

Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана.

---

Ю.В. Иванов

**Автоматизация проектирования оптимальных операций сборки  
электронной аппаратуры на автоматах  
гибких автоматизированных комплексов**

*Рекомендовано методической комиссией факультета ИУ  
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
2004

УДК 658.52.01.56

ББК 32.965

И18

Рецензенты:

проф. МГТУ. д.т.н. В.А. Шахнов

проф. НИЭМИ. д.т.н В.Г.Костиков

**Иванов Ю. В.**

И18 Автоматизация проектирования оптимальных операций сборки электронной аппаратуры на автоматах гибких автоматизированных комплексов.- Учебное пособие. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004-43с.

Рассмотрена методика автоматизации проектирования оптимальных операций сборки электронной аппаратуры на автоматах гибких автоматизированных комплексов. Приведены примеры расчетов операций.

Материал пособия направлен на повышение эффективности сборочного оборудования производства электронной аппаратуры за счет уменьшения трудоемкости сборки путем концентрации установки компонентов на одном автомате, оптимального выбора марок автоматов, оптимизации очередности монтажа компонентов и автоматизации технологической подготовки.

Для студентов, выполняющих семинары, домашние задания, курсовые и дипломные работы по Автоматизации производства ЭС, а также студентов других специальностей и специалистов промышленности, занимающихся автоматизацией сборки.

Илл. 9. Библиогр. 21 назв.

УДК 658.52.01.56

ББК 32.965

**Юрий Викторович Иванов**

**Автоматизация проектирования оптимальных операций сборки  
электронной аппаратуры на автоматах  
гибких автоматизированных комплексов**

*Учебное пособие*

Печатается в авторской редакции

Корректор *О.В. Калашишквва*

Компьютерная верстка *О.В. Беляевой*

Подписано в печать 24.12. 2004. Формат 60x84/16. Бумага офсетная  
Печ.л. 1,9. Усл. печ. л. 1,8. Уч.-изд. л.1,7. Тираж 300 экз. Заказ № 53г.

Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

© МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004

## Введение

Для повышения эффективности сборки электронных модулей (ЭМ) в многономенклатурном производстве технологические операции, выполняемые на автоматах автоматизированных комплексов должны быть построены оптимально, а автоматы объединены в гибкие комплексы (ГАСК).

**Проектирование операций сборки ЭМ, выполняемых на автоматах ГАСК** включает: 1. Анализ изделия электронной аппаратуры (ЭА) и условий его сборки в ГАСК; 2. Расчленение изделия ЭА на модули; 3. Адаптацию электронных модулей (ЭМ), предназначенных для автоматизированной сборки в ГАСК, к условиям ГАСК; 4. Составление списка альтернативных марок сборочных средств (оборудования АТО, оснастки СТО); 5. Формирование требований, ограничений, накладываемых на операцию сборки (АТОП); 6. Определение перечня переходов, выполняемых на данном оборудовании (АТО); 7. Выбор и расчет схемы базирования, расчетной системы координат для перехода; 8. Объединение переходов в операцию и формирование альтернативных вариантов; 9. Расчет точности совмещения выводов ЭК с элементами печатного монтажа платы и сравнение с допусками; 10. Отсев вариантов, не прошедших тест; 11. Оптимизацию очередности монтажа ЭК на плату; 12. Определение трудоемкости сборки, производительности, постоянных и переменных производственных затрат на технологические и транспортные операции; 13. Учет ограничений на производственные затраты и отсев вариантов, не прошедших тест; 14. Определение эффективности оставшихся вариантов операций ( $P_{оп}$ ); 15. Выбор оптимальной операции, у которой  $P_{оп} = P_{оп \max}$  (вместе с ней выбор оптимальной марки АТО и СТО); 16. Разработку для оптимальной операции операционных карт и управляющих технологических программ УТП.

**Требования, предъявляемые автоматизацией к проектированию операций сборки электронных модулей.** Проектирование операций сборки ЭМ, выполняемых на автоматах ГАСК, должно быть автоматизированным, многовариантным, с использованием методов оптимизации. Это, в свою очередь, связано с методами синтеза и анализа, оптимизации; формализацией информации об изделии ЭМ, компонентах, технологии (переходах, операциях) и средствах сборки (АТО, СТО); разработкой правил проектирования (алгоритмов); синтезом моделей альтернативных вариантов операций (переходов); формированием моделей оптимальных операций (переходов); автоматизированной разработкой технологической документации на операцию.

Автоматизированное проектирование сборочных операций ГАСК уменьшает трудоемкость, многовариантное - увеличивает объективность принимаемых технологических решений, оптимизационное - повышает их эффективность.

**Метод синтеза АТОП и их элементов** [см. также 18]. Основными требованиями, которым должен удовлетворять выбираемый метод синтеза, являются: 1. Простота формализации и реализации метода; 2. Возможность синтеза индивидуального техпроцесса АТП автоматизированной сборки каждого типа изделий ЭМ; 3. Создание множества (конечного) вариантов АТП; 4. Просмотр каждого варианта АТП из множества; 5. Автоматизация проектирования.

Существующие методы (повторного, вариантного, адаптивного планирования и традиционные методы синтеза) в полной мере не отвечают этим требованиям [18]. Для проектирования операций сборки ЭМ в ГАСК был разработан новый метод синтеза. В его основе лежат следующие принципы: 1. Классификации

объектов проектирования; 2. Дробление объектов проектирования на типовые элементы - признаки; 3. Множества признаков разделены на шаблоны и модели (шаблон описывает типовой элемент, модель - индивидуальный); 4. Множества признаков при формализации объекта определяют набор его характеристик, положение, связи в общей иерархии объектов; 5. Синтез заключается в отображении структурных связей между изделием и информацией конструкторско-технологической базы знаний (КТ БЗ) по правилам проектирования; 6. В КТ БЗ находятся признаки, шаблоны, начальные модели и правила проектирования (авторские алгоритмы); 7. Правила проектирования есть формализованное описание совокупности действий, в результате которых формируются множество признаков и модель объекта; 8. Очередной вариант объекта получается на каждом шаге полного перебора конечного множества вариантов (для него определяются множество признаков и связи в общей иерархии).

Метод анализа. Метод оптимизации должен обеспечить просмотр всего списка вариантов моделей операций, быть простым в формализации и использовании, иметь приемлемую трудоемкость. Для ГАСК сборки ЭМ с конечным множеством вариантов лучше других подходит метод полного перебора.

Критерий оптимизации должен быть объективным и учитывать: а) особенности собираемых изделий; особенности производства, технологических средств сборки; б) при выборе оборудования учитывать его фактическую загрузку  $K_3$ , точность (выход годных изделий  $K_{ТП}$ ), надежность (готовность к работе  $\rho$ ), трудоемкость, производительность, производственные затраты; в) быть пригодным для выполнения дифференцированного анализа технологических элементов АТП - операций, переходов; г) оперативно и комплексно оценить все варианты технологических операций (переходов), полученные при синтезе; д) обеспечить возможность выбора лучшего (оптимального) варианта; е) иметь формулы (механизмы) расчета всех составляющих комплексного показателя; ж) быть легко формализуемым; з) иметь возможность использовать комплексный показатель для совершенства изделий и средств сборки; и) ориентированность на рыночную экономику.

#### **Методы**

Существующие в машино- и приборостроении <sup>методы</sup> в полной мере не отвечают этим требованиям. В частности, они не учитывают в явном виде номенклатуру производства, особенности собираемых изделий, особенности сборочных средств. Предложенный метод (ТЭО) технико-экономической оценки [более подробно см. 18] и комплексные показатели эффективности (Р), разработанные на его основе, позволяют: 1. Оперативно и комплексно оценить технологические решения по АТП, структурам ГАСК и их элементам; 2. Они учитывают номенклатуру  $N_A$ , годовой объем выпуска  $N_{ЭМ}$ , форму запуска изделия в производство; особенности изделий (структурный состав ЭМ, тип, количество компонентов  $N_{ЭКЭМ}$ , их расположение на плате, вид монтажа); особенности технологических средств сборки (оборудования АТО, оснастки СТО); 3. При выборе оборудования позволяют учесть точность, фактическую загрузку  $K_3$ , выход годных изделий  $K_{ТП}$ , готовность к работе  $\rho$ , трудоемкость, производительность, производственные затраты (в том числе на подготовку производства и на незавершенное производство). 4. Позволяют выполнить дифференцированно анализ АТП, структур ГАСК и их элементов.

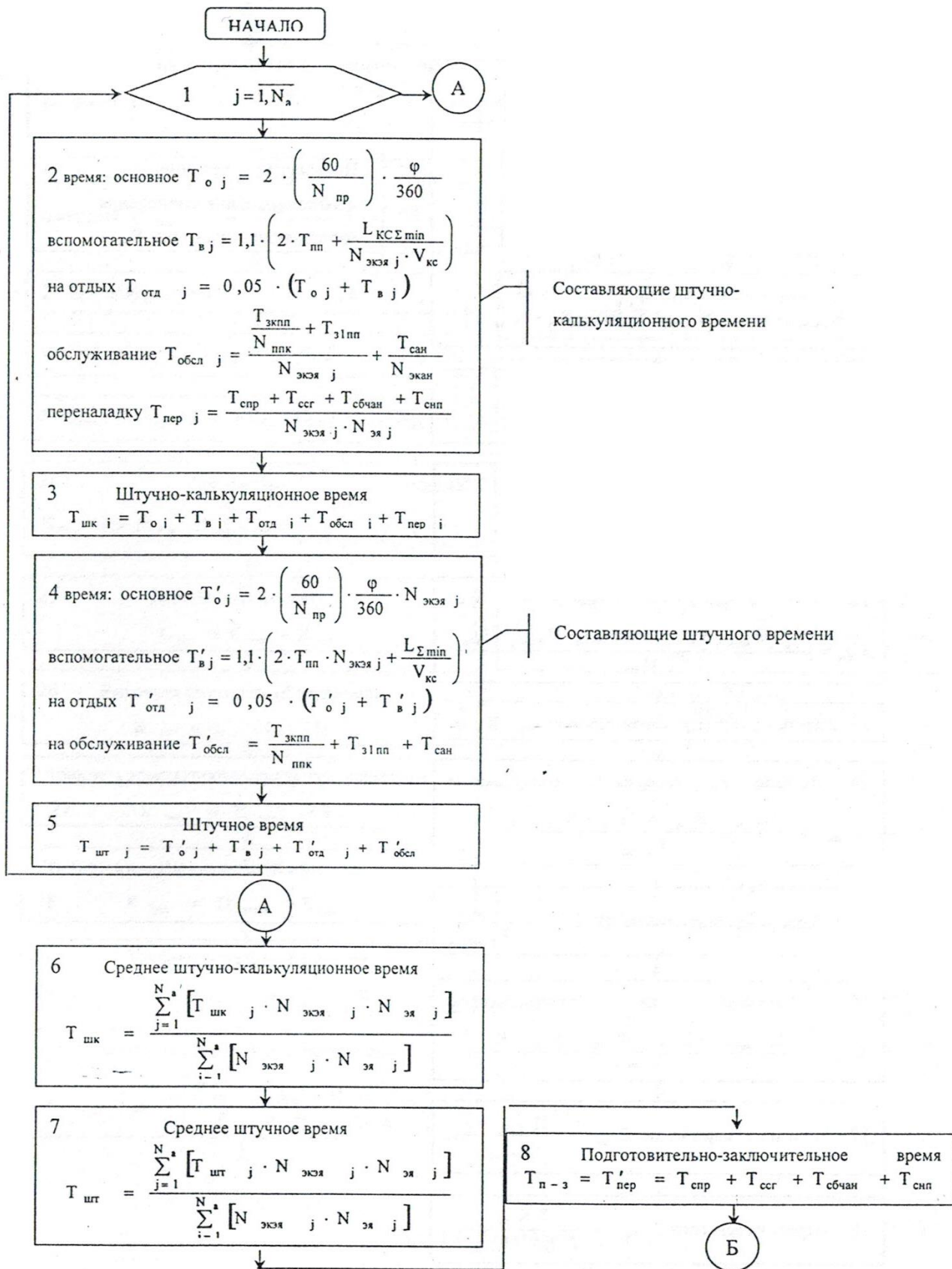


Рис. 1. Алгоритм расчета комплексного показателя эффективности операций сборки  $P_{оп}$

$$9 \quad N_{\text{ЭКЭЯ}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_a} [N_{\text{ЭКЭЯ } j} \cdot N_{\text{ЭЯ } j}]}{\sum_{j=1}^{N_a} [N_{\text{ЭЯ } j}]};$$

$$N_{\text{ЭКЭЯ}} \cdot N_{\text{ЭЯ}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_a} [N_{\text{ЭКЭЯ } j} \cdot N_{\text{ЭЯ } j}]}{N_a};$$

$$N_{\text{ЭКЭЯ}} \cdot N_{\text{ЭЯ}} \cdot N_a = \sum_{j=1}^{N_a} [N_{\text{ЭКЭЯ } j} \cdot N_{\text{ЭЯ } j}]$$

Произведения величин,  
необходимые для вычисления  
составляющих критерия  $P_{\text{оп}}$

$$10 \quad \text{Затраты на 1 ЭК } C_{1\text{ЭК}} = \left( \text{Ц}_{1\text{ЭК}} + \frac{\text{Ц}_{1\text{ПП}}}{N_{\text{ЭКЭЯ}}} \right) \cdot \frac{1}{n_{\text{оп}}}$$

$$11 \quad \text{Затраты на подготовку УТП}$$

$$C_{\text{УТП}} = \frac{3_{\text{мпр}} \cdot T_{\text{р1уп}}}{F_{\text{м.эф}} \cdot N_{\text{ЭКЭЯ}} \cdot N_{\text{ЭЯ}}}$$

$$12 \quad \text{Затраты на брак}$$

$$C_{\text{бр}} = \frac{N_{\text{бр}} \cdot C_{\text{зрем}} \cdot T_{\text{исп1эя}} + 0,9 \cdot n_{\text{бр}} \cdot N_{\text{ЭКЭЯ } j} \cdot \text{Ц}_{1\text{ЭК}}}{N_{\text{ЭКЭЯ}}}$$

$$13 \quad \text{Затраты на зарплату основн. рабочего } C_{\text{з}} = K_{\text{н}} \cdot \varphi$$

$$14 \quad \text{Затраты на содержание оборудования}$$

$$C_{\text{об}} = \frac{(\text{Ц}_{\text{м}} \cdot R_{\text{м}} + \text{Ц}_{\text{з}} \cdot R_{\text{з}}) \cdot \mu}{F_{\text{г.эф}}}$$

$$15 \quad \text{Затраты на обслуживание ПУ } C_{\text{пу}} = \frac{\text{Ц}_{\text{пу}}}{F_{\text{г.эф}}}$$

$$16 \quad \text{Затраты на электроэнергию}$$

$$C_{\text{эл}} = \frac{\text{Ц}_{1\text{квтч}} \cdot K_{\text{ам}} \cdot K_{\text{аб}} \cdot N_{\Sigma} \cdot K_i}{\eta}$$

$$17 \quad \text{Затраты на амортизацию } C_{\text{ам}} = \frac{\text{Ц}_{1\text{об}} \cdot a}{F_{\text{г.эф}}}$$

$$18 \quad \text{Затраты на оснастку } C_{\text{осн}} = \frac{\Sigma K_{\text{пр}}}{Z_{\text{осн}} \cdot F_{\text{г.эф}}}$$

В

Рис. 1 (продолжение)

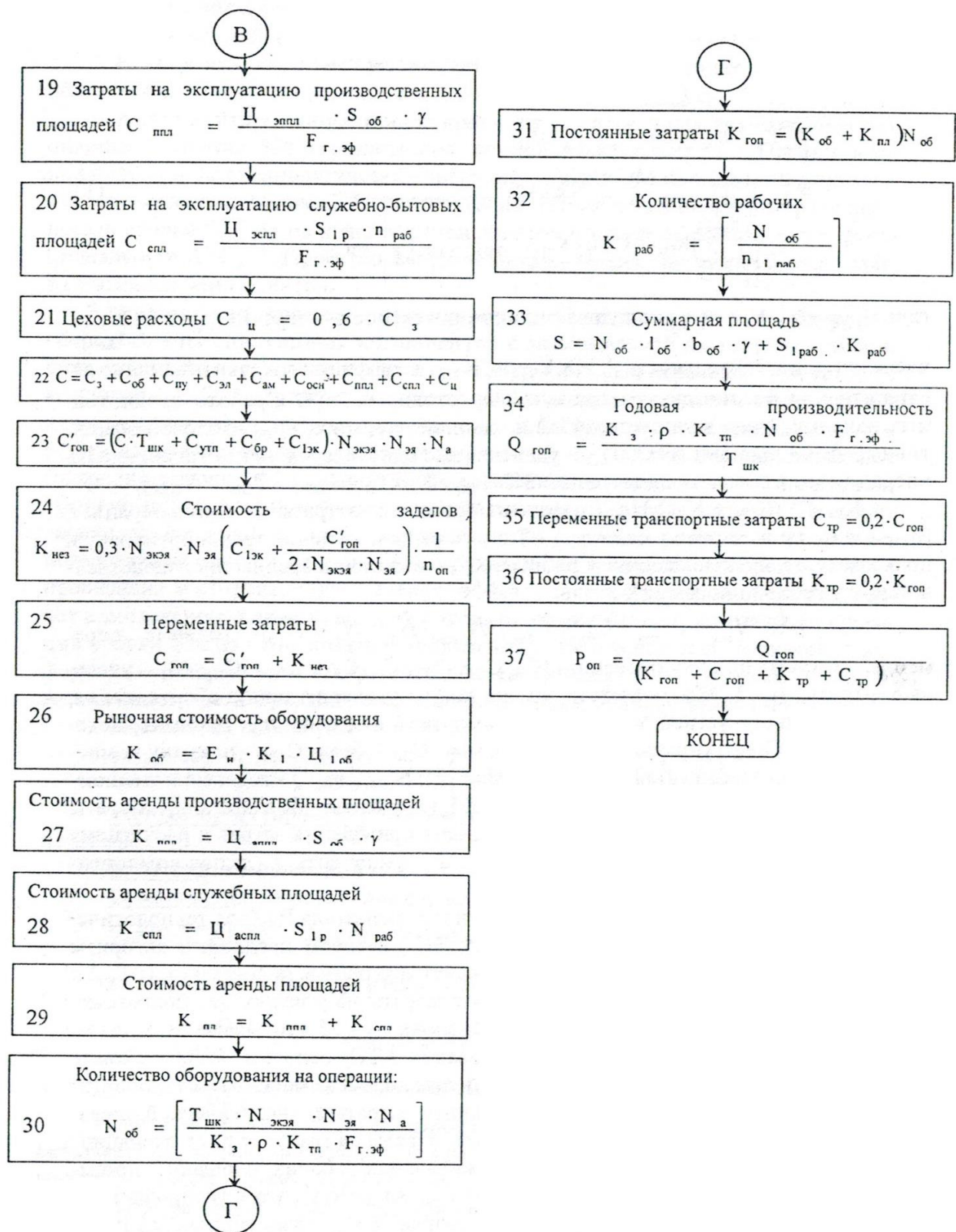


Рис. 1 (окончание)

Это сведено в комплексный показатель эффективности Р (для операций -  $P_{оп}$ , подструктур -  $P_{к1}$ , структур -  $P_{к2}$ ):  $P_{оп} = \frac{Q_{зон}}{(K_{зон} + C_{зон} + K_{мп} + C_{мп})}$

$$P_{к1} = \frac{Q_{зонmin}}{\left\{ \sum_{i=1}^{n_{оп}} [K_{зон} + K_{мп} + C_{зон} + C_{мп}] + C_{мр} \cdot N_a \right\}}$$

$$P_{к2} = \frac{Q_{гопmin}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_{эк}} \sum_{i=1}^{n_{оп}} [K_{гоп} + C_{гоп} + K_{тп} + C_{тп}] + C_{тп} \cdot N_a \right\} \cdot K_{и}} \quad (1)$$

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

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

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

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

Для автоматизации расчета комплексного показателя  $P_{оп}$  (для технологической операции сборки ЭМ из однотипных ЭК) автором предложен алгоритм (рис.1), в котором блоки 2 ÷ 9 выполняют расчет трудоемкости сборки ( $T_{шк}, T_{шт}$ ) и ее составляющих; блоки 10 ÷ 12 определяют затраты на покупку ЭК, подготовку управляющей программ, исправление брака; блоки 13 ÷ 25 учитывают расходы на зарплату рабочих, эксплуатацию оборудования АТО, оснастки СТО, цеховые расходы, незавершенное производство и в целом переменные затраты технологической операции; блоки 26 ÷ 29, 31 - постоянные затраты технологической операции; блоки 35, 36 - постоянные и переменные затраты на транспортные операции; блоки 30, 32 ÷ 34 - количество АТО, обслуживающих рабочих, площадь и производительность операции; блок 37 - значение  $P_{оп}$ . Алгоритм автоматизированного расчета  $P_{оп}$  для технологической операции сборки ЭМ из разнотипных ЭК представлен на рис.1.

Для создания моделей оптимальных операций (переходов) ГАСК кроме методов синтеза и анализа (ТЭО) необходимы: методы обеспечения точности, на-



дежности, оптимизации, критерий оптимизации и ограничения, накладываемые на операцию (переход).

Более подробно о методах синтеза, анализа (ТЭО); методах определения и обеспечения точности и надежности (по  $\lambda$  - характеристикам) см. Л [18].

**Автоматизированное проектирование оптимальных технологических операций сборки ЭМ** из разнотипных компонентов состоит из: 1. Проектирования оптимальных технологических операций сборки ЭМ из однотипных компонентов с использованием; 2. Проектирования оптимальных подструктур (техпроцессов сборки ЭМ из однотипных компонентов с использованием много функционального АТО); 3. Проектирования технологических операций сборки ЭМ из разнотипных компонентов.

**Автоматизированное проектирование технологических операций сборки ЭМ из однотипных компонентов с максимальной их концентрацией и оптимизацией очередности** включает: 1. Синтез простых переходов (для каждого компонента ЭК); 2. Проверку соответствия вариантов переходов на точность, надежность, производственные затраты с использованием назначенной оснастки (отсев вариантов, не прошедших тестирование); 3. Синтез сложных переходов (операций сборки ЭМ из однотипных компонентов с максимальной их концентрацией на технологическом модуле и оптимизацией очередности); 4. Проверку вариантов операций на точность, надежность, производственные затраты с использованием одно операционного оборудования и оснастки (отсев вариантов, не прошедших тестирование); 5. Оценку эффективности вариантов операций (расчет комплексного показателя  $P_{оп}$ ); 6. Формирование модели оптимальной операции сборки ЭМ из однотипных компонентов; 7. Получение технологической информации (операционные карты ОК, блоки управляющих программ УТП); 8. Аналогичное проектирование операций подготовки, пайки, отмывки и контроля.

Постановка задачи [17]:

$$\left( \bar{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)}, \left\{ C_{imkn}^{(p)} \left( T_{i\text{оп}}^{(p)} \right) \right\} \right) = \arg \max \left[ P_{оп} \left( \bar{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)}, \left\{ C_{imkn}^{(p)} \left( T_{i\text{оп}}^{(p)} \right) \right\} \right) \right] \quad (2)$$

Методы проектирования: синтеза, технико-экономической оценки, полного перебора.

Критерий: комплексный показатель эффективности операций  $P_{оп}$ .

Ограничения: на переменные и постоянные затраты по операции

$$C_{зос}(\bar{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)}) \leq [C_{зос}], \quad K_{гоп}(\bar{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)}) \leq [K_{гоп}], \quad \delta_{мо}(C_{imkn}^{(p)}) \leq [\delta_{мо}] \quad (3)$$

$$F_y(C_{imkn}^{(p)}) \geq [F_y], \quad P_{\delta p}(t_{\delta p})(C_{imkn}^{(p)}) \geq [P_{\delta p}], \quad T_{cp}(C_{imkn}^{(p)}) \geq [T_{cp}], \quad \delta_c(T_{ivl}^{(p)}) \leq [\delta_c],$$

$$T_{cp.ATQ}(T_{ivl}^{(p)}) \geq [T_{cp.ATQ}], \quad P_{ATQ}(t_{\delta p})(T_{ivl}^{(p)}) \geq [P_{ATQ}(t_{\delta p})],$$

где  $\bar{O}_{iv}^{(p)}$ ,  $T_{iv}^{(p)}$ ,  $C_{imkn}^{(p)}$  - модели операций, оборудования, оснастки.

Синтез простых переходов выполняется для каждого компонента ЭК. Он включает: формирование множества шаблонов операций, переходов, признаков модели перехода; выбор схемы базирования; назначение (по шаблону) на переход множества видов технологической оснастки (СТО); перебор множеств шаблонов и выбор очередного на каждом шаге; определение признаков множества моделей СТО; выполнение расчетов множества моделей СТО (конструктивных параметров, энергетических, точности, надежности, трудоемкости, стоимости); назначение множества моделей СТО на переход.

**Проверка соответствия** вариантов переходов на точность совмещения, надежность монтажа, производственные затраты с использованием оснастки; отсев вариантов, не прошедших тестирование [если назначенная серийная технологическая оснастка СТО не отвечает требованиям ГАСК (что возможно в условиях ограниченного ассортимента), то происходит проектирование СТО с требуемыми (или близкими к ним) характеристиками].

Синтез операций (сложных переходов) выполняется для всех типов компонентов ЭК и содержит следующие действия: формирование по шаблону признаков модели операции; объединение множества простых переходов в операции с максимальной концентрацией; назначение на операцию множества моделей оборудования (АТО); оптимизация очередности; выполнение цикла по всем маркам АТО; формирование и перебор множества совокупности оснастки и оборудования; назначение на операцию совокупности СТО и АТО; расчет точности, надежности, производственных затрат по операции; сравнение их с допусками; отсев вариантов, не прошедших тестирование [если назначенное серийное технологическое оборудование АТО не отвечает требованиям ГАСК (что возможно в условиях ограниченного ассортимента АТО), то предлагается модернизация назначенной пользователем марки АТО до получения требуемых (или близких к ним) характеристик]; цикл по операциям; расчет основных характеристик и эффективности ( $P_{оп}$ ) вариантов операции.

Формирование модели оптимальной операции сборки из однотипных компонентов содержит: ранжирование вариантов по значениям  $P_{оп}$  и предварительный; выбор лучшего варианта операции (оптимальной), у которого  $P_{оп} = P_{опмакс}$ ; формирование признаков полной модели оптимальной операции сборки ЭМ из однотипных компонентов.

Одной из важных задач проектирования оптимальных операций сборки ЭМ является определение оптимальной очередности монтажа ЭК на плату. Остановимся на этом подробнее.

**Оптимизация очередности монтажа компонентов ЭК на плату** заключается в нахождении варианта последовательности монтажа, при котором суммарный путь координатной системы (КС) будет минимальным ( $L_{\Sigma КС} = L_{\Sigma КС мин}$ ). Расчет суммарного пути КС с платой (ПП)  $L_{КС \Sigma}$  АТО и оптимизация последовательности установки компонентов ЭК типа  $\bar{X}^{(p)}$  на плату выполнены методом многоугольника по критерию  $L_{КС \Sigma} \rightarrow \min$ . Задача оптимизации последовательности монтажа ЭК на плату решена как задача о назначениях. Ее решение сводится к поиску маршрута с минимальным суммарным путем КС АТО ( $L_{КС \Sigma} \rightarrow \min$ ) при учете ограничений (отсутствие петель в траектории, заход в место установки компонента не более одного раза). Метод оптимизации был выбран по точности и трудоемкости расчета  $L_{\Sigma КС}$ . Для этого автором были проведены исследования для ЭМ с 12-ю компонентами. Точность и трудоемкость расчета оценивалась по методу полного перебора для методов попарных перестановок, ближнего соседа, многоугольника и разных их сочетаний. По результатам исследований (рис. 2 и 3) лучше других оказался метод многоугольника (как наиболее точный и менее трудоемкий).

Запишем это в виде произведения матриц расстояний и последовательности обхода мест установки ЭК:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (4)$$

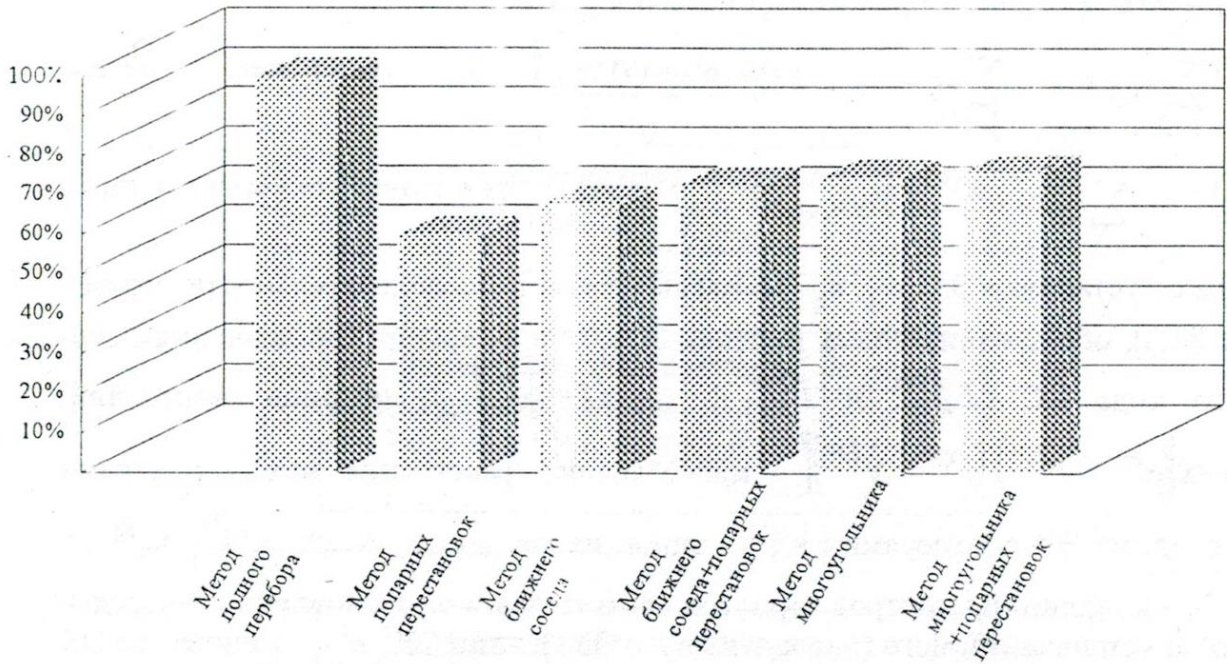


Рис. 2. Оценка точности расчетов последовательности монтажа компонентов на плату различными методами оптимизации

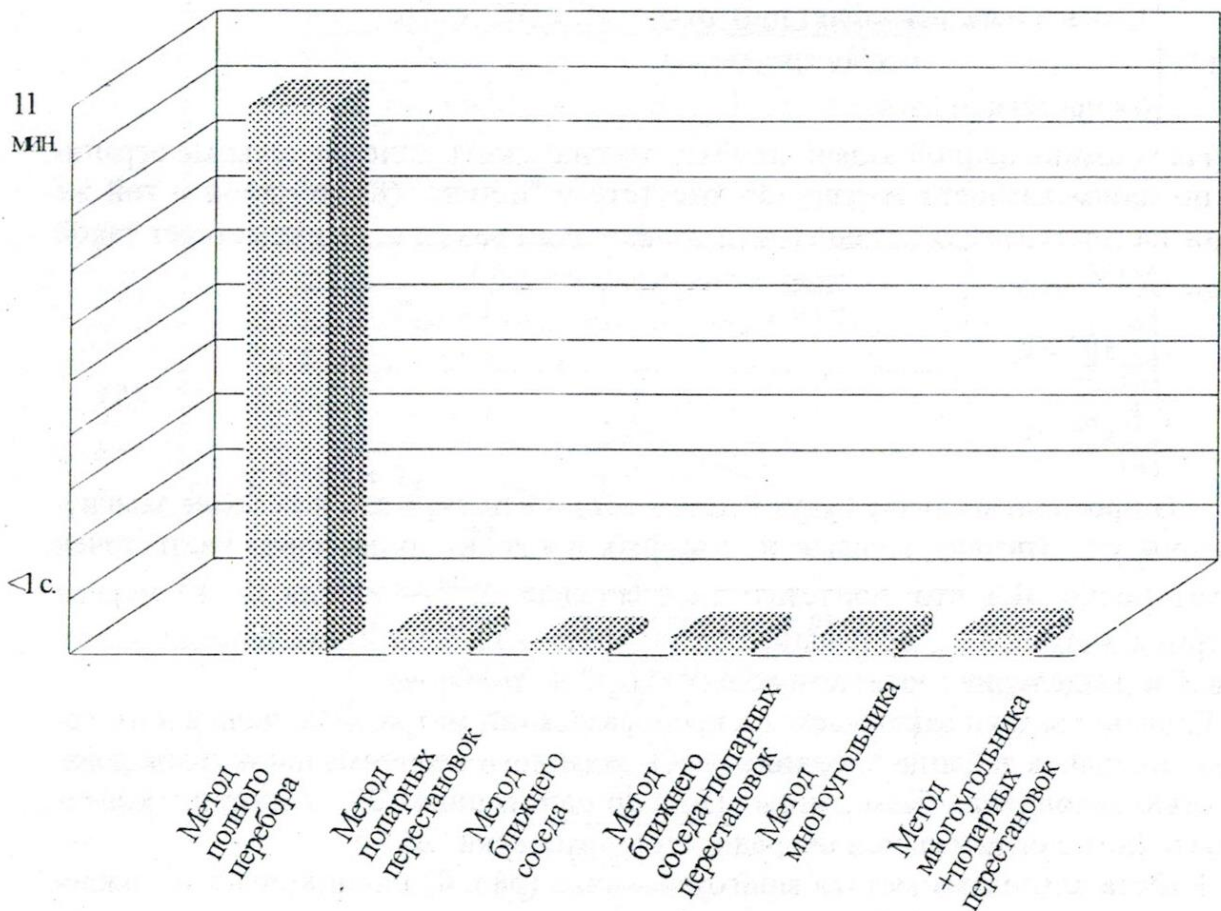


Рис.3. Оценка трудоемкости расчетов последовательности монтажа компонентов на плату разными методами оптимизации

ограничения: заход КС в одну позицию - один раз

$$\left( \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad j=1,2,\dots,n; x_{ij} = 0,1 \forall i,j \right) \quad \text{и} \quad \text{отсутствие} \quad \text{петель}$$

$\left[ \left( \sum_{i=1}^k x_{ij}^{(k)} = 1, \quad \sum_{j=1}^k x_{ij}^{(k)} = 1, \quad X^{(k)} = \|x_{ij}\|_{k \times k}, \quad k < n \right) \right]$  каждая из которых охватывает 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 ( $L_{КС\Sigma}^{неопт}$  и  $L_{КС\Sigma}^{опт}$ )]; где:  $D = \|d_{ij}\|_{n \times n}$  - матрица расстояний;

$d_{ij} = \max \left\{ \left( x^{x_i^{(p)}} - x^{x_j^{(p)}} \right) \left( y^{x_i^{(p)}} - y^{x_j^{(p)}} \right) \right\}$  - максимальное расстояние между центрами двух соседних ЭК с номерами  $i$  и  $j$  по одной из координат  $(x, y)$ ;  $x^{x_i^{(p)}}$ ,  $x^{x_j^{(p)}}$ ,  $y^{x_i^{(p)}}$ ,  $y^{x_j^{(p)}}$  - координаты центров корпусов соответственно установленного (предыдущего) и устанавливаемого (последующего) ЭК;  $p$  - тип ЭК;  $n$  - количество ЭК данного типа  $\bar{X}^{(p)}$  в ЭМ, устанавливаемых на плату (ПП) в данной сборочной операции  $\tilde{O}_i^{(p)}$ ;  $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$  - матрица последовательности обхода мест установки

$$ЭК, \quad x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если в маршрут входит путь от ЭК } x_i^{(p)} \text{ к ЭК } x_j^{(p)}; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

На решение данной задачи необходимо наложить дополнительные ограничения по односвязности маршрута - отсутствие "петель" (КС в одной и той же позиции на плате может остановиться только один раз), т.е. не существует такой матрицы  $X^{(k)}$ , что:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k x_{ij}^{(k)} = 1; \\ \sum_{j=1}^k x_{ij}^{(k)} = 1. \end{cases} \quad (5)$$

В противном случае будут иметь место не один, а два или более замкнутых маршрута (петли), каждый из которых проходит лишь через часть точек (мест установки ЭК), что допустить нельзя (здесь  $X^{(k)}$  - любая  $(k \times k)$  мерная подматрица матрицы  $X$ , полученная в результате выбора  $k$  диагональных элементов  $X$  и выделения соответствующих строк и столбцов).

Решение задачи заключается в преобразовании матрицы  $X$  начального состояния (исходная таблица координат ЭК), заданного неоптимальной последовательностью заполнения базы данных (БД) по однотипным ЭК, в матрицу конечного состояния с оптимальной очередностью установки ЭК.

Работа алгоритма метода многоугольника (рис. 4) начинается с нахождения в матрице расстояний  $D$  треугольника с минимальным периметром, т.е. нахождения точек  $i_1, i_2, i_3 \in P$  таких, что:

$$D_{i_1 i_2} + D_{i_2 i_3} + D_{i_3 i_1} = \min_{i \neq j, j \neq k, k \neq i} (D_{ij} + D_{jk} + D_{ki}), \quad i, j, k \in P \quad (6),$$

где:  $P$  - множество индексов ЭК типа  $\bar{X}^{(p)}$  в составе ЭЯ,  $|P| = n$ .

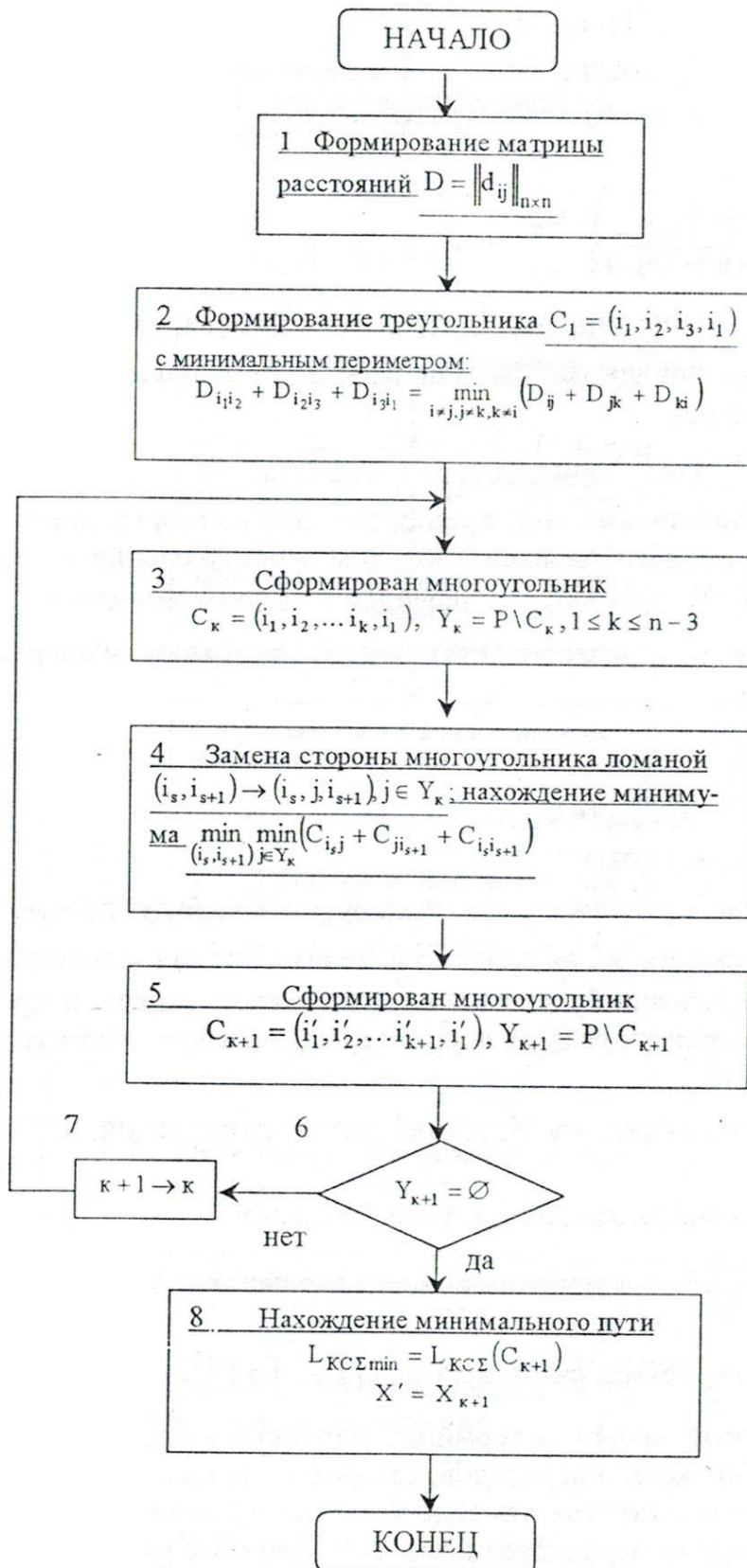


Рис. 4. Алгоритм метода многоугольника

Общий шаг алгоритма. Пусть построен многоугольник  $C_k = (i_1, i_2, \dots, i_k, i_1)$ .  
 $Y_k = P \setminus C_k$ ,  $C_1 = (i_1, i_2, i_3, i_1)$ ,  $1 \leq k \leq n - 3$ .

Многоугольник  $C_k$  соответствует состоянию маршрутной матрицы  $X_k$  [с произвольной (не оптимальной) последовательностью ЭК] такому, что:

$$X_k = \left\| x_{ij} \right\|_{n \times n};$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (i, j) = (i_{k-1}, i_k) \in C_k; \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Вычислим удлинение стороны  $(i_s, i_{s+1})$  многоугольника при ее замене ломаной  $(i_s, j, i_{s+1})$ ,  $j \in Y_k$ ; найдем минимум по всем  $j \in Y_k$  и затем минимум по всем сторонам многоугольника:

$$\min_{(i_s, i_{s+1})} \min_{j \in Y_k} (C_{i_s j} + C_{j i_{s+1}} + C_{i_s i_{s+1}}) \quad (7)$$

В результате выполнения этой процедуры одна из сторон многоугольника заменится ломаной из двух звеньев; получим многоугольник с вершинами  $C_{k+1} = (i'_1, i'_2, \dots, i'_{k+1}, i'_1)$ ,  $Y_{k+1} = P \setminus C_{k+1}$  и перейдем к следующему шагу.

Многоугольник  $C_{k+1}$  соответствует новому состоянию маршрутной матрицы  $X_{k+1}$ , такому, что:

$$X_{k+1} = \left\| x_{ij} \right\|_{n \times n}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (i, j) = (i'_k, i'_{k+1}) \in C_{k+1}; \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Работа алгоритма продолжается до тех пор, пока не будут просмотрены все точки (места) расположения ЭК на плате (т.е. до выполнения условия  $Y_{k+1} = \emptyset$ ). Выполнение данного условия будет означать, что задача решена и кратчайшим маршрутом является маршрут, равный периметру полученного многоугольника:

$$L_{\text{КС}\Sigma \text{min}} = L_{\text{КС}\Sigma}(C_{k+1}) \quad (8)$$

При этом матрица маршрута  $X_{k+1}$  становится оптимальной  $X'$ :

$$X' = X_{k+1} \quad (9)$$

Образуются два новых признака модели операции:

$$L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{неопт}}(\tilde{O}_i^{m(p)}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (\text{суммарный неоптимальный ход КС})$$

$$\text{и } L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{опт}}(\tilde{O}_i^{m(p)}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x'_{ij} \quad (\text{суммарный оптимальный ход КС}) \quad (10)$$

При решении этой задачи (в терминах шаблонов и моделей) необходимо строго упорядочить множество переходов, которое получается при объединении простых переходов, а его строгая упорядоченность достигается сортировкой записей таблицы «Модели переходов» в соответствии с матрицей оптимального маршрута  $X'$  по значению связанных полей.

Формирование информации для операционных карт (ОК) проследим по алгоритму (рис. 5). Основная задача алгоритма заключается в представлении информации, полученной в результате проектирования операций (АТОП с КРП) технологического процесса АТП сборки в ГАСК, в формат операционной карты ОК (Гост 3.1407 – 74, форма 2). Алгоритм содержит тринадцать блоков.

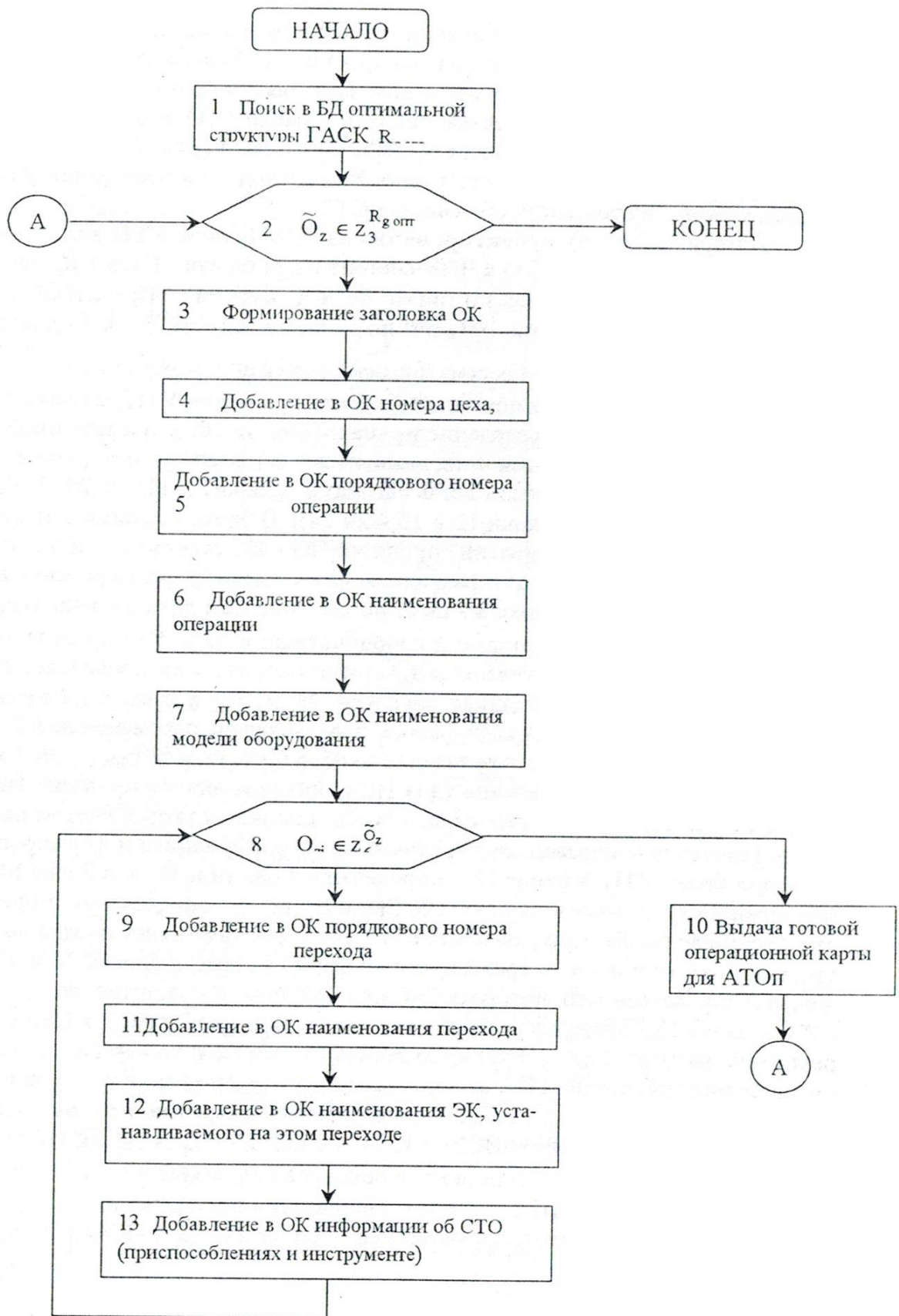


Рис. 5. Алгоритм автоматизированного формирования операционных карт сборки ячеек ЭМ в ГАСК

В блоке 1 алгоритма происходит поиск в базе данных (БД) оптимальной структуры ГАСК. В блоке 2 организован цикл по шаблонам операций структуры; в блоке 3 происходит добавление к ним заголовка; в блоках 4 - 7 указываются соответственно № № цеха, участка, операции, марки АТО. В блоке 8 происходит цикл по моделям операций, в блоке 9 - выдача готовой карты ОК. В блоках 10 - 13 происходит добавление соответственно № перехода, наименования перехода, компонента ЭК, информации об оснастке СТО.

Алгоритм (рис. 6) проектирования на ЭВМ блоков УТП для монтажа на плату различных ЭК для АТО с ЧПУ состоит из 24 блоков. Блок 1 предназначен для перебора компонентов ЭК по типам  $X^{(p)} \in X$  в составе ЭМ; блок 2 - для перебора операций в множестве  $\bar{O}_i^{(p)} \in \bar{O}^{(p)}$  по данному типу ЭК; блок 3 - для проверки условия принадлежности рассматриваемой операции к монтажной  $z_5^{(p)} \in N_{\text{монт}}$ . В блоке 4 происходит формирование базовых признаков УТП, в блоке 5 - заголовок УТП, в блоке 6 - определение принадлежности ЭК к той или иной группе [например, к ЭРЭ с осевыми выводами левая ветвь алгоритма (блоки 7 ÷ 11, 17 ÷ 19, 21); ИС2 - то же [левая ветвь алгоритма (блоки 7 ÷ 11, 18, 20, 21)]; ИС4 - [правая ветвь алгоритма (блоки 12 ÷ 16, 22 ÷ 24)]. В блоке 7 происходит запись № ЭМ, (для ЭРЭ и ИС2) определение привязки ПП к КС станка по X и Y, определения квадранта S; перевод в пятиразрядную форму записи; формирование первого кадра блока УТП  $F_i^{(p)}$ ; в блоке 8 - цикл по компонентам данного типа (группы) с их геометрическими параметрами и координатами; в блоке 9 - определение перемещений КС по X и Y с учетом результатов оптимизации последовательности монтажа ЭК, пересчет координат корпусов ЭК из мм в шаги с пятиразрядной формой записи; в блоке 10 - вычисление и кодирование перемещения СГ по высоте (размер  $h_y$ ); в блоке 11 - выявление необходимости установки ЭК с контролем; в блоке 12 - представление (для ИС4) информации по привязке ПП к КС станка по осям X и Y в форме целого числа шагов и остатка с учетом направления перемещения, перевод ее в трехразрядную форму записи и формирование 1-го кадра блока УТП; в блоке 13 - определение кода типа ИС4; в блоке 14 - перебор компонентов ИС4 в составе ЭК ЭМ; в блоке 15 - определение информации для перемещения КС при монтаже ИС4 с учетом оптимизации последовательности, пересчет ее в шаги и трехразрядную форму записи; в блоках 16 и 17 - определение необходимости поворота ЭК при монтаже соответственно для ИС4 и ЭРЭ; в блоке 18 - проверка условия вхождения ЭК в группу ИС2; в блоке 19 - определение размера Z (для ЭРЭ) и его запись в пятиразрядной форме; в блоке 20 - определение ориентации ИС2 при монтаже и соответствующих такой ориентации номеров кассет; в блоках 21 и 22 - формирование очередного кадра блока УТП  $F_i^{(p)}$  соответственно для ЭРЭ (ИС2) и ИС4; в блоке 23 - (для ЭРЭ и ИС2) определение перемещений для возврата КС в исходное положение по X и Y в форме целого числа шагов и остатка с учетом направления перемещения и перевод информации в пятиразрядную форму записи; в блоке 24 - (для ИС4) формирование последнего кадра блока УТП.



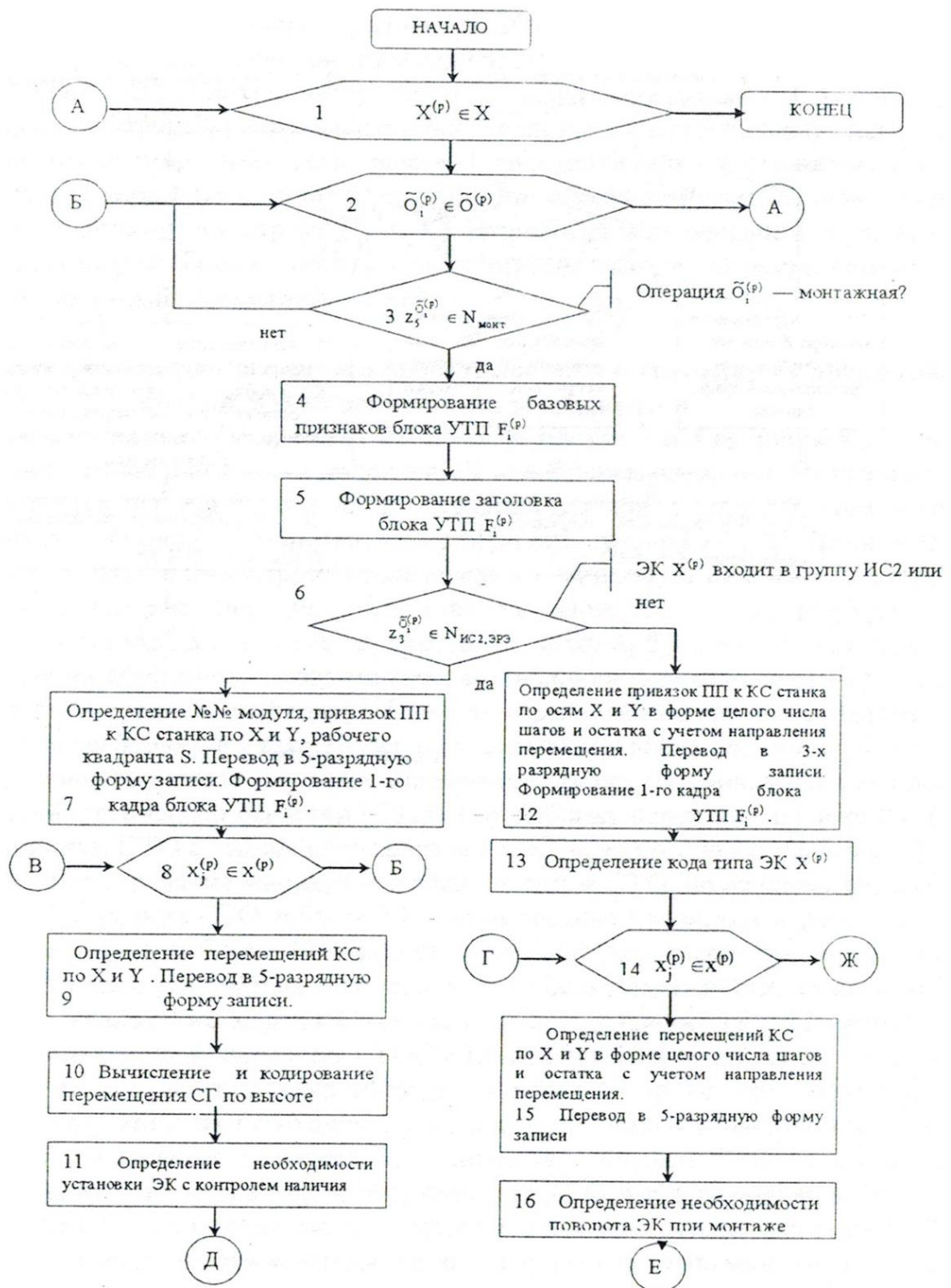


Рис. 6. Алгоритм формирования блоков УТП монтажа ЭК на плату для АТО с ЧПУ

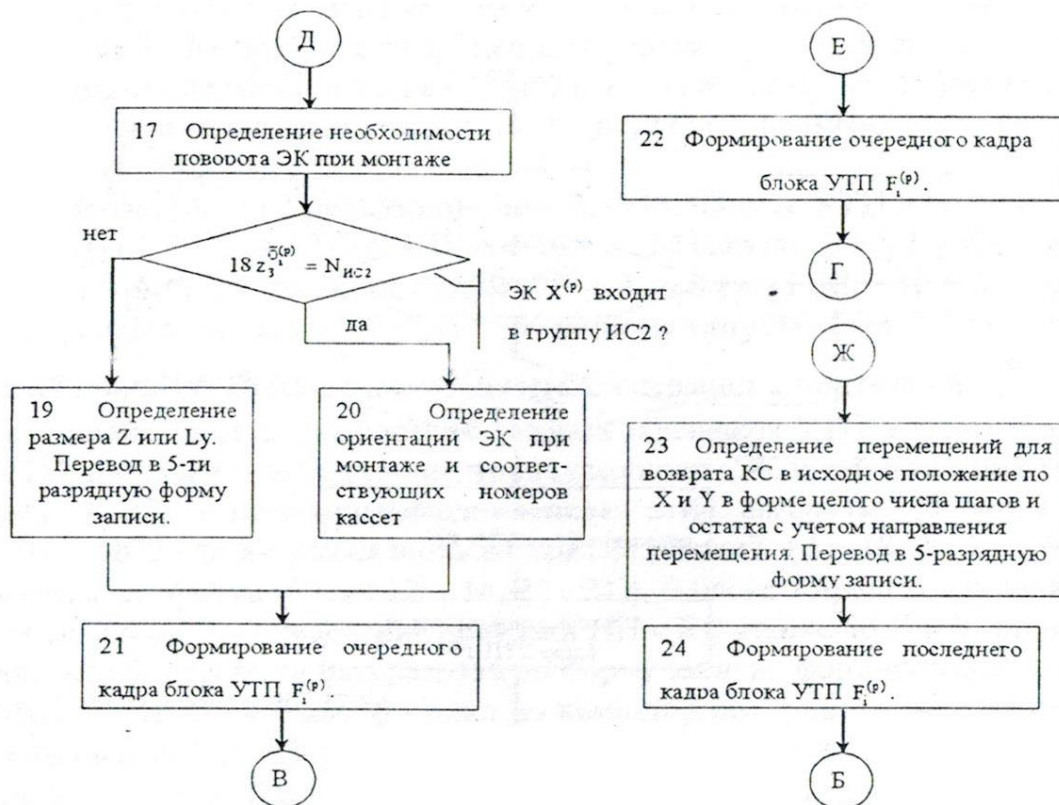


Рис. 6 (окончание)

## Формирование оптимальной операции сборки ЭМ

Формирование оптимальной операции сборки электронных модулей из однотипных электронных компонентов выполняется при анализе всех альтернативных вариантов, оценке их точности, надежности, определении и сравнении эффективности (по  $P_{оп}$ ), выборе варианта с наибольшей эффективностью, разработке операционных карт и блоков управляющих программ.

Окончательно оптимальная операция сборки электронных модулей из разнотипных электронных компонентов определяется на завершающей стадии проектирования оптимального техпроцесса сборки (оптимальной структуры ГАСК), где учтены варианты с многооперационным оборудованием (на основе оптимальных подструктур и структур ГАСК). Разработка этих операций, а также операционных карт и блоков управляющих программ выходит за рамки данного пособия, но их можно посмотреть в Л. 17.

### Алгоритм автоматизированного проектирования оптимальных операций сборки ЭМ из однотипных компонентов

Алгоритм (рис.7) содержит 22 блока. В блоках 1 и 3 выполняются циклы по моделям типов и видов компонентов ЭК и шаблонам операций. На каждом шаге выбирается очередной тип ЭК и очередной шаблон. В блоке 2 формируется множество шаблонов операций по всему техпроцессу сборки (АТП) сборки ЭМ; в блоке 4 - формирование строго упорядоченного множества шаблонов переходов, входящих в шаблон операции на основе ЭК. Блоки 5 - 12 предназначены для формирования множества моделей переходов: в блоке 5 - цикл по всем шаблонам переходов из сформированного множества шаблонов переходов с выбором на каждом шаге очередного шаблона; в блоке 6 - формирование признаков модели перехода (по шаблону); в блоке 7 - выбор схемы базирования для платы, формирование признаков модели перехода, назначение на переход множества шаблонов видов технологической оснастки (СТО) (по шаблону перехода); в блоке 8 - цикл по всем видам СТО с выбором на каждом шаге очередного шаблона вида СТО; в блоке 9 - формирование множества шаблонов типов СТО по шаблону вида СТО, выбор шаблона типа СТО; в блоке 10 - формирование признаков модели СТО по шаблону ее типа; в блоке 11 - расчет численных характеристик модели СТО (конструктивных параметров, временной, точности, надежности, стоимости); в блоке 12 - назначение модели СТО на переход. В блоках 13 - 22 происходит формирование модели операции АТОП с КОП: блок 13 формирует по шаблонам операции и типа ЭК признаки операции; в блоке 14 происходит объединение множества однотипных переходов в операцию с их максимальной концентрацией (КОП), назначение на операцию множества моделей СТО; в блоке 15 - формирование множества марок оборудования АТО и его назначение на операцию; в блоке 16 для монтажных операций методом многоугольника выполняется оптимизация очередности монтажа ЭК на плату по критерию минимального суммарного хода координатной системы  $L_{КС\Sigma} \rightarrow \min$  (для разных вариантов последовательности монтажа рассчитывается суммарный холостой ход и выбирается тот, у которого  $L_{КС\Sigma} \min$ ); в блоке 17 - цикл по всем маркам АТО множества (на каждом шаге выбирается очередная марка АТО); в блоке 18 - проводится комплексная оценка точности, надежности данной модели АТО и совокупности моделей СТО; результаты оценки сравниваются с допустимыми в ГАСК значениями (варианты, не прошедшие тестирование отсеиваются); выполняется расчет ко-

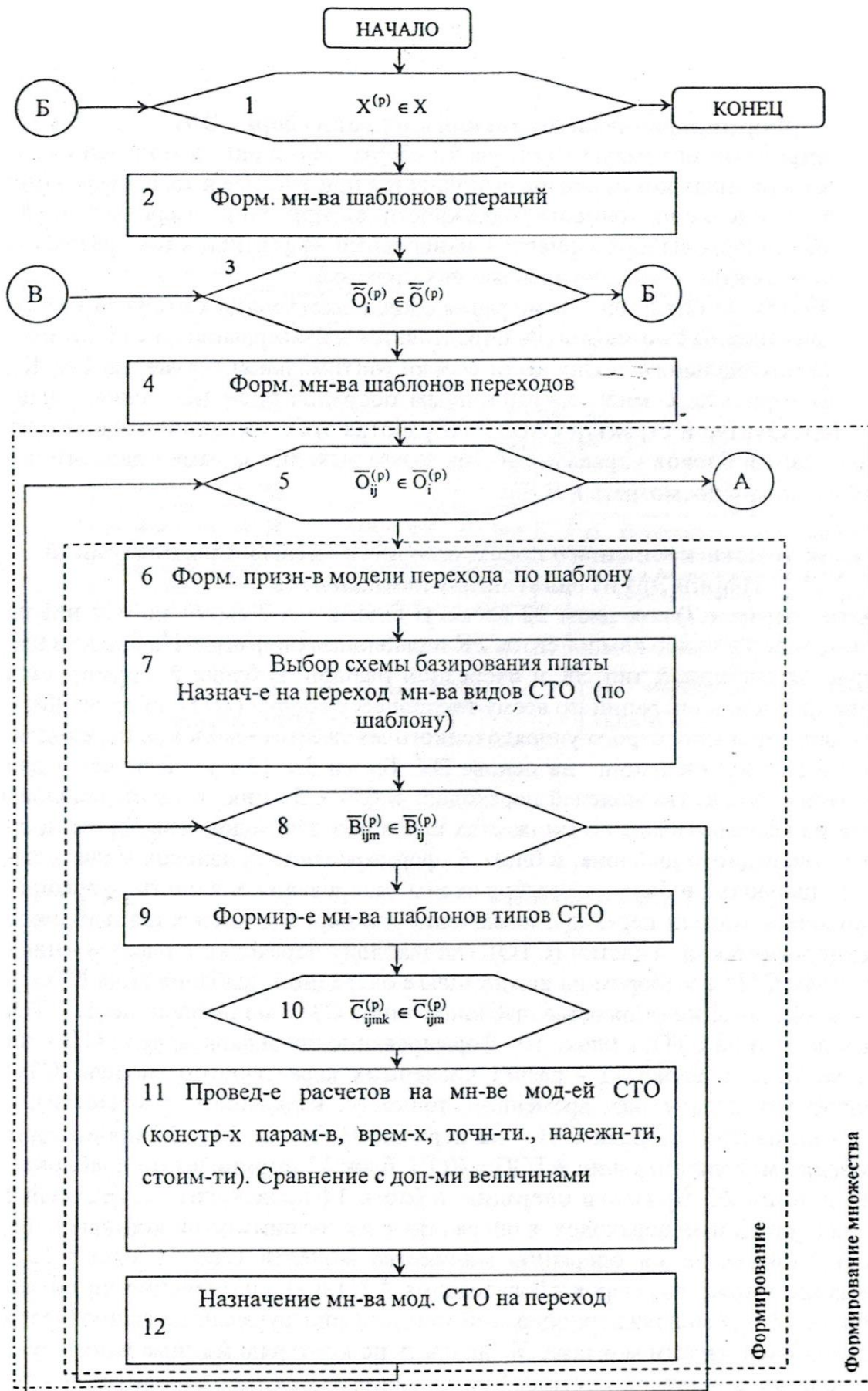


Рис. 7 Алгоритм проектирования сборочных операций АТОП с концентрацией и оптимизацией последовательности

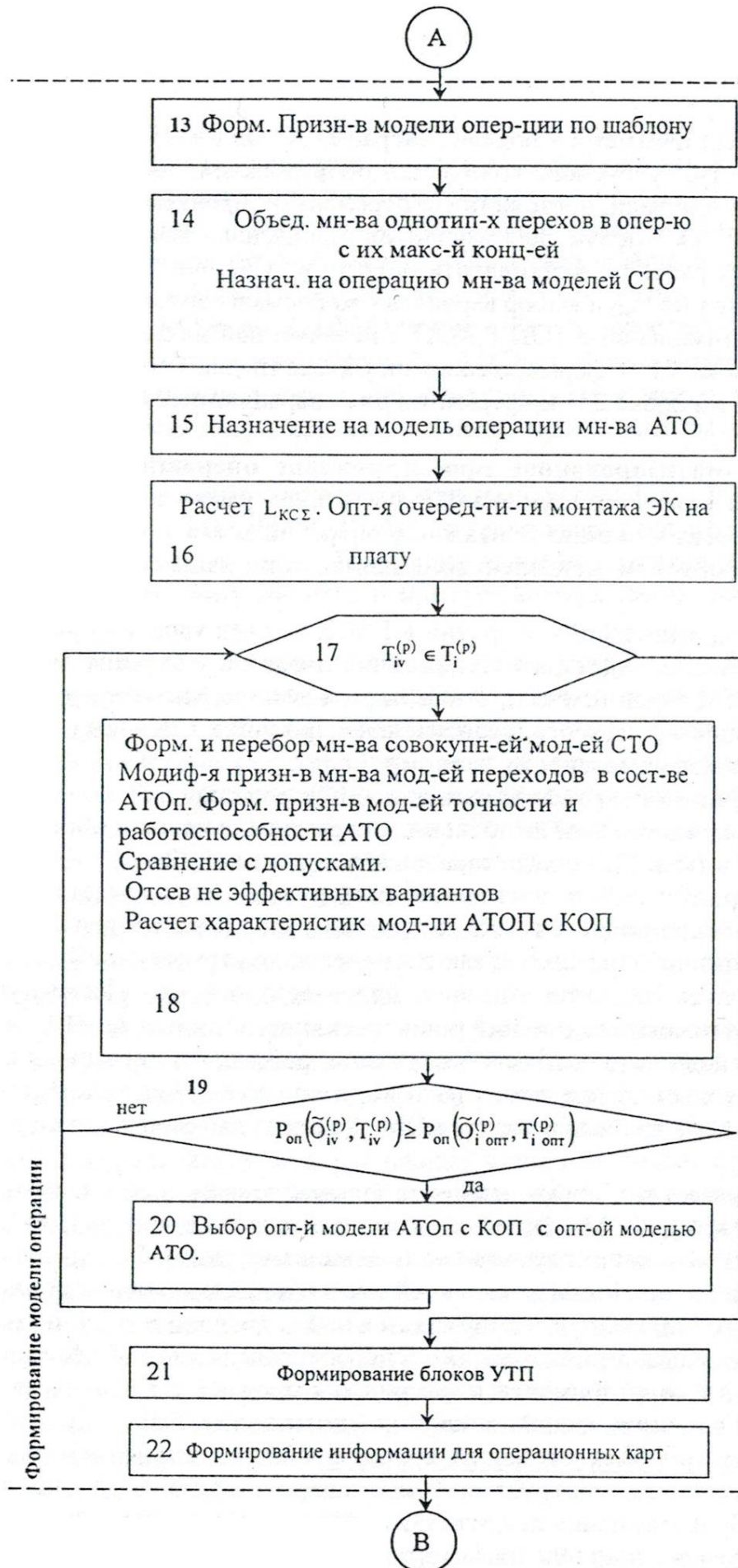


Рис. 7 (окончание)

личественных параметров модели операции АТОп с КОП (трудоемкости, производительности, требуемого количества оборудования, обслуживающих рабочих, занимаемой площади, постоянных и переменных производственных затрат), учет ограничений на затраты, для вариантов, прошедших тестирование по затратам, выполняется расчет эффективности операций ( $P_{оп}$ ); в блоках 19 и 20 – сравнение вариантов по  $P_{оп}$  и выбор варианта с максимальным значением ( $P_{оп} = P_{опмакс}$ ) (модели оптимальной АТОП с КОП с назначенной на нее оптимальной маркой АТО); в блоке 21 - формирование информации для блоков управляющих программ УТП а в блоке 22 - информации для операционных карт (ОК).

**Автоматизированное проектирование операций подготовки, пайки, отмывки и контроля** выполняется аналогично рассмотренному автоматизированному проектированию монтажных операций согласно известным методикам [12, 21] и формулам, приведенных в приложении данного пособия (табл. ТП1 – ТП4).

Метод выполнения операции в ГАСК должен удовлетворять ряду требований: образование надежного соединения вывода ЭК с элементом печатного монтажа платы с заданным сопротивлением контакта, низкому уровню дефектов, универсальности, гибкости, сравнительно простой возможности автоматизации, высокой производительности, экономичности.

#### **Операции подготовки выводов ЭК к монтажу**

Условия и режимы выполнения операций формовки и обрезки выводов ЭК приведены в табл. ТП1, подготовки к пайке – в табл. ТП2.

**Операции пайки электронных модулей.** Пайка является важной операцией для воспроизведения технологического процесса сборки ЭМ. Основными характеристиками операции являются надежность, трудоемкость, инвариантность к типу корпуса ЭК, автоматизация, производительность. Достигнутый уровень надежности паяных соединений по интенсивности отказов ( $\lambda = 10^{-8} \div 10^{-10}$  1/час) становятся недостаточным для безотказной работы ответственных изделий в течение многих лет. Пайка влияет на выход годных ЭМ. Дефекты появляются как в процессе пайки, так и при очистке ЭМ. Дефекты пайки во многом зависят от метода пайки.

Из известных методов пайки в большей степени указанным выше требованиям отвечают для ЭМ с DIP монтажом - пайка волной припоя; для ЭМ с планарным монтажом - пайка групповыми паяльниками; для ЭМ с поверхностным монтажом - пайка оплавлением паяльной пасты (конвекционная или инфракрасная). Для простых SMD (чипов) применяется пайка двойной волной припоя. Для планарного и поверхностного монтажа в перспективе возможна лазерная пайка при условии снижения стоимости и увеличения производительности. Условия и режимы выполнения операций пайки приведены в табл. ТП3.

**Пайка оплавлением паяльной пасты.** Пайка оплавлением паяльной пасты является бесконтактной групповой, высокопроизводительной пайкой (до 20 000 smd/час). Процессу пайки предшествует дозированное нанесение паяльной пасты (методом дозирования или трафаретной печати) на контактные площадки платы, установка SMD компонентов на контактные площадки платы.

Паяльная паста содержит припой, флюс и клеящее вещество (для фиксации компонента на плате при транспортировке к месту пайки). Нагрев при пайке может быть конвекционным или инфракрасным (ИК). Конвекционный нагрев пред-

почтителен, так как, в отличие от ИК нагрева, у него нет эффекта затемнения крупными корпусами мелких, перегрева темных корпусов и возможность пайки SMD с выводами, расположенными под корпусом.

В пайке оплавлением можно выделить условно четыре стадии: предварительного нагрева, предварительной сушки, собственно пайки и охлаждения. Предварительный нагрев (рис. 9) для паст на основе ПОС-61 или ПОС-63 и их импортных аналогов (PM 89, PM92, BP10) рекомендуется осуществлять до температуры  $110 \div 130$  °С со скоростью нагрева  $2 \div 3$  °С/сек. Нагрев необходим также для уменьшения термических напряжений в компонентах и местах пайки из-за того, что процесс нагрева платы при пайке в печи происходит быстро и плохо поддается регулированию.

Предварительную сушку выполняют при температуре  $130 \div 160$  °С в течение 60 сек. Для корпусов SO, QFP, PLCC, LCC и др. это время при необходимости может быть увеличено (до  $\leq 5$  мин). Предварительное подсушивание проводят с целью удаления летучих ингибиторов и предотвращения смещения компонентов.

Пайку выполняют в течение 10 сек при температуре  $215 \div 260$  °С. Для электронных модулей (ЭМ) с двухсторонним монтажом температура должна быть  $\leq 240$  °С; для ЭМ с односторонним монтажом - предельная температура пайки  $280$  °С. Время и температура пайки влияют на образование интерметаллического соединения. Его чрезмерный рост увеличивает хрупкость паяного соединения. ЭМ при температуре плавления пасты ( $179 \div 183$  °С) должна находиться не более 60 сек. Охлаждение (принудительное) до температуры солидосаликвидуса выполняется со скоростью  $2 \div 5$  °С/сек.

Окончательный выбор режимов делает технолог с учетом конструкции и материала печатной платы, типа и размеров компонентов (ЭК), типа паяльной пасты, результатов предварительной пайки.

Плату устанавливают в контейнер и загружают в туннельную печь, разогревают до температуры плавления пасты ( $215 \div 240$  °С). В печи под конвейером находится поддон со специальной жидкостью, имеющую температуру кипения выше температуры плавления пасты (например, инертный фтористый углерод ЕС-70). Над и под конвейером из нержавеющей стали равномерно расположены тепловые электрические нагреватели. В процессе пайки жидкость нагреваясь, превращается в пар, который вытесняет из контейнера воздух, препятствуя окислению. Пары жидкости осаждаются на плате и компонентах, равномерно отдавая теплоту парообразования открытым участкам платы. Для обеспечения оптимального режима кипения жидкости плотность мощности нагрева не должна превышать  $10$  Вт/см<sup>2</sup>. Паста расплавляясь, образует галтель между выводом компонента и контактной площадкой. Когда плата нагреется до температуры жидкости процесс конденсации паров прекратится и нагрев платы закончится. Этот способ пайки высокопроизводителен, инвариантен к типу корпуса SMD, но не экологичен и имеет высокую скорость нарастания нагрева (80 к/с).

Пайка с ИК нагревом. Пайка ЭМ с ИК нагревом является бесконтактной, групповой, высокопроизводительной пайкой (до 20 000 smd/час). Особенность пайки заключается в том, что нагрев платы и компонентов происходит теплом инфракрасного излучения (ИК). Хотя скорость нарастания нагрева умеренна ( $2 \div 6$  к/с), все же существует опасность выхода из строя компонентов при пайке, из-за того, что энергия источника ИК воспринимается сразу всей поверхностью кор-

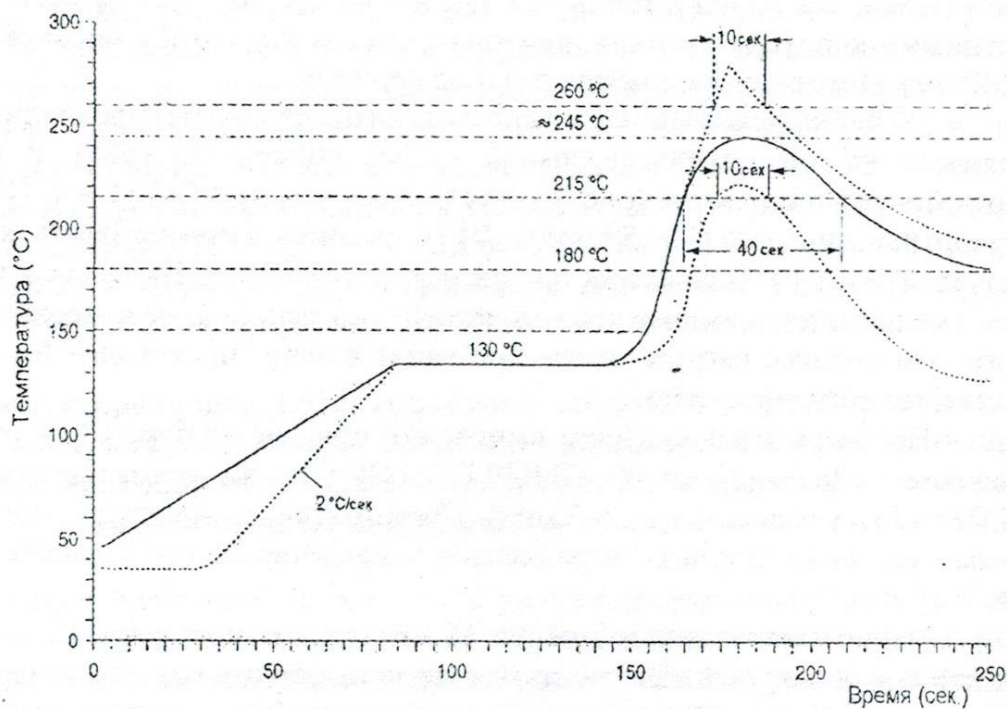


Рис. 8. График температур при пайке электронных модулей оплавлением припоя

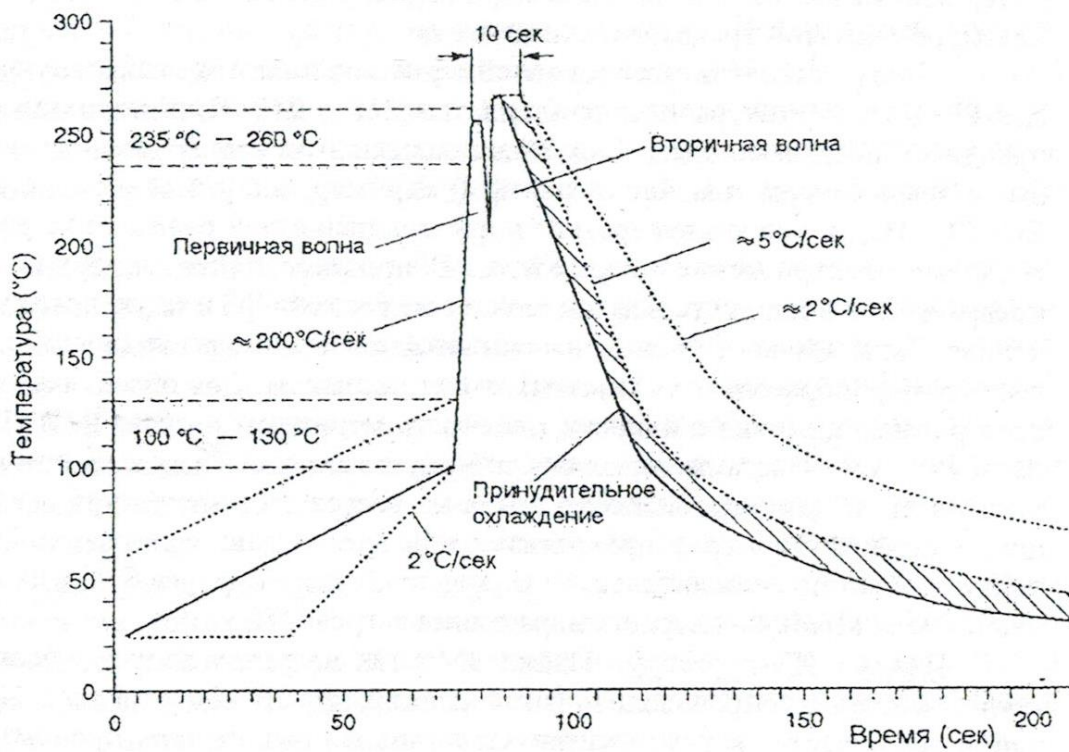


Рис. 9. График температур при пайке электронных модулей двойной волной припоя



пуса SMD. Пайка применима только для термостойких SMD, выдерживающих температуру 250° С. Способ пайки высоко производителен, инвариантен к типу корпуса SMD и экологичен.

Лазерная пайка ЭМ. Она происходит при локальном нагреве соединения теплом лазерного луча. Отработан следующий режим пайки: скорость перемещения платы координатной системой 4 ÷ 7 м/с, мощность лазерного излучения 26 ÷ 30 Вт, диаметр луча в фокальной плоскости 2,5 ÷ 4 мм; время пайки одного вывода ~ 0,7 с.

Материалы (основные и вспомогательные): припой, флюсы, припойные пасты, защитные жидкости.

Припой. Для пайки ЭМ применяют чаще всего низкотемпературные эвтектические или около эвтектические оловянно-свинцовые припои (например, составом: Sn 63 – Pb 37, Sn 60 – Pb 40, Sn 40 – Pb 60, Sn 95 – Ag 5 и др.) в виде проволоки, трубки и расплавленного припоя [имеется самофлюсующийся припой (например, ПОС-61 КП)].

Предельные нормы примесей у нас приняты: меди – 0,5; золота – 0,2; железа – 0,01; цинка – 0,08; кадмия – 0,02; алюминия и никеля – по 0,05; меди и золота в сумме – 0,4. Содержание олова в эвтектическом припое в ваннах лужения должно быть ≥ 57 %; в ваннах пайки ≥ 58 %. Проверка состава припоя в ванне пайки выполняется один раз в месяц, в ванне лужения – один раз в три месяца.

Припойные пасты (механическая смесь порошка припоя, связующего вещества, флюса и др. веществ) широко применяются при поверхностном монтаже. Среди отечественных паст назовем ПЛ1-1, ПЛ1-3, ПЛ-112, ПЛ-312, ППЛ-ОС-61, КЛ-1 и др.

Флюсы. В производстве ЭМ применяются не активированные флюсы (на основе канифоли и полиэфирных смол).

Активированные флюсы (без канифоли с использованием активаторов – аминов и слабых органических кислот) из-за коррозионного воздействия на паяемые металлы и резкого уменьшения сопротивления диэлектриков в производстве ЭМ не нашли применение.

При использовании однокомпонентных флюсов (например, марки X32-10i английской фирмы Мультикор Солдерс) отпадает необходимость в отмывке изделий ЭМ с SMD компонентами после пайки. Флюс может использоваться для пайки широкого спектра бытовой, телекоммуникационной, специальной и др. видов аппаратуры, в том числе с влагозащитными покрытиями. ЭМ с SMD паяемые с флюсом X32-10i без отмывки выдерживают испытание на загрязнение по американскому военному стандарту USA MIL-P-28809A, на коррозию по стандарту USA Corros Mirgor Test per MIL-F-14 256D. Флюс X32-10i обеспечивает быструю пайку компонентов без образования перемычек и сосулков, высокое сопротивление изоляции (без отмывки флюса), применение оборудования функционального и диагностического контроля; может использоваться с любыми типами припоев. Применение флюса X32-10i укорачивает техпроцесс АТП сборки ЭМ, устраняет необходимость минимизировать время между окончанием пайки и началом отмывки, бережет средства на покупку и эксплуатацию моеющего и сушильного оборудования.

Защитные жидкости, например, марок ЖЗ-1, ВМ-71, ТП-22, ЖЗФ-350 (на основе минерального масла и различных добавок, повышающих температурную

стабильность) применяют для защиты расплавленного припоя в ваннах лужения и пайки от окисления воздухом.

Применение антиоксидантов (например, марки Херсин-2040) в установках пайки волной припоя не требует отмывки ЭМ после пайки. Среднее время жизни Херсина

- 2040 до 5 рабочих смен. Сигналом к смене антиоксиданта является его полное потемнение (образование густой массы, которую удаляют скребком или перфорированным черпаком).

Пайка волной припоя (контактная, групповая) наиболее распространена в производстве ЭМ, так как обеспечивает высокое качество паяных соединений, высокую производительность, реализована в большом количестве марок оборудования. При пайке необходимо иметь полную смачиваемость всех выводов и контактных площадок волной припоя, а расплавленный припой не должен образовывать перемычки между соседними выводами. Суть пайки заключается в перемещении паяемого изделия ЭМ на конвейере ( $V_k \sim 3$  м/мин) над модулями флюсования, подогрева и волны припоя. Нанесение флюса может быть пенным, волновым и струйным. Пенный способ наиболее распространен, так как прост, дешев и экономичен (отсутствуют движущиеся части), но флюс сравнительно быстро густеет из-за испарения растворителя а ванна загрязняется (флюс меняют еженедельно через 40 ÷ 50 час работы). Пена образуется при пропускании через жидкий флюс сжатого воздуха (высота шапки 5 ÷ 7 до 15 мм). При волновом способе капли флюса с вращающегося барабана сдувают на изделие воздушные форсунки. Струйное распыление при большой производительности дает потеки и требует большого расхода флюса.

Подогрев ЭМ необходим для испарения избытка растворителя флюса, повышения его активности, предотвращения образования пор в припое при пайке, уменьшения теплового удара, повышения скорости пайки. Для ЭМ с односторонним монтажом - подогрев до 80 ÷ 100 °С; для ЭМ двухсторонним монтажом подогрев до 100 ÷ 130 °С (рис. 10).

Известны три способа нагрева: радиационный сверху и снизу, а также конвекционный снизу. Радиационный подогрев снизу (кварцевыми лампами, обладающими эффектом самоочистки вследствие выгорания флюса) исключает нагрев компонентов, поэтому считается оптимальным.

В процессе пайки изделие ЭМ проходит над волной припоя, а компоненты, расположенные на нижней стороне, погружаются в расплавленный припой. Из-за сил поверхностного натяжения и отсутствия смачивания корпусов компонентов появляются теневые участки, где образуются непропаянные соединения. Увеличение длины контактных площадок частично уменьшает эффект теней, а для устранения перемычек (при шаге между выводами < 0,5 мм нужна пайка двойной волной припоя). При этом первая волна – турбулентная, высокая, но узкая (ее подбирают таким образом, чтобы обеспечить смачивание всех выводов, но не допустить смачивания корпусов компонентов). Вторая волна – ламинарная, спокойная и широкая удаляет избытки припоя и завершает образование галтелей (но не все SMD компоненты выдерживают пайку волной). Режимы пайки: температура припоя в ванне 240 ÷ 270 °С; время воздействия припоя 1 ÷ 3 сек (в зависимости от длины гребня волны и скорости конвейера).

Волна припоя (одинарная волна типа  $\lambda$ , Z и двойная волна). Лучшие результаты получаются при широкой волне и наклонном конвейере ( $\alpha = 8 \div 18^\circ$ ) с

одинарной волной для DIP монтажа и двойной волной для SMD монтажа. Зона контакта изделия с волной составляет  $2 \div 8$  мм а время –  $0,7 \div 2$  с.

**Операции отмывки и сушки.** Необходимость очистки ЭМ зависит от требований, предъявляемых к изделию и вида применяемых флюсов. Она обязательна после пайки с применением активных водосмываемых флюсов (но не все SMD компоненты допускают отмывку). После отмывки ЭМ должны иметь сопротивление изоляции  $\geq 100$  Мом. Очистка ЭМ затруднена из-за неправильного размещения коммутационных дорожек и высокой плотности монтажа. По возможности расстояния между коммутационными дорожками необходимо увеличивать, а компоненты располагать так, чтобы не загораживать друг от друга движение потока растворителя. Интервал времени между завершением пайки и началом отмывки должен быть сведен к минимуму (даже 30 минутный перерыв существенно увеличивает объем очистки). Для очистки ЭМ применяют органические растворители (гидрофобные – для удаления канифоли и жиров, гидрофильные – для удаления полярных и не полярных соединений, а также азеатронные растворители, представляющие смесь первых двух). Гидрофобные растворители с водой не смешиваются, а гидрофильные смешиваются.

Существующие методы отмывки можно свести к трем группам: ультразвуковому, вибрационному и комбинированному.

В первой группе методов при отмывке на изделие ЭМ воздействуют моющими растворами, органическими растворителями и ультразвуком. Ультразвук помогает механически разрушить пленку загрязнений и ускоряет химическое воздействие моющей среды (поверхностно-активных веществ, органических растворителей, воды и водных растворов) и жидкости для предварительной замочки, промывки, пассивирования и консервации. Органические растворители (например, трихлорэтилен, хладон, метанол, ацетон и др.) хорошо удаляют канифоль, минеральные масла, парафин, смолы и пасты, но они токсичны а метанол и ацетон еще – взрывоопасны и пожароопасны.

Во второй группе методов на изделия ЭМ воздействуют вибрацией (с частотой  $25 \div 50$  гц) и растворителями. Качество очистки ЭМ зависит от частоты колебания, температуры, давления паров жидкости и продолжительности очистки. Растворители разрушают однородность загрязнения, облегчает их диспергирование. Вибрация ускоряет растворение загрязнений и удаление частиц из зоны очистки. Особенно трудно поддаются очистки ЭМ, выполненные на основе многослойных печатных плат (удаление остатков флюса, продуктов травления и др.). Предварительно изделия ЭМ замачивают в ванне с поверхностно-активными веществами (в течение  $3 \div 5$  мин). Затем очистку ЭМ выполняют в трех ваннах (по 30 с в каждой) с применением спирто-бензиновой смеси и вибрации.

В третьем методе на ЭМ воздействуют алифатическими содержащими хлор растворителями (например, четырех хлористый углерод, треххлорэтилен, метилхлороформ, хлористый метилен), а также фтор- и хлоруглеродистыми растворителями. Алифатические содержащие хлор растворители токсичны и химически не устойчивы на свету. Применяемые для повышения их устойчивости стабилизаторы загрязняют растворители и усложняют их регенерацию. Фтор- и хлоруглеродистые растворители (например, фреон) являются универсальными, обеспечивают высокую степень очистки ЭМ, не горючи, химически стойки и мало токсичны.

**Операции контроля собранных изделий.** Трудоемкость и сложность контроля собранных изделий ЭМ зависит от их конструкции, схемотехнического решения, технологии сборки и качества компонентов. Контроль цифровых и цифро-аналоговых ЭМ различен. Для цифровых ЭМ устанавливается соответствие фактических связей заданным; проверяются уровень логических сигналов (0 и 1) и величины задержек; проводится функциональный контроль (в том числе функциональное тестирование, необходимое при наладке); внутри-схемное тестирование и диагностирование. Для цифро-аналоговых ЭМ добавляется проверка формы сигналов (вид, амплитуда, фронт, частота) и контроль дополнительных характеристик электрических схем (например, токов).

Диагностирование изделий четвертого поколения (с применением БИС и СБИС) предъявляет дополнительные требования: генерацию тестовых последовательностей тест-наборов длиной  $10^8$  и более; контроль узлов с различными уровнями логических сигналов при частоте смены тест-наборов до 4 МГц; формирование нескольких независимых синхропоследовательностей; наличие средств поиска неисправностей, описания отладки и изготовление документации на тест-программы.

Контроль ЭМ обычно выполняется в два этапа. На первом этапе происходит сбор информации о фактическом состоянии изделия, показателях его свойств; на втором – сравнение полученной информации (на первом этапе) с установленными нормами и критериями; установление соответствия или расхождения этой информации.

Условия и режимы выполнения операций контроля изделий ЭМ после монтажа и пайки приведены в табл. ТП4.

**Проектирование оптимальных подструктур ГАСК.** Подструктуры проектируются для каждого типа компонентов ЭК с учетом всех операций техпроцесса сборки ЭМ (подготовительных, монтажа, пайки, отмывки, контроля).

Автоматизированное проектирование оптимальных подструктур сборки ЭМ из однотипных компонентов включает: 1. Постановку задачи, выбор методов синтеза, анализа, оптимизации; определение критериев и ограничений; 2. Синтез групповых техпроцессов АТП; 3. Синтез множества подструктур; 4. Проверку соответствия вариантов подструктур величинам допустимых производственных затрат; 5. Отсев вариантов, не прошедших тестирование; 6. Оценку эффективности вариантов подструктур; 7. Формирование оптимальной подструктуры. Подробно об автоматизированном проектировании оптимальных подструктур см. в Л [17. ГАСК].

Автоматизированное проектирование операций сборки ЭМ из разнотипных компонентов содержит: 1. Синтез множества операций сборки из разнотипных компонентов; 2. Проверку соответствия вариантов операций требованиям по точности, надежности, производственным затратам; 3. Формирование модели оптимальной операции.

#### Синтез множества операций сборки из разнотипных компонентов

Постановка задачи:

$$\left( \tilde{O}_{k \text{ опт}}^{\text{крп}}, T_{k \text{ опт}}^{\text{крп}}, C(T_{k \text{ опт}}^{\text{крп}}) \right) = \arg \max \left[ P_{\text{оп}} \left( \tilde{O}_{kv}^{\text{крп}}, T_{kv}^{\text{крп}}, C(T_{kv}^{\text{крп}}), \left\{ \tilde{O}_{1 \text{ опт}}^{(p)} \right\}, \left\{ \tilde{G}_{y \text{ опт}}^{(p)} \right\} \right) \right] \quad (11)$$

Методы проектирования: синтеза, технико-экономической оценки, полного перебора; для оптимизации очередности – метод многоугольника

Критерий: комплексный показатель эффективности операций  $P_{оп}$ ; для оптимизации очередности - суммарный путь  $L_{\Sigma КС}$ .

Ограничения: на переменные и постоянные затраты по операции

$$C_{гоп}(\bar{O}_{kv}^{крп}, T_{kv}^{крп}) \leq [C_{гоп}]_0; \quad K_{гоп}(\bar{O}_{kv}^{крп}, T_{kv}^{крп}) \leq [K_{гоп}]_0 \quad (12)$$

на точность и надежность оборудования АТО вместе с оснасткой СТО

$$\delta_c(T_{kv}^{крп}) \leq [\delta_c]; \quad T_{ср.АТО}(T_{kv}^{крп}) \geq [T_{ср.АТО}]; \quad P_{АТО}(t_{бр})(T_{kv}^{крп}) \geq [P_{АТО}(t_{бр})]; \quad (13)$$

ограничения при оптимизации очередности – отсутствие петель в траектории, заход в место установки компонента не более одного раза.

Синтез множества операций сборки из разнотипных компонентов (с максимально возможной концентрацией и оптимизацией очередности) выполняется аналогично синтезу операций сборки из однотипных компонентов (I-й этап). Но для образования операций сборки ЭМ из разнотипных ЭК здесь добавлены действия, обеспечивающие объединение разнотипных переходов в операцию с максимально возможной концентрацией на автомате. Подробно об автоматизированном проектировании оптимальных операций сборки ЭМ из разнотипных компонентов с максимально возможной концентрацией и оптимизацией очередности монтажа ЭК на плату см. в Л [17].

### Примеры расчетов операций сборки электронных модулей из однотипных компонентов

Пример 1. Оценка эффективности операции монтажа и пайки микросхем с планарными выводами на автомате с ЧПУ АРПМ в составе ГПМ ГАСК (с использованием табл. 1-6 Л.14).

Исходные данные: годовая программа  $N_{ЭМ} = 10^4$  эм/год;  $N_{ЭКЭМ} = 20$  ис4/эм; номенклатура  $N_A = 50$  тип эм/год; паспортная производительность АРПМ  $Q_{п} = 400$  ис/час; потребляемая мощность  $N_{\Sigma} = 0,75$  кВт; занимаемая площадь  $S = 1,8$  м<sup>2</sup> покупная цена единицы оборудования  $C_{1об} = 50000$  руб.

Особенности технологии операции монтажа и пайки ИС<sub>4</sub> на АРПМ см. в Л. [19].

#### Расчет трудоемкости, производительности монтажа и пайки ИС<sub>4</sub>

$$T_{шк} = T_o + T_b + T_{отд} + T_{обс} + T_{пер} = \frac{1,05}{Q} + T_{обс} + T_{пер}$$

где:  $T_{шк}$ ,  $T_o$ ,  $T_b$ ,  $T_{отд}$ ,  $T_{обс}$ ,  $T_{пер}$  – время соответственно штучно-калькуляционное, на монтаж, пайку, вспомогательные действия, отдых, обслуживание АТО, его переналадку.

$$T_{обс} = \frac{t_{ЭКПП} + t_{ЗПП}}{N_{КПП}} + \frac{t_{САНЭК}}{N_{ЭКАН}} = \frac{1,67 \cdot 10^{-2}}{20} + \frac{0,28 \cdot 10^{-2}}{20} + \frac{1,6 \cdot 10^{-2}}{600} = 1,4 \cdot 10^{-4} [\text{час} / \text{ЭК}]$$

$$T_{пер} = \frac{T_{СПР} + T_{СГ} + T_{СБАН} + T_{СМПР}}{N_{ЭКЭМ} \cdot N_{ЭМ}} = \frac{25 \cdot 10^{-2} + 50 \cdot 10^{-2} + 25 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-2}}{20 \cdot 10^4} = 5,25 \cdot 10^{-6} [\text{час} / \text{ЭК}]$$

$$T_{\text{ШК}} = \frac{1,05}{Q_{\text{П}}} + T_{\text{ОБС}} + T_{\text{ПЕР}} = \frac{1,05}{400} + 1,4 \cdot 10^{-4} + 5,25 \cdot 10^{-6} = 3,479 \cdot 10^{-3} [\text{час} / \text{ЭК}]$$

**Производительность часовая АТО**

$$Q_{\text{ч}} = \frac{K_{\text{з}} \cdot \rho \cdot K_{\text{ПП}}}{T_{\text{ШК}}} = \frac{0,9 \cdot 0,98 \cdot 0,99}{3,29 \cdot 10^{-3}} = 265,4 \text{ ЭК/час}$$

Годовая производительность АТО  $Q_{\text{ГОП}}$

$$Q_{\text{Г}} = Q_{\text{ч}} \cdot F_{\text{ГЭФ}} = 265,4 \cdot 4100 = 1,09 \cdot 10^6 [\text{ЭК/год} \cdot \text{об}],$$

**Количество оборудования  $N_{\text{ОБ}}$**

$$N_{\text{ОБ}} = \frac{N_{\text{ЭКЭЯ}} \cdot N_{\text{ЭЯ}} \cdot N_{\text{А}}}{Q_{\text{Г}}} = \frac{20 \cdot 10^4 \cdot 50}{1,09 \cdot 10^6} = 9,17 \text{ шт./оп, примем } N_{\text{ОБ}} = 10 \text{ шт./оп.}$$

$$Q_{\text{ГОП}} = Q_{\text{Г}} \cdot N_{\text{ОБ}} = 1,09 \cdot 10^6 \cdot 10 = 1,09 \cdot 10^7 [\text{ЭК/год оп}].$$

**Годовые производственные затраты на технологическую операцию постоянные:** ( $K_{\text{ГОП}}$ )  $K_{\text{ГОП}} = (K_{\text{ОБ}} + K_{\text{ППЛ}}) N_{\text{ОБ}}$  [руб./год]

стоимость единицы оборудования  $K_{\text{ОБ}}$

$$K_{\text{ОБ}} = E_{\text{Н}} \cdot K_1 \cdot \text{Ц}_{\text{ОБ}} = 0,167 \cdot 1,13 \cdot 50000 = 9,417 \cdot 10^3 [\text{руб./год}],$$

затраты на аренду производственных площадей  $K_{\text{ППЛ}}$

$$K_{\text{ППЛ}} = \text{Ц}_{\text{АПЛ}} \cdot S_{\text{ОБ}} \cdot \gamma = 200 \cdot 1,8 \cdot 5 = 1800 [\text{руб./год}],$$

затраты на аренду служебных площадей  $K_{\text{СПЛ}}$

$$K_{\text{СПЛ}} = \text{Ц}_{\text{АСПЛ}} \cdot S_{\text{ПР}} \cdot n_{\text{РАБ}} = 200 \cdot 0,7 \cdot 0,25 = 35 [\text{руб./год}],$$

затраты на аренду площадей  $K_{\text{ПЛ}}$

$$K_{\text{ПЛ}} = K_{\text{ППЛ}} + K_{\text{СПЛ}} = 1800 + 35 = 1835 [\text{руб./год}],$$

постоянные годовые затраты  $K_{\text{ГОП}}$

$$K_{\text{ГОП}} = (K_{\text{ОБ}} + K_{\text{ПЛ}}) \cdot N_{\text{ОБ}} = (9417 + 1835) \cdot 10 = 1,125 \cdot 10^5 [\text{руб./год}];$$

**переменные ( $C_{\text{ГОП}}$ ):**

$$C_{\text{ГОП}} = C_{\text{ГОП}}^? + K_{\text{НЕЗ}} [\text{руб./год}],$$

$$C_{\text{ГОП}}^? = (C \cdot T_{\text{ШК}} + C_{\text{УТП}} + C_{\text{БР}} + C_{\text{1ЭК}}) \cdot N_{\text{ЭКЭЯ}} \cdot N_{\text{ЭЯ}} \cdot N_{\text{А}} [\text{руб./год}],$$

$$C = C_{\text{з}} + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{ПУ}} + C_{\text{ЭЛ}} + C_{\text{АМ}} + C_{\text{ОСН}} + C_{\text{ПЛ}} + C_{\text{Ц}} [\text{руб./час}],$$

затраты на зарплату  $C_{\text{з}}$

$$C_{\text{з}} = K_{\text{д}} \cdot \phi \cdot n_{\text{РАБ}} = 1,7 \cdot 0,67 \cdot 0,25 = 0,285 [\text{руб./час}],$$

затраты на эксплуатацию оборудования  $C_{\text{ОБ}}$

$$C_{\text{ОБ}} = \frac{(\text{Ц}_{\text{з}} \cdot R_{\text{з}} + \text{Ц}_{\text{М}} \cdot R_{\text{М}}) \cdot \mu}{F_{\text{зэф}}} = \frac{(7,7 \cdot 3 + 30,6 \cdot 20) \cdot 1,2}{4100} = 0,186 [\text{руб./час}],$$

затраты на эксплуатацию программного устройства  $C_{\text{ПУ}}$

$$C_{\text{ПУ}} = \frac{\text{Ц}_{\text{ПУ}}}{F_{\text{зэф}}} = \frac{700}{4100} = 0,174 [\text{руб./час}],$$

затраты на электроэнергию  $C_{\text{ЭЛ}}$

$$C_{\text{ЭЛ}} = \frac{\text{Ц}_{\text{1кВт.ч}} \cdot N_{\Sigma} \cdot K_{\text{АВ}} \cdot K_{\text{АМ}} \cdot K_i}{\eta} = \frac{0,04 \cdot 0,75 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 1,05}{0,95} = 0,0186 [\text{руб./час}],$$

затраты на амортизацию  $C_{\text{АМ}}$

$$C_{\text{АМ}} = \frac{\text{Ц}_{\text{ОБ}} \cdot a}{F_{\text{зэф}}} = \frac{50000 \cdot 0,2}{4100} = 2,439 [\text{руб./час}],$$

затраты на оснастку  $C_{осн}$

$$C_{осн} = \frac{\Sigma K_{пр}}{Z_{осн} \cdot F_{зэф}} = \frac{450 + 200 + 500 + 500}{2 \cdot 4100} = 0,201 \text{ [руб./час]},$$

затраты на эксплуатацию производственных площадей  $C_{ппл}$

$$C_{ппл} = \frac{Ц_{эпл} \cdot S_{об} \cdot \gamma}{F_{зэф}} = \frac{20 \cdot 1,8 \cdot 5}{4100} = 0,0439 \text{ [руб./час]},$$

затраты на эксплуатацию служебных площадей  $C_{спл}$

$$C_{спл} = \frac{Ц_{эспл} \cdot S_{п.р.а.б.} \cdot n_{п.р.а.б.}}{F_{зэф}} = \frac{20 \cdot 0,7 \cdot 0,25}{4100} = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ [руб./час]},$$

цеховые затраты

$$C_{ц} = 0,4 \cdot C_3 = 0,4 \cdot 0,285 = 0,114 \text{ [руб./час]},$$

затраты  $C$

$$C = C_3 + C_{об} + C_{пу} + C_{эл} + C_{ам} + C_{осн} + C_{ппл} + C_{спл} + C_{ц} =$$

$$= 0,285 + 0,186 + 0,174 + 0,0186 + 2,439 + 0,201 + 0,0439 + 8,5 \cdot 10^{-4} + 0,114 = 3,46 \text{ [руб./час]}.$$

затраты на разработку управляющей программы  $C_{утп}$

$$C_{утп} = \frac{Z_{МПР} \cdot T_{р\text{у}\text{п}}}{F_{мэф} \cdot N_{экз} \cdot N_{эя}} = \frac{250 \cdot 10}{192 \cdot 20 \cdot 10^4} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ [руб./эк]},$$

затраты на 1 компонент (ЭК)

$$C_{1эк} = \frac{1}{n_{оп}} \cdot \left( Ц_{1эк} + \frac{Ц_{1ппл}}{N_{экэм}} \right) = \frac{1}{10} \cdot \left( 4 + \frac{8}{20} \right) = 0,44 \text{ [руб./эк]},$$

затраты на брак  $C_{бр}$

$$= \frac{N_{бр} \cdot \frac{Z_{мрем}}{F_{мэф}} \cdot T_{исп\text{экэм}} + 0,9 \cdot n_{бр} \cdot Ц_{1эк} \cdot N_{экэм}}{N_{экэм}} = \frac{0,01 \cdot \frac{250}{192} \cdot 0,05 + 0,01 \cdot 0,197 \cdot 4 \cdot 20}{20} =$$

$$= 0,0079 \text{ [руб./эк]}.$$

Определение затрат  $C'_{гоп}$

$$C'_{гоп} = (C \cdot T_{шк} + C_{утп} + C_{бр} + C_{1эк}) \cdot N_{экэм} \cdot N_{эм} \cdot N_A =$$

$$= (3,46 \cdot 3,479 \cdot 10^{-3} + 6,5 \cdot 10^{-5} + 0,0079 + 0,44) \cdot 20 \cdot 10^4 \cdot 50 =$$

$$= 4,6 \cdot 10^6 \text{ [руб./год]},$$

Затраты на незавершенное производство  $K_{нез}$

$$K_{нез} = 0,3 \cdot N_{экэм} \cdot N_{эм} \cdot \left( C_{1эк} + \frac{C_{гоп}}{2 \cdot N_{экэм} \cdot N_{эм}} \right) \cdot \frac{\sigma}{n_{оп}} = 0,3 \cdot 20 \cdot 10^4 \cdot \left( 0,197 + \frac{7,35 \cdot 10^6}{2 \cdot 20 \cdot 10^4} \right) \cdot \frac{1}{10} =$$

$$= 0,11 \cdot 10^6 \text{ [руб./год]},$$

затраты  $C_{гоп}$ :  $C_{гоп} = C'_{гоп} + K_{нез} = 4,6 \cdot 10^6 + 0,11 \cdot 10^6 = 4,71 \cdot 10^6 \text{ [руб./год]},$

постоянные затраты на транспорт, отнесенные к данной технологической операции:

$$K_{тр} = 0,2 \cdot K_{гоп} = 0,2 \cdot 1,125 \cdot 10^5 = 2,25 \cdot 10^4 \text{ [руб./год]},$$

переменные затраты на транспорт, отнесенные к данной технологической операции:

$$C_{TR} = 0,2 \cdot C_{ГОП} = 0,2 \cdot 4,71 \cdot 10^6 = 0,942 \cdot 10^6 \text{ [руб./год]}$$

Комплексный показатель эффективности  $R_{оп}$ :

$$R_{оп} = \frac{Q_{ГОП}}{(K_{ГОП} + K_{ТР} + C_{ГОП} + C_{ТР})} = \frac{1,09 \cdot 10^7}{(1,125 \cdot 10^5 + 2,25 \cdot 10^4 + 4,71 \cdot 10^6 + 0,942 \cdot 10^6)} = 1,88 \text{ эк/руб.}$$

**Пример 2. Оценка эффективности операции формовки выводов при подготовке к монтажу и пайке микросхем с планарными выводами на специальном автомате (ГТ2629), работающем в составе ГПМ ГАСК (с использованием табл. 1-6 Л.[14]).**

На автомате выполняются операции формовки, обрезки выводов ИС<sub>4</sub>, укладки ИС<sub>4</sub> в кассеты.

Исходные данные автомата: паспортная производительность  $Q_{п}=1200$  ис/час; потребляемая мощность  $N_{\Sigma}=0,5$  кВт; занимаемая площадь  $S_{об}=0,45$  м<sup>2</sup>; цена единицы оборудования  $C_{об}=7500$  руб;  $N_{ЭКЭМ}=10^4$  ис/эм;  $N_{ЭМ}=10^4$ ;  $N_{А}=50$  тип эм/год.

*Особенности технологии операции формовки выводов ИС<sub>4</sub> см. ниже в примере 3.*

#### *Расчет трудоемкости и производительности*

Трудоёмкость  $T_{шк} = T + T_{обсл}$

$$\text{Время (основное, вспомогательное, отдыха) } T = T_{о} + T_{в} + T_{отд} = \frac{1,05}{Q_{п}} = 8,75 \cdot 10^{-4} \text{ час/эк}$$

Время обслуживания  $T_{обсл}$

$$T_{обсл} = \frac{T_{сан}}{N_{экан}} = \frac{16 \cdot 10^{-2}}{600} = 2,667 \cdot 10^{-4} \text{ час/эк}$$

Полная трудоёмкость  $T_{шк}$

$$T_{шк} = T + T_{обсл} = 8,75 \cdot 10^{-4} + 2,667 \cdot 10^{-4} = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ час/эк}$$

Часовая производительность ( $Q_{ч}$ )

$$Q_{ч} = \frac{K_{з} \cdot \rho \cdot K_{гп}}{T_{шк}} = \frac{0,9 \cdot 0,98 \cdot 0,99}{1,14 \cdot 10^{-3}} = 765,95 \text{ эк/час}$$

Годовая производительность ( $Q_{гоп}$ )

$$Q_{гоп} = Q_{ч} \cdot F_{гэф} = 765,95 \cdot 4100 = 3,14 \cdot 10^6 \text{ ис/год.}$$

Количество оборудования. ( $N_{об}$ )

$$N_{об} = \frac{N_{ЭКЭМ} \cdot N_{ЭМ} \cdot N_{а}}{Q_{гоп}} = \frac{20 \cdot 10^4 \cdot 50}{3,117 \cdot 10^6} = 3,185 \text{ шт.}$$

Примем  $N_{об} = 4$  автомата.

*Расчет годовых производственных потерь:  
постоянных ( $K_{гоп}$ )*



$$K_{\text{ГОП}} = (K_{\text{ОБ}} + K_{\text{ПЛ}}) \cdot N_{\text{ОБ}}$$

Стоимость единицы оборудования  $K_{\text{ОБ}}$

$$K_{\text{ОБ}} = E_H \cdot K_1 \cdot \Pi_{\text{ОБ}} = 0,167 \cdot 1,13 \cdot 7500 = 1,412 \cdot 10^3 \text{ руб./об.}$$

Затраты на аренду производственных площадей  $K_{\text{ПЛ}}$

$$K_{\text{ПЛ}} = \Pi_{\text{АПЛ}} \cdot S_{\text{ОБ}} \cdot \gamma = 200 \cdot 0,45 \cdot 5 = 450 \text{ руб./год}$$

Затраты на аренду служебных площадей  $K_{\text{СПЛ}}$

$$K_{\text{СПЛ}} = \Pi_{\text{АСПЛ}} \cdot S_{\text{ПР}} \cdot n_{\text{РАБ}} = 200 \cdot 0,7 \cdot 0,25 = 35 \text{ руб./год}$$

Затраты на аренду площадей  $K_{\text{ПЛ}}$

$$K_{\text{ПЛ}} = K_{\text{ПЛ}} + K_{\text{СПЛ}} = 450 + 350 = 800 \text{ руб./год}$$

Постоянные годовые затраты  $K_{\text{ГОП}}$

$$K_{\text{ГОП}} = (K_{\text{ОБ}} + K_{\text{ПЛ}}) \cdot N_{\text{ОБ}} = (1412 + 800) \cdot 2 = 4,425 \cdot 10^3 \text{ руб./год;}$$

*переменных* ( $C_{\text{ГОП}}$ )

$$C_{\text{ГОП}} = C_{\text{ГОП}}^? + K_{\text{НЕЗ}}$$

$$C_{\text{ГОП}}^? = (C \cdot T_{\text{ШК}} + C_{\text{БР}} + C_{\text{ІЭК}}) \cdot N_{\text{ЭКЭЯ}} \cdot N_{\text{ЭЯ}} \cdot N_{\text{А}}$$

$$C = C_3 + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{ПУ}} + C_{\text{ЭЛ}} + C_{\text{АМ}} + C_{\text{ОСН}} + C_{\text{ПЛ}} + C_{\text{Ц}}$$

Затраты на зарплату  $C_3$

$$C_3 = K_{\text{Д}} \cdot \varphi \cdot n_{\text{РАБ}} = 1,7 \cdot 0,67 \cdot 0,25 = 0,285 \text{ руб./час эк}$$

Затраты на эксплуатацию оборудования  $C_{\text{ОБ}}$

$$C_{\text{ОБ}} = \frac{(\Pi_3 \cdot R_3 + \Pi_M \cdot R_M) \cdot \mu}{F_{\text{зэф}}} = \frac{(7,7 \cdot 3 + 30,6 \cdot 20) \cdot 1,2}{4100} = 0,1859 \text{ руб./час}$$

Затраты на электроэнергию  $C_{\text{ЭЛ}}$

$$C_{\text{ЭЛ}} = \frac{\Pi_{\text{1кВт.ч}} \cdot N_{\Sigma} \cdot K_{\text{АВ}} \cdot K_{\text{АМ}} \cdot K_i}{\eta} = \frac{0,04 \cdot 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 1,05}{0,95} = 1,24 \cdot 10^{-2}$$

руб./час

Затраты на амортизацию  $C_{\text{АМ}}$

$$C_{\text{АМ}} = \frac{\Pi_{\text{ОБ}} \cdot A}{F_{\text{гэф}}} = \frac{7500 \cdot 0,2}{4100} = 0,366 \text{ руб./час}$$

Затраты на оснастку  $C_{\text{ОСН}}$

$$C_{\text{ОСН}} = \frac{\Sigma K_{\text{П}}}{Z_{\text{ОСН}} \cdot F_{\text{гэф}}} = \frac{450}{2 \cdot 4100} = 0,055 \text{ руб./час}$$

Затраты на производственные площади  $C_{\text{ПЛ}}$

$$C_{\text{ПЛ}} = \frac{\Pi_{\text{эпл}} \cdot S_{\text{ОБ}} \cdot \gamma}{F_{\text{гэф}}} = \frac{20 \cdot 0,45 \cdot 5}{4100} = 0,011 \text{ руб./час}$$

Затраты на служебные площади  $C_{\text{СПЛ}}$

$$C_{\text{СПЛ}} = \frac{\Pi_{\text{эспл}} \cdot S_{\text{ПРАБ}} \cdot n_{\text{РАБ}}}{F_{\text{зэф}}} = \frac{20 \cdot 0,7 \cdot 0,25}{4100} = 8,537 \cdot 10^{-4} \text{ руб./ч}$$

Цеховые затраты  $C_{\text{Ц}}$

$$C_{\text{Ц}} = 0,4 \cdot C_3 = 0,4 \cdot 0,285 = 0,114 \text{ руб./ч}$$

Итак, затраты  $C$

$$C = C_3 + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{ЭЛ}} + C_{\text{АМ}} + C_{\text{ОСН}} + C_{\text{ПЛ}} + C_{\text{СПЛ}} = 0,285 + 0,1859 + 0,0124 + 0,366 + 0,055 + 0,0118 + 0,114 = 1,03 \text{ руб./ч}$$

Затраты на брак  $C_{\text{БР}}$

$$C_{БР} = \frac{N_{БР} \cdot 3_{мрз} \cdot T_{ислэм} + 0,9 \cdot n_{БР} \cdot I_{лэк} \cdot N_{ЭКЭМ}}{N_{ЭКЭМ}} = \frac{0,01 \cdot 250 \cdot 0,05 + 0,9 \cdot 0,01 \cdot 4 \cdot 20}{20} = 0,044$$

Затраты на 1 ЭК  $C_{1ЭК}$

$$C_{1ЭК} = \frac{1}{n_{ОП}} \cdot \left( I_{1ЭК} + \frac{I_{II}}{N_{ЭКЭМ}} \right) = \frac{1}{10} \cdot \left( 4 + \frac{8}{20} \right) = 0,44 \text{ руб./эк}$$

Определение затрат  $C_{ГОП}$

$$C'_{ГОП} = (C_{ТШК} + C_{БР} + C_{1ЭК}) \cdot N_{ЭКЭМ} \cdot N_{ЭМ} \cdot N_A = (1,03 \cdot 1,148 \cdot 10^{-3} + 0,044 + 0,44) \cdot 20 \cdot 10^4 \cdot 50 = 4,84 \cdot 10^6 \text{ руб./год}$$

Затраты на незавершенное производство  $K_{НЕЗ}$

$K_{НЕЗ} =$

$$0,3 \cdot N_{ЭКЭМ} \cdot N_{ЭМ} \cdot \left( C_{ЭКЭМ} + \frac{C'_{ГОП}}{2 \cdot N_{ЭКЭМ} \cdot N_{ЭМ}} \right) \cdot \frac{\sigma}{n_{ОП}} = 0,3 \cdot 20 \cdot 10^4 \cdot \left( 0,44 + \frac{4,84 \cdot 10^6}{2 \cdot 20 \cdot 10^4} \right) \cdot \frac{1}{10} = 3,366 \cdot 10^4 \text{ руб.}$$

Годовые технологические затраты  $C_{ГОП}$

$$C_{ГОП} = C'_{ГОП} + K_{НЕЗ} = 1,35 \cdot 10^6 + 33660 = 4,716 \cdot 10^4 \text{ руб.}$$

а с учетом производственных (транспортных) затрат  $C_{\Sigma} = C_{ГОП}$ .

Комплексный показатель эффективности  $R_{ОП}$

$$R_{ОП} = \frac{Q_{ГОП}}{(1,2 \cdot K_{ГОП} + 1,2 \cdot C_{ГОП}) \cdot K_{И}} = \frac{3,117 \cdot 10^6}{(1,2 \cdot 4,425 \cdot 10^3 + 1,2 \cdot 1,358 \cdot 10^6) \cdot 20} = 0,095 \text{ эк/руб.}$$

**Пример 3. Определение эффективности операций формовки и лужения выводов интегральных микросхем ИС<sub>4</sub> в ГПК-1 ГАСК (с использованием табл. 1-6 Л.[14]).**

Исходные данные:  $Q_{П} = 1200$  эк/час;  $S = 3,6$  м<sup>2</sup>;  $N_{\Sigma} = 2,0$  кВт;  $C_{ОБ} = 100\,000$  руб;  $N_{ЭКЭМ} = 20$  ис<sub>2</sub>/эм, (выводы не имеют гарантии пайки), три резистивно-конденсаторных сборки Б20 (выводы имеют гарантию пайки),  $N_{ЭМ} = 10^4$  эм/год;  $N_A = 50$  тип эм/год; плата  $0,38 \times 0,38$  м.

Техпроцесс (подготовка, монтаж, пайка, отмывка и контроль) сборки ЭМ в ГАСК из ИС<sub>4</sub> и Б20 имеет шесть операций ( $n_{ОП} = 6$ ).

*Особенность технологии операций подготовки выводов ИС<sub>4</sub> в ГПК-1.* Техпроцесс подготовки выводов интегральных микросхем в четвертом типе корпуса ИС<sub>4</sub> (401.14-2), выполняемый в ГПК-1, содержит операции: формовку, обрезку в размер, флюсование, лужение выводов интегральных микросхем, касетирование ИС<sub>4</sub>.

*Формовку выводов прямоугольного сечения производят с радиусом, равным не менее двух толщин, а круглых – не менее двух диаметров. При формовке в месте соединения вывода с кристаллом возникают значительные растягивающие силы, способные разрушить соединение. Для их предотвращения в штампе имеется прижимной элемент. Прижим выполняют с усилием  $F_{ПР} = 0,25 \div 0,3$  от усилия изгиба ( $15 \div 1,5$  Н на вывод).*

Усилие формовки вывода при двух угловой гибке определяют по формуле  $F = (2 \div 4) \cdot B \cdot S \cdot \sigma_B \cdot K + F_{ПР}$ , где:  $B$  – ширина,  $S$  – толщина вывода ИС<sub>4</sub>,  $\sigma_B$  – временное сопротивление материала выводов,  $F_{ПР}$  – усилие прижима,  $K$  – таблич-

ный коэффициент (Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке). ИС<sub>4</sub> с завода изготовителя поступают с удлиненными выводами.

*Обрезку* выводов в размер обычно производят в одном штампе сразу после формовки.

*Лужение* выводов необходимо для обеспечения их паяемости. Выводы погружают в расплавленный припой, нагретый до температуры 230 ÷ 280° С. На границе раздела формируется слой интерметаллических соединений ≈ 0,8 ÷ 1,1 мкм. Горячее покрытие выводов оловянно-свинцовым сплавом повышает паяемость и сохраняет ее в течение года.

1. *Расчет трудоемкости и производительности операции подготовки выводов ИС<sub>4</sub>*

$$T_{\text{ШК}} = T_{\text{О}} + T_{\text{В}} + T_{\text{ОТД}} + T_{\text{ОБС}} + T_{\text{ПЕР}} \approx \frac{1,05}{Q} + T_{\text{ОБС}} + T_{\text{ПЕР}},$$

где  $T_{\text{О}}$  - основное время операции,  $T_{\text{В}}$  - вспомогательное время,  $T_{\text{ОТД}}$  - время отдыха,  $T_{\text{ОБС}}$  - время обслуживания,  $T_{\text{ПЕР}}$  - время на переналадку,  $Q_{\text{П}}$  - паспортная производительность единицы оборудования;

$$T_{\text{ОБС}} = \frac{t_{\text{С АНЭК}}}{N_{\text{ЭКАН}}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-2}}{900} = 0,178 \cdot 10^{-4} \text{ [час/эк]},$$

где  $t_{\text{С АНЭК}}$  - время смены автоматического накопителя,  $N_{\text{ЭКАН}}$  - количество компонентов в накопителе;

$$T_{\text{ПЕР}} = \frac{T_{\text{СГ}} + T_{\text{СБАН}} + T_{\text{СНПР}}}{N_{\text{ЭКЭМ}} \cdot N_{\text{ЭМ}}} = \frac{50 \cdot 10^{-2} + 25 \cdot 10^{-2} + 2,8 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^4} = 3,764 \cdot 10^{-6} \text{ [час/эк]},$$

где  $T_{\text{СГ}}$  - время смены головки,  $T_{\text{СБАН}}$  - время смены базовой части накопителя,  $T_{\text{СНПР}}$  - время смены носителя программ,  $N_{\text{ЭМ}}$  - годовой объем выпуска ячеек.

$$T_{\text{ШК}} = \frac{1,05}{Q_{\text{П}}} + T_{\text{ОБС}} + T_{\text{ПЕР}} = \frac{1,05}{1200} + 0,178 \cdot 10^{-4} + 3,764 \cdot 10^{-6} = 8,97 \cdot 10^{-4} \text{ [час/эк]};$$

годовая производительность:

$$Q_{\text{Г}} = \frac{K_3 \cdot \rho \cdot K_{\text{ГП}} \cdot F_{\text{ГЭФ}}}{T_{\text{ШК}}} = \frac{0,9 \cdot 0,98 \cdot 0,99 \cdot 4100}{8,97 \cdot 10^{-4}} = 3,99 \cdot 10^7 \text{ [эк/год об]},$$

количество единиц оборудования  $N_{\text{ОБ}} = \frac{N_{\text{ЭКЭМ}} \cdot N_{\text{ЭМ}} \cdot N_{\text{А}}}{Q_{\text{Г}}} = \frac{20 \cdot 10^4 \cdot 50}{3,99 \cdot 10^6} = 2,5$

[шт/оп], принимаем  $N_{\text{ОБ}} = 3$  [шт/оп]

$$Q_{\text{ГОП}} = Q_{\text{Г}} \cdot N_{\text{ОБ}} = 3,99 \cdot 10^6 \cdot 3 = 1,197 \cdot 10^7 \text{ [эк/год оп]}$$

где  $K_{\text{ГП}}$  - коэффициент, учитывающий выход годных изделий,  $\rho$  - коэффициент готовности,  $F_{\text{ГЭФ}}$  - годовой эффективный фонд времени оборудования,  $K_3$  - коэффициент загрузки оборудования.

2. *Расчет годовых производственных затрат постоянных:*

$$K_{\text{ГОП}} = (K_{\text{ОБ}} + K_{\text{ПЛ}}) \cdot N_{\text{ОБ}}$$

$$K_{\text{ОБ}} = E_{\text{Н}} \cdot K_1 \cdot C_{1\text{ОБ}} = 0,167 \cdot 1,13 \cdot 100000 = 1,887 \cdot 10^4 \text{ [руб./год об]},$$

где  $K_{\text{ОБ}}$  - постоянные затраты на единицу оборудования,  $E_{\text{Н}}$  - коэффициент, учитывающий затраты на эксплуатацию на 1 год,  $K_1$  - коэффициент, учитывающий затраты доставки и наладки,  $C_{1\text{ОБ}}$  - стоимость одной единицы оборудования;

постоянные затраты на производственную и служебную площадь (приходящиеся на единицу оборудования)  $K_{пл} = K_{шпл} + K_{спл}$

$$K_{пл} = C_{Ашпл} \cdot S_{об} \cdot \gamma + C_{Аспл} \cdot S_{ср} \cdot n_p = 200 \cdot 3,6 \cdot 4,5 + 200 \cdot 0,7 \cdot 0,25 = 3275 \text{ [руб./год об]}$$

$$K_{гоп} = (K_{об} + K_{пл}) \cdot N_{об} = (1,887 \cdot 10^4 + 3,275 \cdot 10^3) \cdot 3 = 6,64 \cdot 10^4 \text{ [руб./год оп]}$$

[ $K_{гоп}$  - постоянные годовые затраты,  $K_{шпл}$  - постоянные затраты на производственные площади,  $K_{спл}$  - постоянные затраты на служебные площади,  $C_{Ашпл}$  - годовая стоимость аренды 1 м<sup>2</sup> производственной площади,  $S_{об}$  - площадь, занимаемая единицей оборудования,  $\gamma$  - коэффициент увеличения площади,  $C_{Аспл}$  - годовая стоимость аренды 1 м<sup>2</sup> служебной площади,  $S_{ср}$  - служебная площадь, приходящаяся на одного рабочего,  $n_p$  - количество рабочих.];

**переменных :**

$C_z = K_d \cdot \varphi \cdot n_p = 1,7 \cdot 0,67 \cdot 0,25 = 0,285 \text{ [руб./час]}$  - затраты на зарплату рабочим,

$$C_{обс} = \frac{(C_M \cdot R_M + C_z \cdot R_z) \cdot \mu}{F_{ГЭФ}} = \frac{(30,6 \cdot 20 + 7,7 \cdot 3) \cdot 1,2}{4100} = 0,155 \text{ [руб./час]} - \text{затраты на эксплуатацию оборудования,}$$

$C_M$  - цена одной единицы ремонтосложности механической части,  $R_M$  - количество единиц ремонтосложности механической части,  $C_z$  - цена одной единицы ремонтосложности электрической части,  $R_z$  - количество единиц ремонтосложности электрической части,  $\mu$  - коэффициент, учитывающий наиболее сложное оборудование;

$$C_{пу} = \frac{C_{пу}}{F_{ГЭФ}} = \frac{700}{4100} = 0,17 \text{ затраты на программное управление,}$$

где  $C_{пу}$  - стоимость программного устройства;

$$C_{эл} = \frac{C_{квтч} \cdot N_{\Sigma} \cdot K_{ам} \cdot K_{ав} \cdot K_l}{\eta} = \frac{0,04 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 1,05}{0,95} = 0,0495 \text{ [руб./час]} -$$

затраты на электроэнергию, где  $C_{квтч}$  - стоимость одного кВтч эл.энергии,  $N_{\Sigma}$  - суммарная мощность энергоустановки,  $K_{ам}$  - коэффициент, учитывающий использование энергоустановок по мощности,  $K_{ав}$  - коэффициент, учитывающий использование электродвигателя по времени,  $K_l$  - коэффициент, учитывающий потери в сети,  $\eta$  - КПД;

$$C_{осн} = \frac{\Sigma K_{пф}}{z \cdot F_{ГЭФ}} = \frac{200}{2 \cdot 4100} = 0,0244 \text{ [руб./час]} - \text{затраты на оснастку, где}$$

$\Sigma K_{пф}$  - сумма, получаемая от учета всех типов оснастки (приемный стол),  $z$  - количество лет эксплуатации оснастки;

$$C_{ам} = \frac{C_{1ато} \cdot a}{F_{ГЭФ}} = \frac{100\,000 \cdot 0,2}{4100} = 4,878 \text{ [руб./час]} - \text{затраты на амортизацию,}$$

где  $C_{1ато}$  - покупная цена единицы оборудования,  $a$  - коэффициент амортизационных отчислений; затраты на эксплуатацию производственной и служебной площади  $C_{пл} = C_{шпл} + C_{спл}$

$$C_{\text{пл}} = \frac{Ц_{\text{эпл}} \cdot S_{\text{об}} \cdot \gamma}{F_{\text{гэф}}} + \frac{Ц_{\text{эспл}} \cdot S_{\text{пр}} \cdot n_{\text{р}}}{F_{\text{гэф}}} = \frac{20 \cdot 3,6 \cdot 4,5}{4100} + \frac{20 \cdot 0,7 \cdot 0,25}{4100} = 7,985 \cdot 10^{-2} \text{ [руб.час]}$$

затраты на площадь, где:  $C_{\text{пл}}$  – затраты на производственную площадь,  $Ц_{\text{эпл}}$  – годовая цена эксплуатации одного  $\text{м}^2$  производственной площади,  $C_{\text{спл}}$  – затраты на служебную площадь,  $Ц_{\text{эспл}}$  – годовая цена эксплуатации одного  $\text{м}^2$  служебной площади;

$$\text{цеховые затраты } C_{\text{ц}} \approx 0,4 \cdot C_3 = 0,4 \cdot 0,285 = 0,114 \text{ [руб./час]},$$

$$C = C_3 + C_{\text{об}} + C_{\text{пу}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{осн}} + C_{\text{пл}} + C_{\text{ц}} = 0,285 + 0,175 + 0,17 + 0,0495 + 4,878 + 0,0244 + 0,08 + 0,114 = 5,876 \text{ [руб./час]},$$

$$C_{\text{ути}} = \frac{З_{\text{мпр}} \cdot t_{\text{р1 ути}}}{F_{\text{мэф}} \cdot N_{\text{экэм}} \cdot N_{\text{эм}}} = \frac{250 \cdot 1}{192 \cdot 21 \cdot 10^4} = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ [руб./час]} - \text{затраты на}$$

разработку управляющей программы, где  $З_{\text{мпр}}$  – месячная зарплата разработчика (проектировщика),  $t_{\text{р1 ути}}$  – трудоемкость разработки одной управляющей программы,  $F_{\text{мэф}}$  – месячный эффективный фонд времени;

$$C_{1\text{эк}} = \frac{1}{n_{\text{оп}}} \cdot \left( Ц_{1\text{эк}} + \frac{Ц_{1\text{пл}}}{N_{\Sigma\text{экэм}}} \right) = \frac{1}{6} \cdot \left( 4 + \frac{8}{23} \right) = 1,058 \text{ [руб./эк]} - \text{стоимость уста-}$$

новки одного компонента, где  $n_{\text{оп}}$  – количество операций в техпроцессе сборки ЭМ в ГАСК,  $Ц_{1\text{эк}}$  – стоимость одного компонента (ИС<sub>4</sub>),  $Ц_{1\text{пл}}$  – цена одной печатной платы;

$$C_{\text{бр}} = \frac{N_{\text{бр}} \cdot C_{\text{зррсм}} \cdot t_{\text{испэм}} + 0,9 \cdot n_{\text{бр}} \cdot Ц_{1\text{эк}} \cdot N_{\text{экэм}}}{N_{\text{экэм}}} = 0,01 \cdot \frac{250}{192} \cdot 0,05 + 0,9 \cdot 0,01 \cdot 4 \cdot 23 = 0,036 \text{ [руб./час]}$$

затраты на брак, где  $N_{\text{бр}}$  – процент бракованных ячеек, собираемых на данном предприятии,  $C_{\text{зррсм}}$  – месячная зарплата ремонтника,  $t_{\text{испэм}}$  – трудоемкость исправления ячейки;

$$C'_{\text{гоп}} = (C \cdot T_{\text{шк}} + C_{\text{ути}} + C_{\text{бр}} + C_{1\text{эк}}) \cdot N_{\text{экэм}} \cdot N_{\text{эя}} \cdot N_{\text{а}} = (4,26 \cdot 8,97 \cdot 10^{-4} + 6,2 \cdot 10^{-6} + 0,036 + 1,058) \cdot 20 \cdot 10^4 \cdot 50 = 1,087 \cdot 10^7 \text{ [руб./час]}$$

$$K_{\text{нез}} = 0,3 \cdot N_{\text{экэм}} \cdot N_{\text{эя}} \cdot \left( C_{1\text{эк}} + \frac{C'_{\text{гоп}}}{2 \cdot N_{\text{экэм}} \cdot N_{\text{эм}}} \right) \cdot \frac{\sigma}{n_{\text{оп}}} = 0,3 \cdot 20 \cdot 10^4 \cdot \left( 1,058 + \frac{1,087 \cdot 10^7}{2 \cdot 20 \cdot 10^4} \right) \cdot \frac{1,2}{6} = 1,594 \cdot 10^4 \text{ [руб./год]}$$

- затраты, связанные с незавершенным производством

$$C_{\text{гоп}} = C'_{\text{гоп}} + K_{\text{нез}} = 1,087 \cdot 10^7 + 1,594 \cdot 10^4 = 1,088 \cdot 10^7 \text{ [руб./год]}$$

$$P_{\text{оп}} = \frac{Q_{\text{гоп}}}{(1,2K_{\text{гоп}} + 1,2C_{\text{гоп}}) \cdot K_{\text{и}}} = \frac{1,197 \cdot 10^7}{(1,2 \cdot 6,64 \cdot 10^4 + 1,2 \cdot 1,088 \cdot 10^7) \cdot 50} = 0,92 \text{ [эк/руб.]}$$

комплексный показатель эффективности структуры ГАСК,

$K_{\text{ТР}} = 0,2 \cdot K_{\text{ГОП}}$  - капитальные затраты на транспортные операции,  
 $C_{\text{ТР}} = 0,2 \cdot C_{\text{ГОП}}$  - текущие затраты на транспортные операции,  $K_{\text{И}}$  - коэффициент приведения к расчетному году.



### Контрольные вопросы

1. В чем заключена адаптация изделия ЭМ к условиям сборки в ГАСК.
2. Перечислите операции входящие техпроцесса сборки ЭМ в ГАСК.
3. В чем заключается разработка операционной технологии сборки ЭМ в РТК.
4. Каким требованиям должна отвечать операция монтажа ЭК в РТК.
5. Назовите метод оптимизации очередности монтажа ЭК в РТК.
6. Что является критерием при оптимизации очередности монтажа ЭК в РТК.
7. Какие ограничения учитывают при оптимизации очередности монтажа ЭК.
8. Назовите основные характеристики операции монтажа ЭК в РТК.
9. Какие виды информации необходимо определить при разработке управляющей технологической программы монтажа ЭК в РТК.
10. Назовите структуру управляющей технологической программы монтажа ЭК в РТК.

### Приложение

#### Элементарные технологические операции сборки ЭА

Технологические операции сборки ЭА Таблица ТП1

Технологические операции сборки ЭА		Таблица ТП1			
Механические операции. Основные параметры: F, M, T <sub>о</sub> , C					
Гибка	$\delta_{2\text{min}} \geq t_{\text{max}};$ $F_{\text{пр}} > F_{\text{раст}};$	$R_{\Gamma \text{ min}} \geq 2 \cdot t_{\text{max}};$ $F_{\text{раст}} = F_{\text{рв}} \cdot n_a$			
	$F_{\text{рв}}$ , кгс	0,25	0,5	1,0	2,0
	$S_{\text{в}}$ , мм <sup>2</sup>	до 0,1	0,1...0,2	0,2...0,5	0,5...2,0
Гибка выводов ЭК -образная 	$F_{\Gamma 1} = [(2...4) \cdot b \cdot t \cdot \sigma_{\text{и}} \cdot K + F_{\text{пр}}] \cdot n_{\text{в}};$ $F_{\text{пр}} \approx (0,25...0,3) \cdot F_{\Gamma}$				
Гибка выводов ЭК ┌-образная 	$F_{\Gamma 2} = (1,25 \cdot b \cdot t \cdot \sigma_{\text{и}} \cdot K + F_{\text{пр}}) \cdot n_{\text{в}}$ или $F_{\Gamma 2} = (1,25 \cdot S_{\text{в}} \cdot \sigma_{\text{и}} \cdot K + F_{\text{пр}}) \cdot n_{\text{в}};$				
Гибка выводов ЭК на угол < 90°	$F_{\Gamma 3} = (K \cdot b \cdot t \cdot \sigma_{\text{и}} + F_{\text{пр}}) \cdot n_{\text{в}}$ или $F_{\Gamma 3} = (K \cdot S_{\text{в}} \cdot \sigma_{\text{и}} + F_{\text{пр}}) \cdot n_{\text{в}};$ $T_{\text{ог}};$ $C_{\Gamma}$				

Обрезка выводов ЭК	$F_{обр1} = (K \cdot b \cdot \tau_{cp} \cdot t + F_{пр}) \cdot n_v$ (для алюминия $\tau_{cp} = 10 \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{мм}^2$ ), $F_{обр2} = (K \cdot 0,78 \cdot D_v^2 \cdot \tau_{cp} + F_{пр}) \cdot n_v$ ; $T_{обр}$ , $C_{обр}$
Развальцовка	$F_{разв} = 0,25 \cdot (D_n - D_{вн}) \cdot K \cdot \sigma_T \cdot D_{разв} / D_n$ ; $T_{оразв}$ , $C_{разв}$
Клепка	$F_{кл} = K \cdot D_{пр}^{1,75} \cdot \sigma_v^{0,75}$ ; $T_{окл}$ , $C_{кл}$
Напрессовка припоя на планарные выводы микросхем ИС <sub>4</sub>	$F_{напр} = \sigma_T \cdot b \cdot t \cdot n_v$ (для ИС <sub>4</sub> $b \cdot t = 0,3-0,1$ — применяют проволочный припой $D_{пр} = 0,31 \dots 0,35 \text{ мм}$ ; длина навески $l_{пр} = 0,5 \cdot (b + t_{ш}) \cdot n_v$ ; $T_{онапр}$ , $C_{напр}$
Свинчивание	$M_{зат} = 0,5 \cdot D_{cp} \cdot F_{св}$ ; $M_{зат} = 0,05 \cdot D_p \cdot \sigma_n \cdot (6,5 \cdot \mu + 1)$ ; $n = 300 \dots 900 \text{ об/мин}$ ; $T_{осв}$ , $C_{св}$

Таблица ТПІ (окончание)

Склеивание	$F_{скл} = K \cdot S_k \cdot q$ ( $q = 0,2 \text{ кгс} / \text{см}^2$ ) $V_k = S_k \cdot t_k$ ( $t_k = 0,05 - 0,15$ )
Накрутка	$F_{накр} = F_{ст}$ ; $F_{ст} \geq 1,5 \dots 3,5 \text{ кг} \cdot \text{с}$ ; $l_{пр1} = (x_i - x_{i-1}) + (y_i - y_{i-1}) + 2 \cdot l_{накр}$ ; $l_{накр} = [n_1 \cdot D_{ш} + (n_2 + 1) \cdot D_{на} + (n_1 + n_2) \cdot S_2] \cdot N + S_1 + (n-1) \cdot S_3 + 2 \cdot D_{из}$ ; $H_{ш1} = (n+1) \cdot D_{ш} + 3 \cdot S_1 + 3 \cdot D_{на} + S_2$ ; $H_{шм1} = (n+1) \cdot D_{ш} + 2 \cdot S_1 + 4 \cdot D_{на} + S_2$ ; $H_{ш2} = 2 \cdot (n+1) \cdot D_{ш} + 6 \cdot S_1 + 3 \cdot D_{на} + 2 \cdot S_2$ ; $H_{шм2} = 2 \cdot (n+1) \cdot D_{ш} + 6 \cdot S_1 + 7 \cdot D_{на} + 2 \cdot S_2$ ; $T_{онакр}$ ; $C_{накр}$
Намотка	$W = (25 \cdot L \cdot (12 \cdot D_n - 7 \cdot D_{вн} + 18 \cdot B))^{1/2} / (D_{вн} + D_n)$ ; $D_{вн} = D_k$ ; $D_n = D_{вн} + 2 \cdot H$ ; $R = 4 \cdot \rho \cdot l_{cp} \cdot W / (\pi \cdot D_{ж}^2)$ ; $l_{об} = l_{cp} \cdot W$ ; $l_{cp} = 0,5 \cdot (D_n - D_{вн})$ ; $H = D_{на} \cdot H$ ; $L = \mu \cdot a \cdot W^2 \cdot \pi \cdot D_{ж}^2 / (4 \cdot l_{об})$ ; $m = W / \omega$ ; $\omega = B / D_{на}$ $W = (25 \cdot L \cdot (12 \cdot D_n - 7 \cdot D_{вн} + 18 \cdot B))^{1/2} / (D_{вн} + D_n)$ ; $D_{вн} = D_k$ ; $D_n = D_{вн} + 2 \cdot H$ ; $R = 4 \cdot \rho \cdot l_{cp} \cdot W / (\pi \cdot D_{ж}^2)$ ; $l_{об} = l_{cp} \cdot W$ ; $l_{cp} = 0,5 \cdot (D_n - D_{вн})$ ; $H = D_{на} \cdot H$ ; $L = \mu \cdot a \cdot W^2 \cdot \pi \cdot D_{ж}^2 / (4 \cdot l_{об})$ ; $m = W / \omega$ ; $\omega = B / D_{на}$
Намотка рядовая	$F_n = 8,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ ; $n_{ш} = 30 \cdot F_n \cdot T_n / [T_1 \cdot C \cdot R_n \cdot (1 + 1,1 \cdot T_n / T_T)] \leq n_{шдоп}$ ; $V_{доп} = 10^{-3} \cdot D_n \cdot n_{шдоп}$ ; $S = D_{на}$ ; $T_{он} = T_n + (W - W_1) / n_{ш}$ ; $W_1 = 0,5 \cdot T_n \cdot n_{ш}$ ; $T_{он}$ ; $C_n$ $F_n = 8,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ ; $n_{ш} = 30 \cdot F_n \cdot T_n / [T_1 \cdot C \cdot R_n \cdot (1 + 1,1 \cdot T_n / T_T)] \leq n_{шдоп}$ ; $V_{доп} = 10^{-3} \cdot D_n \cdot n_{шдоп}$ ; $S = D_{на}$ ; $T_{он} = T_n + (W - W_1) / n_{ш}$ ; $W_1 = 0,5 \cdot T_n \cdot n_{ш}$ ; $T_{он}$ ; $C_n$

Намотка секторная или кольцевая	$I_{пр} = R \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot D_{ж} / 4$ ; $W = I_{пр} / I_{срв}$ ; $I_{срв} = 2 \cdot h + 2 \cdot b + \pi \cdot D_{на}$ ; $\varphi = W \cdot S \cdot 360^\circ / (\pi \cdot D_{ср})$ ; $S = D_{на}$ ; $W_{ш} = (I_{пр} + 2 \cdot I_{к}) / (\pi \cdot D_{шн})$ ; $F_{нат} \leq F_{ндоп}$ ; $F_{натдоп} = 1,9 \cdot 10^4 \cdot D_{ж}^2 (\text{гс}) = 19 \cdot D_{ж}^2 (\text{кгс})$
Вклейка, переклейка ЭРЭ в ленту	$L_{вк} = L_3 + 2 \cdot B_m + 2 \cdot B_a + B_p$ ; $L_3 = L_y + 2 \cdot B_n - d_b$ ; $L_a = L_{вн} + 2 \cdot B_l$ ; $T_{овкл}$ ; $C_{вкл}$ $L_{вк} = L_3 + 2 \cdot B_m + 2 \cdot B_a + B_p$ ; $L_3 = L_y + 2 \cdot B_n - d_b$ ; $L_a = L_{вн} + 2 \cdot B_l$ ; $T_{овкл}$ ; $C_{вкл}$

**Примечание.** Обозначения в таблице ТП1:  $\delta_a$  – зазор между пуансоном и матрицей гибочного штампа в (для ИС<sub>4</sub>  $\delta_a = 0,1 \dots 0,15$ ), мм;  $R_r$ ,  $t$ ,  $b$ ,  $S_b$  – радиус гйба, толщина, ширина и сечение вывода, мм;  $F_r$ ,  $F_{рв}$  – вертикальной плоскости,  $F_{раст}$ ,  $F_{пр}$ ,  $F_{обр1}$ ,  $F_{обр2}$ ,  $F_{разв}$ ,  $F_{кл}$ ,  $F_{скл}$ ,  $F_{накр}$ ,  $F_{св}$ ,  $F_n$ ,  $F_{ст}$  – соответственно усилия гибки, растяжения вывода, суммарного растяжения, прижатия вывода, обрезки прямоугольного и круглого сечения выводов, развальцовки, клепки, склеивания, напрессовки припоя на вывод, свинчивания, натяжения провода при намотке, стягивания проводника со штыря при контроле качества накрутки, кгс;  $K$  – коэффициент запаса (для гибки выводов ИС<sub>4</sub>  $K = 1,2$ );  $\sigma_b$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_n$ ,  $\tau_{ср}$  – соответственно предел прочности, текучести, изгиба, среза материала выводов ЭК, кгс/мм<sup>2</sup>;  $M_{зат}$  – момент затяжки винта, кг·см;  $D_p$  – средний диаметр резьбы, мм;  $\mu$  – коэффициент трения головки винта об опорную поверхность (без смазки  $\mu = 0,14$ );  $q$  – удельное усилие прижима склеиваемых деталей (обычно  $q = 0,2$ ), кг/см<sup>2</sup>;  $S_k$  – площадь нанесения клея, см<sup>2</sup>;  $t_k$  – толщина слоя клея [ $t_k = (5 \dots 15) \cdot 10^{-3}$ ], см;  $V_k$  – объем капли клея, см<sup>3</sup>;  $\sigma_{ик}$  – предел прочности клееного соединения ( $\sigma_{ик} = 40 \dots 160$  кг/см<sup>2</sup>);  $T_{жк}$ ,  $T_{окг}$ ,  $T_{окх}$  – соответственно время нахождения клея в жидком состоянии; время полимеризации при подогреве и без него ( $T_{жк} = 1 \dots 4$ ,  $T_{окг} = 0,4 \dots 3$ ,  $T_{окх} = 20 \dots 25$ ), ч;  $I_{пр}$ ,  $I_{нкp}$  – длина провода связи и длина накручиваемой на штырь части провода, мм;  $H_{ш1}$ ,  $H_{ш2}$  и  $H_{шм1}$ ,  $H_{шм1}$  – длина штыря для немодифицированной и модифицированной накрутки при одном и двух соединениях на штыре;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – соответственно расстояние между витками одного соединения, между корпусом разъема и первым витком нижнего соединения, между соседними соединениями, мм;  $n$  – число витков в одном соединении (из них  $n_1$  – изолированных и  $n_2$  – неизолированных);  $N$  – число соединений на штыре;  $D_{ж}$ ,  $D_{на}$  – диаметр провода обмотки по металлу и по изоляции, мм;  $D_n$ ,  $D_{вн}$ ,  $D_k$  – диаметры обмотки: наружный, внутренний и каркаса катушки, мм;  $B$  – ширина обмотки, мм;  $W$ ,  $W_1$ ,  $\omega$  – число витков обмотки, число витков, намотанное в период разгона шпинделя и число витков в одном слое;  $I_{пр}$ ,  $I_{срв}$ ,  $I_k$  – соответственно длина провода обмотки, средняя длина провода одного витка, длина вывода, мм;  $H$  – высота обмотки;  $L$ ,  $R$ ,  $\rho$  – индуктивность, сопротивление обмотки и удельное сопротивление материала провода;  $S$ ,  $\varphi$  – шаг и угол наматывания;  $T_n$ ,  $T_t$  – время пуска и торможения шпинделя (для станка СРН-0,5  $T_n = 2,5$  с,  $T_t = 1$  с), с;  $n_{ш}$ ,  $V$  – число оборотов шпинделя и скорость наматывания;  $R_n$ ,  $h$ ,  $b_k$  – радиус скругления каркаса, его высота и толщина, мм;  $C$  – коэффициент, учитывающий инерционность станка (для станка СРН-0,5  $C = 0,1$  г·с<sup>2</sup>/см);  $L_3$  – длина ЭРЭ;  $L_a$  – длина заготовки ЭРЭ;  $B_m$ ,  $B_a$ ,  $B_p$ ,  $B_n$ ,  $B_l$ ,  $d_b$ ,  $L_{вн}$  – размеры соответственно: ширина матрицы вырубki ( $B_m = 2$  мм), минимальный зазор между матрицей и подающим колесом ( $B_a = 0,5$  мм), ширина подающего колеса ( $B_p = 0,8$  мм), ширина пуансона вырубki ( $B_n = 7,5$  мм), диаметр выводов ЭРЭ, ширина липкой ленты, расстояние между внутренними краями ленты увеличивают до ближайшего значения (для



класса А  $L_{\text{вн}} = 40$  мм, для класса В  $L_{\text{вн}} = 50$  мм, для класса С  $L_{\text{вн}} = 60$  мм),  $T_{\text{ог}}$ ,  $T_{\text{обр}}$ ,  $T_{\text{оразв}}$ ,  $T_{\text{окл}}$ ,  $T_{\text{онапр}}$ ,  $T_{\text{осв}}$ ,  $T_{\text{оскл}}$ ,  $T_{\text{онакр}}$ ,  $T_{\text{он}}$ ,  $T_{\text{овкл}}$  - время операции гибки, обрезки, развальцовки, клейки, напрессовки припоя, свинчивания, склеивания, накрутки, намотки, клейки ЭРЭ в ленту;  $C_{\text{г}}$ ,  $C_{\text{обр}}$ ,  $C_{\text{разв}}$ ,  $C_{\text{кл}}$ ,  $C_{\text{напр}}$ ,  $C_{\text{св}}$ ,  $C_{\text{скл}}$ ,  $C_{\text{накр}}$ ,  $C_{\text{н}}$ ,  $C_{\text{вкл}}$  - себестоимость для тех же операций.

Операции подготовки модулей ЭЯ к пайке

Таблица ТП2

Операции	Основные параметры: $h_{\text{фл}}$ , $V_{\text{фл}}$ , $R_{\text{фл}}$ , $t_{\text{фл}}$ , $T_{\text{офл}}$ , $T_{\text{под}}$ , $T_{\text{опод}}$ , $C_{\text{под}}$
Флюсование ЭМ	Флюс на основе канифоли, например, SW3 (20...25% - канифоли, 5% - салициловой кислоты, остальное - этиловый или изопропиловый спирт), наносится на ПП с противоположной монтажу стороны пенным, волновым или струйным способом. $h_{\text{фл}} = 5...10 \pm 10$ мм; $V_{\text{фл}} = 200...450$ мм; $R_{\text{фл}} = 0,8...1 \pm 0,002$ г/см <sup>3</sup> ; $t_{\text{фл}} = 2...4$ мкм
Подогрев ЭМ	$T_{\text{под}} = (80...130)^{\circ}\text{C}$ ; для односторонних ПП $T_{\text{под}} = (80...90)^{\circ}\text{C}$ ; для двусторонних с $t_{\text{пп}} < 1,6$ мм $T_{\text{под}} = (100...110)^{\circ}\text{C}$ ; для МПП с $t_{\text{пп}} < 1,6$ мм $T_{\text{под}} = (105...120)^{\circ}\text{C}$ ; МПП $1,6 < t_{\text{пп}} < 2,4$ мм $T_{\text{под}} = (120...130)^{\circ}\text{C}$ .

Операции пайки модулей ЭЯ

Таблица ТП3

Операции	Основные параметры: $T_{\text{п}}$ , $U_{\text{п}}$ , $F_{\text{пр}}$ , $F_{\text{отр}}$ , $S_{\text{п}}$ , $T_{\text{оп}}$ , $C_{\text{п}}$
Пайка штырьковых выводов ИС <sub>2</sub> и ЭРЭ (пайка волной припоя)	Припой на основе свинца и олова с низкой температурой плавления, например, LSnS0Sb (Pb-Sn - 50 %, Sb - 0,5...2 %, допустимые примеси: Sn+As+Ni - 0,18 %, Zn+Cd+Al - 0,005 %); $T_{\text{сол}} = 186^{\circ}\text{C}$ ; $T_{\text{ликв}} = 205^{\circ}\text{C}$ ; $R_{\text{пр}} = 8,7$ г/см <sup>3</sup> ; $T_{\text{п}} = 200...270^{\circ}\text{C}$ ; $\lambda = 8...10^{\circ}\text{C}$ ; $h_{\text{в}} = 2...8$ мм; $T_{\text{оп}} = 0,7...2$ с; $V_{\text{тр}} = 0,5...3$ м/мин.
Пайка планарных выводов ИС <sub>4</sub> : 1. групповым паяльником с косвенным нагревом	$T_{\text{пл}} = (100...300)^{\circ}\text{C}$ ; $F_{\text{прис}} = 0,15 \pm 0,02$ кгс; $S_{\text{пmin}} \geq 50$ %; $F_{\text{прв}} = 1$ кгс; $T_{\text{оп}} = (1...5)$ с/ИС. Паяльник выполнен из меди или никеля с пазом и канавками на рабочем торце.
2. групповым U-образным паяльником	$S = 1,25$ и $0,625$ мм; $U_{\text{п}} = 1,62$ В; $T_{\text{п}} = (420...500)^{\circ}\text{C}$ ; $F_{\text{прв}} = (1...2,5)$ кгс; $S_{\text{пmin}} \geq 50$ %; $F_{\text{отр}} = 0,41$ кгс; $T_{\text{оп}} = 0,72$ с/ИС.
3. пайка сопротивлением	Материал плат - фенольный гетинакс. Толщина меди на КП платы - 0,025 мм. Материал паяльника - молибден. $S = 1,25$ и $2,5$ мм; $U_{\text{п}} = (0,2...0,4)$ В; $F_{\text{прв}} = 0,35$ кгс; $S_{\text{пmin}} \geq 75$ %; $F_{\text{отр}} = 0,75$ кгс; $T_{\text{оп}} = (0,02...0,16)$ с/В.

**Примечание.** Обозначения в таблице ТП3: где:  $h_{\text{фл}}$ ,  $V_{\text{фл}}$  - высота и ширина флюса;  $R_{\text{фл}}$  - плотность флюса;  $t_{\text{фл}}$  - толщина покрытия флюсом;  $T_{\text{под}}$  - температура подогрева ПП;  $t_{\text{пп}}$  - толщина ПП;  $T_{\text{сол}}$ ,  $T_{\text{ликв}}$  - температура солидуса и ликвидуса припоя;  $R_{\text{пр}}$  - плотность припоя;  $T_{\text{п}}$  - температура пайки;  $h_{\text{в}}$  - высота волны припоя;  $T_{\text{оп}}$ ,  $C_{\text{п}}$  -

Операции контроля собранных ЭЯ

Таблица ТП4

Контроль качества	Тепловой (например, по величине ИК - сигнала)	
Контроль соединений	Прозвонка цепей (связей), сравнение фактических связей с табличными по чертежу; выявление КЗ и лишних связей. Внутрисхемное тестирование (определение правильности коммутационной схемы). Тестирование электронных компонентов; $T_{окс}$ , $C_{кс}$ .	
Контроль уровней импульсного сигнала	ТТЛ $0,13 В < U^0 < 0,4 В$ $2,4 В < U^1 < 4,5 В$ $T_{оку}$ , $C_{ку}$ .	ЭСЛ $0,68 В < U^0 < 0,98 В$ $1,63 В < U^1 < 1,9 В$
Определение времени задержки	$T_a$ ; $T_{ока}$ ; $C_{ка}$ .	
Определение уровня	$A_{вых}/A_{вх}$ ; $T_{окуа}$ ; $C_{куа}$ .	
Определение коэффициента усиления	$K_u$ ; $T_{оку}$ ; $C_{ку}$ .	
Параметрический статический контроль	Замер величины напряжения и тока: $\sim U$ , $\sim I$ , $=U$ , $=I$ и сравнение их с табличными. Замер частоты $f$ сигнала переменного тока. Замер $T_{опк}$ , $C_{пк}$ .	
Динамический контроль	Замер величины перерегулирования $\sigma$ кривой переходного процесса, времени переходного процесса $T_p$ , частоты среза $\omega_{ср}$ , полосы пропускания $\omega_p$ , крутизны переднего и заднего фронтов импульсного сигнала $T_{зап}$ и др. $T_{одк}$ , $C_{дк}$ .	

## Литература

1. Иванов Ю. В., Лакота Н. А. Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов: Учеб. пособие. - М.: Радио и связь, 1987,-464 с
- 2 Малов А. Н., Иванов Ю. В. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов: Учебник. - М.: Машиностроение. 1974. - 368 с.
3. Иванов Ю. В. Автоматизация сборки в условиях гибкого производства Обзор ВНИИТЭМР. Серия 6. - 1988. - Выпуск 2.-42 с.
- 4 Иванов Ю.В. Проектирование операций сборки, выполняемых на оборудовании с ЧГГУ: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 1984. - 32 с.
5. Иванов Ю.В.. Автоматизированная адаптация изделий электронных ячеек к условиям сборки в гибком автоматизированном комплексе // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2001. - № 3. - С. 100-112.
6. Иванов Ю.В. Проектирование координатных систем с быстродействующими следящими приводами для автоматизации сборки электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002. - 38 с.
7. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования грузочных устройств электронных компонентов для автоматизированной сборки электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002.
8. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования устройств захвата электронных компонентов для автоматической сборки электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002.
9. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования головок монтажа электронных компонентов для автоматической сборки электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002.
11. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования специального технологического оснащения гибкого автоматизированного сборочного комплекса производства электронной аппаратуры: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002.
12. Ханке Х.И, Фабиан Х. Технология производства РЭА.-М.: Энергия, 1980.
13. Иванов Ю. В. Повышение эффективности сборки изделий //Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1995. -№4.
14. Иванов Ю.В. Курсовая работа по автоматизированному производству электронных систем: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2004. - 30 с.
15. Иванов Ю.В. Автоматизированная разработка управляющих технологических программ монтажа ЭРЭ с оптимизацией их последовательности на автомате с С ЧГГУ: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2002.
16. Иванов Ю.В. Проектирование простых роботизированных комплексов сборки электронной аппаратуры: Уч. пособие. - МГТУ, 2004. - 44 с.
17. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования сложных роботизированных комплексов сборки электронной аппаратуры: Уч. пособие. - МГТУ, 2004. - 46 с.

18.Иванов Ю.В. Автоматизированное проектирование технологических процессов сборки электронной аппаратуры в гибких автоматизированных комплексах: Учебное пособие. - М.: МГТУ, 2004. - 31 с.

19. Иванов Ю.В. Автоматизированная разработка управляющих технологических программ монтажа и пайки интегральных микросхем с планарными выводами на автомате с ЧГТУ с оптимизацией очередности: Учеб. пособ. М.: МГТУ, 1993.

20. 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.

21. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах/А.В. Егунов, Б.Л. Жоржوليани, В.Г. Журавский; Под редакцией В.Г. Журавского. - М.: Радио и связь, 1988. - 280 с.

## Оглавление

Введение .....	3
Проектирование операций сборки электронных модулей а автоматах ГАСК .....	3
Требования, предъявляемые автоматизацией к проектированию операций сборки электронных модулей .....	
Метод синтеза АТОП и их элементов .....	3
Автоматизированное проектирование технологических операций сборки ЭМ из однотипных компонентов .....	9
Оптимизация очередности монтажа компонентов ЭК на плату .....	10
Алгоритм автоматизированного формирования операционных карт сборки ячеек ЭМ в ГАСК .....	15
Алгоритм формирования блоков УТП монтажа ЭК на плату для АТО с ЧПУ .....	18
Формирование оптимальной операции сборки ЭМ .....	19
Алгоритм автоматизированного проектирования оптимальных операций сборки ЭМ из однотипных компонентов .....	19
Автоматизированное проектирование операций подготовки, пайки, отмывки и контроля .....	22
Проектирование оптимальных подструктур ГАСК .....	28
Примеры расчетов операций сборки электронных модулей из однотипных компонентов .....	29
Контрольные вопросы .....	38
Приложение .....	38
Литература .....	43