

УДК 658.52.01.56

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ СБОРКИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ИЗ ОДНОТИПНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СБОРОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Ю.В. Иванов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: Yvivanov@bmstu.ru

*Методология проектирования роботизированных комплексов сборки электронных модулей (гибких автоматизированных сборочных комплексов) предполагает разработку оптимальных технологических и транспортных операций, учет компоновки оборудования, вероятностного характера сборки, адаптации изделий электронных модулей к сборке, автоматизацию технологической подготовки. В существующей практике этого нет. Приведена методика компьютерного проектирования оптимальных технологических операций сборки электронных модулей из однотипных компонентов со структурной и параметрической оптимизацией в многономенклатурном роботизированном производстве гибких автоматизированных сборочных комплексов.*

**Ключевые слова:** технологическая операция, процесс, структурная и параметрическая оптимизация, эффективность, комплексность, синтез, надежность, производительность, стоимость.

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL OPERATIONS FOR ASSEMBLING ELECTRONIC MODULES FROM THE SAME-TYPE COMPONENTS AT FLEXIBLE AUTOMATED ASSEMBLING ROBOTIC COMPLEXES IN MULTI-NOMENCLATURE PRODUCTION

**Yu.V. Ivanov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: Yvivanov@bmstu.ru

*Methodology to design the robotic complexes for assembling electronic modules (flexible automated assembling complexes) involves the development of optimal technological and transport operations, taking into account the equipment configuration, probabilistic nature of assembly, adaptation of electronic module components to the assembly, automation of technological preparation. There is none of this in the existing practice. Here the methods are given for computer-aided design of optimal technological operations to assemble electronic modules from components of the same type with their structural and parametric optimization in the multi-nomenclature robotic production of flexible automated assembling complexes.*

**Keywords:** technological operation, process, structural and parametric optimization, effectiveness, integration, synthesis, reliability, productivity, cost.

В производстве электронных модулей (ЭМ) из-за частой сменяемости изделий наиболее сложно автоматизировать многономенклатурное производство. Оно достаточно велико (по данным статистики

составляет более 80 %). Как показали исследования [1, 2], для автоматизации многономенклатурного производства наиболее перспективна сборка ЭМ в роботизированных комплексах, например в гибких автоматизированных сборочных комплексах (ГАСК). При этом проектирование ГАСК и его элементов должно выполняться по специальной методике [2]. Проектирование ГАСК должно быть компьютерным, комплексным, многовариантным; выполнено на основе оптимальных технологических, транспортных операций, оптимальных структур, с учетом компоновки оборудования. Для этого нужны методы проектирования (синтеза, технико-экономической оценки (ТЭО), оптимизации, точности, надежности, производительности, стоимости) и методики проектирования оптимальных технологических операций (ТО) 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 и стоимости, а также методики проектирования транспортных операций, компоновки оборудования, оптимальных структур и технологических процессов сборки ЭМ из разнотипных компонентов будут рассмотрены в других работах.

**Цель исследования.** Для обоснованного выбора оборудования автоматизированных технологических операций (АТО) технологических процессов и структур ГАСК ЭМ в многономенклатурном производстве нужно разработать методику проектирования оптимальных ТО сборки ЭМ из однотипных компонентов и исследовать влияние типа оборудования и годовой программы выпуска на эффективность сборки.

В настоящей работе рассмотрена методика компьютерного проектирования оптимальных ТО сборки изделий ЭМ из однотипных компонентов [1–8].

В методике применено два вида оптимизации: структурная (максимальная интеграция монтажа однотипных компонентов на одном автомате) и параметрическая (оптимальная очередность монтажа компонентов на плату). Параметрическая оптимизация выполнена с использованием метода многоугольника.

Компьютерное проектирование оптимальных ТО сборки ЭМ из однотипных компонентов в ГАСК с концентрацией однотипных переходов (КОП) является первым этапом проектирования оптимальных структур ГАСК [2]. На втором этапе для подструктур разрабатываются технологические процессы сборки ЭМ из однотипных электронных комплексов (ЭК), на третьем — из разнотипных ЭК. На их основе разрабатываются технологические процессы сборки оптимальных структур ГАСК.

Гибкие автоматизированные сборочные комплексы предъявляют к проектированию ТО АТОП с КОП следующие требования: проектирование должно быть компьютерным, с максимальной концентрацией (интеграцией) на каждом рабочем месте, многовариантным, с оптимизацией последовательности монтажа ЭК. Компоненты ЭК должны быть в групповой упаковке (упаковка компонентов и подготовка выводов ЭК должны соответствовать требованиям сборочного технологического автомата или робота. Для каждого типа АТО с ЧПУ разрабатываются операционная технология и управляющие программы пользователя; определяется эффективность операции (она должна быть выполнена по комплексному показателю  $P_{оп}$ ).

В свою очередь, показатель эффективности  $P_{оп}$  должен учитывать 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 ТО сборки ЭМ из однотипных компонентов с максимальной их концентрацией и оптимизацией очередности включает в себя:

- синтез простых переходов (для каждого компонента ЭК, входящего в состав ЭМ);

- проверку соответствия вариантов переходов с использованием назначенной оснастки на точность, надежность, производственные затраты; отсев вариантов, не прошедших тестирование (если назначенная серийная технологическая оснастка (СТО) не отвечает требованиям ГАСК (что возможно в условиях ограниченного ассортимента), то проектируется СТО с требуемыми характеристиками);

- синтез сложных переходов выполняется путем объединения простых переходов в сложные или операцию;

- проверку вариантов операции на точность, надежность, производственные затраты с использованием однопредметного оборудования и оснастки;

- отсев вариантов, не прошедших тестирование, если назначенное серийное технологическое оборудование АТО не отвечает требованиям ГАСК, что возможно при ограниченном ассортименте АТО, то предлагается модернизация назначенной пользователем марки АТО до получения требуемых (или близких к ним) характеристик;

- оценку эффективности вариантов операции (расчет комплексного показателя  $P_{оп}$ );

- формирование модели оптимальной операции сборки ЭМ из однотипных компонентов (ранжирование вариантов операции по значению показателя  $P_{оп}$ ; выбор лучшего варианта (оптимального), у которого  $P_{оп} = P_{оп. max}$ );

— получение технологической информации: операционных карт (ОК), блоков управляющих программ. Аналогично выполняется проектирование операций подготовки, пайки, отмывки и контроля. Такого комплексного подхода в автоматизации сборки ЭМ нет [3–11].

**Постановка задачи** включает в себя: математическую запись, выбор методов синтеза, анализа, оптимизации; определение критериев и ограничений:

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

В левой части записано, какой объект проектируется (модель оптимальной операции  $\tilde{O}_{\text{ioпт}}^{(p)}$  с оптимальной маркой оборудования  $T_{\text{ioпт}}^{(p)}$  и оснасткой  $C_{\text{imkn}}^{(p)}$ ); в правой — за счет чего получается оптимальная операция (за счет максимального значения аргумента  $P_{\text{оп}}$ ).

*Методы проектирования.* Применены авторские методы синтеза, ТЭО, обеспечения точности, надежности, производительности, стоимости, а также теория множеств, методы полного перебора, многоугольника. Метод многоугольника применен для параметрической оптимизации (определения очередности монтажа компонентов ЭК на плату), метод полного перебора — для определения эффективности операций.

*Критерии.* Используются авторские критерии: комплексный показатель эффективности операций  $P_{\text{оп}}$  и минимальный суммарный путь координатной системы при установке всех компонентов  $L_{\Sigma\text{KC min}}$ .

*Ограничения.* Ограничения накладываются на суммарные годовые переменные и постоянные технологические и приведенные к ним транспортные затраты по операции; на точность и надежность оснащения и оборудования:

$$C_{\text{гоп}} \left( \tilde{O}_{\text{iv}}^{(p)}, T_{\text{iv}}^{(p)} \right) \leq [C_{\text{гоп}}], \quad K_{\text{гоп}} \left( \tilde{O}_{\text{iv}}^{(p)}, T_{\text{iv}}^{(p)} \right) \leq [K_{\text{гоп}}];$$

$$\delta_{\text{сто}} \left( C_{\text{imkn}}^{(p)} \right) \leq [\delta_{\text{сто}}];$$

$$F_y \left( C_{\text{imkn}}^{(p)} \right) \geq [F_y], \quad P(t_{\text{бп}}) \left( C_{\text{imkn}}^{(p)} \right) \geq [P(t_{\text{бп}})], \quad T_{\text{ср}} \left( C_{\text{imkn}}^{(p)} \right) \geq [T_{\text{ср}}];$$

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

$$T_{\text{срАТО}} \left( T_{\text{iv}}^{(p)} \right) \geq [T_{\text{срАТО}}], \quad P_{\text{АТО}}(t_{\text{бп}}) \left( T_{\text{iv}}^{(p)} \right) \geq [P_{\text{АТО}}(t_{\text{бп}})],$$

где  $\tilde{O}_{\text{iv}}^{(p)}$ ,  $T_{\text{iv}}^{(p)}$ ,  $C_{\text{imkn}}^{(p)}$  — модели операций, оборудования, оснастки;  $K_{\text{гоп}} \left( \tilde{O}_{\text{iv}}^{(p)}, T_{\text{iv}}^{(p)} \right)$ ,  $C_{\text{гоп}} \left( \tilde{O}_{\text{iv}}^{(p)}, T_{\text{iv}}^{(p)} \right)$  — годовые постоянные и пере-

менные затраты на ТО;  $[K_{\text{гоп}}]$ ,  $[C_{\text{гоп}}]$  — их допустимые значения;  $F_y \left( C_{imkn}^{(p)} \right)$  — требуемое усилие для установки компонента,  $[F_y]$  — его допуск;  $P(t_{\text{бр}}) \left( C_{imkn}^{(p)} \right)$  — вероятность безотказной работы оснастки СТО,  $[P(t_{\text{бр}})]$  — ее допуск;  $T_{\text{ср}} \left( C_{imkn}^{(p)} \right)$  — среднее время наработки на отказ оснастки СТО,  $[T_{\text{ср}}]$  — его допуск;  $\delta_c \left( T_{iv}^{(p)} \right)$  — допуск на замыкающее звено цепочки точности “вывод ЭК — элемент печатного монтажа платы”;  $P_{\text{АТО}}(t_{\text{бр}})$  — вероятность безотказной работы оснастки  $P(t_{\text{бр}})P \left( C_{imkn}^{(p)} \right)$ , оборудования  $P_{\text{АТО}}(t_{\text{бр}}) \left( T_{iv}^{(p)} \right)$ ;  $[P(t_{\text{бр}})]$ ,  $[P_{\text{АТО}}(t_{\text{бр}})]$  — их допуск;  $T_{\text{ср}} \left( T_{iv}^{(p)} \right)$  — среднее время наработки на отказ оборудования,  $[T_{\text{срАТО}}]$  — его допуск.

**Основные результаты.** Синтез простых переходов выполняется для каждого компонента ЭК и состоит из формирования множества шаблонов операций, переходов, признаков модели перехода; выбора схемы базирования; назначения (по шаблону) на переход множества видов СТО; перебора множеств шаблонов и выбора очередного на каждом шаге; определения признаков множества моделей СТО; выполнения расчетов множества моделей СТО (конструктивных и энергетических параметров, точности, надежности, трудоемкости, стоимости); назначения множества моделей СТО на переход.

На этом этапе проверяются соответствие вариантов переходов на точность совмещения, надежность монтажа, производственные затраты с использованием оснастки. При невыполнении условий выполняется отсев вариантов, не прошедших тестирование.

**Синтез операций.** Синтез технологических операций АТОП с КОП (сложных переходов) выполняется для всех компонентов ЭК каждого типа и содержит следующие действия: формирование по шаблону признаков модели операции; объединение множества простых переходов в операцию с максимальной концентрацией; назначение на операцию множества моделей оборудования (АТО); оптимизация последовательности монтажа [методом многоугольника по суммарному пути координатной системы (КС)  $L_{\Sigma КС}$  ( $L_{\Sigma КС} = L_{\Sigma КС \text{ min}}$ ), учет ограничений (отсутствие петель в траектории, заход в место установки компонента не более одного раза; неналожение одного компонента на другой, неустановка ЭК в запретную зону)]; выполнение цикла по всем маркам АТО; назначение на операцию совокупности СТО и АТО; формирование и перебор множества совокупностей СТО и АТО; расчет точности, надежности, производственных затрат на операцию; сравнение их с допусками; отсев вариантов, не прошедших тестирование; цикл по операциям; расчет основных характеристик и эффективности вариантов операции ( $P_{\text{оп}}$ ).

*Формирование модели оптимальной операции.* Модель оптимальной операции сборки формируется из однотипных компонентов. После расчета эффективности  $P_{\text{оп}}$  происходит ранжирование вариантов по значениям  $P_{\text{оп}}$  и предварительный выбор лучшего варианта операции (оптимального), у которого  $P_{\text{оп}} = P_{\text{оп max}}$ . При этом формируются признаки полной модели оптимальной операции сборки ЭМ из однотипных компонентов.

### **Алгоритм компьютерного проектирования оптимальных технологических операций сборки ЭМ из однотипных компонентов.**

Компьютерное проектирование операций АТОП с КОП может быть выполнено, например, с помощью алгоритма (рис. 1). Алгоритм содержит 22 блока. В блоках 1 и 3 выполняются циклы по всем типам компонентов ЭК из множества  $X = \{X^{(p)}, p = \overline{1, n_X}\}$  (предварительный этап) и шаблонам операций из множества  $\bar{O}^{(p)}$ . На каждом шаге выбирается очередной тип компонента ЭК и шаблон  $\bar{O}_i^{(p)}$ .

В блоке 2 формируется множество шаблонов операций  $\bar{O}^{(p)}$  по всему технологическому процессу АТП сборки ЭМ на основе ЭК типа  $X^{(p)}$ .

В блоке 4 происходит формирование упорядоченного множества шаблонов переходов  $\bar{O}_i^{(p)}$  (входящих в шаблон операции  $\bar{O}_i^{(p)}$ ) на основе ЭК типа  $X^{(p)}$ .

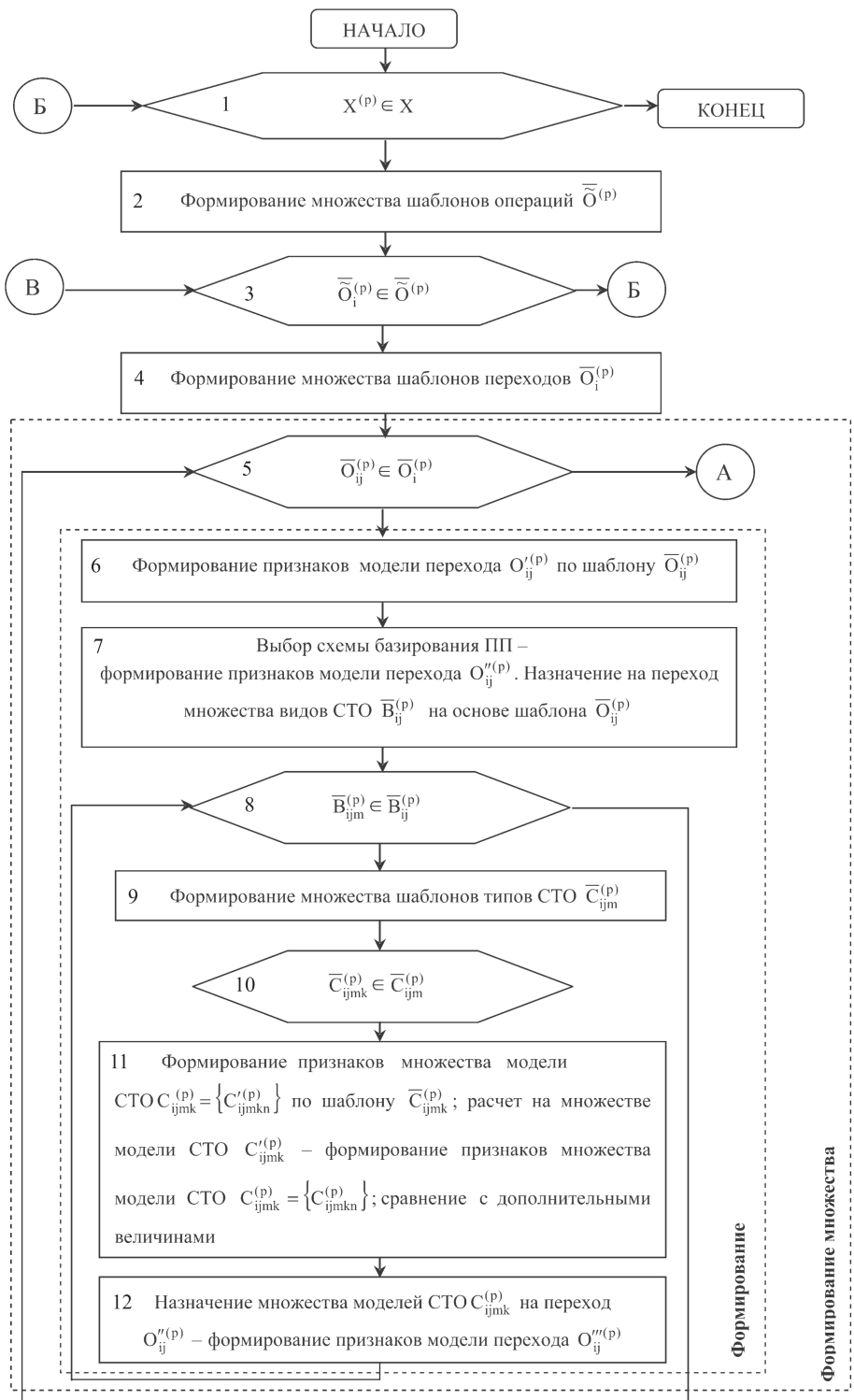
Блоки 5–12 предназначены для формирования множества моделей переходов. В блоке 5 выполняется цикл по всем шаблонам переходов из сформированного множества  $\bar{O}_i^{(p)}$  с выбором на каждом шаге очередного шаблона  $\bar{O}_{ij}^{(p)}$ .

В блоке 6 формируются признаки модели перехода  $O'_{ij}^{(p)}$  (по шаблону  $\bar{O}_{ij}^{(p)}$ ) и параметры компонентов ЭК типа  $X^{(p)}$ .

В блоке 7 выбирается схема базирования платы, формируются признаки и предварительная модель перехода  $O''_{ij}^{(p)}$ , назначается на переход множество видов оснастки СТО  $\bar{B}_{ij}^{(p)}$  (на основе шаблона перехода  $\bar{O}_{ij}^{(p)}$ ).

В блоке 8 выполняется цикл по всем видам СТО из назначенного множества  $\bar{B}_{ij}^{(p)}$  с выбором на каждом шаге очередного шаблона вида СТО  $\bar{B}_{ijm}^{(p)}$ .

В блоке 9 происходит формирование множества шаблонов типов СТО  $z_0^{C_{ijm}^{(p)}}$  [в соответствии с шаблоном вида СТО  $\bar{B}_{ijm}^{(p)}$ ], выбор шаблона типа СТО  $\bar{C}_{ijm}^{(p)}$ .



**Рис. 1 (начало).** Алгоритм проектирования сборочных операций АТОП с КОП с концентрацией и оптимизацией последовательности монтажа



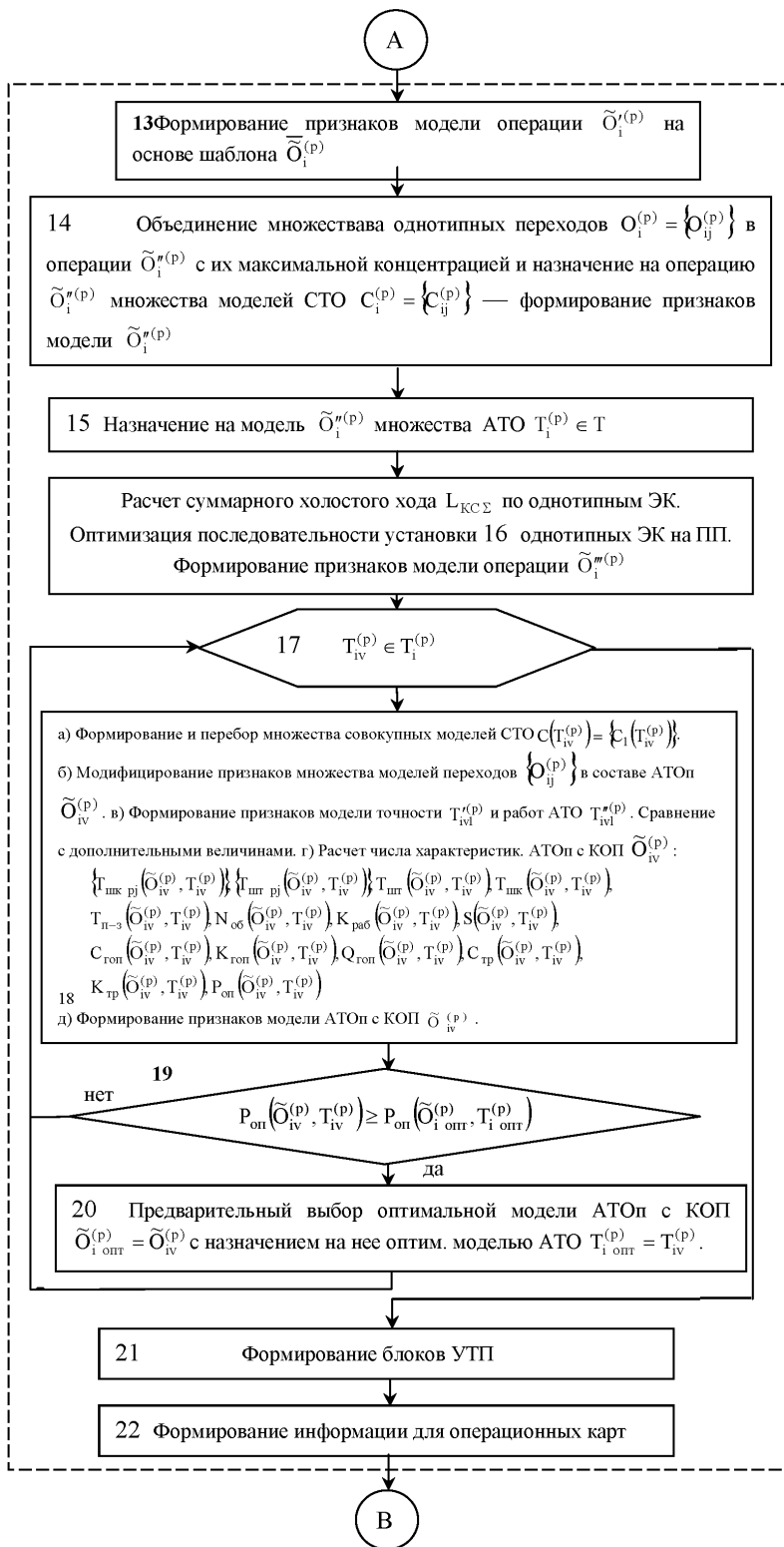


Рис. 1 (окончание)



В блоке 10 формируются признаки  $(z_0^{C_{ijm}^{(p)}}, z_1^{C_{ijm}^{(p)}} = z_0^{\bar{C}_{ijm}^{(p)}} \text{ и } z_2^{C_{ijm}^{(p)}})$  [на основе шаблона типа  $\bar{C}_{ijm}^{(p)}$  и предварительной модели СТО  $C_{ijm}^{(p)}$ ].

В блоке 11 рассчитываются численные характеристики СТО (конструктивные параметры, трудоемкость, точность, надежность, стоимость), формируются признаки  $(z_3^{C_{ijm}^{(p)}} - \text{численные характеристики, } \bar{C}_{ijm}^{(p)}, z_5^{C_{ijm}^{(p)}} - \text{необходимый набор характеристик})$  и полная модель СТО  $C_{ijm}^{(p)}$ .

В блоке 12 назначаются на переход  $O'_{ij}^{(p)}$  модели СТО  $C_{ijm}^{(p)}$ .

Блоки 13–22 предназначены для формирования модели операции с концентрацией однотипных переходов (АТОП с КОП). Блок 13 формирует на основе шаблона  $\bar{O}_i^{(p)}$  и параметров шаблона типа ЭК  $\bar{X}^{(p)}$  признаки (с индексами от 0 до 5) и промежуточную модель операции  $\tilde{O}'_i^{(p)}$ .

В блоке 14 происходит объединение множества однотипных переходов  $O_i^{(p)} = \{O_{ij}^{(p)}\}$  по ЭК типа  $\bar{X}^{(p)}$  в операцию  $\tilde{O}''_i^{(p)}$  с КОП, назначение на операцию множества моделей СТО  $C_i^{(p)} = \{C_{ij}^{(p)}\}$ , формирование признаков  $z_6^{\tilde{O}'_i^{(p)}}, z_7^{\tilde{O}'_i^{(p)}}$  на основе множества идентификаторов модели (МИМ) переходов  $O_i^{(p)} = \{O_{ij}^{(p)}\}$ , МИМ СТО  $C_i^{(p)} = \{C_{ij}^{(p)}\}$  и промежуточной модели операции  $\tilde{O}''_i^{(p)}$ .

В блоке 15 формируется множество оборудования АТО  $T_i^{(p)} \in T$  и его назначение на операцию  $\tilde{O}''_i^{(p)}$ .

В блоке 16 для монтажных операций методом многоугольника оптимизируется последовательность установки компонентов ЭК типа  $\bar{X}^{(p)}$  на плату по критерию  $L_{КС\Sigma} \rightarrow \min$ . Для разных вариантов последовательности монтажа рассчитывается суммарный холостой ход КС АТО и выбирается тот, у которого  $L_{КС\Sigma} \min$ . Формируется промежуточная модель операции  $\tilde{O}'''_i^{(p)}$ . В блоке 16 рассчитывается суммарный холостой ход КС  $L_{КС\Sigma}$  (этот шаг алгоритма выполняется только для монтажных операций). Решается задача оптимизации последовательности установки компонентов ЭК типа  $\bar{X}^{(p)}$  по критерию минимальной длины хода КС  $L_{КС\Sigma} \rightarrow \min$ , которую можно сформулировать в виде задачи о назначениях:

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

при

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1; \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; \\ j = 1, 2, \dots, n; \\ x_{ij} = 0, 1 \forall i, j. \end{cases} \quad (1)$$

где  $D = \|d_{ij}\|_{n \times n}$  — матрица расстояний, ( $n$  — число компонентов ЭК данного типа  $\bar{X}^{(p)}$  в изделии ЭМ, устанавливаемых на плату на данной сборочной операции  $\tilde{O}_i^{(p)}$ );  $\forall$  — квантиль (знак общности);  $d_{ij} = \max \left[ \left( x^{x_i^{(p)}} - x^{x_j^{(p)}} \right), \left( y^{x_i^{(p)}} - y^{x_j^{(p)}} \right) \right]$  — максимальное расстояние между центрами двух соседних компонентов ЭК с номерами  $i$  и  $j$  по одной из координат  $(x, y)$ ;  $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$  — матрица, в которой

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

Решение задачи заключается в преобразовании матрицы  $x$  от начального состояния, заданного неоптимальной последовательностью заполнения базы данных по однотипным компонентам ЭК, в конечное состояние, определяемое системой (1).

Начальное состояние матрицы обозначим через  $x$ , конечное — через  $x'$ . Применим метод многоугольника для симметричных матриц. Таким образом, формируется модель операции  $\tilde{O}_i'''^{(p)}$  на основе модели  $\tilde{O}_i''^{(p)}$  и двух новых признаков (неоптимальный  $L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{не опт}}$  и оптимальный  $L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{опт}}$  холостые ходы КС):

$$\begin{aligned} L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{не опт}}(\tilde{O}_i'''^{(p)}) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}; \\ L_{\text{КС}\Sigma}^{\text{опт}}(\tilde{O}_i'''^{(p)}) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x'_{ij}. \end{aligned} \quad (2)$$

Одновременно строго упорядочивается множество переходов  $\{O_i^{(p)} = \{O_{ij}^{(p)}\} | O_{ij}^{(p)} < O_{ij+1}^{(p)} \forall j \in J \Rightarrow z_{6j}^{\tilde{O}_i^{(p)}} < z_{6j+1}^{\tilde{O}_i^{(p)}} \forall j \in J\}$ . Множество переходов  $O_i^{(p)}$  есть объединение переходов при условии строгой упорядоченности  $O_{ij}^{(p)} < O_{ij+1}^{(p)} \forall j \in J$ . При этом выполняется условие строгой упорядоченности составляющих признака  $z_{6i}^{\tilde{O}_i^{(p)}}$ :  $z_{6j}^{\tilde{O}_i^{(p)}} < z_{6j+1}^{\tilde{O}_i^{(p)}} \forall j \in J$ . Формируется промежуточная модель операции

$\tilde{O}_i^{m(p)}$ . Модель операции  $\tilde{O}_i^{m(p)}$  есть объединение признаков модели  $\tilde{O}_i^{n(p)}$  с индексами от 0 до 7, признака с индексом 6, признаков с индексами 23 и 24, определенных в результате проектирования, и упорядочиванием составляющих.

В блоке 17 происходит цикл по всем маркам оборудования АТО из сформированного множества  $T_i^{(p)}$ . На каждом шаге выбирается очередная единица АТО  $T_{iv}^{(p)} \in T_i^{(p)}$ . Индекс перебора единиц АТО обозначается как V. Значение переменной  $\langle P_{\text{оп}}(\tilde{O}_i^{m(p)}, T_{\text{ioпт}}^{(p)}) \rangle$  приравнивается нулю:  $\langle P_{\text{оп}}(\tilde{O}_i^{m(p)}, T_{\text{ioпт}}^{(p)}) \rangle := 0$ . Выполняется полный перебор записей таблицы “Модели АТО  $T_i^{(p)}$ ”.

В блоке 18 проводится комплексная оценка точности, надежности и производительности данной модели АТО сборки ЭМ  $T_{iv}^{(p)}$  в совокупности с оснасткой СТО  $C_1(T_{iv}^{(p)})$ . Результаты оценки сравниваются с допустимыми для роботизированного комплекса “ТАСК” значениями. Для комплексной оценки составляются следующие модели АТО: модели точности (погрешность замыкающего звена сборочной размерной цепи  $\delta_c$ ),  $T_{iv}^{(p)}$  надежности (средняя наработка на отказ  $T_{\text{срАТО}}$ , вероятности безотказной работы  $P_{\text{АТО}}(t_{\text{бр}})$  на заданное время  $t_{\text{бр}}$ )  $T_{iv}^{(p)}$ , производительности  $T_{iv}^{(p)}$ . Выполняется расчет количественных параметров модели  $\tilde{O}_{iv}^{(p)}$  операции АТОП с КОП. Далее учитываются ограничения, формируются признаки (с индексами от 8 до 22) и промежуточная модель операции  $\tilde{O}_{iv}^{(p)}$ .

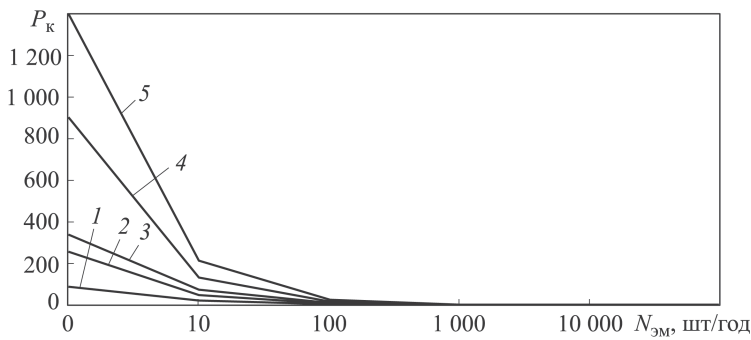
В блоке 19 текущее значение показателя эффективности  $P_{\text{оп}}(\tilde{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)})$  сравнивается с ранее полученным максимальным значением  $P_{\text{оп}}(\tilde{O}_{\text{ioпт}}^{(p)}, T_{\text{ioпт}}^{(p)})$ .

В блоке 20 формируется модель оптимальной технологической операции сборки ЭМ (АТОП с КОП)  $\tilde{O}_{\text{ioпт}}^{(p)}$  с оптимальной маркой АТО  $T_{\text{ioпт}}^{(p)}$  из множества  $\{\tilde{O}_{iv}^{(p)}\}$ :

$$\tilde{O}_{\text{ioпт}}^{(p)} = \tilde{O}_{iv}^{(p)} \left| \begin{array}{l} z_8^{\tilde{O}_{iv}^{(p)}} = z_0^{T_{\text{ioпт}}^{(p)}} \end{array} \right. ;$$

$$T_{\text{ioпт}}^{(p)} = T_{iv}^{(p)} \left| \begin{array}{l} P_{\text{оп}}(\tilde{O}_{\text{ioпт}}^{(p)}, T_{\text{ioпт}}^{(p)}) = \max \{ P_{\text{оп}}(\tilde{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)}) \forall v \in V \} \Leftrightarrow z_{25}^{\tilde{O}_{iv}^{(p)}} = 1 \\ C_{\text{гоп}}(\tilde{O}_{\text{ioпт}}^{(p)}, T_{\text{ioпт}}^{(p)}) \leq [C_{\text{гоп}}]_O ; \\ K_{\text{гоп}}(\tilde{O}_{\text{ioпт}}^{(p)}, T_{\text{ioпт}}^{(p)}) \leq [K_{\text{гоп}}]_O , \end{array} \right.$$

где модель операции  $\tilde{O}_{iv}^{(p)}$  была спроектирована на основе моделей изделия, его компонентов, оборудования, оснастки, перехода  $\tilde{O}_{iv}^{(p)}$ , шаблона и признаков операции  $z_{0...12}^{\tilde{O}_i^{(p)}}$  (полученных при проектировании).



**Рис. 2.** Зависимость эффективности комплекса  $P_k$  от вида монтажного АТО и годового объема выпуска электронных модулей  $N_{эм}$ :

1 — АРМ, 2 — автоматы с ЧПУ, 3 — ГПМ, 4 — СБЦ, 5 — РТК

В блоке 21 формируется информация для управляющих программ.

В блоке 22 определяется информация для операционных карт.

На этом заканчивается проектирование оптимальных ТО сборки ЭМ из однотипных компонентов (первый этап проектирования роботизированного ГАСК). Проектирование оптимальных ТО сборки ЭМ из разнотипных компонентов происходит на третьем этапе разработки ГАСК.

**Выбор марки оборудования для заданных изделий и условий производства.** Исследования проводились с использованием программного комплекса “Контур”. В качестве сборочного оборудования были использованы (рис. 2): 1 — автоматизированные рабочие места, 2 — автоматы с ЧПУ, 3 — гибкие производственные модули, 4 — сборочные центры, 5 — простые роботизированные комплексы. Роботизированные комплексы построены на основе сборочных роботов и СБЦ. В них автоматизирована загрузка пустых плат и выгрузка собранных узлов ЭМ. Такие комплексы имеют наибольший уровень автоматизации. В СБЦ, построенных на основе сборочных роботов, загрузку/выгрузку выполняют сами роботы. В ГПМ загрузку/выгрузку выполняют автооператоры (с неизменяемым циклом работы). В автоматах с ЧПУ загрузка/выгрузка ЭМ не автоматизирована.

Эффективность сборки определялась комплексным показателем  $P_k$  для подструктур, так как сравнивать приходится операции, выполняемые на одно- и многопредметном оборудовании.

$$P_{k1} = \frac{Q_{\text{гоп min}}}{\sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} [K_{\text{гоп}} + K_{\text{ТР}} + C_{\text{гоп}} + C_{\text{ТР}}]}$$

Здесь  $Q_{\text{гоп}} = \frac{K_3 \rho K_{\text{ТП}} N_{\text{об}} F_{\text{г.эф}}}{T_{\text{шк}}}$  — годовая производительность выбранной операции [ $K_3, \rho, K_{\text{ТП}}$  — коэффициенты, учитывающие соответственно фактическую загрузку АТО, готовность АТО к работе, выход

годных изделий;  $N_{об}$  — число АТО на данной операции,  $F_{г.эф}$  — годовой эффективный фонд времени АТО;  $T_{шк}$  — удельная трудоемкость выполнения операции (монтажа, подготовки или пайки) для одного компонента ЭК];  $K_{гоп} = (K_{об} + K_{пл})N_{об} + K_{тр}$  — годовые постоянные затраты на одну операцию [ $K_{об}$  — затраты на покупку единицы АТО (его рыночная цена), налог, транспортировку к пользователю, пуско-наладочные работы;  $K_{пл}$  — стоимость аренды производственной и служебной площадей];  $C_{гоп} = (CT_{шк} + C_{утп} + C_{бр} + C_{1эк}) N_{экэм} N_{эм} N_a + K_{нез}$  — годовые переменные затраты на одну операцию [удельные затраты на один компонент ЭК (соответственно на зарплату  $C_3$ , эксплуатацию оборудования  $C_{об}$ , его программного устройства  $C_{пу}$ , энергию  $C_3$ , амортизацию  $C_{ам}$ , оснастку  $C_{осн}$ , площадь  $C_{пл}$ , цеховые расходы  $C_{ц}$ , управляющую программу  $C_{утп}$ ; исправление брака  $C_{бр}$ ; покупку компонента  $C_{1эк}$ ; незавершенное производство  $K_{нез}$ );  $N_a$ ,  $N_{эм}$ ,  $N_{экэм}$  — годовые номенклатура изделий (типов ЭМ), объем выпуска ЭМ, число компонентов ЭК данного типа в изделии ЭМ].

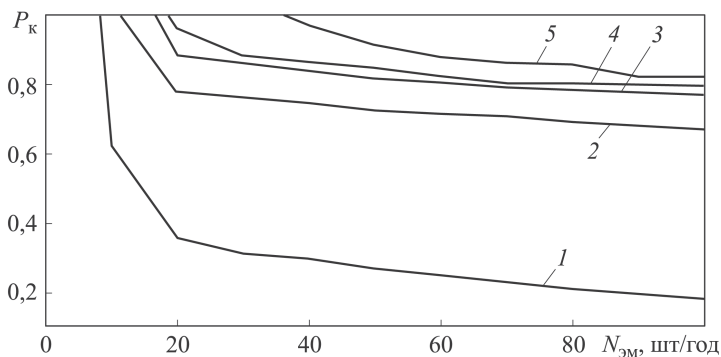
Исследования влияния на эффективность годовой программы  $N_{эм}$  собираемых ЭМ и видов оборудования выполнены для номенклатуры 50 тип. ЭМ/год. Программа выпуска  $N_{эм}$  изменялась дискретно (1, 100, 1000. . .) от 1 до 10 000 ЭМ/год. Из графика (рис. 2) следует, что наибольшую эффективность имеет роботизированный комплекс ГАСК, потом — СбЦ, затем — ГПМ, наименьшую — ГАСК с АРМ (благодаря тому, что роботизированный комплекс имеет наибольший уровень автоматизации и наименьшие потери времени; с увеличением программы выпуска начинают быстро расти переменные затраты (производительность растет медленно). Это приводит к уменьшению эффективности ( $P_k$ ). Такое снижение приемлемо для диапазона  $N_{эм}$  от 1 до 500. . . 800 ЭМ/год. Это указывает на то, что разработанный ГАСК наиболее эффективен для многономенклатурной сборки ЭМ в мелкосерийном производстве.

Номенклатура изменялась дискретно (1, 10, 20, 30. . .) от 1 до 100 тип. ЭМ/год. Годовая программа выпуска — на уровне 1000 ЭМ/год.

Во всем диапазоне изменения номенклатуры наибольшую эффективность имеют ГАСК выполненные с использованием роботизированных технологических комплексов, затем — СбЦ и ГПМ, наименьшую — с АРМ. Влияние номенклатуры (см. рис. 3) на эффективность комплекса особенно заметно в диапазоне  $N_a$  от 0 до 20 тип. ЭМ/год. Это объясняется тем, что переменные затраты еще не велики. При дальнейшем увеличении {от 20 до 100 тип. ЭМ/год} затраты и производительность начинают расти и эффективность изменяется мало.

По графикам для заданных условий производства можно обоснованно выбрать тип оборудования.

**Выводы.** 1. Представлена оригинальная методика компьютерного проектирования технологических оптимальных операций АТОП с



**Рис. 3.** Зависимость эффективности комплекса  $P_{\text{кот}}$  вида монтажного оборудования и номенклатуры  $N_a$  изделий

КОП сборки ЭМ (первый этап проектирования структур ГАСК). Она обеспечивает концентрацию однотипных компонентов ЭК, оптимизацию очередности их монтажа на плату, обоснованный выбор сборочного АТО, разработку для него операционной технологии и управляющих программ УТП.

2. На основе рассмотренной методики разработаны модели операции монтажа ЭК с концентрацией однотипных переходов, позволившие за счет оптимизации очередности установки ЭК уменьшить суммарную длину  $L_{\text{КС}\Sigma}$  хода КС (в среднем на 30%), что способствовало уменьшению вспомогательного времени  $T_v$  и увеличению (на 6...8%) производительности сборочного АТО.

3. Сокращена длина цепочки технологической подготовки операции монтажа за счет концентрации нескольких видов работ на одном месте технолога (совмещение разработки управляющих программ с адаптацией собираемых изделий ЭМ к требованиям автоматизированной сборки в роботизированном ГАСК, контролем, отладкой управляющих программ; изготовлением листа с текстом программы и компоновкой ЭК на плате);

4. Проведенные на моделях операций АТОП с КОП (в составе подструктур ГАСК) исследования влияния  $N_a$  и  $N_{\text{ЭМ}}$  на эффективность  $P_k$  показали, что для многономенклатурного серийного производства ЭМ наиболее эффективным сборочным оборудованием АТО являются простые роботизированные комплексы, построенные с использованием промышленных роботов, технологических автоматов и сборочных центров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Ю.В. Проектирование автоматизированных технологических процессов сборки ЭМ в ГАСК: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 45 с.

2. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования структур гибких автоматизированных сборочных комплексов многономенклатурного производства электронной аппаратуры: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 45 с.
3. Иванов Ю.В., Лакота Н.А. Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.
4. Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Базы данных для САПР структур ГАСК сборки ЭМ первого уровня Свид. ФС интеллектуальной собственности 2.06.2006 № 2006620158.
5. Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. САПР структур ГАСК сборки ЭМ первого уровня. Свид. ФС интеллектуальной собственности 2.06.2006 № 2006611922.
6. Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Специальное программное обеспечение автоматизированной разработки структур ГАСК многономенклатурного производства электронной аппаратуры: Учеб. пособие. М.: МГТУ, 2002. 37 с.
7. Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Модуль автоматизированной разработки расписания запуска ЭМ первого уровня в многономенклатурное производство. Свид. ФС интеллектуальной собственности 2.06.2006 № 2006611921.
8. Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Модуль определения оптимальной последовательности монтажа электронных компонентов на печатную плату и автоматизированной подготовки управляющих программ УТП для оборудования с ЧПУ. Свид. ФС интеллектуальной собственности 2.06.2006 № 2006611924.

## REFERENCES

- [1] Ivanov Yu.V. Proektirovanie avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh protsessov sborki EM v GASK [Computer-aided engineering of production methods of circuit modules using flexible automated assembly site]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2004. 45 p.
- [2] Ivanov Yu.V. Avtomatizatsiya proektirovaniya struktur gibkikh avtomatizirovannykh sborochnykh kompleksov mnogonomenklaturnogo proizvodstva elektronnoy apparatury [Computer-aided engineering of structures of flexible automated assembly site of multiproduct manufacture of electronic apparatus]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2004. 45 p.
- [3] Ivanov Yu.V., Lakota N.A. Gibkaya avtomatizatsiya proizvodstva REA s primeneniem mikroprotssessorov i robotov [Flexible automation of radio-electronic apparatus production with using microprocessors and robots]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1987. 464 p.
- [4] Ivanov Yu.V., Kurnosenko A.E. Bazy dannykh dlya SAPR struktur GASK sborki EM pervogo urovnya [Database for CAD of structures of flexible automated assembly site of assemblage of first-level circuit modules]. Certificate of Federal Service RF of Intellectual Property 2.06.2006 № 2006620158.
- [5] Ivanov Yu.V., Kurnosenko A.E. SAPR struktur GASK sborki EM pervogo urovnya. [CAD of structures of flexible automated assembly site of assemblage of first-level circuit modules]. Certificate of Federal Service RF of Intellectual Property 2.06.2006 № 2006611922.
- [6] Ivanov Yu.V., Kurnosenko A.E. Spetsial'noe programmnoe obespechenie avtomatizirovannoy razrabotki struktur GASK mnogonomenklaturnogo proizvodstva elektronnoy apparatury [Special software for computer-aided engineering of structures of flexible automated assembly site for multiproduct manufacture of circuit modules ]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002. 37 p.
- [7] Ivanov Yu.V., Kurnosenko A.E. Modul' avtomatizirovannoy razrabotki raspisaniya zapuska EM pervogo urovnya v mnogonomenklaturnoe proizvodstvo [Module of computer-aided engineering schedule for starting of first-level circuit modules for multiproduct manufacture]. Certificate of Federal Service RF of Intellectual Property 2.06.2006 № 2006611922.



- [8] Ivanov Yu.V., Kurnosenko A.E. Modul' opredeleniya optimal'noy posledovatel'nosti montazha elektronnykh komponentov na pechatnyuyu platu i avtomatizirovannoy podgotovki upravlyayushchikh programm UTP dlya oborudovaniya s ChPU [The sensing module of optimal sequence installation of electronic components for PCB and automated preparation of control programs (CTP) for CNC equipment]. Certificate of Federal Service RF of Intellectual Property 2.06.2006 № 2006611924.

Статья поступила в редакцию 2.10.2014

Юрий Викторович Иванов — д-р техн. наук, профессор кафедры “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области автоматизации сборки электронной аппаратуры. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Yu.V. Ivanov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Design and Technology of Production of Electronic Apparatus” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a number of publications in the field of automation of electronic apparatus assembly.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.