

УДК 621.396.6.001.66

С.А. ЩИПЕЛЕВ¹, А.Н. ЕСМАНЧУК²

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

²Научно-производственное предприятие «Хартрон-Энерго», Украина

АНАЛИЗ АВТОМАТОВ-УСТАНОВЩИКОВ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ УСТАНОВКИ КОМПОНЕНТОВ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Проведена классификация автоматов-установщиков поточного типа для поверхностного монтажа. Дано математическое описание основных параметров операции установки компонентов на печатную плату автоматом-установщиком и разработан моделирующий алгоритм данной технологической операции.

поверхностный монтаж, автомат-установщик, печатная плата, математическое описание, моделирующий алгоритм

Введение

Современная электронная аппаратура характеризуется микроминиатюризацией, высокой технологичностью, малой массой и повышенной надежностью. Возможность производства современной электронной аппаратуры во многом обеспечивается достижениями в области создания нового поколения электронных компонентов, технологии и оборудования для поверхностного монтажа.

Поверхностный монтаж – это закрепление и монтаж электронных компонентов специальной конструкции (компоненты монтажа на поверхность) непосредственно на поверхность монтажной платы.

Главным достоинством поверхностного монтажа электронных компонентов является то, что он обладает критерием прогрессивности: обеспечивает миниатюризацию радиоэлектронной аппаратуры при одновременном росте функциональной сложности.

В настоящее время процессы внедрения поверхностного монтажа в нашей стране проходят медленно, во многом причиной этого является сложная экономическая ситуация на предприятиях, а также недостаточная готовность предприятий и их специалистов к внедрению новых технологий.

В современной литературе и сети Интернет, как правило, предоставлена справочная информация фирм-производителей оборудования и компонентов

для поверхностного монтажа [1, 2]. Вопросам, посвященным непосредственно технологическому процессу, его проектированию, моделированию и построению, на производстве уделяется недостаточно внимания. В Украине на сегодняшний момент не издается ни одно периодическое издание, посвященное поверхностному монтажу, лишь в журнале «Электронные компоненты и системы» есть рубрика, посвященная вопросам поверхностного монтажа.

Цель данной работы – построение моделирующего алгоритма технологической операции установки элементов поверхностного монтажа автоматом-установщиком поточного типа.

Далее будут решены следующие задачи: анализ и классификация современных автоматов-установщиков поверхностного монтажа, математическое описание и построение моделирующего алгоритма операции установки компонентов автоматом-установщиком.

1. Классификация и анализ автоматов-установщиков поверхностного монтажа поточного типа

Одной из важных операций технологического процесса поверхностного монтажа является автоматическая установка компонентов на печатные платы. От точности выполнения этой операции в значи-

тельной мере зависит надежность и электрические характеристики аппаратуры. Поэтому используются автоматы-установщики, которые получили название «pick-and-place equipment» или «placement system». Такие установки осуществляют захват компонентов из подающих устройств и размещение их на контактных площадях печатных плат, обеспечивая необходимую точность монтажа. Основной тенденцией их развития является повышение точности позиционирования и производительности работы. Большое значение имеет также обеспечение гибкости в работе и программной перенастройки автоматов на новые виды корпусов, систем их подачи на новые топологии печатных плат. Кроме того, важным для такого оборудования является повышение выхода годных изделий, что обеспечивается программным управлением процесса сборки, встроенными системами контроля с поиском и заменой неисправных компонентов с использованием систем технического зрения.

Рассматривая конструктивные особенности различных автоматов-установщиков, необходимо отметить, что рабочий цикл любого автомата-установщика включает в себя:

- выбор из накопителя требуемого компонента;
- перемещение его к посадочному месту на печатной плате;
- установку компонента с требуемой точностью позиционирования.

Главный исполнительный механизм установщиков (двухкоординатный стол и монтажная головка) строятся по двум схемам: Т (T-drive) и Н (H-drive) (рис. 1).

В Т-схеме обеспечение движения манипулятора, устанавливаемого на Х-плече в направлениях X и Y , – с приводом и жестким креплением поперечной траверсы только на одном плече Y . В Н-схеме обеспечивается привод в двух плечах траверсы Y с жестким креплением поперечной траверсы на двух продольных траверсах.

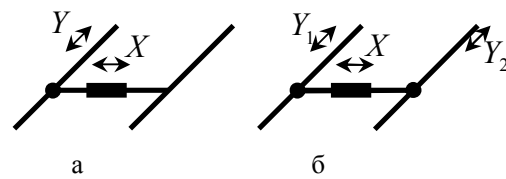


Рис. 1. Схема реализации исполнительных механизмов автоматов-установщиков:
а – Т-drive; б – Н-drive

Выпускаемые ведущими зарубежными фирмами автоматы-установщики разделены на пять групп в зависимости от их производительности и точности установки компонентов.

Автоматы первой группы имеют относительно простую механику, которая чаще всего реализуется по Т-схеме, упрощенные алгоритм функционирования и схему управления, ограниченную точность позиционирования ($0,15$ мм), механическую юстировку компонентов, ограниченный набор компонентов (R, C, чип SO, PLCC, QFP с шагом между выводами $P 0,625$ мм).

Автоматы второй группы наряду с большей производительностью имеют более высокую точность позиционирования (погрешность $\pm 0,12$ мм). Следует отметить, что в этом случае возможно применение наряду с механическими и оптических систем ориентирования компонентов, большой набор компонентов. Они могут быть реализованы по одинарной сдвоенной Т-схеме. Сдвоенная Т-схема обеспечивает большую производительность.

Автоматы третьей группы имеют более сложную механику, оптическую систему ориентирования компонентов, более точную систему позиционирования (погрешность $\pm 0,1$ мм). Выполняются по схеме с центральной региорной головкой и с использованием блока головок, осуществляющих синхронный захват и установку компонентов. По этой схеме может осуществляться одновременный захват и позиционирование большого количества компонентов. При этом печатная плата не перемещается, следовательно, сокращается время на ее транспортировку.

Четвертая группа автоматов-установщиков реализуется по схеме последовательно-параллельного позиционирования. Многозахватные головки располагаются вдоль конвейера и осуществляют независимую установку компонентов. Погрешность позиционирования $\pm 0,08 \dots 0,1$ мм.

Особенность пятой группы автоматов-установщиков – это их повышенная точность позиционирования ($\pm 0,03 \dots 0,05$ мм). Выполняются они по H-схеме с применением специальных материалов, узлов точной механики с современным приводом, систем технического зрения, высокоточных систем измерения координат. Применяются для установки компонентов с шагом выводов менее 0,3 мм (QFP, BGA, Flip-Chip, CSP).

Технологический цикл автоматов-установщиков возможно реализовать с помощью взаимного перемещения основных конструктивных элементов автомата – монтажной головки, координатного стола и магазина с компонентами. В настоящее время принят ряд вариантов комбинаций перемещаемых основных элементов автоматов-установщиков.

Вариант 1. Печатная плата и магазин с компонентами неподвижны (магазин может перемещаться только в направлении X). Компоненты захватываются монтажной головкой с необходимой позиции питателя и устанавливаются на посадочное место. Монтажная головка перемещается по всем направлениям (X , Y , Z) и вокруг своей оси (Y), что позволяет ей по заданной программе выбирать требуемый элемент и устанавливать его в любую точку на печатной плате. Автоматы, работающие по такой схеме, обладают наибольшей гибкостью и позволяют устанавливать компоненты любых типов, что эффективно в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства при большой номенклатуре изделий и типоразмеров компонентов. Производительность может быть повышена за счет применения нескольких монтажных головок. В автоматах-установщиках, выполненных по данному варианту исполнения, может быть предусмотрена возможность использования установщика для дозирования

клея или паяльной пасты. Для этого вместо головки, устанавливающей компоненты, в автомате используется специальная дозирующая головка. Конструктивная реализация описанной схемы выполнена в автоматах-установщиках ряда фирм, например, Zevatech(США), Dima(Нидерланды), Samsung(Корея), Siemens(Германия) [1, 2, 3].

Вариант 2. Этот вариант исполнения автомата-установщика характеризуется использованием блока головок (до 30) и нескольких печатных плат. Такие системы могут обеспечить высокую производительность. Наиболее эффективным является их применение для монтажа компонентов простой формы, например, чип-конденсаторов и чип-резисторов. Примером такой разработки является автомат-установщик компонентов FMC фирмы Assembleon (Philips). Производительность автомата до 96000 компонентов в час. Это самый производительный серийно выпускаемый автомат в мире.

Вариант 3. Роторная схема построения автоматов в последние годы находит все большее применение в конструкциях высокопроизводительных автоматов-установщиков. В этой схеме используется блок монтажных головок, которые по кругу перемещаются с одной позиции на другую. Место установки компонента позиционируется координатным столом. Различают автоматы-установщики с поворотом ротора вокруг вертикальной и горизонтальной осей и с различными вариантами подачи компонентов. Большее применение в разрабатываемых автоматах-установщиках имеет место схема с ротором, вращающимся вокруг вертикальной оси. Такие автоматы содержат один или два ротора, на каждом из них размещается по 10 или 20 монтажных головок. Центрирование компонентов осуществляется механическими устройствами или системами технического зрения.

Проведенный анализ автоматов-установщиков поточного типа для производства радиоэлектронной аппаратуры поверхностным монтажом дает возможность выбора оборудования для производства как по

критериям, указанным в классификации, так и по требованиям, выдвигаемым "заказчиком".

2. Математическое описание технологической операции установки компонентов ПМ

Построение математических моделей функционирования производственных и технологических систем является основой для решения задач оценки и выбора характеристик. Под математической моделью технологического процесса будем понимать совокупность соотношений (формул, уравнений, неравенств, логических условий, операторов), определяющих характеристику состояния системы (через них и выходные сигналы) в зависимости от параметров процесса, входных сигналов, начальных условий и времени. Математическая модель является результатом формализации процесса, т.е. построения четкого формального (математического) описания процесса с необходимой степенью приближения к действительности [4].

Будем считать, что все автоматы-установщики имеют общий цикл работы, как было указано выше. Рассмотрим производственный процесс установки радиоэлектронных элементов на печатную плату поверхностным монтажом. Очевидно, что сущность формализации операции установки состоит в переработке информации, описывающей состояние компонентов, участвующих в операции. Пусть в технологической операции установки участвует сборный узел (печатная плата) и m компонентов (элементов). Введем обозначения, имеющие конкретный физический смысл: α – параметры печатной платы, k – параметры компонентов. Такие параметры будут иметь полуфабрикаты для момента времени $t \leq t^{(n)}$. В результате операции установки получим печатную плату с новым значением параметров α_{IIk_y} , а элементы прекратят существование.

Операцию установки необходимо задать соотношением вида

$$\alpha_{IIk_y} = (\alpha_1 k_1, \dots, \alpha_m k_m, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_l), \quad (1)$$

где β_i – параметры, зависящие от характеристик автомата-установщика.

На практике приходится сталкиваться со случайными значениями α_{IIk_y} . В этих случаях используют соотношение

$$\alpha_{IIk_y} = (\alpha_1 k_1, \dots, \alpha_m k_m, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_l) + \delta \alpha_{IIk_y}, \quad (2)$$

где $\delta \alpha_{IIk_y}$ – случайные соотношения, задаваемые соответствующим законом распределения или другими вероятностными характеристиками.

Примем выражения для параметров операции установки:

1. Момент начала операции $t_{ij}^{(n)}$. Пусть $t_j^{(n)}$ – момент поступления очередной печатной платы для установки компонентов, а $t_{1j}^{(n)}, t_{2j}^{(n)}, \dots, t_{mj}^{(n)}$ – момент поступления компонентов для установки. Операция начинается в момент готовности всей совокупности элементов:

$$t_j^{(n)} = \psi(t_{1j}^{(n)}, t_{2j}^{(n)}, \dots, t_{mj}^{(n)}) \quad (3)$$

2. Длительность операции τ_{ij} . Может рассматриваться как сумма длительности трех этапов цикла работы автомата-установщика.

3. Время подготовки к работе $\tau^{(T)}$ после предыдущей операции. Как правило, является случайной величиной (зависящей от выполнения предыдущей операции) с заданным законом распределения. Обычно принимают показательный закон распределения:

$$f(t^{(T)}) = \lambda e^{-\lambda t^{(T)}}, \quad (4)$$

где λ зависит от характеристики самого автомата и от устанавливаемых компонентов.

На основе приведенных рассуждений запишем математическое выражение для модели операции установки компонентов на печатную плату поверхностным монтажом:

$$T = t \sum_{i=1}^l f \left(t_j^{(n)}, \tau_{ij}, t_{ij}^{(k)}, t_{ij}^{(\Gamma)}, t_j^{nров} \right), \quad (5)$$

где t – норма времени на операцию;

i – номер операции;

l – число операций;

T – норма времени на установку j -го узла;

$t_j^{(n)}$ – момент поступления j -го сборочного узла;

τ_{ij} – длительность операции установки j -го узла;

$t_{ij}^{(k)}$ – момент окончания i -й операции установки j -го узла;

$t_{ij}^{(\Gamma)}$ – момент готовности всех компонентов;

$t_j^{nров}$ – время проверки j -го узла.

3. Моделирующий алгоритм технологической операции установки компонентов ПМ

Исходя из описанного выше, рассмотрим производственную операцию установки радиоэлектронных компонентов на печатную плату автоматом-установщиком поверхностного монтажа. Она предполагает участие двух полуфабрикатов. Из них необходимо различать ведущий полуфабрикат (печатную плату) и ведомый полуфабрикат (устанавливаемые компоненты). Под данной операцией будем понимать такой элементарный акт производственной операции над совокупностью полуфабрикатов (ведущих и ведомых), в результате которого изменится значение хотя бы одного из параметров ведущего полуфабриката (за счет присоединения ведомого). Рассмотренная ниже модель позволяет получить в результате моделирования разнообразные производственные характеристики. Для простоты ограничимся фиксацией следующих величин: количества установленных компонентов, количества готовых изделий, количества бракованных изделий и некоторых других.

Перейдем к разработке моделирующего алгоритма. Операция установки компонентов подразумевает проведение l установочных операций. Если

в необходимый момент времени соответствующий полуфабрикат имеется, то операция установки продолжается, если отсутствует – операция срывается. Компонент, выбранный из питателя для установки на печатную плату, будет установлен с определенной вероятностью и точностью, в противном случае компонент будет отбракован. Операция может продолжаться лишь ограниченное время. Если операция в норму времени не укладывается, то наступает сбой. Процесс продолжается до тех пор, пока $t_j^{(n)} < T$, где $t_j^{(n)}$ – момент поступления очередного ведущего полуфабриката на сборку. Каждая i -я операция состоит в установке на печатную плату лишь одного компонента. Будем считать, что режим перемещения сборного узла от места установки в автомате к месту выполнения установочных операций является жестким (конвейер); если длительность l операций установки значительно больше времени движения конвейера, то временем движения конвейера можно пренебречь.

Для записи алгоритма будем использовать следующие операторы:

– A – арифметический оператор;

– Π – логический оператор;

– \mathcal{Y} – оператор, означающий окончание вычислений;

– Φ – оператор формирования реализаций случайных процессов;

– F – оператор формирования неслучайных величин;

– K – оператор-счетчик.

В моделирующем алгоритме эти операции будут реализовываться следующие функции:

– Φ_1 – формирование момента поступления печатной платы на сборку;

– Π_2 – проверка условия $t_j^{(n)} < T$;

– F_3 – формирование $i = 1$;

– Φ_4 – формирование момента времени проверки j -го узла $t_j^{nров}$;

– P_5 – проверка готовности j -го узла к установке элементов;

– K_6 – счетчик количества срывов при операции установки всего изделия;

– A_7 – определение момента t_j^{npoe} ;

– P_8 – проверка условия $n \geq m_j$, где n – количество компонентов определенного типа, имеющих в накопителе, m_j – количество компонентов, необходимых для установки на j -й узел;

– F_9 – переход к i -й установочной операции;

– K_{10} – счетчик количества срывов i -й операции установки;

– Φ_{11} – формирование момента выбора из накопителя компонентов для i -й операции установки;

– P_{12} – проверка условия $P_i^{op} < P_i$, где P_i^{op} – вероятность того, что компонент не может быть взят из накопителя или окажется бракованным;

– P_i – вероятность, с которой автомат выбирает годный компонент из накопителя;

– Φ_{13} – формирование времени перемещения компонентов к посадочному месту на печатной плате;

– Φ_{14} – формирование момента установки компонента;

– Φ_{15} – формирование длительности i -й операции установки компонентов на печатную плату τ_{ij} ;

– A_{16} – определение момента $t_{ij}^{(k)}$ окончания i -й операции установки компонента;

– K_{17} – счетчик количества установленных компонентов;

– P_{18} – проверка условия $i < l$;

– K_{19} – счетчик номеров установочных операций;

– F_{20} – переход к $(i + 1)$ -й операции;

– P_{21} – проверка условия $P_i^{op} < P_i$, где P_i – вероятность того, что автомат находится в данный

момент в состоянии, в котором может быть выполнена $(i + 1)$ -я операция установки, P_i^{op} – вероятность того, что автомат не может выполнить $(i + 1)$ -ю установочную операцию (определяется по закону распределения);

– Φ_{22} – формирование значения параметров изделия (если операция установки компонентов полностью завершена) или параметров печатной платы (в случае срыва операции установки) на выходе автомата-установщика;

– K_{23} – счетчик количества готовых изделий;

– A_{24} – обработка результатов моделирования;

– R_{25} – выдача результатов и конец измерения;

– Φ_{26} – формирование времени готовности всех компонентов.

Сущность работы моделирующего алгоритма (рис. 2) состоит в следующем. Оператор Φ_1 формирует момент поступления печатной платы для установки компонентов $t_j^{(n)}$. Величина $t_j^{(n)}$ сравнивается с T (оператор P_2): если $t_j^{(n)} > T$, то моделирование продолжается; в противном же случае управление передается оператору A_{24} для обработки результатов моделирования. Оператор случайных величин F_3 формирует операцию установки $i = 1$. Оператор Φ_4 формирует момент проверки печатной платы, также может предусматривать поиск, проверку, идентификацию печатной платы элементами технического зрения, если таковые имеются на автомате-установщике. Оператор P_5 проверяет готовность j -го узла к операции установки. В случае готовности оператор A_7 определяет t_j^{npoe} , в противном случае происходит подсчет количества срывов при производстве j -го изделия (K_6) и формируются значения параметров (Φ_{22}).

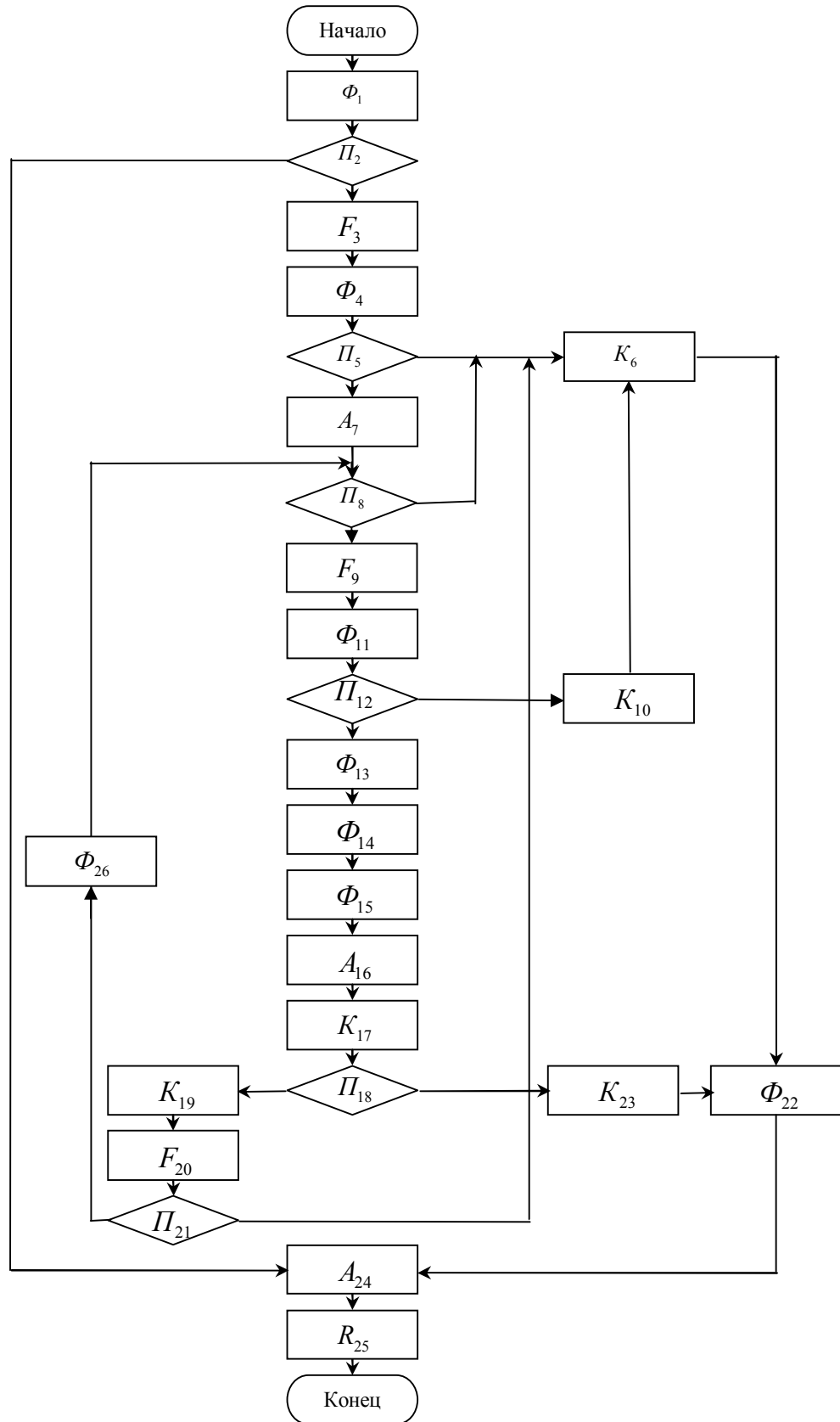


Рис. 2. Моделирующий алгоритм операций установки компонентов

Переход к i -й операции установки (F_9), после проверки количества компонентов, необходимых для установки на j -й узел ($П_8$). Автомат-установщик выполняет рабочий цикл с длительностью установки компонентов τ_{ij} . В зависимости от вида устанавливаемых компонентов и ожидаемых результатов моделирования необходимо изменять алгоритм введением операторов, которые будут фиксировать каждый этап рабочего цикла. В случае срыва i -й операции K_{10} фиксирует его. Если условие $i < l$ ($П_{18}$) выполняется, то переходим к $(i + 1)$ -й операции установки (F_{20}). В случае выполнения условия $P_{II}^{op} < P_i$ ($П_{21}$) происходит повторение рабочего цикла для $(i + 1)$ -й операции установки компонентов на печатную плату, как в случае выхода годных изделий. Так, и при срывах, и отказах на протяжении установочных операций происходит изменение значения параметров печатной платы (Φ_{22}). Оператор R_{25} – выдача результатов и конец измерения.

На основе выражения (5) был построен моделирующий алгоритм, где все составляющие описаны операторами алгоритма. Рассмотренная выше модель охватывает лишь простейший принцип установки радиоэлектронных элементов на печатную плату автоматами-установщиками. В зависимости от автомата-установщика и особенностей его работы алгоритм может быть изменен и дополнен.

Заключение

В данной работе было дано математическое описание основных параметров технологической операции установки компонентов автоматами-установщиками и построен моделирующий алгоритм этой операции. Типичные прикладные задания, которые могут решаться на производстве с использованием данного принципа: определение производительности оборудования, устойчивости к срывам операций установки, оптимальных заделов элемен-

тов и печатных плат, количества выхода готовых изделий за смену, времени готовности выполнения заказа, определение узких мест, ограничивающих производительность. Приведенный выше анализ и классификация современных автоматом-установщиков помогут найти оптимальное решение задачи выбора оборудования. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены другие способы моделирования и построения моделей как технологической операции установки компонентов, так и других операций технологического процесса производства радиоэлектронной аппаратуры поверхностным монтажом.

Литература

1. Грачев А., Мельник А., Попов Л. Поверхностный монтаж при конструировании и производстве электронной аппаратуры. – О.: ЦНТИЭПИ ОНЮА, 2003. – С. 228–240.
2. Мэнгин Ч.-Г., Маикклелланд С. Технология поверхностного монтажа. – М.: Наука, 1990. – С. 11–27.
3. Грачев А., Малиновский Н. Поверхностный монтаж электронных компонентов // Электронные компоненты и системы. – 2002. – № 1. – С. 19–30.
4. Ларин В., Метхин Н. Моделирование технологических процессов и систем. – Л.: ЛИАП, 1975. – С. 8–11.
5. Бусленко Н. Математическое моделирование производственных процессов на ЦВМ. – М.: Наука, 1964. – С. 168–172.
6. Буловский П. Технология радиоэлектронного аппаратурыстроения. – М.: Энергия, 1971. – С. 287–296.

Поступила в редакцию 17.05.04

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков