

На правах рукописи

УДК 621.75:621.398

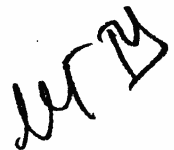
Иванов Юрий Викторович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СТРУКТУР ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СБОРОЧНЫХ
КОМПЛЕКСОВ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

**Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук**

Москва 2003



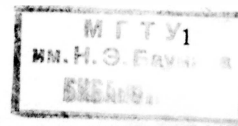
A.C.

Актуальность проблемы. Тенденции развития научно-технического прогресса связывают с широким использованием радио-, видео-, вычислительной электронной аппаратуры (ЭА) бытового и специального назначения. ЭА находит широкое применение практически во всех отраслях народного хозяйства. Одним из основных устройств любой ЭА являются электронные модули (ЭМ), которые строят на базе печатной платы (ПП) и навесного монтажа электронных компонентов (ЭК). Трудоемкость сборки ЭМ составляет до 70 и более % от общей трудоемкости изготовления электронной аппаратуры, поэтому автоматизация производства ЭМ - актуальна. Но автоматизация затруднена из-за большой номенклатуры ($N_A \leq 100$ тип. эя/г) и небольших партий выпуска ЭМ ($N_{ЭЯ} \leq 2500$ эя/г), несовершенства сборочных средств и технологической подготовки. Средства сборки здесь должны обладать гибкостью (программной переналадкой), быть объединены в комплексы (АСБК), ЭМ адаптированы к сборке в АСБК, техпроцессы - индивидуальны (для каждого типа ЭМ), автоматизированы и оптимальны. Наиболее перспективны для этих условий - гибкие автоматизированные сборочные комплексы (ГАСК) {на основе (АТО) автоматизированного технологического оборудования [сборочных центров (СБЦ), роботизированных технологических комплексов (РТК), гибких производственных модулей (ГПМ)], специального технологического оснащения (СТО); автоматизированной транспортно-накопительной системы (транспорта АТр с произвольным выбором адресата); средств вычислительной техники (ВТ)}, которые в сравнении с комплектом оборудования (для аналогичного объема и номенклатуры ЭМ) содержат меньше единиц АТО, рабочих, занимают меньшую площадь, обеспечивают большую загрузку АТО, но дороги и сложны в проектировании. Важно уже на ранней стадии при формировании и выборе структур ГАСК (например, рис. 1) принять правильное решение.

В этой связи представляют особый интерес работы отечественных и зарубежных ученых: а) по проектированию структур АСБК Абалкина В.Н., Алексеева В.Г., Алексеева П.И., Валькова В.М., Волчкевича Л.И., Горнева В.Ф., Краузе Г., Лапина М.С., Лищинского М.Ю., Меткина Н.П., Митрофанова С.П., Нестерова Ю.И., Норенкова И.П., Рея У., Пономарева В.М., Садовской Т.Г., Серебрянного В.Г., Соломеева Ю.М., Сосонкина В.Л., Фролова В.Н., Шаумяна Г.А., Шпура Г.; б) по обеспечению технологических требований АСБК в АТО и СТО Васильева Г.Н., Дальского А.М., Капустина Н.М., Киселева В.М., Кузнецова М.М., Кузнецова Ю.И., Кулешова В.С., Лакоты Н.А., Лещенко В.А., Малова А.Н., Медведева А.М., Михайлова О.П., Попова Д.Н., Попова Е.П., Чеканова А.Н. и др.

К настоящему времени изучены и исследованы некоторые частные задачи по разработке АСБК и его элементов (например, принципы организации, управления, построения АТО для подготовки ЭК, сборки), но отсутствует обобщение полученных ранее результатов, нет научно обоснованной теоретической базы, методов и средств проектирования технологических структур ГАСК многономенклатурного производства ЭМ.

Цель и задачи работы. Решение крупной научной проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение - методы и средства проектирования технологических структур ГАСК многономенклатурного производства ЭМ, позволившей повысить эффективность использования серийного АТО путем объединения его в ГАСК.



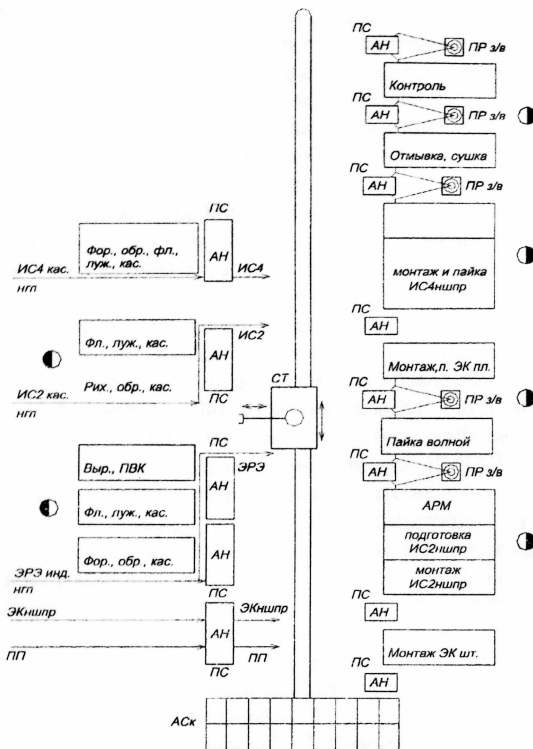


Рис. 1. Пример унифицированной структуры ГАСК сборки ЭА на базе микросхем ИС2, ИС4, ЭРЭо и компонентов не широкого применения ЭК:

ИС₂, ИС₄ - интегральные микросхемы со штырьковыми и планарными выводами; ГПА - выводы ЭК с гарантией пайки; НГПА - выводы ЭК без гарантии пайки; Расп - распаковка ИС; КАС - касетирование ЭК; Обр - обрезка выводов ЭК; Форм - формовка выводов ЭК; Фл - флюсование выводов ЭК; Луж - лужение выводов ЭК; ПВК - программное вклеивание в ленту ЭРЭ разных размеров и номиналов; ЭК ншпр - компоненты неширокого применения; ПС - приемный стол; АН - автоматизированный накопитель ПП, ЭМ; ПР - промышленный робот; СТ - самоходная транспортная тележка с ПР; АСк - автоматизированный склад; АРМ - автоматизированное рабочее место

Для разработки этой проблемы поставлены и решены задачи теоретического, экспериментального и промышленного характера: 1) исследование основных направлений автоматизированного проектирования структур АТП, АСБК и условий, позволяющих объединять сборочное АТО в комплексы; 2) разработка для генерации,

анализа и выбора вариантов структур ГАСК и их элементов методов синтеза и технико-экономической оценки (ТЭО); 3) разработка методологии многоэтапного проектирования оптимальных структур ГАСК, включающей технологические операции сборки ЭМ из однотипных ЭК и подструктур из них, операции сборки ЭМ из разнотипных ЭК, транспортные операции, компоновку ГАСК и на их основе структур ГАСК; 4) разработка и обоснование правил принятия решения при адаптации изделий ЭМ к условиям сборки в ГАСК; 5) исследование возможностей обеспечения технологических требований ГАСК в сборочном АТО, например, путем замены приводов его координатной системы на разработанные и исследованные автором быстродействующие следящие приводы.

Методы исследования. Работа по созданию методов и средств проектирования технологических структур ГАСК многономенклатурного производства ЭЯ основана на системном подходе к моделированию структур автоматизированных операций, технологических процессов АТП, комплексов ГАСК.

Теоретические исследования работы основаны на использовании: теорий производительности, надежности машин и автоматических линий, множеств, массового обслуживания, автоматического регулирования и управления; математического аппарата интегральных и интегро-дифференциальных уравнений; методов физического, математического, электронного, цифрового моделирования; численного решения на ЭВМ, оптимизации.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена физико-математической постановкой задач и корректным применением методов исследования. С целью проверки и уточнения полученных расчетных соотношений нелинейных моделей были проведены экспериментальные исследования на специально созданных стендах.

Научная новизна работы состоит в том, что на основе теоретического обобщения опыта разработки АСБК созданы методы и средства проектирования технологических структур ГАСК многономенклатурного производства ЭМ для повышения эффективности использования серийного сборочного АТО путем объединения его в ГАСК. Впервые предложены: 1) оценка и выбор из множества вариантов структур и их элементов по комплексному показателю эффективности (по $R_{\text{МАХ}}$); предложенный показатель эффективности P учитывает особенности изделий (ЭМ), оборудования (АТО, СТО, АТР), производства (номенклатуру и годовой объем выпуска ЭМ, брак, незавершенное производство, постоянные и переменные затраты) и технологическую подготовку (проектирование управляющих программ, операционных и маршрутных карт); 2) при синтезе структур использованы не только оптимальные технологические и транспортные операции, но и компоновка комплекса; 3) в технологических операциях вместе с концентрацией разнотипных переходов оптимизирована последовательность их выполнения; 4) при назначении на технологическую операцию оборудования выполнена комплексная оценка АТО и оснастки СТО по точности, надежности, производительности, стоимости; в производительности АТО учтены его загрузка (K_3), выход годных изделий ($K_{\text{ТП}}$), готовность к работе (ρ) и трудоемкость; установлена связь особенностей изделия ЭМ (типами, количеством ЭК, видом монтажа), оборудования (АТО, СТО) и производства (номенклатуры, годового объема выпуска) с трудоемкостью сборки ЭМ (временем на обслуживание $T_{\text{ОБС}}$ и переналадку $T_{\text{ПЕР}}$); 5) для дифференцированно-

го анализа структур ГАСК и их элементов комплексный показатель эффективности P имеет модификации (для операций - $P_{оп}$, для подструктур - $P_{К1}$, для структур - $P_{К2}$); 6) в транспортных операциях (АТрОп), исходя из вероятностного характера транспортных потоков и заявок на обслуживание АТО (с использованием СМО), оптимизация выбора количества транспортного оборудования АТр и его марки произведена с обеспечением требуемой загрузки АТО ($K_{з\text{ АТО}}$) и АТр ($K_{з\text{ АТр}}$).

Основные научные положения, выносимые на защиту: 1) объединение в структуру ГАСК серийного АТО сборки ЭМ для повышения его эффективности, позволившее (в сравнении с комплектами - группой независимых работающих единиц АТО в механизированных комплексах) уменьшить потребность в оборудовании, квалифицированных рабочих, площадях, сократить сроки сборки изделий, увеличить загрузку оборудования и его производительность; 2) методология образования технологических структур ГАСК с использованием серийного АТО, обеспечившая многоэтапное автоматизированное их проектирование и оптимизацию; 3) метод синтеза структур ГАСК и их элементов, учитывающий особенности изделий и технологической сборочной среды и позволивший объединить АТО в комплексы ГАСК, повысив эффективность его использования; 4) метод технико-экономической оценки эффективности структур ГАСК, позволивший, благодаря учету особенностей изделий и технологической сборочной среды, количественно определить эффективность вариантов структур (и их элементов) и выбрать из них лучший; 5) синтез технологических структур ГАСК на основе оптимальных подструктур, технологических, транспортных операций и компоновки комплекса [технологических операций с концентрацией однотипных, разнотипных компонентов и оптимизацией их последовательности сборки; транспортных операций с оптимизацией выбора количества транспортного оборудования АТр и его марки при учете требуемой загрузки АТО ($K_{з\text{ АТО}}$) и АТр ($K_{з\text{ АТр}}$); подструктур на основе унифицированных структур и операций сборки ЭМ из однотипных компонентов]; 6) основные направления обеспечения технологических требований ГАСК в сборочном оборудовании и СТО, например, за счет применения в его координатных системах разработанных и исследованных автором быстродействующих следящих приводов.

Практическая ценность и реализация результатов данной работы. Предложенные автором: 1) методология трехэтапного автоматизированного проектирования технологических структур ГАСК; 2) метод синтеза структур ГАСК и их элементов; 3) метод технико-экономической оценки результатов проектирования; 4) методики синтеза технологических операций [с концентрацией разнотипных переходов, оптимизацией последовательности их выполнения, оптимизацией выбора марки и количества АТО и СТО] и транспортных (с учетом вероятностного характера транспортных потоков, оптимизацией выбора марки и количества АТр при обеспечении требуемой загрузки АТО и АТр); 5) методики синтеза подструктур, компоновки ГАСК с оптимизацией выбора лучшей; 6) методики автоматизации проектирования оснащения СТО (уменьшает трудоемкость разработки СТО) и принятия конструкторско-технологических решений при адаптации изделий ЭМ к условиям сборки в ГАСК (способствует увеличению доли автоматизированной сборки и уменьшению величины переменных затрат при сборке ЭМ); 7) пути обеспечения технологических требований ГАСК в сборочных АТО и СТО,

например, заменой приводов их КС на разработанные и исследованные автором быстродействующие следящие приводы позволяют увеличить производительность АТО за счет уменьшения вспомогательного времени позиционирования КС; 8) унифицированные структуры ГАСК сборки различных изделий ЭМ (со штырьковым, планарным и комбинированным монтажом ЭК) для разработки шаблонов синтеза структур; 9) алгоритмы автоматизированного проектирования групповых технологических процессов АТП сборки ЭМ (применены при синтезе операций, разработке шаблонов подструктур и унифицированных структур), расчета комплексного показателя эффективности P_{K1} , P_{K2} и $P_{ОП}$ (обеспечили оптимальный выбор соответственно подструктур, структур ГАСК, моделей СТО, АТО, АТр при разработке технологических и транспортных операций ГАСК), проектирования управляющих программ УТП (обеспечили подготовку информации, ее кодирование, контроль, формирование кадров УТП монтажа ЭК на плату на АТО с ЧПУ с оптимизацией последовательности монтажа ЭК, что уменьшило время на ее подготовку); 10) модели КС с предложенными быстродействующими следящими приводами (СлПр) электрическими - с двигателями постоянного или переменного тока, электрогидравлическими с цилиндром или гидромотором, их средства коррекции, а также устройства форсировки КС с шаговым приводом вращения (ШПр) (позволившие увеличить производительность АТО за счет повышения быстродействия их СлПр, ШПр и уменьшить трудоемкость наладки).

На основе результатов работы подготовлены и изданы: научные статьи, монография, справочник, авторское свидетельство, учебники и учебные пособия {всего 63 наименования; среди них учебники Основы автоматик и автоматизация производственных процессов (М.: Машиностроение, 1974, 366 с) и Principles of Automation & automated production processes [М., Мир, 1976, 400 с. (соавтор Малов А.Н)]; учебное пособие Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов [М.: Радио и связь, 1987, 460 с (соавтор Лакота Н.А.)]}.

Результаты работы внедрены в НИИ, на заводах, в конструкторских и технологических бюро: МРТЗ (г. Москва), НПО ВТ (г. Минск), НПО им. Масленникова и Экран (г. Самара), эл.механический завод (г. Брест).

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 15 всесоюзных, отраслевых конференциях и семинарах, в том числе: на всесоюзных научно-технических конференциях в г. Москве: Автоматизация сборочных работ, 1975; Автоматизация сборочных работ в приборостроении, 1975; Приборостроение, 1979; Автоматизация технологических процессов в приборостроении, 1980; Актуальные проблемы современного приборостроения, 1986, 1988 и 1989; Актуальные проблемы информатики, управления и вычислительной техники, 1987; Информатика 2000; на конференциях в г. Минске НПО ВТ Автоматизация сборки, 1980 + 1986 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 63 печатных работы, в том числе 2 учебника, 20 учебных пособий, монография, справочник, авторское свидетельство, статьи.

Личный вклад соискателя. Все материалы, представленные в работе выполнены соискателем. Соавторство относится к разработке программного обеспечения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов (266 страниц текста, 93 рис. и 103 табл.), списка литературы из 315 наименований и приложений (19 страниц текста, 53 рис. и 140 табл.).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и выносимые на защиту положения, их практическая значимость, состав методов и средств разработанных автором научных основ проектирования технологических структур ГАСК многономенклатурного производства ЭЯ (рис.2).

В первой главе дано современное состояние проблемы автоматизированной сборки электронных модулей (ЭМ) в многономенклатурном производстве ЭА и адаптации ЭМ к условиям сборки в ГАСК. Анализ автоматизированного производства ЭМ показал, что изделия ЭМ мало приспособлены к автоматизированной сборке; сборка ЭА автоматизирована, в основном, в мало- номенклатурном производстве; имеющиеся АСБК спроектированы не оптимально [применяемые в них техпроцессы ТП разработаны на основе типовых маршрутов ТМ методом адаптации; нет структурной оптимизации; не учтена компоновка АСБК; выбор АТО выполнен без учета его фактической загрузки, выхода годных, готовности к работе и др.); нет комплексного (системного) подхода. Отсутствуют научные основы автоматизированного, системного, многовариантного, оптимизационного проектирования структур АСБК для многономенклатурного производства ЭМ (база знаний БЗ, методы проектирования новых АТП, комплексная оценка принимаемых технологических решений, методики проектирования оптимальных технологических и транспортных операций, структур ГАСК).

Предложенные классификации объектов (АТОП, АТрОП, СТО, АТО, АТр, структур) и участников (ЭЯ, ЭК) синтеза разработаны для автоматизированного проектирования структур ГАСК с учетом специфики базы знаний, технологии сборки ЭМ и сборочной среды (признаков, шаблонов, моделей, правил проектирования; они отражают типы ЭМ, типы и виды ЭК, вид монтажа ЭК, вид упаковки ЭК, наличие или отсутствие гарантии пайки выводов ЭК, типы и виды СТО, типы АТО, уровень его автоматизации, степень интегрирования в нем операций).

Для автоматизированной адаптации ЭМ к условиям сборки в ГАСК разработан подробный перечень ограничений (перечень состоит из разделов: компоненты, их подготовка, монтаж, контроль) и интерактивная процедура, на каждом шаге которой пользователь принимает решение, соглашаясь или отклоняя предложенное ограничение (отклонение означает выбор ручной сборки ЭМ на АРМе). В конце главы сформулированы цель и основные задачи по созданию научных основ проектирования технологических структур ГАСК сборки ЭА в многономенклатурном производстве.

Во второй главе рассмотрены предложенные автором методология проектирования структур ГАСК и их элементов сборки ЭЯ в многономенклатурном производстве, Методология должна обеспечивать автоматизированное, многовариантное, оптимальное проектирование структур ГАСК и их элементов с комплексной оценкой принимаемых решений. Существующие подходы в проектировании структур АСБК не соответствуют этим требованиям. Предложенная методология (рис.3) удовлетворяет указанным требованиям. Проектирование структур ГАСК является сложной, трудоемкой задачей с высокой размерностью. Было показано, что для уменьшения трудоемкости вычислений, понижения размерности решаемых задач, а также более корректного сравнения эффективности одно- и многооперационного оборудования в ГАСК проектирование структур должно быть многоэтапным (трехэтапным).

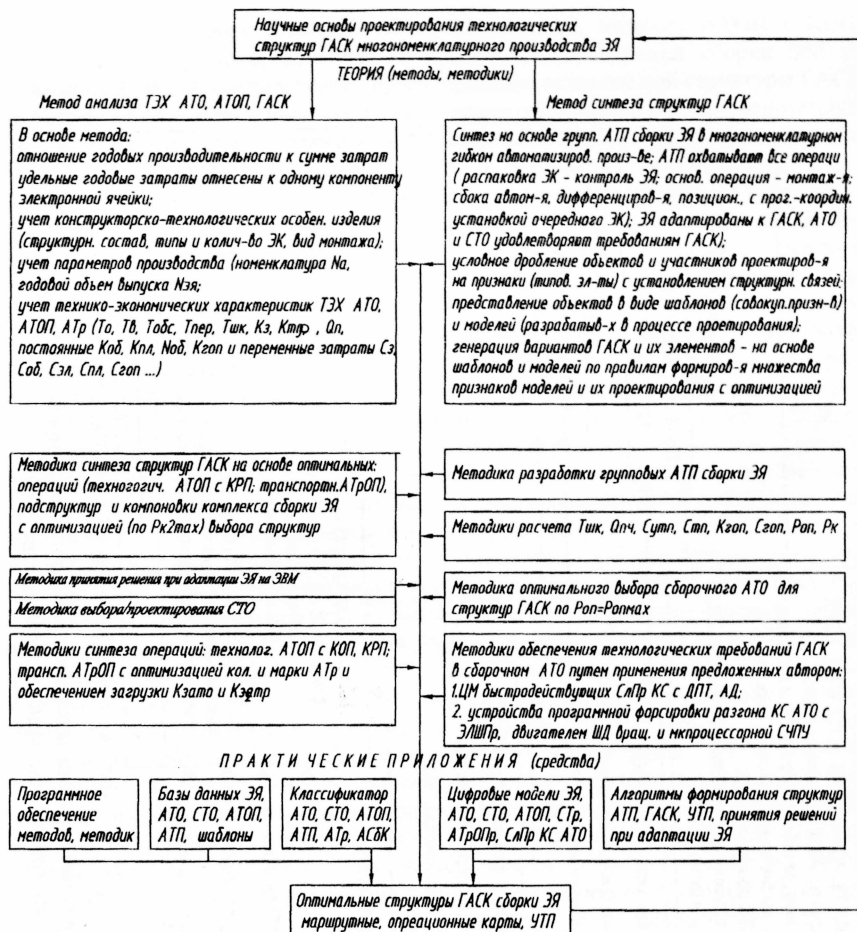


Рис. 2. Методы и средства проектирования технологических структур ГАСК сборки ЭМ в многономенклатурном производстве:

ТЭХ - технико- экономические характеристики; АТОП, АТрОП - автоматизированные операции технологические и транспортные; Стр. - структура; АТП - автоматизированный технологический процесс; СлПр - следящий привод; ЭЛШПр -электрический шаговый привод

На первом этапе выполняется синтез оптимальных операций АТОП с КОП сборки ЭМ из однотипных компонентов с их максимальной концентрацией и оптимизацией очередности установки; на втором этапе - оптимальных подструктур

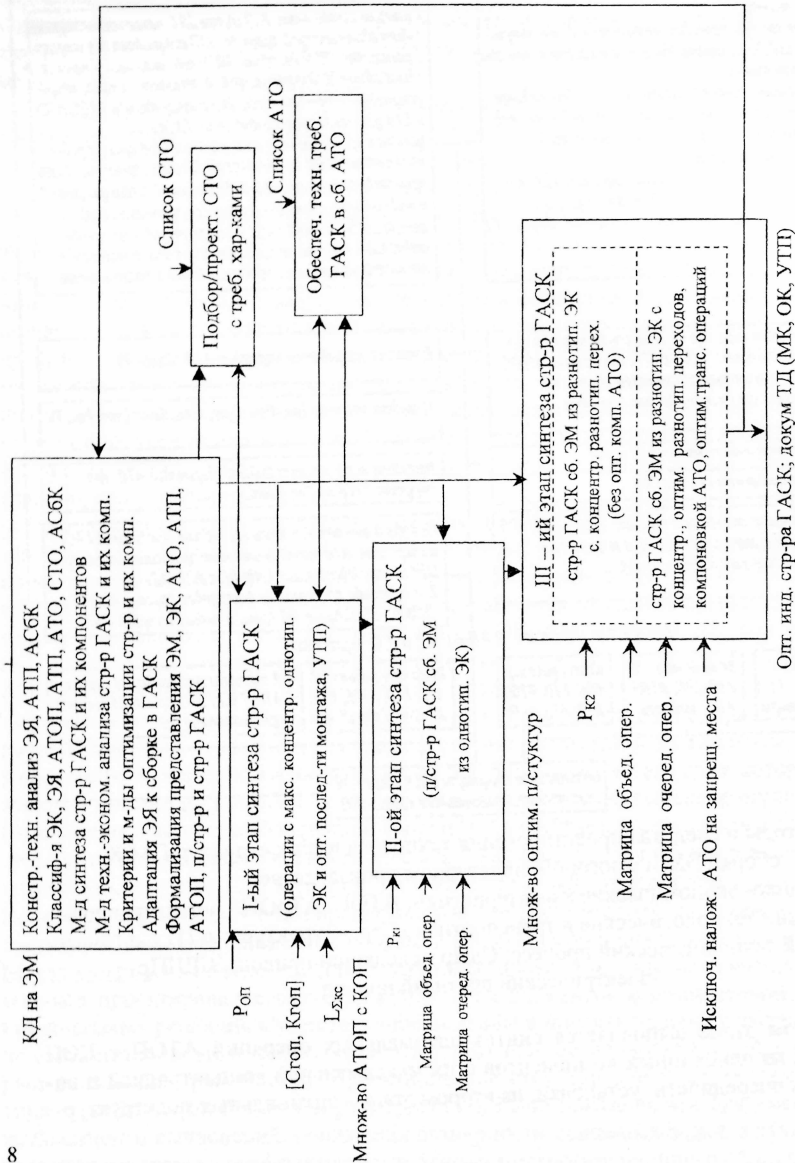


Рис. 3. Концептуальная модель методологии автоматизированного проектирования структур ГАСК многоменклатурного производства ЭЯ

с использованием всех технологических (подготовки, монтажа АТОП с КОП, пайки, отмывки, сушки, контроля) и транспортных операций сборки ЭМ из однотипных ЭК; на третьем этапе - проектирование оптимальной структуры ГАСК на основе оптимальных технологических операций (сборки ЭМ из разнотипных ЭК с их концентрацией и оптимизацией очередности АТОП с КРП), транспортных (АТрОП с оптимизацией выбора марки и количества оборудования АТр), подструктур и компоновки АТО. При одноэтапном проектировании количество рассматриваемых вариантов велико (из-за многократного включения в структуры неоптимальных вариантов операций, АТО) и их полный перебор сопряжен с большими вычислительными ресурсами; в трехэтапном проектировании отсеивание неоптимальных вариантов начинается уже с первого этапа, что позволило использовать в нем для оптимального проектирования операций, подструктур, структур метод полного перебора. Есть еще предварительный этап, который непосредственно в проектировании структур не участвует, но необходим для создания базы знаний (КТ БЗ), шаблонов, начальных моделей объектов проектирования. Условно к нему можно отнести разработку методов (синтеза, технико-экономической оценки), методик и программного обеспечения проектирования структур и их элементов, тестирование АТО и СТО на их возможность включения кандидатами в структуры ГАСК.

Метод синтеза структур ГАСК и их элементов. Для многономенклатурного производства метод проектирования АТП и структур ГАСК должен позволить: возможность создания для каждого нового изделия ЭМ индивидуального (нового) оптимального техпроцесса АТП; создание множества вариантов структур ГАСК и их элементов; просмотр каждого варианта. Метод должен учитывать конструкторско-технологические особенности изделий, оборудования, условий сборки, быть простым в формализации и реализации.

Распространенные методы адаптивного проектирования АТП и АСБК, основанные на использовании аналогов (технологических маршрутов из банка данных), выборе наиболее подходящего, приспособлении его к сборке данного изделия, не отвечают этим требованиям. Мало эффективны для ГАСК известные методы синтеза, основанные на использовании атрибутов-аналогов (детале-операций), т.к. сложны в применении и позволяют создать один новый ТП, который затем, не изменяя структуры, оптимизируется по выбранному критерию (параметрическая коррекция).

В основу предложенного метода положены: 1) дробление объектов проектирования на мелкие типовые элементы - признаки; 2) множества признаков разделены на шаблоны и модели (шаблон описывает типовой элемент, модель - индивидуальный); 3) множества признаков определяют набор его характеристик, положение, связи в общей иерархии объектов; 4) проектирование заключается в отображении структурных связей между изделием и базой знаний (КТ БЗ); 5) генерация множества вариантов структур ГАСК и их элементов происходит из информации КТ БЗ по правилам проектирования; 6) в КТ БЗ находятся признаки, шаблоны, начальные модели, правила проектирования (формализованное описание совокупности последовательных действий по авторским алгоритмам, целью которых является определение множества признаков и разработка модели объекта); 7) для каждого варианта определяется множество признаков и устанавливаются

связи в общей иерархии: 8) очередной вариант получается на каждом шаге полного перебора конечного множества.

Предложенный метод генерирует новые решения, допуская как структурную, так и параметрическую оптимизацию.

Например, синтез технологических переходов (для каждого типа ЭК) в операции АТОП монтажа компонентов (ЭК) на плату содержит комплекс действий: выбор модели типа ЭК и шаблона операции; определение признаков модели перехода по шаблону (схема базирования, система координат); назначение на переход множества шаблонов видов технологического оснащения СТО (вид СТО, например, АЗУ - накопитель компонентов ЭК; АН_{III} - накопитель плат; СГ - монтажная головка); его перебор; формирование (по шаблону вида СТО) множества шаблонов типов СТО (например, АЗУ с лотком, кареткой, барабаном) и его перебор; формирование (по шаблону типа СТО) признаков множества моделей СТО; их расчет (конструктивных параметров, точности, надежности, временных характеристик, производственных затрат; расчет моделей СТО выполняется с использованием результатов исследований СТО); сравнение результатов с допустимыми значениями (при неудовлетворении требований отклонение варианта и переход к следующему); формирование по численным характеристикам признаков полной модели СТО; назначение множества моделей СТО на переход.

Метод технико-экономической оценки (ТЭО). Чтобы при автоматизированном проектировании выбрать из множества оптимальную структуру ГАСК или ее элемент нужно иметь возможность оперативно и комплексно оценить особенности изделия ЭА, производства, технологическую среду и затраты на ее подготовку. Известные в машино- и приборостроении методы технико-экономического анализа (на основе роста производительности труда, сроков окупаемости, суммарного экономического эффекта) этим требованиям в полной мере не отвечают, так как не учитывают особенности изделий ЭА, номенклатуру (в явном виде), загрузку АТО, надежность АТО (готовность к работе). Предложенный метод ТЭО и показатель оценки эффективности Р позволили: оперативно и комплексно оценить технологические решения по структурам ГАСК и их элементам, выбрать из множества вариантов лучший, выполнить дифференцированный их анализ, так как учитывают особенности производства (номенклатуру, годовой объем выпуска ЭМ), оборудования, оснастки, изделий (состав ЭМ, типы ЭК, вид монтажа), затраты на подготовку производства. При выборе оборудования учтены его загрузка, готовность к работе, выход годных, производительность, точность, стоимость. Комплексный показатель эффективности Р имеет модификации (Р_{к2}, Р_{к1} - для структур и подструктур, Р_{оп} - для операций):

$$\begin{aligned}
 P_{оп} &= \frac{Q_{гоп}}{(K_{гоп} + C_{гоп} + K_{тр} + C_{тр}) \cdot K_{и}} & P_{к1} &= \frac{Q_{гопmin}}{\left\{ \sum_{i=1}^{n_{оп}} [K_{гоп} + K_{тр} + C_{гоп} + C_{тр}] + C_{гп} \cdot N_a \right\} \cdot K_{и}} \\
 P_{к2} &= \frac{Q_{гопmin}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_{эк}} \sum_{i=1}^{n_{оп}} [K_{гоп} + C_{гоп} + K_{тр} + C_{тр}] + C_{гп} \cdot N_a \right\} \cdot K_{и}} & (1)
 \end{aligned}$$

где: $Q_{\text{гоп}} = Q_{\text{ч}} \cdot N_{\text{об}} \cdot F_{\text{г.эф.}}$ - годовая производительность операции $[Q_{\text{ч}} = \frac{K_3 \cdot \rho \cdot K_{\text{тп}}}{T_{\text{шк}}}]$

часовая производительность АТО; $K_3, \rho, K_{\text{тп}}$ - коэффициенты, учитывающие соответственно фактическую загрузку АТО, готовность АТО к работе, выход годных изделий; $N_{\text{об}}$ - количество АТО на данной операции, $F_{\text{г.эф.}}$ - годовое эффективный фонд времени АТО; $T_{\text{шк}}$ - удельная для одного ЭК трудоемкость операции (монтажа или подготовки) ЭК $T_{\text{шк}} = T_0 + T_{\text{в}} + T_{\text{отд}} + T_{\text{обс}} + T_{\text{пер}}$;

$K_{\text{гоп}} = (K_{\text{об}} + K_{\text{пл}}) \cdot N_{\text{об}}$ - годовые постоянные затраты на одну операцию; $[K_{\text{об}}$ - затраты на покупку единицы АТО (его рыночная цена), транспортировку к пользователю, пусконаладочные работы; $K_{\text{пл}}$ - стоимость аренды производственной и служебной площадей];

$C_{\text{гоп}} = (C \cdot T_{\text{шк}} + C_{\text{уп}} + C_{\text{бр}} + C_{\text{эк}}) \cdot N_{\text{эж}} \cdot N_{\text{я}} \cdot N_{\text{а}} + K_{\text{нез}}$ - годовые переменные затраты на одну операцию $[C_3, C_{\text{об}}, C_{\text{пу}}, C_3, C_{\text{ам}}, C_{\text{осн}}, C_{\text{пл}}, C_{\text{ц}}$ - удельные затраты (на 1 ЭК) соответственно на зарплату; эксплуатацию оборудования, его программного устройства; энергию; амортизацию; оснастку; площадь; цеховые расходы; $C_{\text{уп}}$ - управляющую программу; $C_{\text{бр}}$ - брак; $C_{\text{эк}}$ - покупку компонента; $K_{\text{нез}}$ - незавершенное производство; $N_{\text{а}}, N_{\text{эж}}, N_{\text{эжя}}$ - годовые номенклатура изделий (типов ЭМ), объем выпуска ЭМ, количество ЭК в ЭМ; $C_{\text{тп}}$ - затраты на разработку техпроцесса; $K_{\text{ц}}$ - коэффициент приведения затрат к расчетному году; i - количество операций в АТП по j - му компоненту, j - типов компонентов].

Прогнозирование повышения эффективности структур ГАСК и их элементов путем: параметрической оптимизации технологической операции (последовательности выполнения переходов); структурной оптимизации при синтезе компоновки ГАСК и транспортных операций или совместной - на уровне структур ГАСК.

Третья глава посвящена синтезу однотипных переходов и операций, построенных на основе этих переходов (методике выполнения первого этапа проектирования структур ГАСК сборки ЭЯ в многономенклатурном производстве).

Постановка задачи синтеза операций сборки ЭЯ из однотипных ЭК:

$$\left(\tilde{O}_{\text{оп}}^{(p)}, T_{\text{оп}}^{(p)}, \left\{ C_{\text{имкн}}^{(p)} \left(T_{\text{оп}}^{(p)} \right) \right\} \right) = \arg \max \left[P_{\text{оп}} \left(\tilde{O}_{\text{ив}}^{(p)}, T_{\text{ив}}^{(p)}, \left\{ C_{\text{имкн}}^{(p)} \left(T_{\text{оп}}^{(p)} \right) \right\} \right) \right]$$

ограничения: на затраты $C_{\text{гоп}} \left(\tilde{O}_{\text{ив}}^{(p)}, T_{\text{ив}}^{(p)} \right) \leq [C_{\text{гоп}}]_0$; $K_{\text{гоп}} \left(\tilde{O}_{\text{ив}}^{(p)}, T_{\text{ив}}^{(p)} \right) \leq [K_{\text{гоп}}]_0$

на точность, усилие, надежность $СТО_{\delta_{\text{сто}}} \left(C_{\text{имкн}}^{(p)} \right) \leq [\delta_{\text{сто}}]$; $F_y \left(C_{\text{имкн}}^{(p)} \right) \geq [F_y]$;

$P_{\text{т6р}} \left(C_{\text{имкн}}^{(p)} \right) \leq [P_{\text{т6р}}]$; $T_{\text{ср}} \left(C_{\text{имкн}}^{(p)} \right) \leq [T_{\text{ср}}]$; на точность, надежность АТО

$$\delta_{\text{с}} \left(T_{\text{ив}}^{(p)} \right) \leq [\delta_{\text{с}}]; \quad T_{\text{срАТО}} \left(T_{\text{ив}}^{(p)} \right) \geq [T_{\text{срАТО}}]; \quad P_{\text{АТО}} \left(\text{т6р} \left(T_{\text{ив}}^{(p)} \right) \right) \geq [P_{\text{АТО}} \left(\text{т6р} \right)] \quad (2)$$

[где $\tilde{O}_{\text{ив}}^{(p)}, T_{\text{ив}}^{(p)}, C_{\text{имкн}}^{(p)}$ - модели операций, оборудования, оснастки].

Синтез технологических операций с максимальной концентрацией однотипных переходов (АТОП с КОП) включает синтез переходов (рассмотрен во второй главе как иллюстрация работы метода синтеза) и собственно операций.

Синтез собственно операций АТОП с КОП начинается с формирования признака (по шаблонам операции и типа ЭК) и содержит следующие действия: объединение (по типу ЭК) множества однотипных переходов в операцию с их максималь-

ной концентрации; назначения на операцию множества моделей СТО и АТО; оптимизации последовательности выполнения переходов [метод многоугольника; критерий - минимальный суммарный путь ($L_{\text{КС}\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$); ограничения:

заход КС в одну позицию - один раз ($\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1; \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; j = 1, 2, \dots, n; x_{ij} = 0, 1 \forall i, j$) и отсут-

ствие петель ($(\sum_{i=1}^k x_{ij}^{(k)} = 1; \sum_{j=1}^k x_{ij}^{(k)} = 1; x^{(k)} = \|x_{ij}\|_{k \times k}, k < n)$ каждая из которых охваты-

вает лишь часть мест установки ЭК (d_{ij}, x_{ij} - матрицы длины и последовательности перемещения КС)); образование новых признаков модели операции [по значениям суммарного хода КС ($L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{испол}} \text{ и } L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{опт}}$)]; перебор множества АТО (на каждом шаге выбирается очередная марка АТО); формирование и перебор (для модели АТО) множества совокупностей моделей оснастки СТО [модели СТО (АЗУ, СГ, КС) определяются на основе идентификаторов; по моделям СТО видов АН_{III}, УФ_{III}, УЗВ_{III} производится перебор всех возможных вариантов сочетаний, в результате которого образуется множество совокупностей моделей СТО]; назначение на модель операции АТОп с КОП модели АТО и очередной совокупности моделей СТО; модификация модели каждого перехода (по каждому m-му типу СТО вместо множества назначенных моделей-кандидатов записывается модель СТО, входящая в рассматриваемую совокупность; образование полной модели перехода $O_{ij}^{(p)}$ в составе АТОп с КОП (окончательно модель перехода сформируется в результате выполнения всех шагов цикла); формирование признаков точности (погрешность замыкающего звена сборочной размерной цепи δ_c) и надежности $T_{iv}^{*(p)}$ [интенсивность отказов λ , средняя наработка на отказ $T_{cp\text{АТО}}$ и вероятность безотказной работы $P_{\text{АТО}}(t_{cp})$] совокупности АТО и СТО (см. также главы 4 и 5); сравнение полученных значений с допустимыми (если не соответствуют - вариант исключается и происходит переход к следующему); расчет характеристик модели операции $\tilde{O}_{iv}^{(p)}$ [трудоемкость, количество АТО, рабочих, занимаемая площадь, постоянные и переменные затраты на технологические и транспортные операции (затраты на транспорт определены приближенно), производительность и $P_{\text{оп}}$ с учетом ограничений]; формирование (по результатам расчета) признаков модели АТОп с КОП $\tilde{O}_{iv}^{(p)}$; сравнение моделей операции $\tilde{O}_{iv}^{(p)}$ по значению $P_{\text{оп}}$ и выбор [из конечного множества $\{\tilde{O}_{iv}^{(p)}\}$] оптимальной модели АТОп с КОП $\tilde{O}_{i\text{опт}}^{(p)}$ с назначенной на нее оптимальной совокупностью (марки АТО $T_{i\text{опт}}^{(p)}$ и СТО) [метод оптимизации - полный перебор конечного множества моделей операций (с марками АТО, СТО); критерий - комплексный показатель эффективности технологических операций ($P_{\text{оп}} = P_{\text{оп макс}}$); ограничения - обеспечение максимальной концентрации однотипных переходов на одном рабочем месте, объемы допустимых переменных и постоянных затрат на операцию ($C_{гд}$,

К_{ГД}]); формирование [по $\delta_{\text{от}}^{(p)}$] блоков управляющих программ УТП и операционных карт (ОК).

Четвертая глава разработаны, исследованы модели специального технологического оснащения (СТО) ГАСК многономенклатурного производства ЭМ. Модели СТО необходимы для оценки возможностей СТО, обоснованного их выбора при проектировании операций сборки ЭМ, прогнозирования и обеспечении технологических требований ГАСК в АТО и СТО.

Возможности использования СТО в АТО ГАСК оцениваются по характеристикам точности, надежности, производительности, стоимости.

Основой для построения моделей точности и надежности СТО служат приведенные ниже формулы 3, 5 + 9 [полные модели точности и надежности СТО формируются при объединении признаков, определенных по шаблону и в результате проектирования (см. также главу 3)]. Погрешности СТО (например, устройства фиксации платы УФПП, загрузочного устройства компонентов АЗУ, сборочной головки СГ, координатной системы КС) являются элементами размерной цепи точности сборки ЭМ [погрешности совмещения δ_c (см. также главу 5) выводов компонента ЭК с элементами платы ПП (отверстиями или контактными площадками)].

Из известных в технологии машин и приборов методов обеспечения точности для автоматизированной сборки ЭМ в ГАСК как альтернативные рассмотрены методы полной и неполной взаимозаменяемости [метод групповой взаимозаменяемости не приемлем из-за большой номенклатуры ЭЯ (разнообразных компонентов ЭК, входящих в изделие), большого количества выводов у каждого ЭК (несколько десятков), а методы пригонки и с компенсирующим звеном - из-за необходимости постоянного участия оператора в сборке]. Выполненные автором исследования показали, что δ_c , рассчитанная методом полной взаимозаменяемости (МПЗ) по максимуму - минимуму для штырькового (DIP) монтажа с использованием стандартных ЭК, оказалась значительно больше допустимой ($2\delta_c \geq 0.8$ мм, а для надежной пайки вывода ЭК в монтажном отверстии необходим зазор 0.4 – 0.6 мм), что связано, видимо, с большим числом частных погрешностей, входящих в размерную цепь. Для обеспечения требуемой δ_c нужно значительно увеличить точность ЭК и платы [при планарном или поверхностном (SMD) монтаже - нужна еще большая точность совмещения]. МПЗ применим при небольшом числе звеньев размерной цепи и достаточном большом допуске на замыкающее звено. При сборке ЭМ число звеньев размерной цепи велико (до 100 и более), а допуск на замыкающее звено - мал (в зависимости от вида монтажа 0,1 - 0,2 мм). Для ГАСК сборки ЭМ этот метод не подошел; при его использовании необходимая точность изготовления ЭК, ПП может выйти за пределы не только экономической, но и технически достижимой точности. Методом обеспечения точности при сборке ЭМ в ГАСК выбран метод неполной взаимозаменяемости (МНПЗ). Его применение позволило расширить допуски на составляющие звенья [до 30-40% (с небольшим числом звеньев), до 2 раз (для многозвенных)], но сборка происходит с риском, так как допуск на замыкающее звено определен вероятностным методом расчета размерных цепей. Согласно, например, справочника Замятина В.К. Технология и оснащение сборочного производства машино-, приборостроения, можно записать, что допуск

$$\text{на замыкающее звено: } \delta_c = \frac{1}{\lambda_c} t \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \lambda_i^2 \delta_i^2}, \quad \phi(t) = \frac{1}{\sigma(x) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad t = \frac{x - m(x)}{\sigma(x)} \quad (3)$$

(где t – коэффициент риска; λ_i , λ_c – коэффициенты относительного рассеяния соответственно i -ого составляющего звена и замыкающего размерной цепи; m – число звеньев размерной цепи; $\phi(t)$ – функция плотности вероятности (ФПВ), x – случайная величина, $m(x)$ – математическое ожидание случайной величины, $\sigma(x)$ – ее дисперсия). Для оценки величин погрешностей сборки ЭМ принята модель нормального закона распределения в нормированном виде $\phi(t)$. ФПВ часто адекватно описывает распределения разных параметров машин, приборов и их частей. Но ее применение корректно лишь при выполнении определенных условий, изложенных в предельной теореме А.М. Ляпунова теории вероятностей: на результат формирования данного параметра (например, δ_c) влияет сумма большого числа факторов, каждый из которых создает эффект малой величины; среди факторов нет доминирующих по своему влиянию и все они независимы между собой. Предельные теоремы Бернштейна – Линдберга позволяют распространить условия теоремы Ляпунова на слабо коррелированные между собой величины. При сборке ЭЯ на отклонения параметров (δ_c и ее составляющих) влияет много факторов, которые независимы или мало зависимы между собой, поэтому к ним можно применить модель нормального закона распределения.

Рассмотрим модели точности СТО на примере автоматических загрузочных устройств (АЗУ) с лотком для микросхем (ИС₂). В АЗУ с лотком погрешность ($\delta_{азу}$) нахождения ИС₂ (в зоне захвата головкой (СГ):

$$\delta_{азу} = \sqrt{\delta_{з\lambda 3}^2 + \delta_{\text{ис}}^2 + \delta_{\text{ис}}^2 + \delta_{\text{вуп}}^2 + \delta_{\text{уступ}}^2 + \delta_{\text{изнв}}^2 + \delta_{\text{изнз}}^2} \quad (4)$$

{где: $\delta_{\text{ис}}$, $\delta_{\text{ис}}$ – допуск на изготовление ИС по ширине и длине корпуса; $\delta_{\text{вуп}}$ – допуск на ширину упора; $\delta_{\text{уступ}}$ – допуск на установку упора; $\delta_{\text{изнв}}$ – допуск на ширину лотка с учетом его износа; $\delta_{\text{изнз}}$ – допуск на высоту лотка с учетом его износа (износ покрытия); $\delta_{\text{з\lambda 3}}$ – зазор между корпусом ИС и стенками лотка}.

В теории надежности электронных устройств (ЭА) часто полагают, что отказы ЭА независимы между собой, поэтому можно считать, что время наработки на отказ ЭА подчинено экспоненциальному закону распределения. При расчете надежности ЭА условно делят на отдельные компоненты (элементы), для которых известны (из ТУ или таблиц) интенсивности отказов. По ним находят интенсивность отказов устройства в целом и с помощью известных формул для экспоненциального распределения определяют среднее время наработки на отказ и вероятность безотказной работы устройства для заданного периода времени.

Аналогичный подход применен при определении надежности СТО и АТО. Однако, в расчетах параметров надежности СТО и АТО не всегда удастся использовать аналогии электронных устройств, так как законы распределения времени наработки на отказ многих механических устройств, входящих в состав СТО и АТО, отличаются от экспоненциального (или неизвестны). Для этих случаев можно использовать приближенный и численный (итерационный) методы. Численный метод основан на теоремах теории вероятностей. Вероятность безотказной работы устройства $P(t)$, состоящего из n элементов, за время t в общем случае (когда время безотказной

работы элементов устройства подчинено одному закону распределения) имеет вид

[Венцель Е.С. Теория вероятностей]:
$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \text{ или } (при \text{ разных законах распределения}) \quad (5)$$

$$P(t) = \prod_{i=1}^j p_i(t) \cdot \prod_{i=j+1}^{j+m} p_i(t) \cdot \prod_{i=j+m+1}^{j+m+k} p_i(t) \cdot \dots \cdot \prod_{i=j+m+k+\dots+z}^{j+m+k+\dots+z} p_i(t)$$

[где: $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы за время t i – ого элемента устройства; j – число элементов устройства, время безотказной работы которых подчиняется экспоненциальному, m – число элементов устройства, время безотказной работы которых подчиняется нормальному, k – число элементов устройства, время безотказной работы которых подчиняется равномерному или другому известному закону распределения ($j+m+k+\dots+z = n$)].

Определение $P(t)$ происходит в следующей последовательности: для каждого элемента i (при известном законе распределения) по известным формулам определяют вероятность $p_i(t)$ за время t ; рассчитывают для всего устройства $P(t)$ по формуле (5) $P(t)$ вычисляют для разных времен t , но приводят $P(t)$ к одному времени t ; строят график зависимости $P(t)$ от времени t ; полученную зависимость $P(t)$ аппроксимируют какой-либо функцией; получают $P_{\text{апр}}(t)$ и находят функциональную зависимость $T_{\text{ср.}}$ от параметров элементов [9, 20]:
$$T_{\text{ср.}} = \int_0^{\infty} P_{\text{апр}}(t) dt \quad (6).$$

Численный метод предполагает знание законов распределения времени безотказной работы всех элементов устройства (либо вероятности безотказной работы элементов устройства за одно и то же время t) и выполнение большого объема вычислений, что не всегда возможно.

В основу приближенного метода положена известная теорема теории вероятностей; если какое-либо устройство состоит из достаточно большого числа элементов n , функционирование которых необходимо для работы всего устройства, то закон распределения времени безотказной работы устройства $T_{\text{уст}}$ близок к показательному с параметром $\lambda_{\text{уст}}$:

$$\lambda_{\text{уст}} = \frac{1}{M[T_{\text{уст}}]} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{M[T_i]} \quad (7).$$

{ $M[T_i]$ – среднее время безотказной работы i – ого элемента устройства}.

Формула (7) справедлива для устройств, состоящих из n элементов ($n \geq 3$) при следующих допущениях: устройство и его элементы считаются невосстанавливаемыми; времена безотказной работы элементов устройства независимы между собой (отказы элементов не влияют друг на друга); отказ элементов обнаруживается мгновенно; переключение на резерв осуществляется без перерыва в работе; переключатели абсолютно надежны; индикация отказа достоверна.

Среднее время безотказной работы i – ого элемента устройства $M[T_i]$ определяется так: при известном законе распределения времени наработки на отказ i – ого элемента устройства в качестве $M[T_i]$ берется среднее время наработки на отказ $M[t_i]$; при неизвестном законе (или неизвестных его параметрах, но имеющихся данных статистических исследований времени безотказной работы) - за $M[T_i]$ принимают $m[t_i]$ (математическое ожидание среднего времени наработки на отказ):

$$m[t_i] = \frac{\sum_{j=1}^n t_j}{n} \quad (8)$$

(n – объем выборки из однотипных элементов i , t_j – элементы выборки).

Для механических элементов (передачи, шарниры и т.д.), в качестве $M[T_i]$ берется время износа элемента, рассчитанное по формулам износа [хотя среднее время наработки на отказ определяется как неслучайная величина, но расчетное значение $M[T_i]$ можно рассматривать как случайную величину, так как большинство формул износа (или их коэффициенты) получено эмпирическим путем]. Если $M[T_i]$ для какого – либо элемента i рассчитать нельзя, то его условно делят на более мелкие элементы $i_1 \dots i_z$ и вычисляют $M[T_i]$ одним из перечисленных способов.

При разработке моделей надежности АТО, СТО приняты следующие допущения: 1) вероятность безотказной работы систем управления (электронных устройств) значительно выше, чем у механических и электромеханических устройств, поэтому принята за единицу и для упрощения расчетов не учитывается; 2) не учтены отказы крепежных элементов (винтов, гаек и иных мелких механических деталей из-за высокой их надежности); 3) время наработки на отказ имеет экспоненциальное распределение (использована аппроксимация приближенным методом). Тогда, независимо от законов распределения времени наработки на отказ составных элементов СТО, среднее время наработки на отказ: $[T_{\text{ср.СТО}}] = \frac{1}{\lambda_{\text{СТО}}}$.

Вероятность безотказной работы устройства за время t (при аппроксимации экспонентой) вычисляется так: $P(t) = e^{-\lambda_{\text{УСТ}} \cdot t}$ (9).

Среднее время наработки по параметрическим отказам (износ элементов оборудования), не влияющих на точность совмещения, определяется величиной ($U_{\text{доп}}$) и скоростью (γ) допустимого линейного износа [Проников А.С. Надежность машин.]. Например, модель надежности КС (в общем виде) по интенсивности отказов $\lambda_{\text{КС}}$, вероятности безотказной работы $P_{\text{КС}}(T_{\text{ф}})$ и среднему времени наработки

$$\text{на отказ } T_{\text{ср}}: \lambda_{\text{КС}} = \frac{1}{T_{\text{н}}} + \frac{1}{T_{\text{вг}}} + \frac{1}{T_{\text{эл.упр.}}} + \frac{1}{T_{\text{кр.}}} + \frac{1}{T_{\text{ред}}} + \frac{1}{T_{\text{дв}}}, \quad P_{\text{КС}}(T_{\text{ф}}) = e^{-\lambda_{\text{КС}} T_{\text{ф}}}$$

$[T_{\text{н}}, T_{\text{вг}}, T_{\text{ред}}, T_{\text{кр}},$ – среднее время наработки на отказ механических узлов КС (направляющих, передачи винт-гайка, редуктора, деталей крепления, $T_{\text{ф}}$ – эффективный фонд времени работы КС; $T_{\text{дв}}, T_{\text{эл.упр}}$ – среднее время наработки на отказ двигателя и его устройства управления].

Модель временной характеристики (элемента производительности) на примере КС:

$$T_{\text{вк}} = 2 \cdot T_{\text{пп}} + \frac{L_{\text{КС}\Sigma\text{min}}}{N_{\text{эжэ}} \cdot v_{\text{КС}}}$$

где: $T_{\text{пп}}$ – время разгона, переходного процесса привода КС; $v_{\text{КС}}$ – номинальная скорость КС; $L_{\text{КС}\Sigma\text{опт}}$ – суммарный оптимизированный путь КС при установке ЭК данного типа; $N_{\text{эжэ}}$ – количество компонентов данного типа в ЭЯ.

Исследования проводились с использованием приведенных выше моделей СТО для поиска путей улучшения характеристик СТО, удовлетворяющих технологические требования ГАСК. Наиболее сложные модели СТО уточнены на реальном обо-

рудовании или стендах (например, нелинейные приводы КС).

Исследование моделей различных СТО позволило обоснованно выбрать параметры СТО (например, параметры усилителя ЭГУ КС с ЭГСлПр с целью оптимизации по быстродействию СЛПр при выбранных допущениях и ограничениях); количественно оценить характеристики СТО (производительность, точность, надежность) и наметить пути их улучшения {например, применение КС с ЭлСлПр и АД (при $V_{кс} = 0,25$ м/с, $L_{кс} = 0,01$ м, $T_{вкс} = 0,067$ с) вместо КС с ЭлШПр и ШД вращения с резистивной форсировкой (при $V_{кс} = 0,25$ м/с, $L_{кс} = 0,01$ м, $T_{вкс} = 1,07$ с) позволило уменьшить $T_{вкс}$ на 93 %; увеличить точность АЗУ_{ИС2} - точность позиционирования ИС на выходе АЗУ за счет обоснованного выбора точности изготовления АЗУ и ЗУ [для механического ЗУ оптимален 8 + 11 квалитет (допуск 0,022 + 0,09 мм), погрешность АЗУ удовлетворительна (0,1 + 0,15 мм); для пневматического ЗУ - 9 + 13 квалитет (допуск 0,036 + 0,22 мм), при этом погрешность АЗУ выше допустимой (0,5 + 0,6 мм), поэтому при монтаже ИС необходимо повысить точность ее позиционирования, например, применением направляющих гребенок]; увеличить надежность (время безотказной работы) монтажной системы МС за счет обоснованного резервирования головок СГ (при высоком требовании к надежности и минимальной вероятной безотказной работе рекомендуется использовать две резервные головки; дальнейшее увеличение количества СГ не целесообразно, т.к. вероятность безотказной работы увеличивается незначительно (0,2 % на каждую очередную СГ), а стоимость возрастает существенно (5000 + 10000 руб/сг); увеличить производительность монтажной системы МС путем уменьшения времени T_0 за счет применения нескольких головок СГ (увеличение числа СГ наиболее эффективно при $T_0 < 50$ с и наименее эффективно - при $T_0 > 150$ с)].

Исследования моделей динамики КС со СЛПр с учетом нагрузки, нелинейностей и корректирующих устройств показали: 1. все разработанные СЛПр являются быстродействующими и их применение позволяет уменьшить время $T_{вкс}$ за счет уменьшения времени разгона/торможения (времени переходного процесса T_n) [{среди КС массой до 200 кгс с электрическими приводами наибольшее быстродействие имеют КС с двигателями: асинхронным АД ($T_n = 0,013$ с, $f_n = 550$ р/с) и постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов ДПТпм ($T_n = 0,021$ с, $f_n = 275$ р/с); но наиболее быстродействующими оказались у КС ($m_x \leq 200$ кг и $L_{ум} \leq 0,5$ м) с ЭлСЛПр и ГЦ ($T_n \approx 0,0057$ с, $f_n \approx 1300$ р/с) и с ГМ ($T_n = 0,006$ с, $f_n = 700$ р/с)]. По другим параметрам требования ГАСК сборочных АТО выполнены у рассматриваемых КС. Для СлПр КС получены параметры корректирующих устройств.

Применение предложенного устройства программно-аппаратной форсировки разгона и торможения в модели динамики КС сборочного АТО с шаговым приводом ЭлШПр, двигателем вращения ШД и микропроцессорной СЧПУ позволило уменьшить время T_r (до 38 % - с программно-резистивной форсировкой ШД; до 74 % - с программно-электронной) за счет изменения частоты импульсов сигнала управления, увеличения числа ступеней при разгоне и уменьшения - при торможении [подача очередной пачки импульсов осуществлялась в момент неполного завершения коммутации обмоток ШД но так, чтобы ШД оставался в зоне устойчивой работы; вместо традиционных 16 ступеней при резистивно-программной форсировке на разгоне удалось увеличить до 22, а при торможении уменьшить - до 15; применение программно-резистивной фор-

сировки уменьшило T_p на $7,2 + 38 \%$ (с $0,194$ с до $0,13 + 0,18$ с), а программно-электронной - на 74% (до $0,06 + 0,05$ с)].

В пятой главе выполнена разработка, обоснование моделей АТО, их исследование, прогнозирование и обеспечение технологических требований ГАСК многономенклатурного производства ЭЯ в АТО. Модели АТО необходимы для оценки его возможности использования в структурах ГАСК, обоснованного выбора АТО при проектировании операций сборки ЭЯ, определения путей улучшения (прогнозирования) основных характеристик АТО и обеспечения технологических требований ГАСК в АТО сборки ЭЯ. Возможность использования АТО в структурах ГАСК оценена по характеристикам точности, надежности, производительности, стоимости. Приведенные ниже формулы 10 и 11 являются основой для построения моделей точности и надежности АТО [полные модели точности и надежности АТО формируются при объединении признаков, определенных по шаблону и в результате проектирования (см. также главы 3, 7)].

В основу модели точности АТО монтажа ЭК на плату положена погрешность δ_c совмещения выводов ЭК с элементами печатного монтажа платы, которая при нормальном законе распределения погрешностей составляющих имеет вид:

$$\delta_c = \sqrt{\delta_{изгэк}^2 + \delta_{изгпп}^2 + \delta_{сг}^2 + \delta_{кс}^2 + \delta_{уфпп}^2} \quad \text{или [при законах распределения, отличных от нормального:} \quad \delta_c = \frac{1}{3}t \cdot \sqrt{\lambda_{изгэк}^2 \delta_{изгэк}^2 + \lambda_{изгпп}^2 \delta_{изгпп}^2 + \lambda_{сг}^2 \delta_{сг}^2 + \lambda_{кс}^2 \delta_{кс}^2 + \lambda_{уфпп}^2 \delta_{уфпп}^2} \quad (10)$$

[где $\delta_{сг}$ – допуск на расположение компонента ЭК в головке СГ; $\delta_{кс}$ – допуск на позиционирование координатной системы АТО; $\delta_{уфпп}$ – допуск на базирование платы (положение ПП в УФПП); λ_i – коэффициенты относительного рассеивания соответствующих погрешностей; t – коэффициент риска].

В качестве основы модели работоспособности (надежности) АТО приняты λ – характеристики: среднее время наработки на отказ ($T_{срАТО}$), вероятность безотказной работы $P_{АТО}(T)$, интенсивность отказов $\lambda_{АТО}$ и коэффициент (ρ) готовности АТО к работе, которые определяются по формулам:

$$T_{срАТО} = 1 / \lambda_{АТО}, \quad P_{АТО}(T) = e^{-\lambda_{АТО} \cdot T}, \quad \rho = T_{срАТО} / (T_{срАТО} - T_{вос})$$

$$\lambda_{АТО} = \lambda_{азу} + \lambda_{уфпп} + \lambda_{сг} + \lambda_{кс} + \lambda_{анпп} + \lambda_{спу} + \lambda_{узвпп} \quad (11)$$

[где $\lambda_{АТО}$ – интенсивность отказов АТО через интенсивности отказов СТО соответствующего вида ($\lambda_{азу}$, $\lambda_{уфпп}$, $\lambda_{сг}$, $\lambda_{кс}$, $\lambda_{анпп}$, $\lambda_{спу}$, $\lambda_{узвпп}$ – интенсивности отказов соответственно устройств: загрузочного для компонентов, устройства фиксации платы при сборке, сборочной головки, координатной системы, накопителя плат, системы управления, загрузки платы; ($\lambda_{сто}$ приведены в главе 4); $T_{срАТО}$, $T_{вос}$, T – время АТО соответственно среднее наработки на отказ, устранения причин отказа, определения вероятности (эффективный фонд времени работы АТО)].

В основу модели производительности АТО при оценке пригодности конкретной марки АТО для структур ГАСК и прогнозировании возможностей при модернизации (чтобы исключить влияние организационных потерь) была положена цикловая

$$Q_{ц} \text{ производительность:} \quad Q_{ц} = \frac{1}{t_0 + t_{пкy.кс} + t_b} \quad (12)$$

[$t_{0, \text{пк.к.с.}} + t_{\text{в}}$ - время соответственно выборки компонента из АЗУ (см. модель АЗУ соответствующего типа), программно-координатного перемещения КС между позициями установки компонентов, отнесенное к одному компоненту (см. модель КС), перемещения головки СГ с компонентом от крайней верхней до крайней нижней позиции при монтаже данного компонента (см. модель СГ соответствующего типа)].

При проектировании структур ГАСК использована полная производительность $Q_{\text{ч}}$, которая включает в себя цикловую $Q_{\text{ц}}$ через время T_0 и $T_{\text{в}}$ (см. главу 2). Отдельно модели АТО с полной производительностью нет [полная производительность определяется при формировании, например, признака параметров операции АТОп с КРП $\delta_{\text{кв}}^{\text{крп}}$ (глава 7); обоснование методов определения производительности и стоимости (см. в главе 2)].

Проведенные автором исследования с использованием моделей точности, надежности и производительности АТО показали: 1) зная допустимое значение $\delta_{\text{с}}$ и характеристики точности конкретных АТО и СТО можно определить $\delta_{\text{с}}$ для каждой совокупности марки АТО, СТО и сделать вывод о возможности их использования в структурах ГАСК в качестве кандидата (всё сказанное в равной степени относится и к другим характеристикам); 2) сравнение допустимых значений $\delta_{\text{с}}$ для разных видов монтажа показало, что более высокие требования к АТО, СТО предъявляет сборка ЭЯ с поверхностным (SMD) монтажом; 3) допустимую погрешность совмещения $\delta_{\text{с}}$ можно расширить путем увеличения процента риска сборки; 4) наиболее сильное влияние на расчетную погрешность $\delta_{\text{с}}$ оказали тип КС и СГ; 5) прогноз показал, что наибольшую точность ($\delta_{\text{с}}=0,33$ мм) можно получить в совокупности АТО и КС с ЭЛШП (или с ГЦ) в сочетании с СГ с механическим захватом и почти всеми типами АЗУ, наименьшая - у АТО с КС и ШД вращения, СГ с пневматическим захватом и почти всеми типами АЗУ; 6) уменьшая процент риска и вероятность случайных отказов можно добиться увеличения (на 10 %) вероятности безотказной работы АТО; 7) высокой вероятности безотказной работы АТО должны соответствовать высокая вероятность наработки по случайным отказам и вероятность сборки (к примеру, для получения вероятности безотказной работы АТО ≥ 98 % вероятность наработки по случайным отказам и вероятность сборки должны быть $\geq 97\%$); 8) прогноз показал, что наибольшее значение времени наработки можно получить в АТО с микропроцессорной СЧПУ, КС с ЭлСлПр и АД (двухфазным), СГ с пневматическим приводом и АЗУ с лотком или с ВБЗУ [$T_{\text{но}} = 6412$ час, что соответствует требованиям ГАСК] за счет высокой надежности СЧПУ, АЗУ, СГ и АД и небольшого количества механических узлов; 9) наименьшее значение времени наработки на отказ оказалось у АТО, включающего АЗУ с кареткой, СГ с кулачковым приводом, КС со СлПр и ДПТ (с электромагнитным возбуждением; $T_{\text{но}}=1037$ час) или трехфазным АД (общего назначения, $T_{\text{но}}=1074$ час); из-за низкой надежности КС, АЗУ, СГ данного типа и наибольшего числа механических узлов (передачи винт-гайка, редукторы, направляющие); 10) увеличение коэффициента готовности ρ прежде всего связано с использованием в АТО головок СГ с пневматическим приводом; по прогнозу наибольшее значение ρ получено у АТО и КС с АД или ГЦ, ВБЗУ или АЗУ с лотком, СГ с пневматическим приводом [$\rho \geq 98$ %; это

соответствует требованиям ГАСК (в оценочных моделях АТО заложен $\rho=95 \div 98$ %)); наименьшее значение ρ имеет у АТО с СГ с кулачковым приводом, АЗУ с кареткой и КС с ЭлСлПр с ДПТ с электромагнитным возбуждением ($\rho=0,875$ %) или с трехфазным АД ($\rho=0,879$ %; эти значения ρ близки к требуемым в ГАСК); 11) сочетание быстродействующих АЗУ (АЗУ с кареткой и т.д.) с КС на быстродействующих СлПр приводах позволило значительно увеличить производительность. (наибольшая производительность получилась при использовании в АТО с АЗУ с кареткой или пневматическим трактом, СГ с кулачковым приводом и КС с ЭГСлПр с ГЦ или ЭлЛШП приводом [например, для АТО с АЗУ с кареткой и КС с ЭлЛШП $Q_{ц}=2,4$ шт/с]; наименьшая - у АТО с СГ с пневматическим приводом, АЗУ с барабаном (АЗУ с б), КС с шаговым приводом ЭлШПр и резистивной форсировкой разгона/торможения двигателя ШД вращения ($Q_{ц}=0,273$ шт/с); 12) при применении быстрого АЗУ в сочетании с КС с ЭлШПр в АТО можно добиться значительного увеличения производительности $Q_{ц}$ (в 1.5 - 2 раза) только за счет программной форсировки привода [(в этом случае исключаются затраты на замену привода при модернизации), например, для АТО с АЗУ барабанного типа, СГ с кулачковым приводом, КС с ЭлШД и ШД вращения: $Q_{ц}=0,552$ шт/с для АТО с КС с ЭлШД и резистивной форсировкой против $Q_{ц}=0,952$ шт/с с программно-резистивной форсировкой (увеличение в 1,7 раза) или $Q_{ц}=1,124$ шт/с с программно-электронной форсировкой (увеличение в 2 раза); хотя полученное при этом абсолютное значение производительности $Q_{ц}$ сравнительно невелико, от этого пути отказываться не следует, так как в промышленности имеется много автоматов сборки ЭЯ с такими КС (с ЭлШД, ШД вращения и резистивной форсировкой, например, марки АА 6028)]; 13) увеличение значения максимальной скорости ($v_{кк} > 0,25$ м/с) не дало ощутимого прироста производительности $Q_{ц}$ [например, в АТО с АЗУ и кареткой, СГ с кулачковым приводом, КС с ЭлСлПр и АД переход от скорости $V_{кк \max}=0,25$ м/с на $V_{кк \max}=0,33$ м/с увеличил $Q_{ц}$ на ~ 1 % (с 2,128 до 2,146 шт/с), а на $V_{кк \max}=0,5$ м/с - увеличил $Q_{ц}$ на ~ 3 % (с 2,128 до 2,193 шт/с); тогда, как в АТО с АЗУ и кареткой, СГ с кулачковым приводом, при $V_{кк \max}=0,25$ м/с замена КС с ЭлШД и резистивной форсировкой ШД вращения на КС с ЭлСлПр и АД увеличила $Q_{ц}$ на ~ 72 % (с 0,724 до 2,62 шт/с), что объясняется значительно большим влиянием на $Q_{ц}$ увеличения быстродействия привода (T_n), чем увеличения его скорости ($V_{кк \max}$)].

В шестой главе рассмотрен синтез подструктур ГАСК сборки в многономенклатурном производстве электронных ячеек из однотипных компонентов (методика выполнения второго этапа проектирования структур ГАСК); он происходит по всему техпроцессу (АТП) сборки ЭЯ с использованием операций $\tilde{O}_i^{(p)}|_{\text{опт}}$. Разработка второго этапа базируется на результатах: предварительного и первого этапов, глав 4, 5 и спроектированных на втором этапе моделей подструктур ГАСК.

Постановка задачи синтеза подструктур $\tilde{G}_y^{(p)}$ ГАСК:

$$\tilde{G}_y^{(p)}|_{\text{опт}} = \arg \max \left[P_{kl} \left(\tilde{G}_y^{(p)}, \tilde{O}_{ij}^{(p)}|_{\text{опт}} \right) \right], \quad \tilde{O}_{ij}^{(p)} \in \tilde{O}_i^{(p)}|_{\text{опт}}$$

$$\text{ограничения на затраты} \quad c_{\text{рон}}(\tilde{G}_y^{(p)}) \leq [c_{\text{рон}}]_G; \quad k_{\text{рон}}(\tilde{G}_y^{(p)}) \leq [k_{\text{рон}}]_G \quad (13)$$

$\{[c_{\text{рон}}]_G \text{ и } [k_{\text{рон}}]_G\}$ - допустимые по подструктуре переменные и постоянные затраты}.

Этап разработки оптимальных подструктур ГАСК в многономенклатурном производстве нужен для реализации всего техпроцесса (АТП) сборки ЭМ из однотипных ЭК (от распаковки ЭК до контроля собранного ЭМ включительно), корректного сравнения эффективности использования в ГАСК разного типа АТО (одно- и многооперационного), уменьшения трудоемкости вычислений и понижения размерности задачи проектирования за счет отсева неэффективных решений (вариантов подструктур).

Проектирование подструктур выполнено на основе групповых АТП сборки ЭМ разработанных по авторскому алгоритму, позволившему связать условия поступления компонентов на сборку (тип ЭК, вид их упаковки, наличие гарантии пайки выводов ЭК) с условиями использования ЭК на монтажной операции и учесть не только основные, но вспомогательные операции.

Подготовительные и финишные операции спроектированы по известным методам с использованием формул, приведенных в приложении.

Проектирование подструктур включает синтез: групповых техпроцессов АТП сборки ЭМ из однотипных ЭК; подструктур и их множества (для каждого типа ЭК из операций АТОп с КОП; оценки и выбора лучшей подструктуры.

При синтезе групповых АТП сборки ЭЯ из однотипных ЭК учтены особенности ЭЯ [количество, типы ЭК, вид монтажа; разработаны АТП сборки разных ЭМ: на основе печатной платы (ПП), интегральных микросхем во втором корпусе (ИС₂),

электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и штырькового монтажа; на основе ПП, интегральных микросхем в четвертом корпусе (ИС₄) и планарного монтажа; на основе ПП. SMD компонентов и поверхностного монтажа]. При синтезе АТП происходит выбор типа и формирование АТП в соответствии с правилами и авторским алгоритмом [1].

Синтез множества подструктур сборки ЭЯ (для каждого типа ЭК) есть результат выполнения комплекса действий: перебор шаблонов типов ЭК (состава ЭМ) с выбором на каждом шаге очередного шаблона типа ЭК; формирование (по всему АТП сборки ЭЯ) множества шаблонов подструктур $\bar{\bar{G}}^{(p)}$ [включение шаблона в $\bar{\bar{G}}^{(p)}$ - по совпадению идентификаторов шаблонов (ИШ) ЭК (вида монтажа ЭК, его группы, типа, вида упаковки, признака гарантии пайки) и подструктуры] на основе моделей типа ЭК и его перебор; формирование признаков, модели подструктуры $\bar{G}_y^{(p)}$ (по ее шаблону $\bar{\bar{G}}_y^{(p)}$) и множества шаблонов операций $\bar{\bar{O}}_y^{(p)}$ подструктуры $\bar{G}_y^{(p)}$; перебор множества $\bar{\bar{O}}_y^{(p)}$ по шаблонам операций; включение операции $\bar{O}_{ij}^{(p)} = \bar{O}_i^{(p)}$ в состав подструктуры $\bar{G}_y^{(p)}$ (по шаблону $\bar{\bar{O}}_y^{(p)} = \bar{\bar{O}}_y^{(p)}$) и формирование промежуточной модели подструктуры $\tilde{G}_y^{(p)}$ (при строгом упорядочении множества ИМ операций модели $\tilde{G}_y^{(p)}$); расчет количественных параметров модели подструктуры [производительности, производственных затрат на технологические АТОп и транспортные операции АТрОп (затраты на АТрОп определены приближенно) с учетом ограничений и значения R_{k1}]; формирование оптимальной подструктуры $\tilde{G}_{y\text{опт}}^{*(p)}$ [сравнение подструктур между собой по R_{k1} , выбор лучшей (метод оптимизации - полный перебор конечного множества; критерий - комплексный показатель эффективности

подструктур $R_{k1}=R_{k1max}$; ограничения - максимальная концентрация однотипных переходов на одном рабочем месте, объемы допустимых переменных и постоянных затрат на подструктуру); определение дополнительной информации (количество оборудования, рабочих и площадь) и формирование полной модели $\tilde{G}_{y(р)opt}$ оптимальной подструктуры ГАСК сборки ЭЯ.

Исследование с помощью программного комплекса Контур подструктур разных вариантов (одного назначения, но отличающихся степенью интеграции подготовительных операций) показало, что эффективность (по R_{k1}) выше у подструктур с применением многооперационного АТО (против вариантов с меньшей концентрацией подготовительных операций) из-за меньших суммарных переменных и постоянных затрат, поэтому в структуры ГАСК рекомендованы подструктуры с максимальной концентрацией подготовительных операций.

Седьмая глава отведена под синтез структур ГАСК сборки ЭМ в многономенклатурном производстве с учетом концентрации разнотипных переходов (КРП), оптимизации последовательности их выполнения, компоновки АТО и транспортных операций (методика выполнения третьего этапа).

Разработка третьего этапа базируется на результатах предыдущих этапов (предварительного, первого, второго этапов), глав 4, 5 и формируемых в процессе выполнения третьего этапа моделях структур ГАСК. Синтез структур ГАСК включает разработанные, обоснованные и проверенные методики синтеза и оптимизации: технологических операций сборки ЭМ АТОП с КРП, компоновки АТО в ГАСК, транспортных операций АТрОП и оптимальных структур ГАСК (с учетом технологических АТОП с КРП, транспортных операций и компоновки АТО).

Предложенная методика синтеза технологических операций $\tilde{O}_{k(р)opt}^{крп}$ АТОП с КРП сборки ЭЯ [в отличие от методики синтеза АТОП с КОП (глава 3)] проектирует операции АТОП с КРП из разнотипных переходов с их концентрацией и оптимизацией последовательности выполнения. Постановка задачи синтеза операций АТОП с КРП:
$$\left(\tilde{O}_{k(р)opt}^{крп}, T_{k(р)opt}^{крп}, C(T_{k(р)opt}^{крп}) \right) = \arg \max \left[P_{оп} \left(\tilde{O}_{kv}^{крп}, T_{kv}^{крп}, C(T_{kv}^{крп}), \{ \tilde{O}_{i(р)opt}^{(р)} \}, \{ \tilde{G}_{y(р)opt}^{(р)} \} \right) \right]$$

ограничения: на переменные и постоянные затраты по операции

$$C_{гоп}(\tilde{O}_{kv}^{крп}, T_{kv}^{крп}) \leq [C_{гоп}]_O; \quad K_{гоп}(\tilde{O}_{kv}^{крп}, T_{kv}^{крп}) \leq [K_{гоп}]_O$$

по точности и надежности АТО вместе с СТО операции

$$\delta_c(T_{kv}^{крп}) \leq [\delta_c]; \quad T_{ср.АТО}(T_{kv}^{крп}) \geq [T_{ср.АТО}]; \quad P_{АТО}(t_{6р})(T_{kv}^{крп}) \geq [P_{АТО}(t_{6р})] \quad (14).$$

Синтез происходит благодаря комплексу действий: формирование (по типам ЭК) множества $\tilde{O}_{опт}^{(рi)}$ оптимальных подструктур (из полученных $\tilde{G}_{опт}^{(рi)}$ на втором этапе для каждого типа ЭК); формирование, упорядочивание множества операций $\tilde{O}_{опт}^{коп}$ (на основе множества шаблонов видов операций $\tilde{D}$); перебор множества шаблонов с выбором на каждом шаге очередного шаблона вида монтажа (множество определено на предварительном этапе); для выполнения концентрации разнотипных переходов (КРП) формирование множества операций $\tilde{O}_{опт}^{коп}$ и множества моделей разнотипных ЭК (по совпадению идентификаторов шаблонов (ИШ) видов монтажа, операций и ЭК); проверка наличия в составе АТП сборки ЭЯ двух и более различных

операций, допускающих концентрацию разнотипных переходов $|\tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}| \geq 2$; формирование признаков операций $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ (объединение разнотипных переходов из операций множества $\tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}$ в операцию $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$); назначение на операцию $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ множества АТО $T_k^{\text{крп}} \in T$ (по совпадению: признаков модели АТО $T_{kv}^{\text{крп}}$; ИШ вида операции, монтажа ЭК; МИШ групп, типов ЭК в группе, элементов цикла АТО в составе шаблонов переходов; характеристик моделей ЭК и размеров ПП); расчет суммарного хода КС $L_{\text{КС}\Sigma}$, оптимизация последовательности установки разнотипных ЭК [$L_{\text{КС}\Sigma}$ установки разнотипных ЭК получается сложением $L_{\text{КС}\Sigma}$ установки однотипных ЭК, полученных на 1-ом этапе) и формирование модели операции $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ (модель $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ дополняется двумя признаками — $L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{исопт}}$ и $L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{опт}}$); перебор множества $T_k^{\text{крп}}$ по всем АТО (на каждом шаге выбор очередной марки $T_{kv}^{\text{крп}}$ АТО); для модели $T_{kv}^{\text{крп}}$ - формирование совокупности моделей СТО $C(T_{kv}^{\text{крп}})$ на основе идентификаторов (УИ) и признаков связи [в СТО использованы АЗУ, СГ, КС, АН_{ПП}, УФ_{ПП}, УЗВ_{ПП} (число АЗУ и СГ определяется количеством типов ЭК, подлежащих концентрации КРП; КС определена однозначно идентификатором модели КС; модели УФ_{ПП}, УЗВ_{ПП} и АН_{ПП} получены при проектировании (модель УФ_{ПП} выбирается из множества соответствующих моделей по критерию $\delta_{\text{УФППД}}$ по допустимой точности фиксации ПШ; модели УЗВ_{ПП} и АН_{ПП} для любого АТО $T_i^{(p)}_{\text{опт}}$ одинаковы, поэтому выбирается любая)]; назначение на модель АТО $T_{kv}^{\text{крп}}$ совокупности моделей СТО $C(T_{kv}^{\text{крп}})$, формирование признака (МИМ СТО) операции $\tilde{O}_{kv}^{\text{крп}}$; (аналогично первому этапу) комплексная оценка данной модели АТО $T_{kv}^{\text{крп}}$ и совокупности моделей СТО $C(T_{kv}^{\text{крп}})$ по точности (δ_c) и надежности ($P_{\text{АТО}}(t_{\text{гр}})$, $T_{\text{ср.АТО}}$), сравнение полученных значений с допустимыми и отсеивание вариантов, не прошедших тестирование; расчет характеристик модели $\tilde{O}_{kv}^{\text{крп}}$ (аналогично первому этапу, но затраты на транспортные операции определены более точно по методике проектирования АТрОП) и $R_{\text{оп}}$ с учетом ограничений на затраты]; на основании расчетов - определение признаков с индексами 7÷22 и промежуточной модели операции $\tilde{O}_{kv}^{\text{крп}}$ (модель $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ дополняется признаками, определенными в результате проектирования); сравнение вариантов операций $\tilde{O}_{kv}^{\text{крп}}$ по значению $R_{\text{оп}}$; предварительный выбор оптимальной модели операции $\tilde{O}_{k\text{опт}}^{\text{крп}}$ по $R_{\text{оп max}}$ с назначенной на нее оптимальной моделью совокупности АТО и СТО; исключение (по всему АТП) из множества $\tilde{O}_{\text{опт}}$ операций $\tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}$ и включение вместо них операций $\tilde{O}_{k\text{опт}}^{\text{крп}}$ ($\tilde{O}_{\text{опт}} = (\tilde{O}_{\text{опт}} \setminus \tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}) \cup \tilde{O}_{k\text{опт}}^{\text{крп}}$).

Синтез компоновки ГАСК происходит благодаря комплексу действий: выбор шаблона компоновки $\bar{N}_g$ данного варианта структуры ГАСК $\bar{R}_g$ {шаблоны компоновок ГАСК сформированы на предварительном этапе, построены с использованием унифицированных структур [например, рис. 1, где АТО расположено группами

(по выполняемым технологическим операциям) в два ряда (слева и справа) короткой либо длинной стороной вдоль транспортной магистрали автоматической тележки; АТО обслуживается напольными либо подвесными роботами; расстояния между единицами АТО, АТО и транспортной магистралью, АТО и стенами участка считаются известными}); формирование признаков и предварительной модели компоновки $\tilde{N}'_g$ (по шаблону $\bar{N}_g$); формирование множества видов операций $\bar{D}^{лев}$ и $\bar{D}^{прав}$ (для АТО - слева и справа от транспортной магистрали); перебор множества по всем операциям $\tilde{O}_{z\text{ опт}} \in \bar{O}_{\text{опт}}$ данной структуры R_g ; проверка условия вхождения ИШ вида операции $\tilde{O}_{z\text{ опт}}$ во множества ИШ видов операций $\bar{D}^{лев}$ и $\bar{D}^{прав}$ (признак операции должен принадлежать соответствующему множеству признаков); перебор марок АТО в составе группы, назначенной на операцию $\tilde{O}_{z\text{ опт}}$; определение по X и Y координат центра симметрии АТО относительно начала транспортной магистрали (признак с индексом 2) и проверка ограничений (исключение наложения АТО друг на друга и на транспортные пути); определение обобщенной координаты групп АТО по Y (модель компоновки $\tilde{N}'_g$ дополняется новым значением признака с индексом 2); (формирование промежуточной модели компоновки $\tilde{N}''_g$ при объединении признаков модели $\tilde{N}'_g$ с вновь определенным признаком с индексом 2); исключение отрицательных значений координат АТО путем переноса начала системы отсчета в нижний левый угол производственного участка и пересчет координат всех единиц АТО по оси X [при этом определяется: минимальная отрицательная координата всех АТО - слева от транспортной магистрали, координата левого нижнего угла (X_0) участка относительно середины транспортной магистрали, координата ($X_0 = 0$) середины транспортной магистрали, координаты всех единиц АТО каждой группы - изменение значения признака с индексом 2]; формирование промежуточной модели компоновки $\tilde{N}_g$ при объединении признаков модели $\tilde{N}''_g$ с новым признаком с индексом 2; расчет длины транспортной магистрали $l_{тр}$ - признак с индексом 4 (по координате наиболее удаленной от начала транспортной магистрали единицы АТО); формирование полной модели компоновки $\tilde{N}_g$ (при дополнении модели $\tilde{N}_g$ признаком с индексом 4, определенным в результате проектирования).

В существующей практике разработки автоматизированных комплексов АСБК при проектировании транспортных операций АТрОП определяют тип и количество транспортного оборудования АТр без учета вероятностного характера транспортных потоков, что не позволяет обоснованно выбрать марку и количество АТр; правильно определить величину затрат на транспортные операции; обеспечить заданный уровень загрузки АТО, АТр и высокую эффективность ГАСК.

Основные допущения в предложенной методике синтеза и оптимизации АТрОП: модель производства ГАСК представлена в виде случайного процесса подачи заявок на обслуживание от групп взаимозаменяемого АТО и описана в рамках системы массового обслуживания (СМО) [Новиков О.А., Петухов С.И. Прикладные вопросы

теории массового обслуживания]; СМО - с ожиданием (поступившая заявка не покидает систему и становится в очередь на обслуживание), замкнутая (число обслуживаемых приборов ограничено количеством единиц АТО - m), многоканальная (число каналов - p определяется количеством единиц АТР), процесс подачи заявок на обслуживание АТО - марковский случайный с непрерывным временем (вероятность подачи заявки АТО на обслуживание в момент времени $t > t_0$ не зависит от того, как проходил процесс в ГАСК до времени t_0 и переход ГАСК из одного состояния в другое возможен в любой момент времени t), потоки событий, переводящие ГАСК из одного состояния в другое - пуассоновские [интенсивность заявок на обслуживание АТО $\lambda = 1/T_{\text{ц}}$ ($T_{\text{ц}}$ - среднее цикловое время сборки партии ЭМ либо подготовки партии ЭК на соответствующем АТО)], ординарные, постоянные ($\lambda = \text{const}$ при равномерной интенсивности поступления заявок от одного АТО в рассматриваемом интервале времени), без последствия (в одно и то же время может быть подана и обработана одна заявка); интервал времени между двумя соседними событиями распределен по показательному закону.

Предложенная методика обеспечивает требуемую загрузку АТО, АТР, позволяет для новых ЭМ генерировать индивидуальные транспортные операции (АТРоп), оптимизирует выбор марки $T_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}$ и количество единиц $n_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}$ транспортного обслуживания (АТР) для модели СМО $\tilde{P}_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}$ в составе модели структуры ГАСК $R_{\text{г}}$ (постановка задачи проектирования операций АТРоп):

$$\left(\tilde{P}_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, T_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, n_{\text{гq опт}}^{\text{тр}} \right) = \arg \max \left[P_{\text{оп}} \left(\tilde{P}_{\text{гqv}}^{\text{тр}}, T_{\text{гqv}}^{\text{тр}}, n_{\text{гq}}^{\text{тр}} \right) \right]; \quad n_{\text{гq опт}}^{\text{тр}} = \min(n_{\text{гq}}^{\text{тр}} = 1, 2, \dots);$$

обеспечение загрузки АТО $K_{\text{з АТО}} \left(\tilde{P}_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, T_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, n_{\text{гq}}^{\text{тр}} \right) \geq K_{\text{з АТО треб.}}$ при $n_{\text{гq}}^{\text{тр}} = n_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}$; (15)

обеспечение загрузки АТР $K_{\text{з АТР}} \left(\tilde{P}_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, T_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, n_{\text{гq}}^{\text{тр}} \right) \leq K_{\text{з АТР треб.}}$ при $n_{\text{гq}}^{\text{тр}} = n_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}$;

ограничения на затраты $K_{\text{тр}} \left(\tilde{P}_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, T_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, n_{\text{гq}}^{\text{тр}} \right) \leq [K_{\text{тр}}]; C_{\text{тр}} \left(\tilde{P}_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, T_{\text{гq опт}}^{\text{тр}}, n_{\text{гq}}^{\text{тр}} \right) \leq [C_{\text{тр}}]$.

Синтез АТРоп с использованием СМО включает выполнение комплекса действий: формирование множества шаблонов СМО (в составе данной структуры ГАСК $\bar{R}_{\text{г}}$) и его перебор; формирование признаков модели СМО $\tilde{P}_{\text{гq}}^{\text{тр}}$ (по ее шаблону) и множества шаблонов транспортных операций (в составе СМО); перебор технологических операций $\tilde{O}_{\text{з опт}}$ данного варианта структуры $R_{\text{г}}$; формирование множества шаблонов транспортных операций, обслуживающих технологическую операцию $\tilde{O}_{\text{з опт}}$ и его перебор; формирование признаков модели транспортной операции $\tilde{O}_{\text{гqz}}^{\text{тр}}$ (по ее шаблону); формирование множества шаблонов $\bar{D}_{\text{гqz}}$ видов возможных технологических операций (предшествующих обслуживаемой $\tilde{O}_{\text{з опт}}$) и его перебор; поиск места, откуда перевозится груз [перебор операции в составе техпроцесса АТП (от $\tilde{O}_{\text{z-1 опт}}$ до $\tilde{O}_0$, где $\tilde{O}_0$ - склад)]; формирование признаков (3, 4) [идентификаторов моделей (ИМ) транспортируемых грузов: ЭК, ПП, ЭМ, ИМ операции $\tilde{O}_{\text{з опт}}$, связанной с обслуживаемой и предшествующей ей] и модели $\tilde{O}_{\text{гqz}}^{\text{тр}}$ (к $\tilde{O}_{\text{гqz}}^{\text{тр}}$ добавляются признаки грузов); определение признаков с индексами 5 - 7 [объем транспортной партии; время непрерывной работы единицы АТО без загрузки по данному АТР;

интенсивность потока заявок от группы АТО по данному АТр] и модели $\tilde{O}_{gqi}^{*tp}$; формирование модели $\tilde{P}_{gq}^{*tp}$ (назначение на СМО $\tilde{P}_{gq}^{*tp}$ модели транспортной операции $\tilde{O}_{gqi}^{*tp}$); определение признаков (5 - 8: интенсивности потока заявок от группы АТО и от всех групп АТО; средний путь единицы АТр при обслуживании одной заявки и заявок от группы АТО) и модели СМО $\tilde{P}_{gq}^{*tp}$; назначение на множество транспортных операций $\tilde{O}_{gq}^{*tp}$ в составе СМО $\tilde{P}_{gq}^{*tp}$ множества АТр; цикл по каналам обслуживания (по АТр) $n_{gq}^{*tp} = 1, 2, \dots$ (на каждом шаге количество АТр увеличивается на 1); перебор множества T_{gq}^{*tp} по всем АТр (выбор на каждом шаге очередной марки АТр); определение признака (9 - среднее время обслуживания одной заявки) и формирование модели $\tilde{P}_{gq}^{*tp}$; определение признаков (8, 10 - 13) [для одного транспортируемого груза на одном АТр (часть ходки) расчет трудоемкости ($T_{шк}$, $T_{шт}$, $T_{пз}$), затрат ($C_{тр}$, $K_{тр}$)] и формирование полной модели транспортной операции $\tilde{O}_{gqi}^{*tp}$ (при дополнении модели $\tilde{O}_{gqi}^{*tp}$ признаками с индексами 8, 10- 13); формирование множества АТр $T_{gq}^{*tp} \in T^{*tp}$ - кандидатов для выполнения транспортных операций $\tilde{O}_{gq}^{*tp}$; расчет признаков [20-26 (для суммы транспортируемых грузов на одном АТр - одной ходки) расчет: трудоемкости ($T_{шк}$, $T_{шт}$), площади $S_{тр}$, производительности $Q_{тр}$, затрат ($C_{тр}$, $K_{тр}$), $P_{оп}$], сравнение с допустимыми [$C_{тр}$] [$K_{тр}$] и формирование модели $\tilde{P}_{gqv}^{*tp}$; определение признаков (10, 11: ρ - характеристический параметр СМО, p_0 - вероятность, что все АТр свободны от обслуживания), проверка наличия установившегося режима в СМО ($\rho < 1$) и формирование модели $\tilde{P}_{gqv}^{*tp}$; сравнение моделей СМО по $P_{оп}$, выбор $\tilde{P}_{gqv}^{*tp}$ (по $P_{оп \max}$ с учетом ограничений на $C_{тр}$ и $K_{тр}$); расчет вероятностных характеристик СМО (вероятности среднего числа свободных АТр, коэффициентов простоя и занятости АТр; среднего числа ожидающих и находящихся в обслуживании заявок, коэффициентов простоя и занятости АТО); проверка обеспечения загрузки технологического АТО (не ниже допустимого уровня) и транспортного АТр (не выше допустимого уровня); уточнение количества АТр [по коэффициентам занятости АТО и АТр].

Постановка задачи синтеза собственно структур ГАСК:

$$(R_{g \text{ опт}}, \tilde{N}_{g \text{ опт}}) = \arg \max \left\{ P_{k2} \left(R_g, \left\{ \tilde{O}_{z \text{ опт}} \right\} \left\{ \tilde{G}_{\text{опт}}^{(p)} \right\}, \tilde{N}_g, \left\{ \tilde{P}_{gq \text{ опт}}^{*tp} \right\} \right) \right\}$$

ограничения: на затраты по структуре $C_{\text{гоп}}(R_g) \leq [C_{\text{гоп}}]_R$; $K_{\text{гоп}}(R_g) \leq [K_{\text{гоп}}]_R$ (16)
на работоспособность ГАСК $P_{\text{ГАСК}}(T)(\hat{R}_g) \geq [P_{\text{ГАСК}}(T)]$; $T_{\text{ср.ГАСК}}(\hat{R}_g) \geq [T_{\text{ср.ГАСК}}]$.

Предлагаемая методика синтеза структур ГАСК с учетом результатов проектирования АТОП с КРП, АТРОП и СМО, компоновки ГАСК включает комплекс действий: перебор множества шаблонов структур и выбор на каждом шаге очередного шаблона (множество шаблонов структур построено на основе унифицированных структур и сформировано на предварительном этапе); формирование признаков и начальной модели структуры ГАСК R'_g (по ее шаблону); дополнение модели (R'_g)

признаками [МИМ оптимальных подструктур множества $\tilde{G}_{\text{опт}}$, строго упорядоченное МИМ оптимальных операций множества $\tilde{O}_{\text{опт}}$ (включая операции $\tilde{o}_{k \text{ опт}}^{\text{крп}}$ с максимальной КРП)] и формирование промежуточной модели структуры R_g^* ; при дополнении модели R_g^* полными моделями компоновки $\tilde{N}_g$ и транспортных операций $\tilde{R}_{g \text{ опт}}^{\text{тр}}$ формируется промежуточная модель $\tilde{R}_g$ структуры ГАСК; в результате определения признаков моделей $\tilde{R}_g$ (вероятности безотказной работы, интенсивности отказов, средней наработки на отказ - признаков работоспособности ГАСК, а также переменных, постоянных затрат на технологические и транспортные операции, производительности, значения комплексного показателя эффективности структур ГАСК P_{k2}), сравнения их с допустимыми (кроме P_{k2}) и добавления их к модели $\tilde{R}_g$ образуется промежуточная модель $\tilde{R}_g$; при сравнении вариантов модели $\tilde{R}_g$ по эффективности (по P_{k2}) и выборе из них лучшего (метод полного перебора, критерий $P_{k2} = P_{k2 \text{ max}}$ с учетом ограничений, наложенных на структуру, по работоспособности и затратам) формируется модель $\tilde{R}_{g \text{ опт}}$; полная модель $R_{g \text{ опт}}$ оптимальной структуры ГАСК образуется при добавлении к $\tilde{R}_{g \text{ опт}}$ признаков: количество в ГАСК оборудования, рабочих и занимаемая площадь; одновременно с образованием оптимальной структуры $R_{g \text{ опт}}$ формируется технологическая документация [маршрутная и операционная технология, АТО и оснастка, план участка (количество, марки АТО, координаты и ориентация АТО, транспортно-накопительное оборудование, управляющие программы для АТО). Обоснована совокупность научных принципов проектирования структур ГАСК сборки ЭМ в многономенклатурном производстве ЭА {адаптация ЭМ к условиям сборки в ГАСК; формализация [классификация, условное деление объектов проектирования на элементы (признаки) и представление с помощью теории множеств в виде шаблонов и моделей (шаблоны разрабатывают до начала проектирования; модели формируются в процессе проектирования)], автоматизации, многовариантность, многоэтапность проектирования и оптимизации структур ГАСК; серийное оборудование АТО и оснастка СТО для операций должны соответствовать технологическим требованиям ГАСК; комплексный учет всех операций техпроцесса сборки ЭМ, несинхронность операций по трудоемкости и связь между ними - через накопители; ключевая операция - монтажная (определяет состав подготовительных операций и требования к подготовке ЭК); концентрация монтажа однотипных и разнотипных компонентов ЭК с оптимизацией последовательности сборки; вероятностный характер обслуживания заявок АТО с оптимизацией количества, марки оборудования и обеспечением уровня его загрузки; технико-экономический анализ принимаемых решений; индивидуальная технология и документация на каждый тип ЭМ с учетом условий ее запуска в производство}]. Обоснованы и разработаны (на основе совокупности этих принципов) оптимальные структуры ГАСК сборки ЭМ в многономенклатурном производстве, методики автоматизированного проектирования и оптимального выбора структур ГАСК и их элементов [технологических операций с концентрацией, оптимизацией последова-

тельности монтажа разнотипных ЭК, выбора АТО и СТО; компоновки оборудования; транспортных операций с вероятностным характером обслуживания заявок АТО, оптимизацией выбора количества, марки оборудования и обеспечением уровня его загрузки, позволивших уточнить затраты на транспорт ($C_{\text{тр}}$ соизмеримы с $C_{\text{гоп}}$).

Результаты исследований структур ГАСК сборки ЭМ с использованием их моделей показали: 1) при переводе сборки ЭМ из Комплекта/Вручную - в ГАСК (КРП) получено увеличение эффективности сборки (P_{k2} увеличился на 46,9/ 49 %); уменьшение величины производственных затрат (технологические постоянные $K_{\text{гоп}}$ на 48,4/ 50 %, переменные $C_{\text{гоп}}$ - на 8,86/ 7,3 %), уменьшение количества требуемого монтажного АТО Нато(на 50/75%), уменьшение количества обслуживающего персонала N_p (на 48/68 %), требуемой площади S (на 41/70 %); 2) применение оптимизации [перевод сборки ЭМ в ГАСК из структуры без оптимизации к структуре с параметрической оптимизацией (последовательности выполнения переходов) мало увеличило значение P_{k2} (на 1 + 2 %), переход от структуры с параметрической оптимизацией к структуре с параметрической и структурной оптимизацией (последовательности выполнения переходов, компоновки АТО, транспортных операций) увеличило значение P_{k2} (в среднем на 38 %); 3) введение адаптации ЭМ к условиям сборки в ГАСК увеличило P_{k2} на 50 и более %; 4) обеспечение гарантии пайки у выводов ЭК, поступающих на сборку, увеличило P_{k2} (например, для второго типа структур при $N_a=20$ $N_{\text{я}}=10000$ P_{k2} увеличился на 31 %); уменьшение в ячейке количества ЭК неширокого применения НШПр также увеличило P_{k2} (например, при уменьшении ЭК НШПр с пяти штук до одной увеличило P_{k2} на 57,1 %). Разработаны и исследованы модели компоновки оборудования, которые показали, что компоновка АТО оказывает влияние на эффективность ГАСК, поэтому необходимо выбирать тот вариант, у которого $P_{k2 \text{ max}}$.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Решена актуальная крупная научная проблема - создание методов и средств автоматизированного проектирования технологических структур гибких автоматизированных комплексов (ГАСК) сборки электронных модулей (ЭМ) в многономенклатурном производстве, имеющая большое народно-хозяйственное значение, позволившая повысить эффективность серийного оборудования путем синтеза на его основе структур ГАСК.

Сформулирована и теоретически обоснована совокупность научных принципов автоматизированного проектирования технологических структур ГАСК, которая сделала возможным разработку:

А. структур ГАСК сборки ЭМ большой номенклатуры и разнообразного объема выпуска ЭМ, охвативших операции от распаковки компонентов до контроля собранных ячеек с компактным расположением оборудования, позволивших повысить эффективность ГАСК в сравнении с ручной сборкой на АРМх / (комплексом) АТО, работающих независимо (P_{k2} увеличился на 87/57 %, за счет объединения серийного АТО в структуры и их оптимизации;

Б. методов и методик проектирования технологических структур ГАСК:

1) методологии проектирования структур ГАСК для многономенклатурного производства ЭМ, сделавшей процесс проектирования автоматизированным, мно-

говариантным, многоэтапным с их параметрической и структурной оптимизацией;

2) метода синтеза, позволившего объединить серийное оборудование в структуру ГАСК и генерировать ее варианты;

3) метода технико-экономической оценки структур ГАСК и их элементов, обеспечившего контроль процесса проектирования, дифференцированный анализ, количественную оценку вариантов структур и их элементов, выбор из них лучшего благодаря учету номенклатуры, объема выпуска ЭМ, особенностей изделий, оборудования, его фактической загрузки, технологической подготовки;

4) методики проектирования групповых техпроцессов АТП сборки ЭМ (на основе специальных алгоритмов), учитывающей особенности изделия ЭМ и технологической среды сборки, упростившей проектирование и снизившей трудоемкость разработки АТП;

5) методики проектирования и обеспечения технологических требований ГАСК в СТО (включающей расчеты конструктивных параметров, усилий, точности, надежности, производительности, производственных затрат), которая позволила оценить и прогнозировать эти характеристики при изменении структуры и параметров СТО;

6) методики оценки и обеспечения технологических требований ГАСК в АТО (включающей расчеты точности, надежности, производительности, производственных затрат), которая позволила оценить и выполнить прогноз этих характеристик при изменении структуры и параметров его устройств;

7) методик, обеспечивших синтез вариантов и выбор (по $R_{оп\ max}$, $R_{к1\ max}$, $R_{к2\ max}$) лучшего: технологических операций с концентриацией, оптимизацией последовательности разнотипных переходов; подструктур; компоновки; транспортных операций (АтрОП) с учетом вероятностного характера транспортных потоков путем использования СМО с оптимизацией количества и марок транспортного оборудования АТр при соблюдении требуемой загрузки АТО и АТр; структур ГАСК на основе оптимальных подструктур, технологических (АТОП с КРП), транспортных (АТрОП) операций и компоновки;

8) учет вероятностного характера транспортных потоков в методике синтеза АТрОП позволил уточнить величину переменных затрат на транспортные операции ГАСК, которые оказались соизмеримыми с переменными затратами на технологические операции (вместо применяемых 20 % при укрупненных расчетах);

9) методики принятия решения при адаптации изделий ЭМ к условиям ГАСК, основанной на подробном рассмотрении перечня требований по основным операциям (подготовке, монтажу, пайке, контролю), принятии решения по каждому из них с последующем суммировании, позволившей сократить трудоемкость сборки;

10) рекомендаций выбора оборудования (АТО, АТр) для операций ГАСК по критерию $R_{оп\ max}$, с учетом ограничений [на производственные затраты, возможность АТО], которые позволили обоснованно выбрать марку и количество АТО, АТр;

11) рекомендаций повышения производительности сборочных АТО структур ГАСК на основе разработанных быстродействующих следящих приводов КС и их устройств коррекции;

12) рекомендаций повышения производительности сборочных АТО с шаговым приводом вращения и микропроцессорной СЧПУ путем применения предложенной программно-аппаратной форсировки разгона и торможения стола КС;

13) алгоритмов, цифровых моделей (ЭМ, АТО, СТО, АТОП, АТр, АТр АтрОп, структур ГАСК), необходимых для автоматизированного проектирования структур ГАСК.

Реализация изложенных выше научных принципов осуществлена в:

- а) структурах ГАСК многономенклатурного производства ЭМ;
- б) программном комплексе Контур;
- в) учебном процессе (в лекциях, лабораторно-семинарском практикуме, курсовом и дипломном проектировании);
- г) учебниках, учебных пособиях, монографиях, научных статьях.

Основное содержание диссертации опубликовано в 63 работах, среди них:

1. Иванов Ю. В. Концептуальная модель автоматизированного проектирования структур ГАСК многономенклатурного производства электронных ячеек //Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2001. -№ 2. - С. 58 - 68.
2. Иванов Ю. В. Повышение эффективности сборки изделий //Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1995. - № 4. - С. 66-75.
3. Иванов Ю. В., Лакота Н. А. Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов: Учеб. пособие. - М.: Радио и связь, 1987.- 464 с.
4. Malov A. and Ivanov Yu. Principles of Automation & Automated production processes. - Moscow: Mir Publishers, 1976. - 400 p.
5. Иванов Ю.В. Исследование динамики цифровых моделей следящих приводов координатных систем сборочных автоматов и промышленных роботов с ЧПУ: Учеб. пособие. - М.: МГТУ, 1998. - 32 с.
6. Малов А. Н., Иванов Ю. В. Основы автоматизации и автоматизация производственных процессов: Учебник. - М.: Машиностроение, 1974. - 368 с.
7. Иванов Ю. В. Автоматизация сборки в условиях гибкого производства //Обзор ВНИИТЭМР. Серия 6. - 1988. - Выпуск 2. - 42 с.
8. Иванов Ю.В., Скворцов Ю.В. Техничко-экономический анализ средств автоматизации и новой техники в производстве РЭС и ЭВС: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 1990. -32 с.
9. Иванов Ю.В. Проектирование операций сборки, выполняемых на оборудовании с ЧПУ: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 1984. - 32 с.
10. А.с. 215684 СССР. Двухкаскадный следящий гидравлический усилитель / Ю.В. Иванов, М.М. Кузнецов //Б.И.-1968.-№ 13.
11. Иванов Ю.В. Увеличение производительности оборудования с электрическим шаговым приводом и микропроцессорной СЧПУ //Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1995. - № 3. - С. 91 - 96.
12. Малов А.Н., Иванов Ю.В. Программирование для станков с программным управлением. - М.: МГТУ, 1975. - 75 с.
13. Малов А.Н., Иванов Ю.В. Применение вычислительной техники для проектирования технологии обработки деталей на станках с программным управлением: Учебное пособие. - М.: НТО Машпром. УТП в машиностроении, 1977. - 55с.
14. Кузнецов М.М., Иванов Ю.В. Влияние элементов следящего привода на работу стола станка // Изв. вузов. Машиностроение. -1968. - № 10. - С. 143- 147.
15. Кузнецов М.М., Иванов Ю.В. Экспериментальное исследование следящего привода подачи стола фрезерного станка // Изв. вузов. Машиностроение. - 1968. - № 11. - С. 119 - 123.

16. Иванов Ю.В. Системы автоматического управления: Справочник металлиста / Под ред. Б.Л. Богуславского. - М.: Машиностроение, 1980. - Т.5. - С.167-199.
17. Иванов Ю.В. К вопросу устойчивости следящего привода станков // Известия вузов. Машиностроение. - 1972. - № 11. - С.162-166.
18. Иванов Ю.В. Применение аналоговых вычислительных машин в экспериментальном исследовании следящих приводов станков с программным управлением // Известия вузов. Машиностроение. - 1974. - № 1. - С. 166-171.
19. Иванов Ю.В. Автоматизация электромонтажа в производстве блоков ЭВА // Автоматизация сборочных работ в приборостроении: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - М., 1975. - С. 49-52.
20. Иванов Ю.В.. Автоматизированная адаптация изделий электронных ячеек к условиям сборки в гибком автоматизированном комплексе // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2001. - № 3. - С. 100 - 112.
21. Иванов Ю.В. Исследование электрогидравлического следящего привода подачи стола фрезерного станка: Дис.... канд. техн. наук.- М., 1969. -179 с.
22. Иванов Ю.В. Автоматизированное проектирование управляющих программ для оборудования с ЧПУ монтажа компонентов на плату в ГАСК сборки ЭЯ // Проектирование и технология ЭА (Владимир).- 2001.- № 1. - С. 38-42.
23. Иванов Ю.В., Скуратов А.Е. Линия автоматизированной сборки катушек устройств зажигания // Автоматизация и механизация производственных процессов. -1978. - № 1. - С. 16-21.
24. Иванов Ю.В. Автоматизация сборки узлов ЭВА // Приборостроение: Тез. докл. IV Всесоюзн. конф. - М., 1979. - С. 84-87. - д.с.п.
25. Иванов Ю.В. К вопросу об автоматизации сборки электронных узлов с печатным монтажом // Автоматизация технологических процессов в приборостроении: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - М., 1980. - С.15-19.
26. Иванов Ю.В., Ефимов И.В. Анализ транспортно-складских систем ГАП и разработка АТСС для конкретного производства электронных узлов // Актуальные проблемы современного приборостроения: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - М., 1986. - С. 82-84. - д.с.п.
27. Иванов Ю.В., Доронин Д.В., Лукьянов С.А. Повышение производительности модуля сборки для ГАП электронных узлов РЭА уменьшением времени на разгон- торможение эл. шагового привода стола // Актуальные проблемы современного приборостроения: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - М., 1986. - С. 84-86. - д.с.п.
28. Иванов Ю.В., Горюнов П.Н. Анализ погрешностей, возникающих при монтаже накруткой, и обоснование возможности автоматизации монтажа накруткой на ЭВМ // Актуальные проблемы информатики, управления и вычислительной техники: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - М., 1987. - С. 14-16. - д.с.п.
29. Иванов Ю.В. Проектирование координатных систем с быстродействующими следящими приводами для автоматизации сборки электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002. - 38 с.
30. Волков В.И., Смирнов А.Ю., Иванов Ю.В. Разработка производственного участка сборки электронных модулей персональных ЭВМ// Актуальные проблемы информатики, управления и вычислительной техники: Тез. докл. Всесоюзн. конф. М., 1987.- С. 21-23. - д.с.п.
31. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования загрузочных устройств электрон-

- ных компонентов для автоматизированной сборки электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002. - 32 с.
32. Иванов Ю.В., Малов А.Н. Технологическое оборудование с ЧПУ: Справочник технолога-приборостроителя. - М.: Машиностроение, 1980. - Т.1. - С. 535- 576.
33. Иванов Ю.В., Карпов С.А. Исследование и оптимизация процесса технологической тренировки электронных ячеек //Актуальные проблемы современного приборостроения: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - М., 1989. - С. 138-140. - д.с.п.
34. Иванов Ю.В. Автоматизированная разработка управляющих технологических программ монтажа ЭРЭ с оптимизацией их последовательности на автомате с СЧПУ: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002. -33 с.
35. Иванов Ю.В. Исследование вибробункерного накопительного и загрузочного автоматического устройства производства ЭА: Учеб. пособ.- М.: МГТУ,1994. -17 с.
36. Иванов Ю.В. Автоматизированная разработка управляющих технологических программ монтажа интегральных микросхем со штырьковыми выводами на автомате с СЧПУ с оптимизацией их очередности: Учеб. пособ. -М.: МГТУ, 2002. - 31с.
37. Иванов Ю.В. Автоматизированная разработка управляющих технологических программ монтажа и пайки интегральных микросхем с планарными выводами на автомате с ЧПУ с оптимизацией очередности: Учеб. пособ. -М.: МГТУ, 1993. - 21 с.
38. Иванов Ю.В. Автоматизированная разработка управляющих технологических программ с оптимизацией последовательности образования связей при ведении монтажа накруткой в электронной аппаратуре на оборудовании с ЧПУ: Учебное пособие. -М.: МГТУ, 2002. - 23с.
39. Иванов Ю.В. Автоматизированная разработка управляющих технологических программ с оптимизацией последовательности сверления отверстий в платах на оборудовании с ЧПУ: Учебное пособие. - М.:МГТУ, 2002. - 36 с.
40. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования устройств захвата электронных компонентов для автоматической сборки электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002. - 32 с.
41. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования головок монтажа электронных компонентов для автоматической сборки электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002. - 31с.
42. Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Разработка и оптимизация расписания запуска в производство электронных ячеек при календарном планировании //Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2001: Тезисы докл. III молодеж. науч. техн. конф.- М., 2001. - С. 233-238 с.
43. Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Определение оптимального состава и количества единиц транспортного оборудования для гибкого автоматизированного сборочного комплекса многономенклатурного производства электронных ячеек //Конструкторско-технологическая информатика 2000: Тезисы докл. IV Международного конгресса. - М., 2000. - Т. 1. - С. 212 - 215.
44. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования специального технологического оснащения гибкого автоматизированного сборочного комплекса производства электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002. - 53 с.