

МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Е. А. Данилова, И. И. Кочегаров, В. А. Трусов

Введение

Современные электронные изделия создаются на основе печатного монтажа, представляющего многослойную структуру, состоящую из диэлектрического основания и проводящего рисунка. Условия эксплуатации электронных средств (ЭС) различны и зависят от области их применения, но неизменно к ЭС предъявляются высокие требования по надежности. Максимальные требования по надежности ЭС устанавливают космическая, авиационная и военная отрасли, где ЭС рассчитаны на длительный период эксплуатации в условиях жестких внешних воздействий.

Известно, что на 30–40 % отказов ЭС происходит за счет дефектов печатных плат (ПП), причина возникновения которых кроется в несовершенстве или в несоблюдении технологии их производства.

Для эффективного обнаружения и локализации технологических дефектов традиционно используют информационно-измерительные системы (ИИС), позволяющие проводить активный контроль и диагностирование изделия на всех технологических этапах его производства. Задачей любой ИИС контроля ЭС является выявление критических дефектов, которые приводят к отказу. На сегодняшний день в производстве печатных узлов (ПУ) применяют оптический, электрический, рентгеновский, тепловой и другие виды контроля. При этом процедура контроля должна быть произведена за минимальное время и с наименьшими затратами. Этим условиям вполне соответствует оптический метод контроля, с помощью которого возможен контроль как ПУ, так и печатных плат. Надежность ЭС во многом определяется качеством ПП, основным элементом которых является проводящий рисунок.

При визуальном оптическом контроле проводящего рисунка печатных плат высока вероятность пропуска дефектов из-за субъективности контроля. Поэтому актуальной является задача снижения роли человеческого фактора на основе автоматизированного анализа дефектов.

Некоторые технологические дефекты печатных плат, успешно прошедшие процедуру контроля, потенциально могут перерасти в критические дефекты при наличии внешних и (или) внутренних воздействий различного вида. Сложность процессов развития дефектов, приводящих к отказам печатных плат, настоятельно требует создания и совершенствования ИИС не только обнаружения, но и прогнозирования развития дефектов печатных плат с учетом внешних воздействий.

Для решения этой задачи необходимо провести анализ моделей развития технологических дефектов, позволяющих прогнозировать развитие дефекта и подготовить математические модели для их исследования.

Модель концентрации напряжений

Существуют факторы, которые снижают предел прочности элементов: концентрация напряжений, качество поверхности, размерный фактор и др. В качестве существенного фактора, определяющего прочность и долговечность элементов ПП, выделяем концентрацию напряжений. Многочисленные эксперименты показывают, что в областях резкого изменения формы элемента (технологические дефекты – раковины, вырывы, трещины) возникают повышенные напряжения. Например, при растяжении проводника с отверстием закон равномерного распределения напряжений вблизи отверстия нарушается. Возникает напряженно-деформированное состояние, а у края отверстия появляется пик напряжения [1].

В качестве примера рассмотрим элемент с отверстием круглой формы (раковина) (рис. 1).

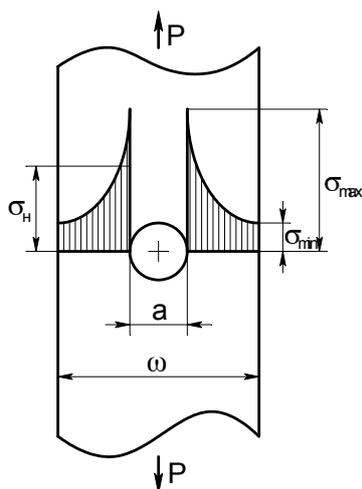


Рис. 1. Элемент, ослабленный отверстием круглой формы

Увеличение местных напряжений в элементе, ослабленном дефектом, определяются коэффициентом концентрации напряжений

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где σ_{\max} – наибольшее местное напряжение; $\sigma_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, которое определяется без учета концентрации напряжений.

В зависимости от материала и характера напряжения концентрация напряжения оказывает различное влияние на прочность элемента конструкции. Поэтому вводится понятие эффективного коэффициента концентрации напряжений, значение которого при циклически изменяющихся напряжениях (при $R = -1$) определяется по формуле

$$K = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma'_{-1}}, \quad (2)$$

где σ_{-1} – предел усталости (выносливости) для элемента, а σ'_{-1} – предел усталости (выносливости), рассчитанный по номинальным напряжениям для элемента, имеющего концентрацию напряжений.

Значения эффективного коэффициента концентрации напряжений можно получить экспериментальным путем. Однако на сегодняшний день накоплен достаточный опыт для установления взаимосвязи между теоретическим и эффективным коэффициентами концентрации напряжений в виде

$$K = 1 + q(K_t - 1), \quad (3)$$

где q – коэффициент чувствительности материала к местным напряжениям. Его величина главным образом определяется свойствами материала. В некоторой степени на изменение q влияют геометрические размеры элемента.

Для определения значения коэффициента чувствительности материала можно воспользоваться подходом, изложенным в работе [2]. В некоторых случаях в виду отсутствия данных для коэффициента чувствительности материала, в частности для новых видов фольг ПП, предлагается использование теоретического коэффициента концентрации K_t . Следует отметить, что когда не учитывается коэффициент чувствительности материала ($q = 1$), ошибка идет в запас прочности: $K = K_t$.

Значения теоретического коэффициента концентрации напряжений K_t практически не зависят от уровня номинальных напряжений и физико-механических свойств материала, а опреде-

ляются геометрией рассматриваемого элемента, способом нагружения и относительными размерами зон концентрации.

Значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений для некоторых типов дефектов определяются через точные аналитические формулы или через графики его зависимости от геометрических параметров элемента и самого дефекта определяемыми экспериментально методами: фотоупругости, голографической интерферометрии, тензометрии, муаровых полос и др. Эти зависимости для различных типов конструктивных элементов содержатся в справочниках по концентрации напряжений, нормах, технических условиях на проектирование конструкций и в других источниках.

За счет влияния коэффициента концентрации напряжений кривые, соответствующие пределу выносливости (рис. 2, 3 тонкие линии), меняют свое положение (рис. 2, 3 утолщенные линии), следовательно, снижают величину числа циклов до разрушения, запас прочности и время до разрушения.

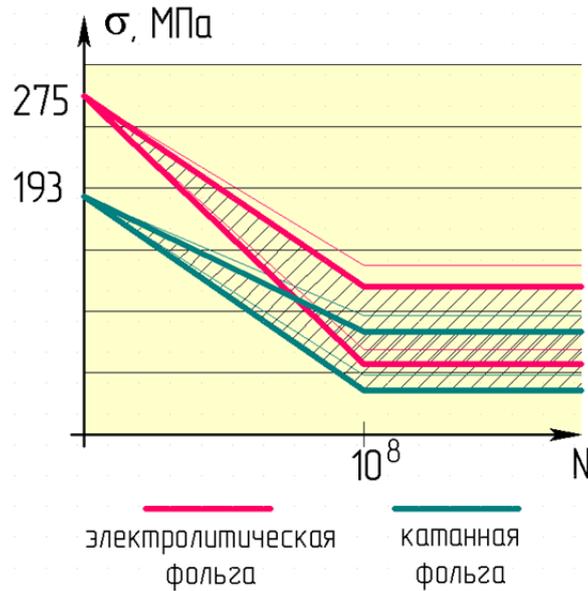


Рис. 2. Кривая усталости

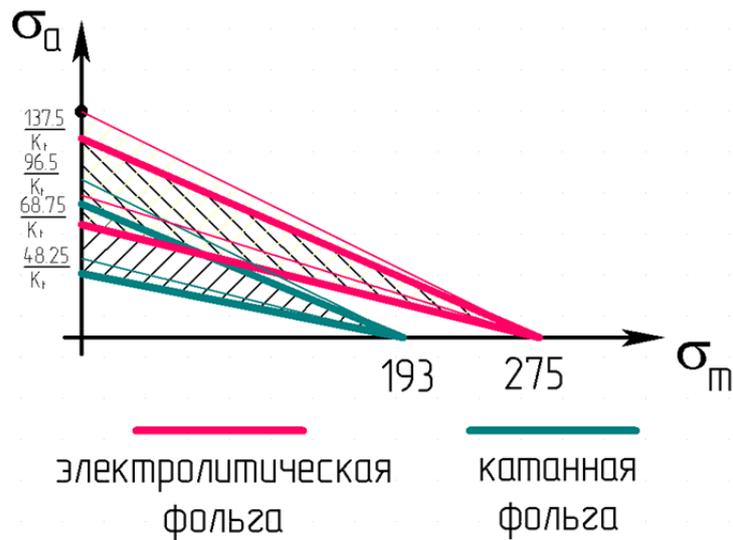


Рис. 3. Диаграмма предельных амплитуд

Таким образом, коэффициент запаса усталостной прочности при наличии концентрации напряжений рассчитываем по формулам:

– при симметричном цикле

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K\sigma_{\max}}; \quad (4)$$

– при несимметричных циклах

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K\sigma_a - \psi\sigma_m}. \quad (5)$$

В книге [2] обобщены данные о теоретических коэффициентах концентрации напряжений для различных видов дефектов. Эти данные послужили основой для сопоставления типов технологических дефектов и моделей в виде эмпирических формул либо зависимостей, полученных аппроксимацией данных экспериментальных графиков.

Для подбора вида зависимости, более точно приближенной к данным, приведенным в виде графиков, осуществляем аппроксимацию зависимости следующими моделями:

- линейная;
- квадратичная;
- кубическая;
- степенная функция;
- показательная;
- логарифмическая;
- гиперболическая аппроксимация;
- экспоненциальная аппроксимация.

При оценке подобранных моделей для окончательного выбора использовались следующие показатели качества моделей:

- коэффициент корреляции;
- коэффициент детерминации;
- средняя ошибка аппроксимации.

Коэффициент корреляции – это величина, которая характеризует силу связи между параметрами. Он может варьировать в пределах от +1 до –1. Значение по модулю близкое к 1, то это означает наличие сильной связи, а если ближе к 0 – связь отсутствует или является существенно нелинейной:

$$r = \frac{\sum (K_t - \bar{K}_t)(\hat{K}_t - \bar{\hat{K}}_t)}{\sqrt{\sum (K_t - \bar{K}_t)^2 \sum (\hat{K}_t - \bar{\hat{K}}_t)^2}}, \quad (6)$$

где K_t – значения теоретического коэффициента концентрации напряжений, получаемые по экспериментальным кривым; \bar{K}_t – среднее значение теоретического коэффициента концентрации напряжений для значений, получаемых по экспериментальным кривым; \hat{K}_t – значения теоретического коэффициента концентрации напряжений, получаемые по подобранным зависимостям; $\bar{\hat{K}}_t$ – среднее значение теоретического коэффициента концентрации напряжений для значений, получаемых по подобранным зависимостям.

Коэффициент детерминации – основной показатель, отражающий меру качества регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели. Чем ближе R^2 к 1, тем выше качество модели. А при равенстве R^2 единице линия регрессии точно соответствует всем наблюдениям:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (K_t - \hat{K}_t)^2}{\sum (K_t - \bar{K}_t)^2}. \quad (7)$$

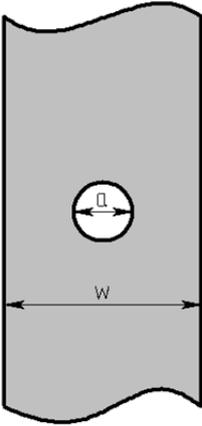
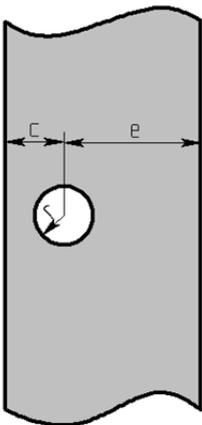
Средняя ошибка аппроксимации представляет собой величину отклонений фактических и расчетных значений результативного признака по каждому наблюдению. Значение ошибки аппроксимации в пределах 5–7 % свидетельствует о хорошем подборе модели к исходным данным:

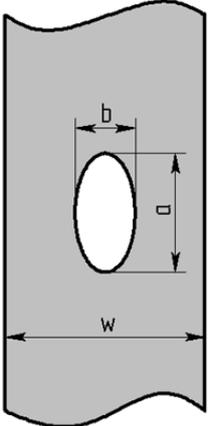
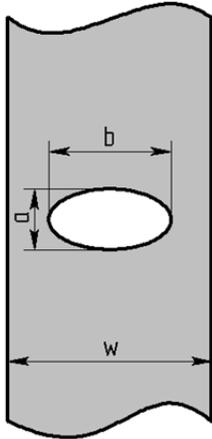
$$A = \frac{100}{K_t} \sqrt{\frac{\sum (K_t - \hat{K}_t)^2}{n}}, \quad (8)$$

где n – количество значений теоретического коэффициента концентрации напряжений.

Модели для определения теоретического коэффициента концентрации напряжений

Далее приводятся модели определения теоретического коэффициента концентрации напряжений нескольких видов распространенных дефектов, которые учитывают снижение прочности элементов ПП. Для каждой модели приведена оценка показателей, определяющих ее качество. Таким образом, выбранные модели для определения значений коэффициента концентрации напряжений можно использовать в качестве базы данных для обнаружения дефектов печатных плат [3].

Дефект: раковина в виде отверстия круглой формы в центре проводника	
	<p>Формула Хейвуда (справедлива для всего диапазона изменения $\frac{a}{w}$):</p> $K_t = 2 + \left(1 - \frac{a}{w}\right)^3,$ <p>где a – диаметр отверстия; w – ширина проводника.</p> <p>Формула Хауленда (Howland)</p> $K_t = 2 + 0,284\left(1 - \frac{a}{w}\right) - 0,600\left(1 - \frac{a}{w}\right)^2 + 1,32\left(1 - \frac{a}{w}\right)^3.$ <p>По графику Хауленда (Howland)</p> $K_t = 3,1981 + 4,6976\left(\frac{a}{w}\right) - 0,0392\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 0,0001\left(\frac{a}{w}\right)^3;$ <p style="text-align: center;">$r = 0,8165;$ $R^2 = 0,666;$ $A = 2,02 \%$</p>
Дефект: раковина в виде отверстия круглой формы, смещенная относительно центра проводника	
	<p><i>Вариант 1</i> По аналитическим результатам Шестрема:</p> <p>1) при $\frac{e}{c} = 1$ ($0 \leq \frac{r}{c} \leq 0,5$):</p> $K_t = -4,1495\left(\frac{r}{c}\right)^3 + 5,5080\left(\frac{r}{c}\right)^2 - 3,4046\left(\frac{r}{c}\right) + 3,0028;$ <p style="text-align: center;">$r = 0,9999;$ $R^2 = 0,9998;$ $A = 0,12 \%$</p> <p>2) при $\frac{e}{c} = 2,4$ ($0 \leq \frac{r}{c} \leq 0,5$):</p> $K_t = -4,0213\left(\frac{r}{c}\right)^3 + 5,6807\left(\frac{r}{c}\right)^2 - 3,3973\left(\frac{r}{c}\right) + 3,0018;$ <p style="text-align: center;">$r = 0,9999;$ $R^2 = 0,998;$ $A = 0,12 \%$</p>

	<p>3) при $\frac{e}{c} = \infty$ ($0 \leq \frac{r}{c} \leq 0,5$) для любого соотношения смещений:</p> $K_t = -3,4024 \left(\frac{r}{c}\right)^3 + 4,8480 \left(\frac{r}{c}\right)^2 - 3,3292 \left(\frac{r}{c}\right) + 3,0018;$ $r = 0,9999;$ $R^2 = 0,998;$ $A = 0,11\%.$ <p><i>Вариант 2</i> По эмпирической формуле:</p> $K_t = C_1 + C_2 \left(\frac{r}{c}\right) + C_3 \left(\frac{r}{c}\right)^2,$ <p>где C_i – коэффициенты, определяемые по формулам:</p> $C_1 = 2,989 - 0,0064 \left(\frac{c}{e}\right);$ $C_2 = -2,872 + 0,095 \left(\frac{c}{e}\right);$ $C_3 = 2,348 + 0,196 \left(\frac{c}{e}\right)$
<p>Дефект: Раковина в виде горизонтального отверстия эллиптической формы в центре (вдоль длины проводника)</p>	
	<p>График Исиды. при $\frac{b}{a} = \frac{1}{2}$ ($0 \leq \frac{b}{w} \leq 1$):</p> $K_t = -0,3952 \left(\frac{b}{w}\right)^3 + 1,6764 \left(\frac{b}{w}\right)^2 - 1,2862 \left(\frac{b}{w}\right) + 1,9619;$ $r = 0,9691;$ $R^2 = 0,9391;$ $A = 1,07\%$
<p>Дефект: Раковина в виде вертикального отверстия эллиптической формы в центре (поперек длины проводника)</p>	
	<p><i>Вариант 1</i> График Исиды 1) при $\frac{b}{a} = 2$ ($0 \leq \frac{b}{w} \leq 1$):</p> $K_t = -2,6592 \left(\frac{b}{w}\right)^3 + 5,0896 \left(\frac{b}{w}\right)^2 - 5,4076 \left(\frac{b}{w}\right) + 5,0243;$ $r = 0,9997;$ $R^2 = 0,995;$ $A = 0,5\%;$

	<p>2) при $\frac{b}{a} = 4$ ($0 \leq \frac{b}{w} \leq 1$):</p> $K_t = -7,6713 \left(\frac{b}{w}\right)^3 + 11,4737 \left(\frac{b}{w}\right)^2 - 10,7167 \left(\frac{b}{w}\right) + 9,0281;$ $r = 0,9983;$ $R^2 = 0,9965;$ $A = 1,46\%;$ <p>3) при $\frac{b}{a} = 8$ ($0 \leq \frac{b}{w} \leq 1$):</p> $K_t = 17,0771 - 20,2945 \left(\frac{b}{w}\right) + 22,2799 \left(\frac{b}{w}\right)^2 - 16,6097 \left(\frac{b}{w}\right)^3;$ $r = 0,9993;$ $R^2 = 0,9986;$ $A = 2,36\%.$ <p><i>Вариант 2</i></p> <p>по аналитической формуле при $1,0 \leq \frac{b}{a} \leq 8,0$</p> $K_t = C_1 + C_2 \left(\frac{b}{w}\right) + C_3 \left(\frac{b}{w}\right)^2 + C_4 \left(\frac{b}{w}\right)^3,$ <p>где C_i – коэффициенты, определяемые по формулам:</p> $C_1 = 1,109 - 0,188 \sqrt{\frac{b}{a}} + 2,086 \frac{b}{a};$ $C_2 = -0,486 + 0,213 \sqrt{\frac{b}{a}} - 2,588 \frac{b}{a};$ $C_3 = 3,816 - 5,510 \sqrt{\frac{b}{a}} + 4,638 \frac{b}{a};$ $C_4 = -2,438 + 5,485 \sqrt{\frac{b}{a}} - 4,126 \frac{b}{a}$
--	--

Полученная база может дополняться по мере накопления статистики по наиболее часто встречающимся дефектам и подбором соответствующих моделей.

Выводы

Технологические дефекты проводящего рисунка ПП являются концентраторами напряжений, приводящими к снижению прочности в процессе эксплуатации. Приведены формулы, связывающие геометрические размеры дефектов и коэффициент концентрации напряжений, соответствующие четырем видам дефектов, необходимые при определении числа циклов до разрушения, коэффициента усталостной прочности и времени до разрушения.

Реальные дефекты проводящего рисунка ПП имеют разнообразную форму и размеры. На практике невозможно охватить все встречающиеся виды реальных дефектов. Приведена формализация видов дефектов, которая позволяет свести их к ограниченному количеству, что позволяет автоматизировать процесс прогнозирования их развития.

Библиографический список

1. Данилова, Е. А. Построение информационно-измерительной системы обнаружения дефектов проводящего рисунка печатных плат / Е. А. Данилова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 69–78.
2. Peterson, R. E. Stress Concentration Factors / R. E. Peterson. – New York : Wiley, 2008. – 560 p.

3. Григорьев, А. В. Автоматизированная система для подсчета заужений проводящего рисунка печатной платы, обусловленных и не обусловленных наличием раковин / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. Н. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10) – С. 27–33.

Данилова Евгения Анатольевна

старший преподаватель,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: siori@list.ru

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Трусов Василий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: trusov_v@mail.ru

Danilova Evgeniya Anatol'evna

senior lecturer,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kochegarov Igor' Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Trusov Vasily Anatol'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Аннотация. *Актуальность и цели.* Некоторые технологические дефекты печатных плат, успешно прошедшие процедуру контроля, потенциально могут перерасти в критические дефекты при наличии внешних и (или) внутренних воздействий различного вида. Сложность процессов развития дефектов, приводящих к отказам печатных плат, настоятельно требует создания и совершенствования ИИС не только обнаружения, но и прогнозирования развития дефектов печатных плат с учетом внешних воздействий. Для решения этой задачи необходимо провести анализ моделей развития технологических дефектов, позволяющих прогнозировать развитие дефекта и подготовить математические модели для их исследования. *Материалы и методы.* В статье использованы методы системного анализа, теории математического и имитационного моделирования, анализа технологических систем. *Результаты.* В работе приводятся четыре модели определения теоретического коэффициента концентрации напряжений нескольких видов распространенных дефектов, которые учитывают снижение прочности элементов ПП. Для каждой модели приведена оценка показателей, определяющих ее качество. *Выводы.* Технологические дефекты проводящего рисунка ПП являются концентраторами напряжений, приводящими к снижению прочности в процессе эксплуатации. Приведены формулы, связывающие геометрические размеры дефектов и коэффициент концентрации напряжений, соответствующие четы-

Abstract. *Background.* Some technological defects of printed circuit boards, successfully passed the control procedure, can potentially develop into critical defects in the presence of external and (or) internal influences of a different kind. The complexity of defect development processes leading to PCB failures urgently requires the creation and improvement of information-measuring systems not only detection, but also prediction of the development of PCB defects, taking into account external influences. To solve this problem, it is necessary to analyze the models of the development of technological defects that allow predicting the development of a defect and to prepare mathematical models for their investigation. *Materials and methods.* The methods of system analysis, the theory of mathematical and simulation modeling, the analysis of technological systems are used in the article. *Results.* The paper presents four models for determining the theoretical stress concentration factor of several types of common defects that take into account the decrease in the strength of the elements of the PP. For each model, an estimate of the indicators determining its quality is given. *Conclusions.* Technological defects of the conductive PP pattern are stress concentrators, leading to a decrease in strength during operation. Formulas relating the geometric dimensions of the defects and the stress concentration coefficient corresponding to the 4 types of defects necessary for determining the number of cycles before failure, the fatigue strength factor, and the time to failure are given. The selected models for determining the values

рем видам дефектов, необходимые при определении числа циклов до разрушения, коэффициента усталостной прочности и времени до разрушения. Выбранные модели для определения значений коэффициента концентрации напряжений можно использовать в качестве базы данных для обнаружения дефектов печатных плат.

Ключевые слова: печатная плата, печатный проводник, технологический дефект, математическая модель, механические напряжения.

of the stress concentration factor can be used as a database for detecting defects in printed circuit boards.

Key words: printed circuit board, printed conductor, technological defect, mathematical model, mechanical stresses.

УДК.396; 621.8

Данилова, Е. А.

Модели технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат / Е. А. Данилова, И. И. Кочегаров, В. А. Трусков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 68–76. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-10.