

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ФЛЮСА В БЛОКЕ ПЕННОГО ФЛЮСОВАНИЯ

Приведены результаты оптимизации процесса контроля плотности флюса в блоке пенного флюсования. Использована полумарковская модель однокомпонентной системы со скрытыми отказами и контролем для описания рассматриваемого блока. Приведен пример расчета оптимальных параметров контроля для конкретной производственной установки.

Наведено результати оптимізації процесу контролю щільності флюсу в блоці пінного флюсування. Використана напівмарковська модель однокомпонентної системи з контролем наявності прихованих відмов для аналізу блоку. Наведено приклад розрахунку оптимальних параметрів контролю для конкретної виробничої установки.

The results of the optimization of the control of density flux in unit foam fluxing are presented. Semi-Markov model single-component system with the control of hidden failures for the description of the block is used. The example of calculation of optimal control parameters for a particular production plant is presented.

подавляющее большинство печатных плат с металлизированными монтажными отверстиями монтируются посредством волновой пайки. Принцип метода состоит в том, что плата прямолинейно проводится через гребень волны припоя. Выделяются следующие технологические этапы процесса волновой пайки:

1. установка платы в технологическую рамку, выпрямляющую ее в плоскость и удерживающую ее в этом состоянии до остывания;
2. фиксация технологической рамки с платой на конвейере;
3. флюсование в блоке флюсования установки;
4. первая зона предварительного подогрева – сушка флюса;
5. вторая зона предварительного подогрева – подготовка платы к термудару расплавленным припоем;
6. пайка волной припоя;
7. съем платы в технологической рамке с транспортера конвейера;
8. охлаждение платы в технологической рамке;
9. изъятие платы из технологической рамки;
10. отмывка остатков флюса.

Нанесение флюса в большинстве случаев осуществляется способом пенного флюсования [1]. Флюс вспенивается воздухом, нагнетаемым через капиллярный фильтр. При нанесении флюса пеной обеспечивает тонкий и равномерный слой флюса. Тонкая пленка флюса (3...4 мкм) достаточна для качественного флюсования, успевает высохнуть в зоне предварительного нагрева, а при последующей отмывке (если таковая требуется) меньше загрязняет моющие растворы.

Достоинства этого способа нанесения флюса — низкая стоимость оборудования и простота настройки процесса флюсования. К недостаткам этого метода можно отнести постоянный контакт флюса с воздухом (испарение растворителя, абсорбция влаги) и контакт флюса с поверхностью печатной платы (растворение во флюсе окислов и других загрязнений, смываемых с поверхности пла-

ты). Это приводит к изменению состава и плотности флюса и, как следствие, к ухудшению пайки.

Рекомендуется [2, 3] проводить регулярный контроль и коррекцию плотности флюса, используемого в блоке флюсования, для обеспечения устойчивого качества пайки. При этом рекомендации производителей оборудования и специалистов по поводу частоты проведения контроля варьируется в диапазоне от двух до восьми раз за смену. Проведение контроля требует определенных временных и экономических затрат, поэтому выбор времени между проведением контроля необходимо проводить с точки зрения его влияния на параметры надежности и эффективности системы.

Цели данной статьи – определить оптимальное время контроля плотности флюса с точки зрения параметров надежности или эффективности системы. Проводить производственный эксперимент для определения оптимального времени контроля является затратной и длительной процедурой. Поэтому принято решение промоделировать процесс контроля плотности флюса.

Для описания процесса выбрана полумарковская модель контроля наличия скрытых отказов в производственной системе [4]. В статье приводится описание полумарковской модели проведения контроля в производственной системе. Данная модель позволяет провести расчет параметров надежности и эффективности рассматриваемого процесса контроля флюса.

Процесс контроля плотности флюса в модельном представлении является однокомпонентной системой, в которой возможны скрытые отказы (изменение плотности флюса). Наличие скрытого отказа может выявлено только во время проведения контроля (измерение плотности флюса). На время проведения контроля процесс пайки останавливается. При обнаружении отказа происходит восстановление свойств системы (корректировка плотности флюса либо его полная замена).

Опишем процесс проведения контроля плотности флюса. В начале работы в емкость блока пенного флюсования заливается свежий флюс. Во время работы установки пайки волной, вследствие абсорбции влаги из атмосферы, испарения растворителя, загрязнения веществами с поверхности печатных плат, плотность флюса изменяется. При превышении плотности флюса определенного уровня – происходит ухудшение качества пайки изделий (наступает скрытый отказ). В процессе работы установки пайки волной возможно проведение контроля плотности флюса. Для проведения контроля пайка останавливается, оператор проверяет плотность флюса. В случае обнаружения скрытого отказа проводится корректировка плотности флюса (восстановление работоспособности).

Согласно [4] для рассматриваемой системы могут быть найдены параметры надежности и эффективности. Стационарный коэффициент готовности находится согласно следующему выражению:

$$K_g = \frac{M\alpha}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^{\infty} H_r(t) f(t) dt}, \quad (1)$$

где случайная величина (СВ)  $\alpha$  – время безотказной работы компонента с функцией распределения (ФР)  $F(t)$  и плотностью распределения (ПР)  $f(t)$ ; СВ  $\delta$  – время между проведением контроля с ФР  $R(t)$  и с ПР  $r(t)$ ; СВ  $\gamma$  – длительность проведения контроля; СВ  $\beta$  – время восстановления компонента после обнару-

жения отказа;  $\hat{H}_r(t) = 1 + H_r(t)$ ;  $H_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} R^{*(n)}(t)$  – функция восстановления процесса восстановления, порожденного СВ  $\delta$ ;  $R^{*(n)}(t)$  –  $n$ -кратная свертка ФР  $R(t)$ .

Средняя удельная прибыль в единицу календарного времени определяется соотношением:

$$S = \frac{M\alpha(c_1 + c_4) - c_2M\beta - (c_3M\gamma + c_4M\delta) \int_0^{\infty} H_r(t)f(t)dt}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^{\infty} H_r(t)f(t)dt}, \quad (2)$$

здесь  $c_1$  – прибыль, получаемая в единицу времени исправного функционирования компонента;  $c_2$  – затраты в единицу времени на восстановление системы;  $c_3$  – затраты в единицу времени на проведение контроля;  $c_4$  – потери в единицу времени работы системы со скрытым отказом.

Средние удельные затраты в единицу времени исправного функционирования находятся из выражения:

$$C = \frac{c_2M\beta - c_4M\alpha + (c_4M\delta + c_3M\gamma) \int_0^{\infty} H_r(t)f(t)dt}{M\alpha}. \quad (3)$$

В случае проведения календарного контроля, время между контролями предполагаются постоянными  $\delta = \tau$ ,  $R(t) = 1(t - \tau)$ . С учетом вида законов распределения времен для системы, интеграл с функцией восстановления  $H_r(t)$  примет вид:

$$\int_0^{\infty} H_r(t)f(t)dt = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}(n\tau). \quad (4)$$

С учетом выражения (4) формулы (1)-(3) преобразуются к виду:

$$K_g = \frac{M\alpha}{M\beta + (\tau + M\gamma) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}(n\tau)},$$

$$S = \frac{M\alpha(c_1 + c_4) - c_2M\beta - (c_3M\gamma + c_4\tau) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}(n\tau)}{M\beta + (\tau + M\gamma) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}(n\tau)}, \quad (5)$$

$$C = \frac{c_2 M\beta - c_4 M\alpha + (c_4 \tau + c_3 M\gamma) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}(n\tau)}{M\alpha}.$$

Для использования формул (5) необходимо определить такие параметры рассматриваемой системы, как ФР СВ  $\alpha$  и математические ожидания  $M\beta$ ,  $M\gamma$ .

В рамках данной работы был поставлен и проведен производственный эксперимент по определению вышеперечисленных параметров. Эксперимент проводился на установке пайки двойной волной с блоком пенного флюсования ERSA ETS-250 [3]. Производитель оборудования рекомендует проводить измерение плотности флюса каждые два часа.

Объем емкости для флюса 1,5 литра. Использовался флюс GSP-2533/RX. Заявленная производителем плотность флюса составляет  $0,794 \pm 0,003$  г/см<sup>3</sup>. В рамках эксперимента в начале смены емкость флюсователя заполнялась свежим флюсом, после чего начинался процесс пайки. В течение смены контролировался уровень флюса. В случае уменьшения начального уровня флюса в емкость доливался свежий флюс до наполнения емкости.

Во время технологических перерывов проводился контроль плотности флюса и его температуры. Измерение плотности проводилось с помощью ареометра с ценой деления  $0,001$  г/см<sup>3</sup>, температура измерялась цифровым термометром с точностью  $1^\circ\text{C}$ . Температура измерялась для возможности перерасчета плотности к температуре  $20^\circ\text{C}$ . Плотность флюса после контроля не корректировалась, что позволило определить вид закона распределения времени наработки системы на скрытый отказ. Принято, что плотность флюса  $0,805$  г/см<sup>3</sup> является критической. Достижение данной плотности в системе эквивалентно моменту возникновения скрытого отказа.

Производственный эксперимент длился 36 календарных дней. За это время зафиксировано 21 скрытый отказ в системе блока флюсования. Т.к. контроль плотности проводился не непрерывно, время наступления отказа определялось по двум ближайшим значениям плотности (до отказа и после отказа) с использованием линейной аппроксимации. Для определенных таким образом времен наступления скрытого отказа в системе построена функция распределения. Наиболее близкой к полученной функции является функция распределения нормальной СВ. Сравнение экспериментально полученной функции с нормальной функцией распределения ( $m=71$  мин,  $\sigma=19$  мин) представлено на рисунке 1. Величина достоверности аппроксимации данных составляет 0,982.

Также в ходе эксперимента определено среднее время проведения контроля  $M\gamma=7$  мин. Время восстановления системы составляет  $M\beta=11$  мин (корректировка плотности флюса). Параметры эффективности системы следующие:  $c_1 = 9$  у.е.;  $c_2 = 2$  у.е.;  $c_3 = 1$  у.е.;  $c_4 = 2$  у.е.

В формулах (5) все параметры определены, за исключением времени между контролем флюса. Следовательно, можно провести поиск оптимального времени между контролем плотности флюса. В данном случае критерием оптимизации может выступить любой из параметров системы:  $Kg(\tau)$ ,  $S(\tau)$  либо  $C(\tau)$ .

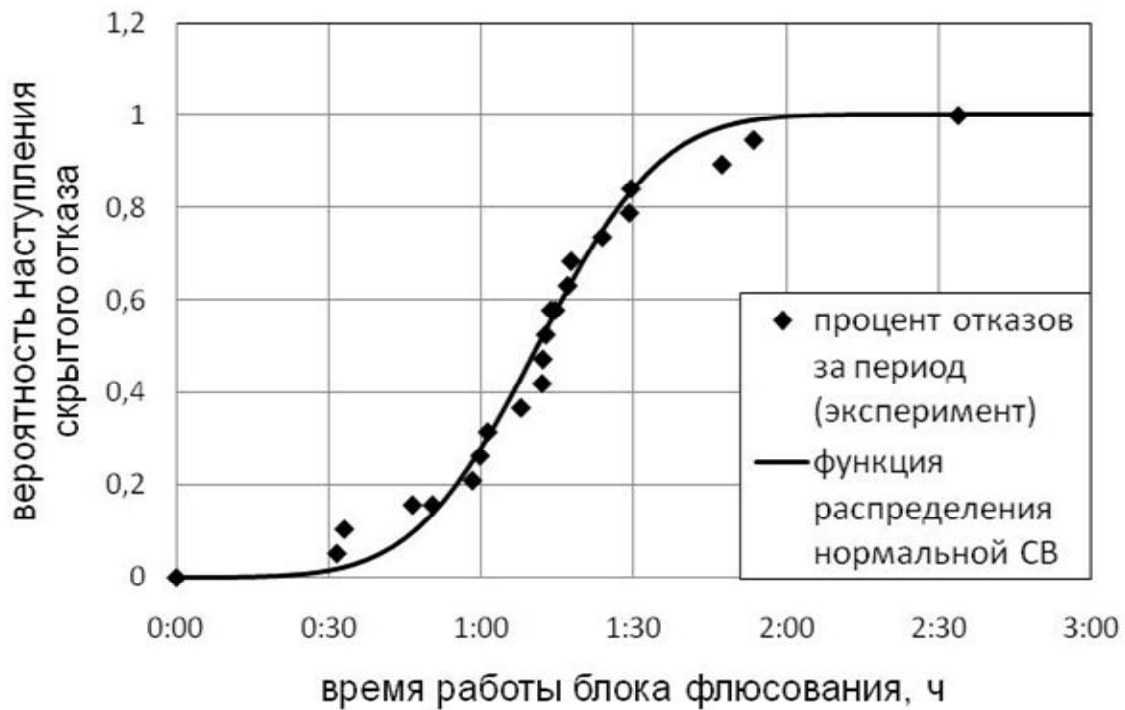


Рис. 1. Значение функции распределения дискретной СВ по результатам эксперимента (точки) и функция распределения нормального закона с параметрами  $m=71$  мин,  $\sigma=19$  мин

На рисунке 2 приведена зависимость коэффициента готовности от времени между проведением контроля плотности флюса.

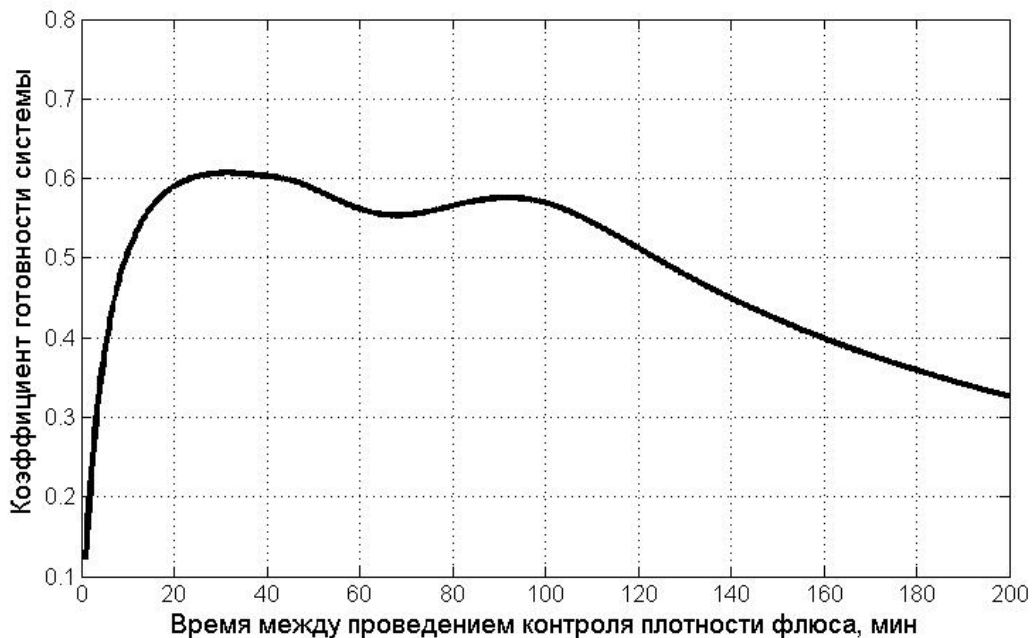


Рис. 2. Зависимость коэффициента готовности системы от времени между проведением контроля плотности флюса

На рисунке 3 приведена зависимость параметров эффективности системы от времени между проведением контроля плотности флюса.

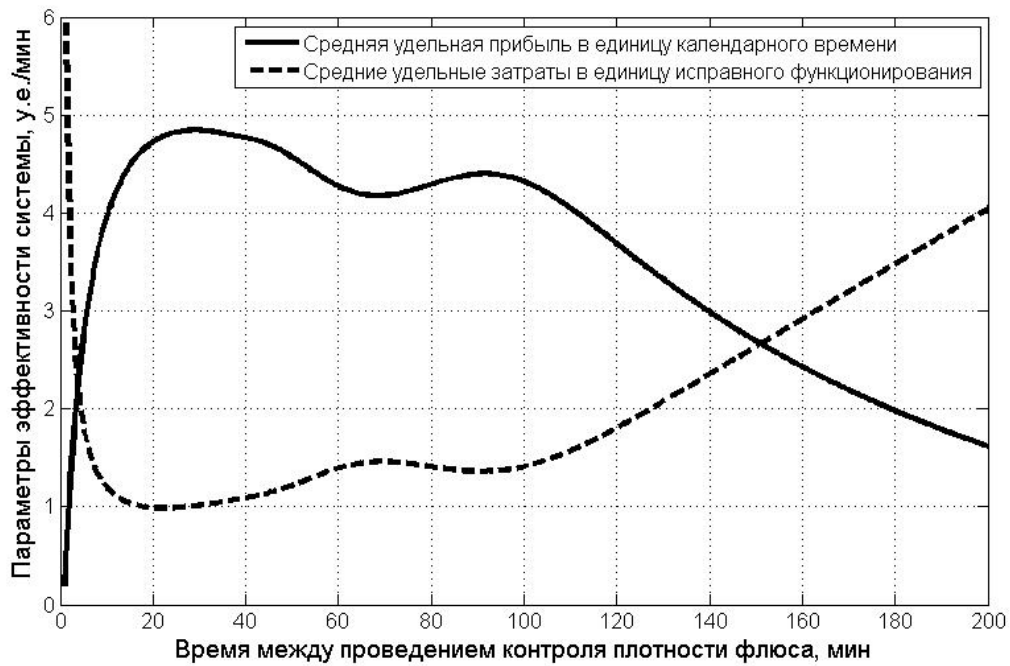


Рис. 3. Зависимость параметров эффективности системы от времени между проведением контроля плотности флюса

Представленные зависимости параметров системы имеют явные экстремумы. В таблице приведен расчет параметров системы с рекомендуемой производителем оборудования периодичностью контроля ( $\tau=120$  мин). Дополнительно представлены результаты оптимизации параметров надежности и эффективности системы при различных условиях (максимальный коэффициент надежности, максимальная прибыль, минимальные затраты).

Таблица

Стационарные характеристики системы

№ п/п	Исходные данные				Результаты			
	$M\alpha$ , мин	$\sigma_{\alpha}$ , мин	$M\beta$ , мин	$M\gamma$ , мин	$\tau$ , мин	$K_g$	$S$ , у.е./мин	$C$ , у.е./мин
1	71	19	11	7	120	0,512	3,685	1,806
2					31,5	<b>0,607</b>	4,836	1,025
3					22,3	0,606	<b>4,843</b>	1,009
4					29	0,597	4,783	<b>0,987</b>

Как видно из результатов расчета рекомендуемый режим работы для конкретного блока пенного флюсования является менее эффективным по сравнению с оптимальными режимами.

В результате работы процесс контроля плотности флюса описан с помощью полумарковской модели производственной системы с контролем скрытых отказов. Моделирование процесса позволило определить оптимальное время календарного контроля плотности флюса на установке пайки волной припоя с точки зрения параметров надежности либо эффективности.

В дальнейшем планируется провести моделирование установки пайки волной припоя как многокомпонентной системы со скрытыми отказами.

#### Список литературы

1. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств. М. - Техносфера, 2007. – 256 с.
2. Пилипенко О. Мысли о монтаже. Пайка волной припоя// Технологии в электронной промышленности. – 2006. №4. – С. 48-53.
3. Установка пайки ERSA ETS-250. Руководство оператора. ERSA Loettechnik GmbH. Перевод и переработка, ред. 1 ЗАО Предприятие «ОСТЕК». 2001. – 53 с.
4. Бойко Е.Г. Анализ влияния периода контроля на надежность технической системы/ Е.Г. Бойко, Ю.Е. Обжерин, Н.В. Казакова // Оптимизация производственных процессов — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. №7. – С. 23-27.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Сдвіжковою О.О.  
Надійшла до редакції 19.03.2013*

УДК.681.5.

© Ю.Е. Обжерин, Е.Г. Бойко

### **ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С ОТКЛЮЧЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ НА ПЕРИОД ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ**

На базе теории полумарковских процессов с общим фазовым пространством состояний построена математическая модель контроля скрытых отказов двухкомпонентной системы с последовательным соединением компонентов. Найдены стационарные надежность и экономические характеристики функционирования системы.

На базі теорії напівмарківських процесів із загальним фазовим простором станів побудована математична модель контролю прихованих відмов двокомпонентної системи з послідовним з'єднанням компонентів. Знайдені стаціонарні надійнісні й економічні характеристики функціонування системи.

On the base of semi-markov process with overall space two-component system with sequential connection of components mathematical the model control by hidden failures were constructed. Reliable and economical functioning characteristics were found.

Несмотря на высокие технологии в современном приборостроении, актуальной является проблема повышения надежности технических систем (ТС) и