

УДК 621.31

## **Экспертная система технологической подготовки процесса сборки и монтажа узлов бортовой радиоаппаратуры**

**Дембицкий Н.Л.<sup>1\*</sup>, Луценко А.В.<sup>2</sup>, Фам Вьет Ань<sup>1\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

<sup>2</sup>*Лианозовский электро-механический завод, ЛЭМЗ, Дмитровское шоссе, 110, Москва, 127411, Россия*

*\*e-mail: [ndembitsky@gmail.com](mailto:ndembitsky@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [phamvietanhqs@gmail.com](mailto:phamvietanhqs@gmail.com)*

### **Аннотация**

Создание радиоаппаратуры (РЭА) для летательных и космических аппаратов требует применения самой современной микроминиатюрной элементной базы. Постоянная тенденция миниатюризации компонентов приводит к необходимости развития и совершенствования сборочно-монтажного производства. В статье предлагается подход к повышению эффективности данного технологического процесса с применением экспертной системы, которая готовит информацию для настройки программного обеспечения на требования конкретного предприятия. Представлена структура математической модели технологического процесса в виде графа, связывающего с помощью производственных правил факторы воздействия на

эффективность и качество производства. Приведен пример разработки базы знаний выбора оборудования сборочных операций.

**Ключевые слова:** экспертная система, база знания, технологический процесс, программный комплекс, оборудование, критерий качества, ограничение, бортовая радиоаппаратура.

## Введение

Создание перспективной бортовой аппаратуры *для летательных и космических аппаратов* диктует необходимость постоянного обновления элементной базы, повышением плотности монтажа и надежности проектируемой РЭА. Конструкции узлов *бортовой РЭА* должны базироваться на новейших технологиях сборки и монтажа, развитие которых связано с микроминиатюризацией компонентов и монтажом на поверхности. Уменьшение размеров компонентов, продиктованное требованиями усложнения функциональных задач и уменьшением массогабаритных характеристик, делает практически невозможным применение ручных операций, поэтому для современных производств *бортовой аппаратуры* создаются все более совершенное автоматизированное технологическое оборудование, специальная оснастка и новые материалы. Повсеместное применение промышленных роботов становится обязательным условием миниатюризации узлов РЭА *для авиационной и космической техники* на базе новейших компонентов.

В настоящее время выпускается широкий спектр разнообразного оборудования, приспособлений и материалов для автоматизированной сборки и монтажа [1]. Их выбор во многом предопределяет эффективность сборочно-монтажного производства, которая связана со многими факторами. На качественные показатели оказывают влияние требования по надежности, производительности, стоимости, эффективности и окупаемости производства.

Микроминиатюрные компоненты требуют пересмотра проектных норм в сторону их ужесточения. Это увеличивает вероятность появления брака, который необходимо контролировать и своевременно выявлять для обеспечения показателей надежности аппаратуры и повышения выхода годных изделий в производстве. Катастрофы космических аппаратов показывают высочайшую значимость перечисленных требований *для космических программ*.

Предлагаемые на рынке технологического оборудования и материалов решения проблемы требуют больших текущих затрат и капитальных вложений в создание производства узлов РЭА, удовлетворяющих современным требованиям. Без комплексной оптимизации невозможно при финансовых ограничениях построить эффективное сборочно-монтажное производство.

Технологическая подготовка процесса сборочно-монтажного производства является сложной многовариантной задачей, решение которой может быть найдено с помощью привлечения методов математического программирования и специальных алгоритмов обработки знаний. Разработчик программного обеспечения для

технологической подготовки производства (ТПП) сталкивается с необходимостью создания универсальных алгоритмов оптимизации, которые должны в зависимости от требований производства и требований проектируемой аппаратуры адаптировать свою структуру и логику обработки.

В работах [2,3] рассматривается методика построения математической модели комплекса технологического оборудования и метод оптимизации, позволяющие настраивать решение на требования конкретного производства. Необходимость разработки обуславливается высокими рисками экономических потерь на этапе планирования закупки оборудования, поскольку стоимость современных технологических установок значительна, а ошибки принятых технических решений могут сказаться на эффективности и выживании предприятия в условиях жесткой конкуренции. Проблему предлагается решать созданием универсальных программных средств, которые базируются на обобщенном представлении задачи ТПП.

Унификация метода оптимизации осуществляется применением процедур адаптации математической модели оптимизации под конкретную задачу. Для этого предлагается использовать в составе программного комплекса специализированного программного модуля (конфигуратора математической модели). Конфигуратор предназначен для первичной обработки и преобразования исходных данных в стандартную форму представления условий и ограничений метода оптимизации. В данной статье остановимся на вопросах разработки математического и программного обеспечения конфигуратора.

## Постановка задачи

Производство РЭА характеризуется множеством факторов, влияющих на выполнение требований производства. Их можно разделить на восемь групп, которые относятся к конструкции изделия, материалам, технологическому оборудованию, производству, технологическим операциям, производственному персоналу, экономическим показателям, элементной базе. Все перечисленные группы факторов взаимосвязаны, оказывают влияние друг на друга, что обуславливает сложность ТПП, так как необходимо найти оптимальное соотношение между факторами различных групп, решив многовариантную задачу с большим количеством параметров, обусловленную множеством ограничений и требований.

В этих условиях возрастает роль автоматизированных систем и программно-информационного обеспечения для принятия оптимальных решений. Учитывать всю совокупность факторов при оптимальном проектировании технологических процессов без использования средств автоматизации сложно.

Математическую модель проектируемого технологического процесса можно представить в виде графа  $G = (X, H)$ , в котором вершины  $X$  представляют параметры технологического процесса, а ребра  $H$  определяют функциональные и логические связи между этими параметрами (рисунок 1).

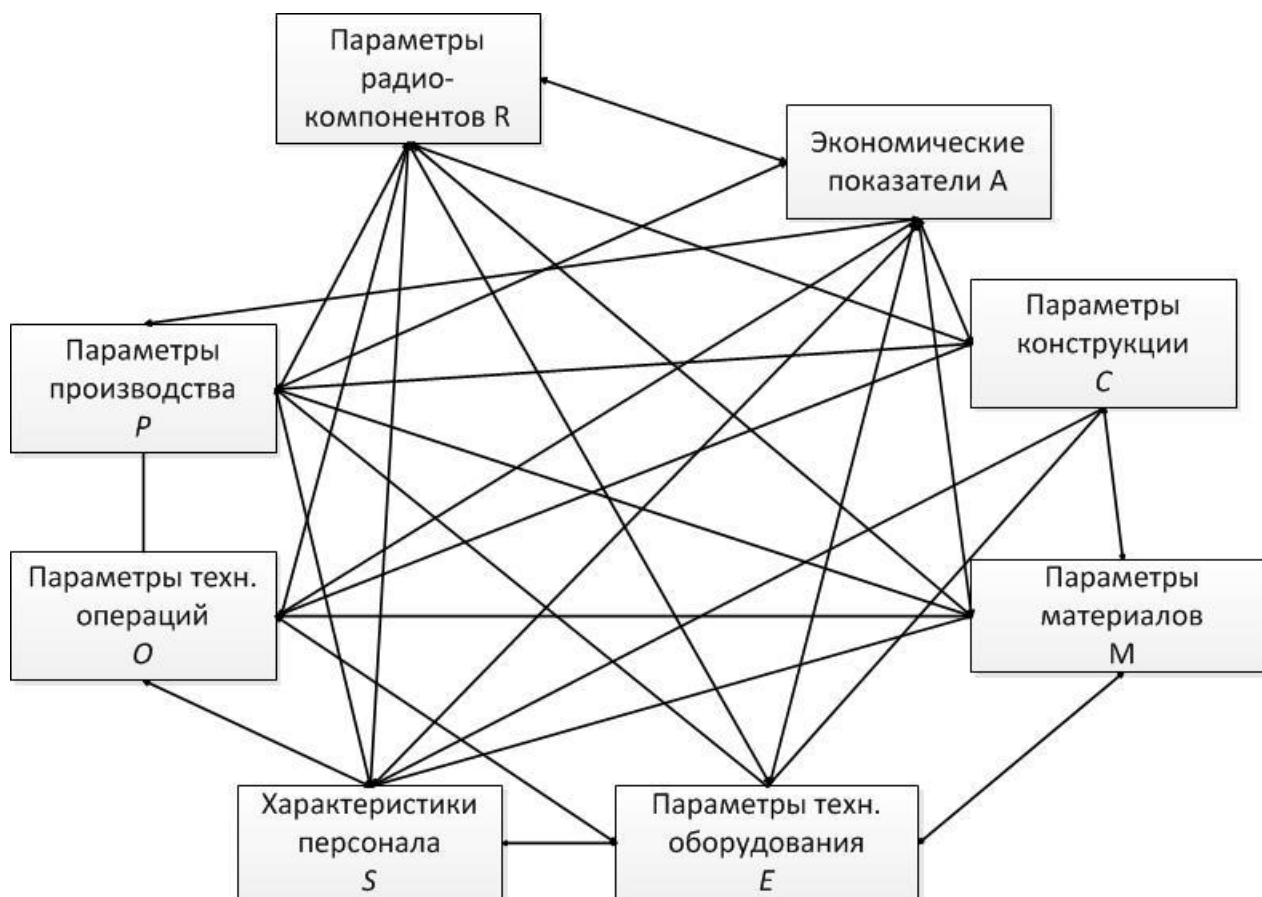


Рисунок 1 - Модель предметной области ТПИ

В графе  $G$  множество вершин  $X$  состоит из подмножеств  $X = P \cup C \cup M \cup E \cup S \cup O \cup A \cup R$ , где  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_\alpha\}$ - множество параметров, характеризующих производство,  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_\gamma\}$ - множество параметров конструкции изделия,  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_\eta\}$ - множество параметров технологических операций,  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_\mu\}$ - параметры материалов,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_\nu\}$ - параметры технологического оборудования,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_\xi\}$ - характеристики персонала,  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_\theta\}$ - параметры радиокомпонентов,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_\pi\}$ - экономические показатели,  $H$ - отображение параметров, определяющие логические и функциональные связи параметров.

Задачей конфигуратора является моделирование и алгоритмизация расчетов аналитических зависимостей между параметрами из множества  $X$  для предварительного выбора вариантов решений, формирования процедур расчета критерия качества и ограничений с целью встраивания в программное обеспечение задачи оптимизации технологической подготовки сборочно-монтажного производства узлов на печатных платах. Используемая в конфигураторе математическая модель должна включать алгоритм генерации логических и расчетных процедур. Такой возможностью обладают экспертные системы [4,5].

Если выбрать любую вершину  $x_i \in X$ , то для нее может быть записано правило, определяющее значение параметра  $x_i$ :

$$q_i = \text{if}(\Psi_i(X)) \text{ then } \Phi_i(X) \quad (1)$$

где  $X$  – множество параметров описывающих технологический процесс,  $\Psi_i(X)$  – логическое выражение для проверки условия выполнения правила,  $\Phi_i(X)$  – аналитическое выражение для расчета параметра  $x_i$  при выполненном условии  $\Psi_i(X)$ . Совокупность выражений (1) для всех параметров  $x_i \in X$  определит отображение  $H: Hx_i \subset X$ .

Выражение (1) в теории экспертных систем называется продукционным правилом (ПрП). В представленной постановке задачи математическая модель является базой знаний задачи проектирования ТП. Такая модель отличается наглядностью представления, простотой внесения дополнений и изменений, высокой модульностью, возможностями обработки с помощью алгоритмов логического вывода.

Если система ПрП полностью определена, т.е. база знаний создана, то для проектирования ТП можно применить экспертную систему (ЭС) [4]. Загружая в ЭС базу знаний и задавая значений входных параметров ТП (фактов), с помощью алгоритмов логического вывода можно получить значения недостающих параметров ТП. В представленной формулировке задача ТПП заключается в формировании систем ПрП (базы знаний) и применении к ним аппарата логического вывода.

### **Программная реализация математической модели**

Программная реализация предложенного подхода к обработке знаний о технологическом процессе сборочно-монтажного производства представляет библиотеку классов. Каждый класс объединяет свойства и правила обработки для определенной группы факторов, влияющих на параметры технологического процесса (рисунок 2). При этом свойства класса могут, как принимать значения параметров и факторов, или передавать их для исчисления других параметров. Методы исчисления параметров инкапсулированы внутри класса, что делает их независимыми от влияния изменений в программном обеспечении модели технологического процесса.

Для обеспечения условий логического вывода создается базовый класс  $\Psi=(U,V,W)$ , который включает базовые методы выполнения логического вывода:  $U$  – методы проверки необходимых условий выполнения правил и  $V$  – методы проверки достаточных условий выполнения правил,  $W$  – метод выполняющий вычисления параметра в консеквентой части. Создание базового класса позволяет в дальнейшем



делать программный код логического вывода более надежным и облегчает наращивание базы знаний.

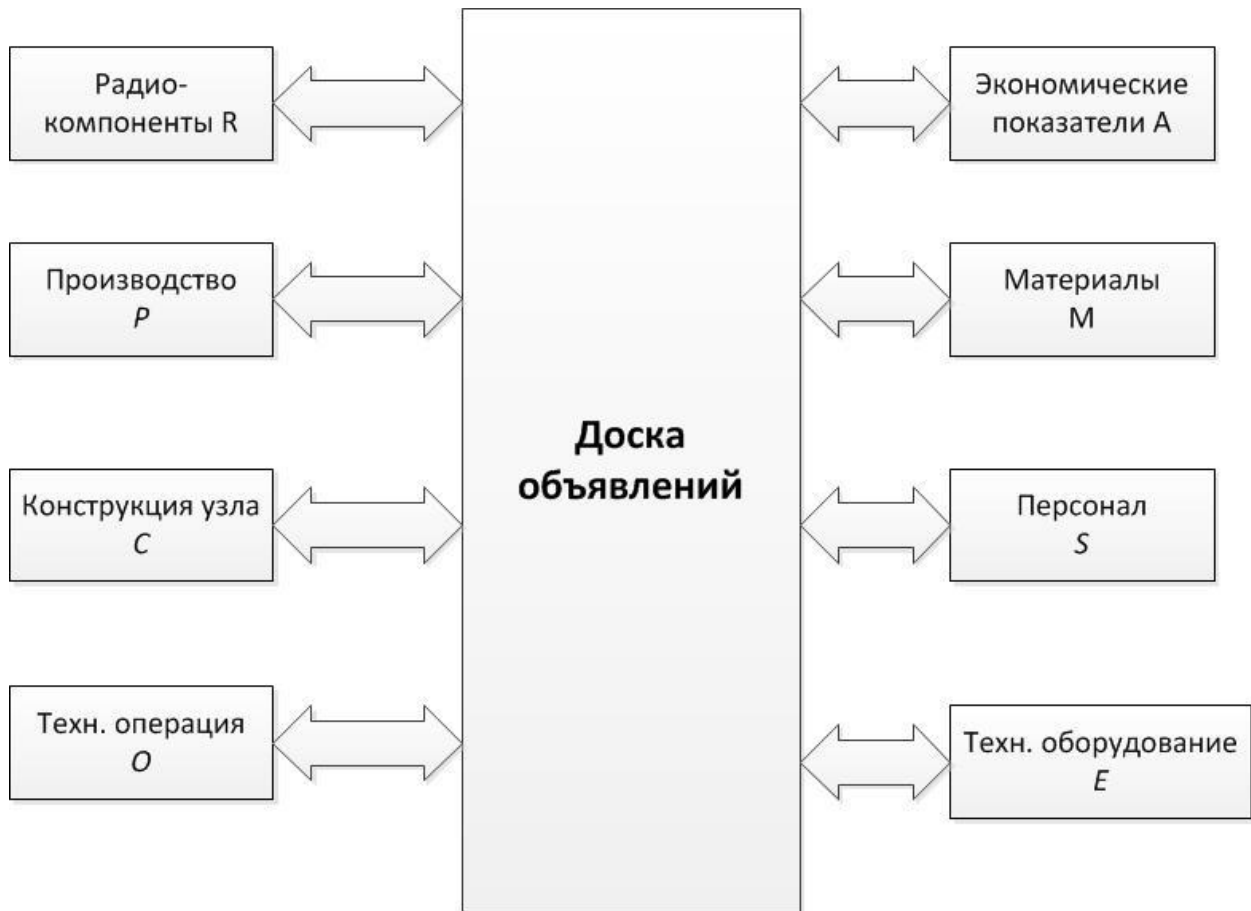


Рисунок 2. Библиотека классов ТПП

Программная реализация модели задачи технологической подготовки производства представляют экземпляры разработанных классов, отражающие различные аспекты предметной области. Их взаимодействие осуществляется через доску объявлений экспертной системы. Доска объявлений представляет область внешней памяти, в которой размещаются значения всех параметров. Диспетчер системы сканирует экземпляры классов, выбирает из доски объявлений значения

параметров вместе с признаками их исчисления. Если экземпляр класса получил все необходимые для расчетов данные, то выполняется исчисление правила.

### **Алгоритм формирования модели**

В условиях широкой номенклатуры оборудования, разнообразных требований к конструкции изготавливаемых узлов РЭА и используемой элементной базы технологический процесс сборочно-монтажного производства имеет множество альтернативных вариантов исполнения. Для сокращения перебора на входе программного комплекса оптимизации выполняется проверка соответствия выбранных вариантов реализации технологических операций требованиям и ограничениям проектируемого технологического процесса. Формирование математической модели решения задачи оптимизации начинается с подготовки базы данных (БД) вариантов реализации технологических операций (рисунок 3).

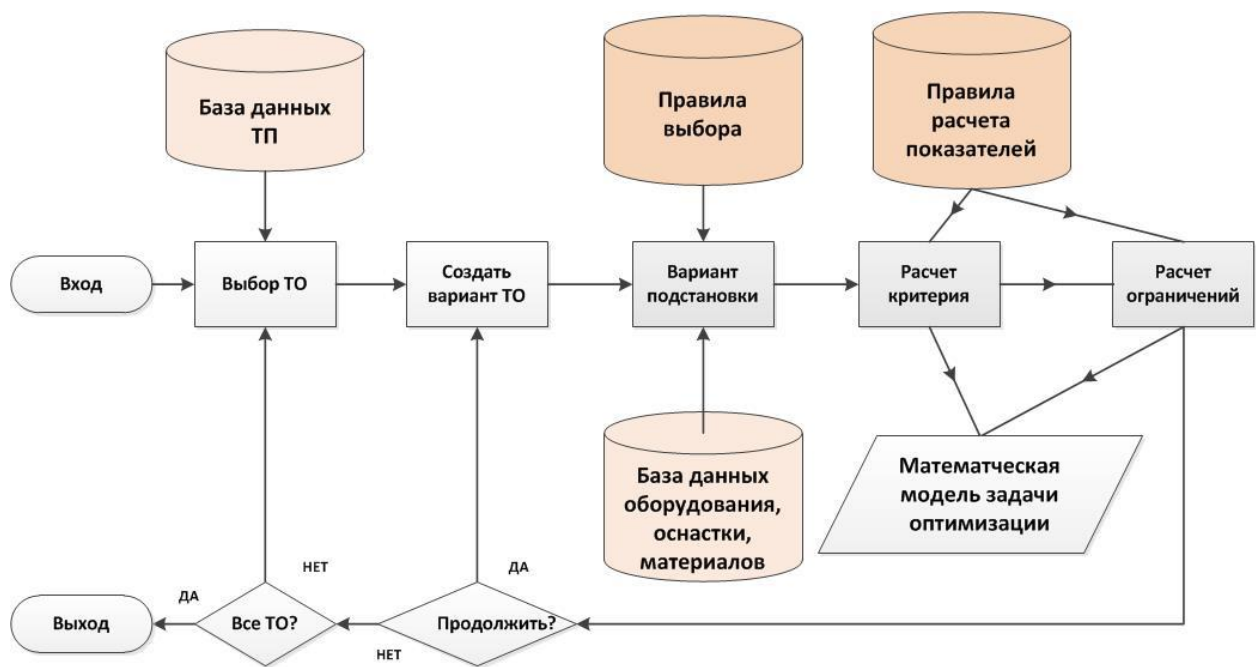


Рисунок 3 - Формирование математической модели решения задачи оптимизации методом математического программирования

Из БД ТП выбираются ТО и для них формируются варианты реализации по правилам, записанным в базу знаний выбора оборудования, оснастки, материалов. В цикле выполняется расчет показателей качества и значения ограничивающих параметров. В результате формируется математическая модель для расчета функции качества и ограничений задачи оптимизации [2, 3].

Аддитивная функция качества ТП

$$F(\bar{X}) = \sum_{i=1}^m f_i(x_{i1}, \dots, x_{in}) \rightarrow ext \quad (2)$$

где  $\bar{X} = (x_{11}, \dots, x_{mn})$  - вектор параметров технологического процесса, а  $f_i(x_{i1}, \dots, x_{in})$  функция, определяющая значения критерия качества для  $i$ -й ТО,  $m$  – количество ТО.

Ограничения представлены совокупностью аддитивных функций  $g_j(\bar{X}) \leq 0$  (3), где  $j$  – номер ограничения задачи оптимизации.

Настройка задачи оптимизации на конкретные требования осуществляется при изменении начальных условий применения правил логического вывода. В зависимости от заданных параметров экспертная система меняет выбор правил, адаптируя алгоритм оптимизации к поставленной задаче.

### **Формирование производственных правил операции сборки.**

Рассмотрим математическую модель оценки выбора оборудования операции сборки радиокомпонентов на ПП по показателю результативности.

При решении задачи необходимо обеспечивать максимальную допустимую результативность ТП, которая достигается контролем и управлением показателей качества выпускаемой продукции. Разработчик обязан обеспечить максимальный выход годных изделий.

Отклонение совмещения выводов компонентов с контактными площадками является одной из главных причин некачественной сборки. В стандартах сборочных операций его значения не должно превышать 25%, а в спец. технике 0%. Поэтому этот параметр требует особого контроля. Поскольку обычно электронные устройства содержат достаточно большое число компонентов, то вероятность установки компонента вне поля допуска должна быть достаточно малой. С другой стороны, слишком жесткие требования к вероятности попадания в поле допуска приводят к

необоснованному удорожанию оборудования и неадекватным мерам по обеспечению качества.

Реализация сборочных ТО связана с установкой компонентов в контактные площадки ПП [6], вследствие чего возникает необходимость в оценке влияния конструкторско-технологических свойств платы и компонентов, точности и силовых параметров робота-манипулятора на показатели собираемости изделия. Факторами, влияющими на показатель собираемости при совмещении компонентов с контактными площадками платы, являются допуски на расстояние между любыми двумя контактными площадками, на ширину контактной площадки платы; на размеры координатного стола робота сборщика; на координаты установочной головки робота; а также размеры контактных площадок и выводов элементов.

Зная значение каждого фактора можно оценить его влияние на показатель собираемости. Далее по показателю собираемости можно сделать вывод о применимости выбранного варианта ТП для производства изделия.

При низких значениях собираемости производство может стать экономически невыгодным, а в случаях спец. техники привести к еще большим потерям.

Параметрическая модель погрешностей сборки содержит 4 логически связанные между собой модели: модель компонентов (COMP), модель платы (PLAT), модель робота сборщика (EQUIPMENT) и модель технологической операции (OPERATION) (рисунок 4). Каждая из моделей представлена в программном комплексе классом.

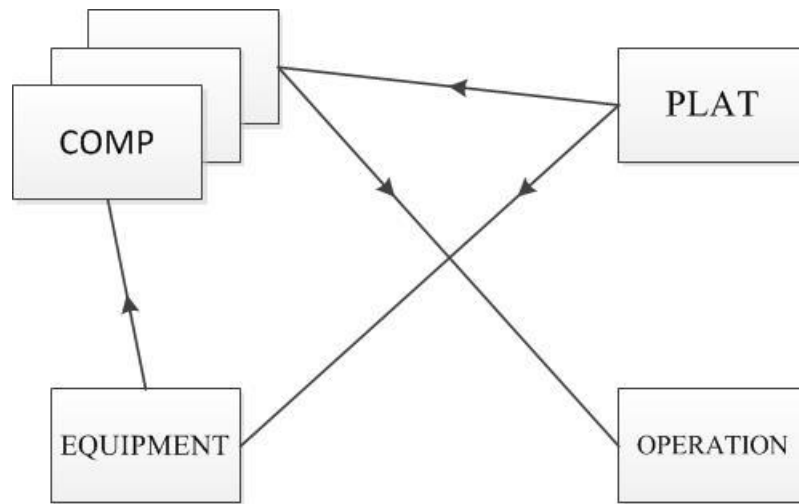


Рисунок 4 - Связи классов модели сборки

Модель компонента связывает вероятность собираемости компонента с погрешностями установки компонента на плату. Для ее исчисления определяется относительная погрешность отклонения центра вывода от центра контактной площадки:

$$\delta_{во} = \sqrt{\delta_{в}^2 + \delta_{к}^2 + \delta_{п}^2 + \delta_{ио}^2} \quad (4)$$

где  $\delta_{в}$  - погрешность смещения координаты центра вывода относительно корпуса компонента,  $\delta_{к}$  – погрешность расстояния от базы компонента до базы платы,  $\delta_{ио}$  – относительная погрешность координаты исполнительного органа манипулятора,  $\delta_{п}$ - относительная погрешность координаты платы.

Вероятность отклонения положения центра вывода от центра контактной площадки  $p$  определит показатель собираемости компонентов на плате. Для этого используется функция Лапласа:

$$\Phi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (5)$$

где  $a=0$  математическое ожидание погрешности,  $x=\delta$  – предельная погрешность отклонения центра вывода,  $\sigma$  – дисперсия отклонения.

Вероятность предельного отклонения центра вывода рассчитывается по формуле  $p = \Phi\left(\frac{1}{\sigma}\right)$ , где  $\sigma = \delta_{\text{во}}/3$ . Показатель собираемости одного компонента  $P_i = p^n$ , где  $n$  – количество выводов компонента. Показатель собираемости всех компонентов  $\bar{P} = \prod_{i=1}^m P_i$  (6), где  $m$  – количество компонентов схемы узла.

Погрешность расстояния от базы компонента до базы платы  $\delta_k$  исчисляется в классе PLAT. Относительная погрешность координаты исполнительного органа манипулятора  $\delta_{\text{ио}}$  и относительная погрешность координаты платы  $\delta_{\text{п}}$  исчисляются в классе EQUIPMENT. Погрешность смещения координаты центра вывода относительно корпуса компонента  $\delta_{\text{в}}$  определяется в классе COMP и связана с операциями формовки выводов.

В классе OPERATION по пороговому показателю собираемости оценивается качество ТП.

При выборе оборудования по критерию результативности в операции сборки применяется продукционное правило

$$\text{if}(\bar{P} \leq P_{\text{пор}}) \text{ then "Выбор"}$$

Представленные правила расчета используются для разработки библиотеки классов объектного программирования. Данная библиотека является частью базы знаний расчета показателей качества ТП сборки узла на печатной плате.

Аналогичным образом строится математическая модель для расчета процента выхода годных других технологических операций и для других факторов (экономических, производственных и т.д). Из БД ТП для каждой ТО выбираются варианты ее реализации и в цикле выполняется расчет показателей качества и значения ограничивающих параметров. В результате формируется база данных вариантов ТО с параметрами оптимизации.

Разработанные математические модели являются базовыми для прогнозирования результативности технологического процесса производства узлов на ПП. Другие классы могут подключаться к расчетам по мере развития системы, отражая весь спектр задач обеспечения эффективности процесса производства. Они позволяют по данным из справочников, параметрам конструкций компонентов и ПП выполнять расчеты, необходимые для оценки качества и выбора вариантов ТП.

## **Выводы**

1. Для создания унифицированного программного комплекса оптимизации технологического процесса сборки и монтажа компонентов на печатных платах необходимо использовать экспертную систему и базу знаний.



2. Разработана структура конфигуратора математической модели задачи оптимизации технологического процесса сборки и монтажа компонентов на печатных платах.

3. Математическая модель сборочно-монтажных операций и ее программная реализация в виде библиотеки объектно-ориентированных классов позволяет выполнять расчеты параметров технологического процесса и осуществлять выбор вариантов исполнения технологических операций с учетом требований к эффективности и качеству производства.

### **Библиографический список**

1. Вотинцев С., Борисенков А. Технология поверхностного монтажа. Шаг за шагом // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2005. № 1. С. 48-55.

2. Дембицкий Н.Л., Луценко А.В., Фам Вьет Ань Оптимизация выбора оборудования для производства бортовых радиотехнических комплексов // Электронный журнал «Труды МАИ», 2015, выпуск № 81: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57879> (дата публикации 13 мая 2015).

3. Фам Вьет Ань Программный комплекс оптимального выбора технологического оборудования для производства радиоаппаратуры. «Информационно-телекоммуникационные технологии» // Тезисы докладов 13-й

Международной конференции «Авиация и Космонавтика - 2014», Москва, 2014, С. 468-469.

4. Дембицкий Н.Л., Назаров А.В. Применение методов искусственного интеллекта в проектировании и производстве РТУ. –М.: МАИ, 2009г.– 228 с.

5. Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы: принципы и программирование. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 1152 с.

6. Фролов В.Н., Львович Я.Е., Меткин Н.П. Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭС: Учебное пособие. - М. Высшая школа, 1991. – 463 с.