

УДК 658.52.01

Оптимизация технологических операций сборки в роботизированном комплексе ГАСК электронных модулей из разнотипных компонентов многономенклатурного производства

Ю.В. Иванов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Optimization of assembling electronic modules from heterogeneous multiproduct manufacturing components in the robotic flexible automated assembly complex

Yu.V. Ivanov

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.

 e-mail: Yvivanov@bmmstu.ru

i Представлен комплексный подход к оценке результатов проектирования с учетом разнотипных компонентов, точности, надежности, производительности, стоимости, структурной и параметрической оптимизации, а также обоснованного выбора марок однопредметного и многопредметного оборудования. Приведена методика оптимизации технологических операций АТОП_{КРП} сборки в роботизированном комплексе ГАСК электронных модулей из разнотипных компонентов многономенклатурного производства. Компьютерное проектирование и оптимизация операций выполняются на моделях, получаемых при разработке роботизированного комплекса ГАСК. Предлагаемая методика отличается от существующих комплексным подходом (применено два вида оптимизации — структурная (максимальная интеграция) и параметрическая (оптимальная очередность монтажа компонентов)). В ней приведены: синтез вариантов оптимальных операций; комплексная оценка их точности, надежности, производственных затрат; расчет характеристик АТОП_{КРП}; сравнение с допусками и отсеивание неэффективных вариантов; определение эффективности операций, прошедших тестирование; выбор оптимального варианта (по комплексному показателю эффективности) и формирование модели оптимальной операции АТОП_{КРП}.

Ключевые слова: технологическая операция, электронный модуль, параметрическая оптимизация, структурная оптимизация, эффективность, синтез.

i A comprehensive approach to assessing design outcomes is proposed. The approach takes into account the diversity of components, their accuracy, reliability, efficiency, and cost, the structural and parametric optimization, as well as the principles of choosing a single or multi-component equipment type. An optimization technique for assembling electronic modules from heterogeneous components in multiproduct manufacturing using the robotic flexible automated assembly complex (FAAC) is presented. The computer-aided design and optimization of operations is performed on the models obtained during the FAAC development. The proposed technique is based on the comprehensive approach. Two types of optimization are used: the structural optimization that implies maximum integration and the parametric optimization that implies the optimal sequence of assembling components. The technique involves the synthesis of optimal operations, the comprehensive assessment of their accuracy, reliability and production costs, the comparison with required tolerances and rejection of inefficient options, determining the efficiency of tested operations, choosing the optimal option (by the integrated efficiency criterion), and the formation of models of optimal operations.

Keywords: production operation, electronic module, parameter optimization, structural optimization, efficiency, synthesis.

Электронные модули (ЭМ) нашли широкое применение в электронной аппаратуре различного назначения. Объем их выпуска в обозримом будущем будет увеличиваться, поэтому актуальна автоматизация производства ЭМ. Однако многономенклатурный характер производства (по статистике более 80 %) делает ее трудно выполнимой. Наиболее эффективной является сборка ЭМ в роботизированном комплексе, например ГАСК [1]. Научной новизной данного исследования является методология проектирования ГАСК, без которой невозможно создание ГАСК. При этом проектирование ГАСК и его элементов должно выполняться по специальной методологии [2] и должно быть построено на основе оптимальных технологических, транспортных операций, подструктур, с учетом компоновки оборудования и вероятностного характера сборки. Для этого необходимы методы проектирования (синтеза, технико-экономической оценки (ТЭО), оптимизации, точности, надежности, производительности, стоимости) и методики проектирования оптимальных технологических операций сборки ЭМ из однотипных и разнотипных компонентов с учетом вероятностного характера сборки; оптимальных транспортных операций, компоновки оборудования, оптимальных структур.

Методы синтеза, ТЭО, оптимизации, точности, надежности, производительности, стоимости и методики проектирования транспортных операций, компоновки оборудования, оптимальных структур и техпроцессов сборки ЭМ из однотипных электронных компонентов (ЭК) разработаны и будут представлены в других статьях.

Обзор публикаций по данной теме [1–4] показал, что в многономенклатурном производстве отсутствует автоматизация ЭМ. В работах [5, 6] описана сборка ЭМ в роботизированном комплексе многономенклатурного производства, приведена методология проектирования, но без детальной проработки (без проектирования и оптимизации технологических операций). В предлагаемой статье сделана попытка восполнить этот пробел.

Проектирование технологических операций сборки ЭМ из разнотипных ЭК со структурной и параметрической оптимизацией (АТОП_{КРП}) является частью методологии. Проектирование и оптимизация операций выполняются на моделях, которые получают при разработке роботизированного комплекса ГАСК.

Цель исследования — разработать методику проектирования оптимальных технологических операций сборки ЭМ из разнотипных компонентов ЭК для обоснованного выбора технологических автоматов и роботов (далее АТО) технологических процессов (АТП) и структур роботизированных комплексов (ГАСК) сборки ЭМ в многономенклатурном производстве.

В методике АТОП_{КРП} применено два вида оптимизации: структурная (максимальная интеграция монтажа разнотипных компонентов на одном автомате) и параметрическая (оптимальная очередность монтажа компонентов на плату). Структурная оп-

тимизация выполнена методом перебора, параметрическая — методом полного многоугольника.

Компьютерное проектирование оптимальных технологических операций сборки модулей ЭМ из однотипных компонентов в роботизированном комплексе ГАСК (АТОП_{КОП}) является первым этапом проектирования оптимальных структур ГАСК [2]. На втором этапе разрабатываются техпроцессы и на их основе подструктуры сборки ЭМ из однотипных ЭК, на третьем — компоновка оборудования; оптимальные технологические операции АТОП_{КРП} (сборка ЭМ из разнотипных компонентов ЭК), транспортные операции и на их основе оптимальные структуры ГАСК.

ГАСК предъявляет к проектированию технологических операций АТОП_{КРП} следующие требования: 1) проектирование должно быть компьютерным; 2) с максимальной концентрацией (интеграцией) монтажа компонентов на каждом рабочем месте; 3) многовариантным; 4) с оптимизацией последовательности монтажа ЭК; 5) компоненты ЭК должны быть в групповой упаковке; 6) упаковка компонентов ЭК и подготовка выводов ЭК должны соответствовать требованиям сборочного технологического автомата или робота; 7) для каждого типа АТО с ЧПУ должны разрабатываться операционная технология и управляющие программы пользователя; 8) определение эффективности операции должно выполняться по комплексному показателю эффективности $P_{оп}$ [6]:

$$P_{оп} = \frac{Q_{г.оп}}{K_{г.оп} + K_{тр} + C_{г.оп} + C_{тр}},$$

где $Q_{г.оп}$ — годовая производительность операции; $K_{г.оп}$ и $C_{г.оп}$ — постоянные и переменные годовые технологические затраты на операцию; $K_{тр}$ и $C_{тр}$ — постоянные и переменные годовые транспортные затраты на операцию.

В свою очередь показатель эффективности $P_{оп}$ учитывает: конструкторско-технологические особенности собираемых изделий ЭМ, технологических автоматов, промышленных роботов, технологической оснастки; производительность операции; годовую программу выпуска изделий; их номенклатуру, условия запуска ЭМ в производство.

Компьютерное проектирование оптимальных операций с концентрацией разнотипных переходов (АТОП_{КРП}) состоит из следующих этапов:

- 1) синтез множества операций АТОП_{КРП};
- 2) проверка соответствия вариантов операций АТОП_{КРП} допускам по точности, надежности, годовым затратам;
- 3) определение эффективности операций по комплексному показателю $P_{оп}$ и формирование модели оптимальной операции АТОП_{КРП}.

Синтезу операций АТОП_{КРП} предшествует постановка задачи с учетом ограничений.

Постановка задачи проектирования операции АТОП_{КРП}. Модель проектирования оптимальной операции АТОП_{КРП} имеет вид

$$\begin{aligned} & \left(\tilde{O}_{k_{\text{опт}}}^{\text{крп}}, T_{k_{\text{опт}}}^{\text{крп}}, C(T_{k_{\text{опт}}}^{\text{крп}}) \right) = \\ & = \arg \max \left[P_{\text{оп}} \left(\tilde{O}_{k_v}^{\text{крп}}, T_{k_v}^{\text{крп}}, C(T_{k_v}^{\text{крп}}), \{ \tilde{O}_{i_{\text{опт}}}^{(p)} \}, \{ \tilde{G}_{y_{\text{опт}}}^{(p)} \} \right) \right], \end{aligned}$$

где $\tilde{O}_{k_{\text{опт}}}^{\text{крп}}$ — модель оптимальной технологической операции с концентрацией разнотипных переходов; $T_{k_{\text{опт}}}^{\text{крп}}$ — модель оптимальной марки оборудования; $C(T_{k_{\text{опт}}}^{\text{крп}})$ — модель оптимального тандема (оборудования с оснасткой); $\tilde{O}_{k_v}^{\text{крп}}$ — модель технологической операции с концентрацией разнотипных переходов; $T_{k_v}^{\text{крп}}$ — модель марки технологического оборудования для концентрации разнотипных переходов; $C(T_{k_v}^{\text{крп}})$ — модель оборудования с оснасткой для операции с концентрацией разнотипных переходов; $\tilde{O}_{i_{\text{опт}}}^{(p)}$ — модель оптимальной технологической операции с концентрацией однотипных переходов; $\tilde{G}_{y_{\text{опт}}}^{(p)}$ — модель оптимальной подструктуры сборки ЭМ из однотипных компонентов. Слева в модели записаны намерения (создание модели оптимальной операции с выбором оптимальной марки оборудования и оснастки); справа — реализация этих намерений (путем получения модели с максимальным значением аргумента комплексного показателя эффективности). Показатель эффективности связан с параметрами оборудования, оснастки операции АТОП_{крп} и АТОП_{коп}, а также оптимальных подструктур.

При этом ограничения распространяются на:

- переменные и постоянные годовые производственные затраты по технологической операции

$$C_{г.оп} \left(\tilde{O}_{k_v}^{\text{крп}}, T_{k_v}^{\text{крп}} \right) \leq [C_{г.оп}]_0,$$

$$K_{г.оп} \left(\tilde{O}_{k_v}^{\text{крп}}, T_{k_v}^{\text{крп}} \right) \leq [K_{г.оп}]_0;$$

- точность оборудования АТО вместе с оснасткой СТО

$$\delta_c \left(T_{k_v}^{\text{крп}} \right) \leq [\delta_c];$$

- допуск на замыкающий размер совмещения выводов компонента с элементами печатного монтажа платы;
- надежность оборудования АТО вместе с СТО:

$$T_{ср \text{ АТО}} \left(T_{k_v}^{\text{крп}} \right) \geq [T_{ср \text{ АТО}}];$$

- среднее время наработки на отказ оборудования;

$$P_{\text{АТО}}(t_{бр}) \left(T_{k_v}^{\text{крп}} \right) \geq [P_{\text{АТО}}(t_{бр})];$$

- вероятность безотказной работы оборудования.

Синтез вариантов технологических операций АТОП_{крп}. Данный процесс состоит из синтеза простых переходов и синтеза сложных переходов (операций) [7–9].

Синтез простых переходов упрощенно можно представить комплексом действий: формирование (по всем типам компонентов ЭК) множества оптимальных подструктур; формирование и упорядочивание множества оптимальных операций $\tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}$; перебор множества шаблонов с выбором на каждом шаге очередного шаблона вида монтажа; формирование множества операций $\tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}$ и множества моделей разнотипных ЭК (для выполнения концентрации разнотипных переходов); проверка наличия в составе техпроцесса АТП сборки модулей ЭМ двух и более различных операций, допускающих концентрацию разнотипных переходов; формирование признаков операций $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ (объединение разнотипных переходов из операций множества $\tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}$ в операцию $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$); назначение на операцию $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ множества моделей оборудования АТО $T_k^{\text{крп}} \in T$; расчет суммарного хода координатной системы (КС) $L_{\text{КС}\Sigma}$; определение оптимальной последовательности установки разнотипных ЭК и формирование промежуточной модели операции $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ (модель $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ дополняется двумя признаками — суммарным неоптимальным $L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{неопт}}$ и оптимальным $L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{опт}}$ ходом КС); перебор множества марок оборудования $T_k^{\text{крп}}$ по всем АТО (на каждом шаге выбор очередной марки $T_{k_v}^{\text{крп}}$ АТО); формирование для модели $T_{k_v}^{\text{крп}}$ АТО совокупности моделей оснастки СТО $C(T_{k_v}^{\text{крп}})$; назначение на модель оборудования АТО $T_{k_v}^{\text{крп}}$ совокупности моделей технологической оснастки СТО $C(T_{k_v}^{\text{крп}})$, операции $\tilde{O}_{k_v}^{\text{крп}}$.

Комплексная оценка модели оборудования АТО

$T_{k_v}^{\text{крп}}$ вместе с оснасткой СТО $C(T_{k_v}^{\text{крп}})$. Выполняется проверка соответствия вариантов операций АТОП_{крп} допускам точность δ_c и надежности $P_{\text{АТО}}(t_{бр})$, $T_{ср \text{ АТО}}$, сравнение полученных значений с допусками; отсев вариантов, не прошедших тестирование; расчет характеристик модели $\tilde{O}_{k_v}^{\text{крп}}$ и эффективности $P_{\text{оп}}$ с учетом ограничений на затраты. Определение (на основе расчетов) признаков (с индексами 7–22) и формирование промежуточной модели операции $\tilde{O}_{k_v}^{\text{крп}}$.

Расчет эффективности операции по комплексному показателю $P_{\text{оп}}$. В формировании модели оптимальной операции входит определение комплексного показателя эффективности и расчет дополнительных характеристик.

При формировании (предварительный выбор) оптимальной модели операции $\tilde{O}_{k_{\text{опт}}}^{\text{крп}}$ по $P_{\text{оп max}}$ с назначенной на нее оптимальной моделью совокупности АТО и СТО производится исключение (по всему техпроцессу АТП) из множества $\tilde{O}_{\text{опт}}$ операций $\tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}$ и включение вместо них операций $\tilde{O}_{k_{\text{опт}}}^{\text{крп}}$.

Синтез вариантов операций АТОП_{крп} (сложных переходов) начинается с формирования ее признаков. Признаки операции АТОП_{крп} формируются путем объединения разнотипных переходов из операций множества $\tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}$ в операцию $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$.

Начальная модель технологической операции АТОП_{крп} формируется по шаблону, промежуточная $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ образуется при объединении признаков переходов с индексами 0–7.

Далее выполняется назначение на операцию $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ множества технологического оборудования АТО. При назначении множества АТО $T_k^{\text{крп}} \in T$ — кандидатов на операцию формируется множество единиц (марок) АТО $T_k^{\text{крп}}$. Условием включения единицы АТО $T_{kv}^{\text{крп}}$ в множество $T_k^{\text{крп}}$ является совпадение признаков модели АТО $T_{kv}^{\text{крп}}$, идентификатора шаблона (ИШ) вида операции $z_4^{\tilde{O}_k^{\text{крп}}}$, ИШ вида монтажа ЭК $z_2^{\tilde{O}_k^{\text{крп}}}$, множества идентификаторов шаблонов (МИШ)/ИШ группы (групп) компонентов ЭК $z_3^{\tilde{O}_k^{\text{крп}}}$, МИШ типов ЭК в группе $z_4^{\tilde{O}_k^{\text{крп}}}$, МИШ элементов цикла АТО в составе шаблонов переходов $\bar{O}_k^{\text{крп}} = \{\bar{O}_{z_{\text{опт}}}^{(pl)}\} = z_6^{\tilde{O}_k^{\text{крп}}}$, множества количественных характеристик ЭК в составе множества моделей ЭК $\{x^{(pl)}\}$, размеров печатной платы (ПП) в составе модели ПП $X^{(0)}$.

Затем рассчитывается суммарный путь КС $L_{\text{КС}\Sigma}$ и определяется оптимальная последовательность установок разнотипных компонентов ЭК из множества $X^{\text{коп}}$. Основой для решения задачи являются рассчитанные на первом этапе холостые ходы и оптимальные последовательности выполнения однотипных переходов $O^{(pl)}$ для ЭК из множества $X^{\text{коп}}$.

Суммарный неоптимальный и оптимальный путь КС АТО при установке разнотипных ЭК получается сложением отдельных холостых ходов при установке ЭК, входящих в множество $X^{\text{коп}}$ (соответственно неоптимальных и оптимальных).

Промежуточная модель операции $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ формируется на основе модели $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ и двух новых признаков — суммарного неоптимального $L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{неопт}}$ и оптимального $L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{опт}}$ холостых ходов КС.

Множество разнотипных переходов $\bar{O}_k^{\text{крп}} = z_6^{\tilde{O}_k^{\text{крп}}} = \{z_6^{\tilde{O}_{z_{\text{опт}}}^{(pl)}}\}$ в составе операции $\bar{O}_k^{\text{крп}}$ упорядочивается автоматически при объединении упорядоченных на первом этапе множеств однотипных переходов по ЭК из множества $X^{\text{коп}}$.

Множество переходов $O_k^{\text{крп}}$ есть объединение переходов $O_{km}^{\text{крп}}$ при условии выполнения строгой упорядоченности признака $z_{6j}^{\tilde{O}_z^{(pl)}} < z_{6j+1}^{\tilde{O}_z^{(pl)}} \forall j \in J^{(pl)}$ и множества разнотипных переходов $O_{km}^{\text{крп}} < O_{km+1}^{\text{крп}}$

$\forall m \in M$. При этом формируется промежуточная модель операции $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$, образуемая путем объединения признаков модели $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ и признаков с индексами 23–25, определенных при проектировании.

Для модели оборудования АТО $T_{kv}^{\text{крп}}$ формируется совокупность моделей оснастки СТО $C(T_{kv}^{\text{крп}})$, которые состоят из автоматизированных загрузочных устройств (АЗУ), сборочных головок (СГ), КС, а также автоматизированных накопителей плат (АН_п), устройств фиксации платы (УФ_п) в зоне сборки, устройств загрузки/выгрузки платы (УЗВп). Число АЗУ $n_{\text{АЗУ}}(T_{kv}^{\text{крп}})$ и СГ $n_{\text{СГ}}(T_{kv}^{\text{крп}})$ определяется количеством устанавливаемых различных типов ЭК.

Модели технологической оснастки СТО, входящие в совокупность $C(T_{kv}^{\text{крп}})$ (за исключением модели КС), получены при проектировании и последующем выборе оптимальных моделей операций АТОП_{коп} $\tilde{O}_{i\text{опт}}^{(p)} = \tilde{O}_{z_{\text{опт}}}^{(pl)} \in \tilde{O}_{\text{опт}}^{\text{коп}}$ для соответствующего оборудования АТО $T_{i\text{опт}}^{(p)}$. При этом модель КС определяется по значению признака $z_{23}^{T_{kv}^{\text{крп}}}$ — ИМ СТО (КС).

Модель УФ_п выбирается из множества соответствующих моделей для АТО $T_{i\text{опт}}^{(p)}$ по критерию максимальной точности фиксации ПП ($\delta_{\text{УФПП}} \rightarrow \max$). Модели УЗВ_п и АН_п для любого АТО $T_{i\text{опт}}^{(p)}$ одинаковы (выбирается любая из них).

Формируется промежуточная модель операции АТОП_{крп} $\tilde{O}_{kv}^{\text{крп}}$, получаемая объединением признаков модели $\tilde{O}_k^{\text{крп}}$ и признаков с индексами 7–22, определенных при проектировании. На модель операции назначается модель АТО $T_{kv}^{\text{крп}}$ и совокупность моделей СТО $C(T_{kv}^{\text{крп}})$. Затем формируется признак $z_7^{\tilde{O}_{kv}^{\text{крп}}}$ АТОП_{крп}, представляющий собой множество идентификаторов модели (МИМ) СТО, входящих в совокупность $C(T_{kv}^{\text{крп}})$: $C_{kv}^{\text{крп}} = C(T_{kv}^{\text{крп}})$; $z_7^{\tilde{O}_{kv}^{\text{крп}}} = \{z_0^{C_{\text{имкп}}^{(p)}} | C_{\text{имкп}}^{(p)} \in (T_{kv}^{\text{крп}})\}$. Выполняется комплексная оценка точности (погрешность замыкающего звена сборочной размерной цепи δ_c , надежности (средняя наработка на отказ $T_{\text{ф}}^{\text{АТО}}$ и вероятности безотказной работы $P_{\text{АТО}}(t_{\text{бр}})$ на заданное время $t_{\text{бр}}$ сборки ЭМ). Рассчитывается производительность по данной модели АТО $T_{kv}^{\text{крп}}$ и совокупности моделей оснастки СТО $C(T_{kv}^{\text{крп}})$.

Результаты сравниваются с допустимыми величинами. Для этого используются соответствующие модели точности $T_{kv}^{\text{крп}}$, работоспособности (надежности) $T_{kv}^{\text{крп}}$ и производительности $T_{kv}^{\text{крп}}$ АТО. Затем формируются уникальные идентификаторы (УИ) и

признаки связи данных моделей с моделью АТО и моделями СТО, входящими в совокупность $C(T_{kv}^{крп})$.

Расчет признаков модели точности выполняется аналогично расчету первого этапа (при проектировании операций АТОП_{коп}).

При объединении признаков с индексами 0–5, определенных при проектировании, формируется полная модель точности АТО $T_{kv}^{крп}$.

Расчет признаков модели работоспособности (надежности) аналогичен расчету первого этапа (при проектировании АТОП_{коп}) за исключением признака $z_3^{т(р)}$ (интенсивность отказов оборудования АТО определяется через интенсивности отказов накопителей компонентов АЗУ, СГ, АН_п, УФ_п, системы программного управления СПУ, УЗВ_п).

При объединении признаков с индексами 0–5, определенных при проектировании, формируется полная модель работоспособности (надежности) оборудования АТО $T_{kv}^{крп}$.

Модель производительности АТО учитывается в признаке $z_{19}^{\tilde{O}_{kv}^{крп}}$ при расчете параметров операции ($\tilde{O}_{kv}^{крп}$).

Полученные параметры моделей $T_{kv}^{крп}$ и $T_{kv}^{крп}$ сравниваются с допустимыми значениями по точности и надежности:

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

Если условия не выполняются, то данная совокупность больше не рассматривается. Осуществляется переход к следующей модели АТО $T_{kv}^{крп} \in T_k^{крп}$. Далее рассчитываются количественные параметры модели операции $\tilde{O}_{kv}^{крп}$, значения обобщенного показателя эффективности $P_{оп}(\tilde{O}_{kv}^{крп}, P_{kv}^{крп})$ и формируется промежуточная модель операции $\tilde{O}_k^{крп}$.

При расчете параметров операции $\tilde{O}_k^{крп}$ определяются ее признаки $z_{\theta 1j}^{\tilde{O}_{kv}^{крп}} \dots z_{22j}^{\tilde{O}_{kv}^{крп}}$ (трудоемкости сборки, производительности АТО, количества единиц АТО, количества обслуживающих АТО рабочих, занимаемой площади, годовых технологических переменных и постоянных затрат на операцию, значения комплексного показателя эффективности операций $P_{оп}(\tilde{O}_{kv}^{крп}, T_{kv}^{крп})$).

При объединении признаков модели $\tilde{O}_k^{крп}$ и признаков с индексами 7–22, определенных в процессе проектирования, формируется промежуточная модель операции $\tilde{O}_k^{крп}$. Одновременно выполняется проверка, удовлетворяют ли параметры модели операции $\tilde{O}_k^{крп}$ с назначенными на нее моделью АТО $T_{kv}^{крп}$ и СТО наложенным ограничениям:

$$\begin{cases} C_{гop}(\tilde{O}_k^{крп}, T_{kv}^{крп}) \leq [C_{гop}]_O; \\ K_{гop}(\tilde{O}_k^{крп}, T_{kv}^{крп}) \leq [K_{гop}]_O. \end{cases}$$

Если эти требования не удовлетворяются, то модель АТО $T_{kv}^{крп}$ с СТО исключается из множества $T_k^{крп}$ и более не рассматривается. Осуществляется переход к следующей модели АТО $T_k^{крп}$.

После расчета $P_{оп}$ сравнивается вычисленное значение критерия $P_{оп}$ с максимальным значением по другим вариантам:

$$\langle P_{оп}(\tilde{O}_k^{крп}, T_{kv}^{крп}) \rangle = \langle P_{оп}(\tilde{O}_k^{крп}, T_{kv}^{крп}) \rangle.$$

Марку оборудования АТО выбирают следующим образом. Если значение критерия $P_{оп}$ данного варианта больше максимального, полученного ранее, то марка АТО $T_{kv}^{крп}$ принимается за оптимальную для операции $\tilde{O}_k^{крп}$ на данном шаге цикла: $T_{kv}^{крп} = T_{kv опт}^{крп}$.

Формирование оптимальной технологической операции АТОП_{крп опт}. Осуществляется по результатам расчета эффективности (по значению комплексного показателя $P_{оп}$) вариантов АТОП_{крп}. Затем происходит их сравнение, ранжирование и предварительный выбор оптимальной модели операции $\tilde{O}_{к опт}^{крп}$ (по $P_{оп max}$) с назначенной на нее оптимальной моделью совокупности АТО и СТО.

В результате выполнения предыдущих действий проектирования формируются признаки и полная модель операции $\tilde{O}_{к опт}^{крп}$, которая образуется путем исключения операций множества $\tilde{O}_{к опт}^{крп}$ из множества $\tilde{O}_{опт}$ по всему техпроцессу АТП сборки изделий ЭМ и включения вместо них множества операции $\tilde{O}_{к опт}^{крп} = \tilde{O}_k^{крп}$. Множество моделей оптимальных операций $\tilde{O}_{опт}$ получается как строго упорядоченное множество моделей $\tilde{O}_{z опт}$ при условии $\tilde{O}_{z1 опт} < \tilde{O}_{z2 опт} \forall z_1, z_2 \in Z$, а множество индексов операций z есть разность множеств z, L с последующим ее объединением с индексом k .

При переборе множества моделей операций $\{\tilde{O}_{kv}^{крп}\}$ происходит выбор (по критерию $P_{оп} = P_{оп max}$) модели оптимальной операции АТОП_{крп} ($\tilde{O}_{к опт}^{крп}$). Модель оптимальной операции АТОП_{крп} $\tilde{O}_{к опт}^{крп}$ с назначенной на нее оптимальной маркой АТО ($T_{к опт}^{крп}$) имеет вид

$$\tilde{O}_{к опт}^{крп} = \tilde{O}_{kv}^{крп} \Big|_{z_8^{крп} = z_0^{крп}},$$

где оптимальная марка оборудования АТО

$$T_{к опт}^{крп} = T_{kv}^{крп} \Big|_{\begin{cases} P_{оп}(\tilde{O}_{к опт}^{крп}, T_{к опт}^{крп}) = \max\{P_{оп}(\tilde{O}_{kv}^{крп}, T_{kv}^{крп}) \mid \forall v \in V\} \Leftrightarrow z_{25}^{крп} = 1; \\ C_{г.оп}(\tilde{O}_{к опт}^{крп}, T_{к опт}^{крп}) \leq [C_{г.оп}]_O; \\ K_{г.оп}(\tilde{O}_{к опт}^{крп}, T_{к опт}^{крп}) \leq [K_{г.оп}]_O \end{cases}}$$

Далее приведен фрагмент алгоритма компьютерного проектирования технологических операций АТОП_{КРП}, который является частью алгоритма проектирования оптимальных технологических структур ГАСК.

Алгоритм компьютерного проектирования оптимальных технологических операций АТОП_{КРП} сборки ЭМ в ГАСК. В общем алгоритме проектирования структур первые 13 блоков выполняют проектирование операций сборки ЭМ из разнотипных компонентов ЭК с их концентрацией и оптимизацией последовательности выполнения (рис. 1). Блок 1 формирует множества оптимальных подструктур по всем типам ЭК. В блоке 2 формируются и упорядочиваются множества операций $\tilde{O}_{\text{опт}}$ по всему техпроцессу АТП сборки ЭМ. В блоке 3 выполняется цикл по всем шаблонам множества, определенного на предварительном этапе (на каждом шаге выбирается очередной шаблон вида монтажа). В блоке 4 формируются множества операций с концентрацией однотипных переходов (КОП) для последующего проведения концентрации разнотипных переходов (КРП). В блоке 5 проверяется условие, есть ли в составе АТП сборки ЭМ две и более различных операций (из еще не рассмотренных), которые допускают выполнение концентрации разнотипных переходов. Если условие выполнено, то переход к блоку 6, если нет — выход из цикла по видам монтажа ЭК и переход к блоку 13. В блоке 6 выполняется формирование признаков модели операции с КРП путем объединения разнотипных переходов из операций множества с КОП в операцию с КРП. В блоке 7 на операцию с КРП назначается множество марок АТО. В блоке 8 осуществляется оптимизация очередности монтажа на плату разнотипных ЭК по минимальному суммарному пути координатной системы КС $L_{\text{КС}\Sigma}$ с учетом ограничений. Блок 9 выполняет цикл по всем маркам АТО (на каждом шаге выбирается очередная марка АТО). В блоке 10 на модель операции АТОП с КРП назначается модель оборудования АТО и оснастки СТО; производится расчет основных характеристик модели операции (времен $T_{\text{шт.к}}$, $T_{\text{шт.г}}$, $T_{\text{ср.шт}}$) для всех операции с КРП по всей номенклатуре ЭМ и типам ЭК. Определяются: производительность, требуемое количество АТО, обслуживающих рабочих, занимаемая площадь, суммарные переменные и постоянные затраты (с учетом затрат на транспортные операции), показатель эффективности $P_{\text{оп}}$ по операциям АТОП с КРП. При этом выполняется проверка, будут ли параметры модели операции с назначенной на нее маркой АТО удовлетворять ограничениям, накладываемым на операцию. Если не удовлетворяют, то модель АТО исключается из множества и более не рассматривается; если удовлетворяют — переход к следующему шагу цикла по моделям АТО (блок 11). В блоках 11 и 12 происходит сравнение вариантов по критерию $P_{\text{оп}}$ и выбор варианта с $P_{\text{оп}} = P_{\text{оп макс}}$. После окончания цикла — переход к блоку 13, в котором выполняется исключение операций множества с КОП из множества $\tilde{O}_{\text{опт}}$ и включение вместо них операций с максимальной КРП

$\tilde{O}_{\text{опт}}$ и включение вместо них оптимальной операции с максимальной концентрацией КРП по всему техпроцессу АТП сборки ЭМ. На этом заканчивается проектирование операций АТОП_{КРП}.

Программное обеспечение компьютерного проектирования оптимальных технологических операций АТОП_{КОП} сборки ЭМ в ГАСК объединено в программный комплекс «Контур» (для всех этапов проектирования структур ГАСК).



Рис. 1. Фрагмент алгоритма проектирования оптимальных технологических операций сборки изделий ЭМ из разнотипных компонентов в многономенклатурном производстве

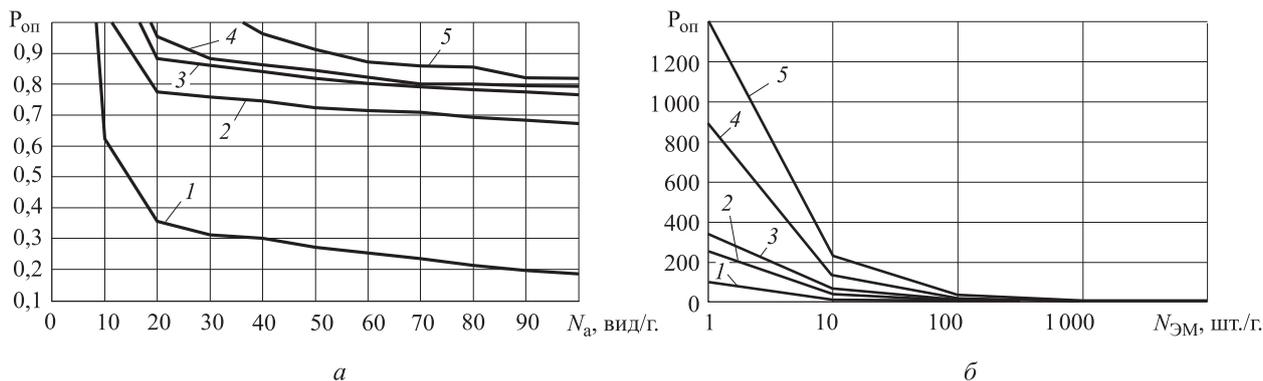


Рис. 2. Зависимость комплексного показателя эффективности технологической операции: *a* — от вида монтажного оборудования и номенклатуры изделий ЭМ; *б* — от вида монтажного оборудования и годовой программы выпуска изделий ЭМ:
 1 — ручная сборка; 2 — сборка в комплекте; 3 — сборка в ГАСК без оптимизации; 4 — сборка в ГАСК с параметрической оптимизации; 5 — сборка в ГАСК со структурной и параметрической оптимизацией

Исследование влияния номенклатуры и объема выпуска ЭМ на эффективность монтажных операций ГАСК. При аналитическом исследовании было установлено, что на эффективность операции $P_{оп}$ (выбор марки АТО) оказывают влияние номенклатура (N_a) и годовой объем выпуска модулей ($N_{ЭМ}$).

В связи с этим исследовано влияние на $P_{оп}$:

- 1) изменения номенклатуры собираемых ЭМ (N_a);
- 2) увеличения годового объема выпуска ЭМ ($N_{ЭМ}$);
- 3) выбор видов АТО.

Исследования проводились с использованием моделей технологических операций в составе структуры ГАСК. Влияние N_a на значение $P_{оп}$ было установлено при фиксированном значении $N_{ЭМ}$ ($N_{ЭМ} = 5\ 000$ ЭМ/г.) и дискретно изменяемой номенклатуре N_a (10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100) (в ТЗ заложен такой диапазон изменения номенклатуры).

Результаты исследования (рис. 2, *a*) показали, что увеличение номенклатуры из-за роста переменных затрат приводит к уменьшению значения $P_{оп}$ (особенно при увеличении N_a от 10 до 40; при дальнейшем увеличении N_a значение $P_{оп}$ примерно стабилизировалось).

Аналогичные исследования были проведены два определения влияния годового объема выпуска изделий $N_{ЭМ}$ на $P_{оп}$ (рис. 2, *б*) при фиксированном значении N_a ($N_a = 100$ — максимальное значение по ТЗ). При этом $N_{ЭМ}$ изменялся дискретно ($N_{ЭМ} = 1; 10; 100; 1000; 10\ 000$).

Наиболее эффективными типами сборочного оборудования для ГАСК оказались сборочные центры (кривая 4), что логично для многономенклатурного серийного производства ЭМ.

Результаты исследования структур ГАСК показали: 1) увеличение годовой программы выпуска $N_{ЭМ}$ обуславливает уменьшение $P_{оп}$ из-за роста переменных затрат; 2) наиболее эффективным сборочным средством (типом АТО) до 5 000 ЭМ/г. является сбо-

рочный центр. При дальнейшем увеличении количества $N_{ЭМ}$ эффективнее становится гибкий производственный модуль ГПМ (на базе сборочного автомата).

Таким образом, с помощью синтеза технологических операций АТОП_{КРП} сборки ЭМ из разнотипных ЭК получается несколько вариантов моделей операций. Наполнение их признаков числовым содержанием и применение комплексного показателя эффективности позволило оценить, сравнить между собой и выбрать лучший вариант ($P_{оп} = P_{оп\ max}$) — выполнить оптимальный выбор марки АТО и оснастки. Использование метода многоугольника и расчет суммарного пути, пройденного КС, дало возможность определить оптимальную очередность монтажа компонентов. Промежуточное тестирование на допустимые значения по точности, надежности и затратам позволило учесть принятые ограничения, а также исключить неэффективные решения и понизить разрядность решаемых задач.

Выводы

1. Разработана оригинальная методика АТОП_{КРП}, позволившая спроектировать операции сборки ЭМ из разнотипных переходов с их концентрацией, оптимизацией последовательности выполнения переходов, оптимизацией выбора марки оборудования АТО, технологической оснастки СТО с учетом точности, надежности, ограничений на допустимые затраты.

2. Результаты исследования комплексного показателя эффективности технологических операций от условий сборки показали: 1) увеличение годовой программы выпуска $N_{ЭМ}$ обуславливает уменьшение $P_{оп}$ из-за роста переменных затрат; 2) наиболее эффективным сборочным средством (до 5 000 ЭМ/г.) является сборочный центр. При дальнейшем увеличении количества $N_{ЭМ}$ эффективнее становится гибкий производственный модуль (на базе сборочного автомата).

Литература

- [1] Асаль Р. *Роботы и автоматизация производства*. Москва, Машиностроение, 2001. 448 с.
- [2] Шпур Г., Краузе Ф.-Л. *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1988. 648 с.
- [3] Мэнгин Ч.Г., Макклелланд С. *Технология поверхностного монтажа*. Москва, Мир, 1990. 276 с.
- [4] Иванов Ю.В. Концептуальная модель автоматизированного проектирования структур ГАСК многономенклатурного производства электронных ячеек. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2001, № 2, с. 58–68.
- [5] Козырев Ю.Г., ред. *Роботизированные производственные комплексы*. Москва, Машиностроение, 2002. 272 с.
- [6] Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. *Базы данных для САПР структур ГАСК сборки ЭМ 1-го уровня*. Свидетельство ФС интеллектуальной собственности. № 2006620158. 2006.
- [7] Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. *САПР структур ГАСК сборки ЭМ 1-го уровня*. Свидетельство ФС интеллектуальной собственности. № 2006611922. 2006.
- [8] Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. *Модуль определения оптимальной последовательности монтажа компонентов ЭК на плату ПП и автоматизированной подготовки управляющих программ УТП для оборудования с ЧПУ*. Свидетельство ФС интеллектуальной собственности. № 2006611924. 2006.

References

- [1] Asal' R. *Roboty i avtomatizatsiia proizvodstva* [Robots and automation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2001. 448 p.
- [2] Shpur G., Krauze F.-L. *Avtomatizirovannoe projektirovanie v mashinostroenii* [Computer-aided design in engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 648 p.
- [3] Mengin Ch.G., Makklelland S. *Tekhnologiya poverkhnostnogo montazha* [Surface Mount Technology]. Moscow, Mir publ., 1990. 276 p.
- [4] Ivanov Iu.V. *Kontseptual'naia model' avtomatizirovannogo projektirovaniia struktur GASK mnogomenklaturnogo proizvodstva elektronnykh iacheek* [Conceptual model of computer-aided design of structures Gask multiproduct production of electronic cells]. *Vestnik MGTU. im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering]. 2001, no. 2, pp. 58–68.
- [5] *Robotizirovannye proizvodstvennyye komplekсы* [Robotic production complexes]. Ed. Kozyrev Iu.G. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002. 272 p.
- [6] Ivanov Iu.V., Kurnosenko A.E. *Bazy dannykh dlia SAPR struktur GASK sborki EM 1-go urovnia* [Databases for CAD assembly structures Gask EM Level 1]. Certificate of the Federal Service of Intellectual Property no. 2006620158. 2006.
- [7] Ivanov Iu.V., Kurnosenko A.E. *SAPR struktur GASK sborki EM 1-go urovnia* [CAD assembly structures Gask EM Level 1]. Certificate of the Federal Service of Intellectual Property no. 2006611922. 2006.
- [8] Ivanov Iu.V., Kurnosenko A.E. *Modul' opredeleniia optimal'noi posledovatel'nosti montazha komponentov EK na platu PP i avtomatizirovannoi podgotovki UTP dlia oborudovaniia s ChPU* [Module determine the optimal sequence of component mounting PCB EC PP and automated preparation of TSS for CNC equipment]. Certificate of the Federal Service of Intellectual Property no. 2006611924. 2006.

Статья поступила в редакцию 23.12.2013

Информация об авторе

ИВАНОВ Юрий Викторович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Yvivanov@bmstu.ru).

Information about the author

IVANOV Yuriy Viktorovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Design and Manufacture of Electronic Equipment» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: Yvivanov@bmstu.ru).