

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 681.2.082

*Е. А. Данилова***ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРОВОДЯЩЕГО
РИСУНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ***E. A. Danilova***BUILDING INFORMATION MEASUREMENT SYSTEM
DETECTING DEFECTS DE-CONDUCTIVE PATTERN
OF PRINTED CIRCUIT BOARDS**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Современные электронные средства – сложные системы с иерархической структурой, одним из элементов которой являются печатные платы. Их надежность закладывается как на этапе проектирования, так и на этапе технологического контроля. Целью работы является усовершенствование информационно-измерительной системы контроля печатных плат с оценкой влияния технологических отклонений и внешних эксплуатационных факторов на развитие обнаруженных дефектов. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи используются методы морфологической обработки изображения, компьютерного имитационного моделирования, в частности метод конечных элементов и методы нечеткой логики. Для численного решения применяется программный пакет ANSYS. *Результаты.* Предложено понятие латентного дефекта печатных плат. Усовершенствована фасетная классификация дефектов печатных плат. Описывается методика обнаружения латентных дефектов печатных плат. Предложена структурная схема информационно-измерительной системы контроля печатных плат. *Выводы.* Введение понятия латентного дефекта позволяет расширить диапазон допусков отклонений размеров печатных дорожек. Методика обнаружения дефектов, включающая анализ, классификацию типа дефекта и блок математического моделирования, позволяет определять дальнейшее развитие латентного дефекта. Предложенная структурная схема информационно-измерительной системы реализует предложенную методику.

A b s t r a c t. *Background.* Modern electronic media are complex systems with a hierarchical structure, one of which elements are printed circuit boards. Their reliability is laid both at the design stage, and the stage of technological control. The aim of the work is to improve the information-measuring PCB control system with the assessment of the impact of technological variations and external factors on the development of operational defects found. *Materials and methods.* To solve this problem uses morphological image processing techniques, computer simulation, in particular, the finite element method and the methods of fuzzy logic. For the

numerical solution using software package ANSYS. *Results.* The concept of latent defect PCBs. Improved facet classification PCB defects. A technique of detection of latent defects in printed circuit boards. A block diagram of the information-measuring PCB control system. *Conclusions.* Introduction of the concept latent defect allows you to extend the range of tolerance deviations of the printed track sizes. Methods of detection of defects, including analysis, defect type classification unit and mathematical modeling allows to determine the further development of a latent defect. The proposed structural information measurement scheme implements the proposed method.

К л ю ч е в ы е с л о в а: печатные платы, латентные дефекты, внешние воздействующие факторы, математическая модель, методика контроля, информационно-измерительная система.

К е у w o r d s: printed circuit boards, latent defects, external influencing factors, mathematical model, control technique, information-measuring system.

На сегодня практически все электронные средства (ЭС) создаются на основе печатных плат (ПП). Условия эксплуатации ЭС и объекты их установки различны, но неизменно к ПП предъявляются высокие требования по надежности. Надежность ЭС закладывается на этапе проектирования и должна обеспечиваться на этапе производства за счет применения современного оборудования и контроля качества на всех стадиях технологического процесса. Однако даже самое совершенное автоматизированное оборудование производства ПП не может гарантировать полное отсутствие дефектов.

В российской радиоэлектронной промышленности действует группа стандартов по печатным платам, в которых определены различные виды дефектов. В соответствии с ГОСТами в зависимости от класса точности нормируются такие параметры, как ширина печатного проводника и предельные отклонения его размеров.

Дефекты, размеры которых превосходят предельные отклонения размеров, установленные стандартом, признаются критическими. Существующие системы контроля качества печатных плат нацелены именно на обнаружение критических дефектов [1]. Наличие критических дефектов приводит либо к отбраковке печатных плат, либо (в редких случаях) к последующим работам по устранению дефекта. ПП с дефектами, отклонения размеров которых находятся в пределах допуска, признаются системой контроля как малозначимые и ПП переходят на следующую стадию технологического процесса [2]. Однако среди них возможно существование дефектов, которые при внешних воздействиях перерастают в критические.

Все дефекты печатных проводников можно представить в виде множества (D), состоящего из подмножеств малозначимых дефектов (D_m) и критических дефектов (D_k). При различных векторах внешних воздействий происходит процесс расширения области малозначимых дефектов (D_m), в результате которого возможно пересечение области малозначимых дефектов с областью критических (D_k) (рис. 1). В качестве внешних воздействий могут быть рассмотрены следующие виды воздействий: механические, климатические, электрические, радиационные, химические.

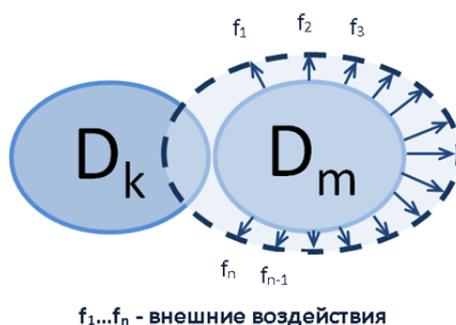


Рис. 1. Соотношение областей критических и малозначимых технологических дефектов

Принимаем, что:

$D = D_k \cup D_m$ – множество отклонений параметров печатной платы;

D_k – подмножество критических отклонений параметров печатной платы (критические дефекты), $D_k \subset D$;

D_m – подмножество малозначительных отклонений параметров печатной платы, $D_m \subset D$.

При этом считаем для любого дефекта, задаваемого отклонением параметра d , следующее:

– если $d \in D_k$, то производится отбраковка печатной платы;

– если $d \in D_m$, то печатная плата переходит на следующую стадию технологического процесса;

– если $d \in D_m \cap D_k$, то данный дефект считаем латентным дефектом, к которому применяется методика математического моделирования.

Таким образом, критерием перехода дефектов в подмножество латентных можно считать величину и характер воздействий [3, 4], т.е. условия эксплуатации.

Под латентными будем понимать такие дефекты, которые не выходят за допуски, установленные ГОСТом для данного класса печатных плат на этапе производства, но при эксплуатации ПП за счет внешних воздействий они переходят в критические и могут привести к отказу ПП. Таким образом, предлагается разбиение всех дефектов ПП на три группы: критические технологические дефекты, малозначимые дефекты, латентные технологические дефекты (рис. 2).

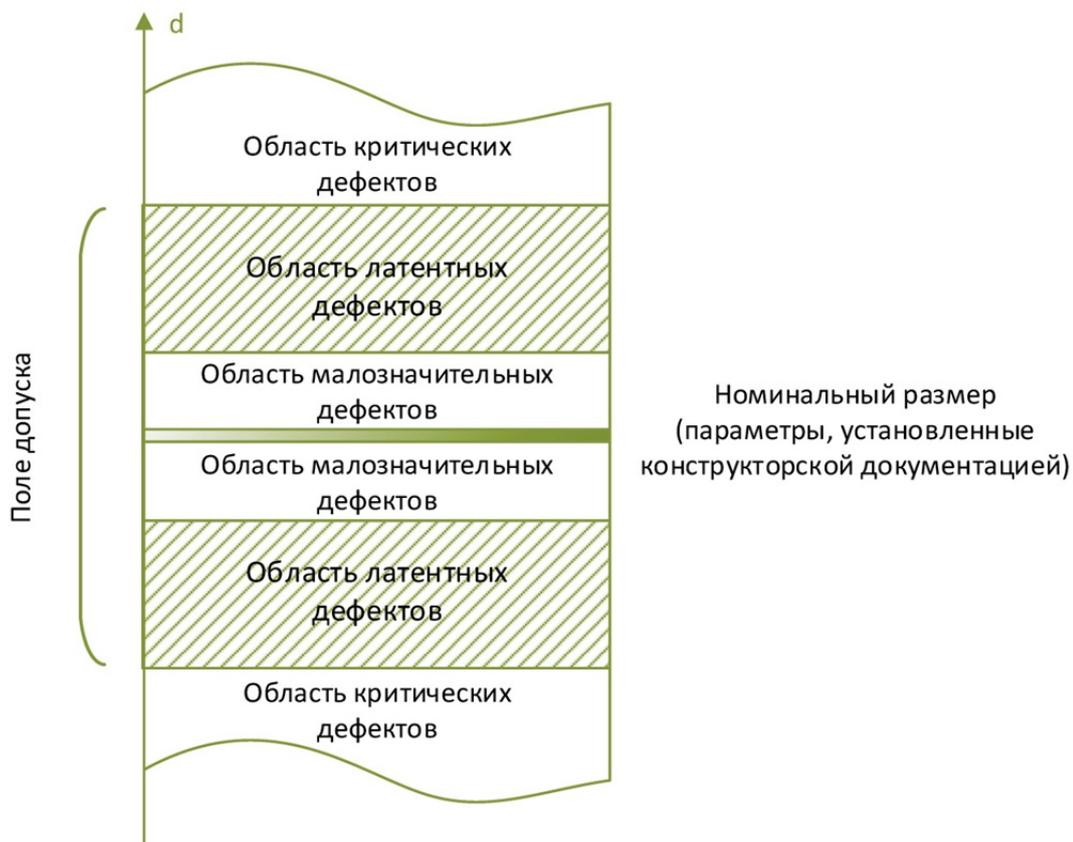


Рис. 2. К определению латентных технологических дефектов

На рис. 2 показана область латентных дефектов, которые при влиянии внешних воздействий могут либо перерасти в критические, либо будут оставаться незначительными для данных условий эксплуатации.

Положение границы областей латентных дефектов, примыкающих к области малозначимых, будет определяться условиями эксплуатации, т.е. величиной и характером внешних воздействий.

В общем виде практическая задача анализа печатной платы на наличие латентных технологических дефектов решается следующим образом. Определяется множество дефектов, проводится их классификация (в зависимости от типа дефекта) и производится оценка их развития при введении внешних воздействий, оценивается влияние дефектов на работоспособность всего устройства.

Имеющиеся дефекты ПП можно классифицировать по различным признакам. На рис. 3 представлена фасетная классификация технологических дефектов ПП, особенностью которой является добавление группы латентных дефектов, которые при воздействии эксплуатационных факторов могут приводить к отказу печатной платы.



Рис. 3. Фасетная классификация технологических дефектов печатных плат

Многоаспектная классификация технологических дефектов печатных плат учитывает условия эксплуатации, что позволяет обоснованно выбрать класс объектов и математические модели развития дефектов. За счет фасетной структуры классификация дает полную характеристику каждому дефекту печатной платы и обеспечивает добавление классификационных признаков при поступлении новых данных о дефектах.

Существующие системы обнаружения дефектов построены по следующему принципу [5]. Если отклонение параметра $d = 0$, то принимается решение о годности печатной платы. Ненулевое значение величины d свидетельствует о наличии дефекта. ГОСТ Р 53429–2009 «Платы печатные. Основные параметры конструкции» устанавливает предельные отклонения размеров проводящего рисунка для каждого класса точности. Они служат некоторым пороговым значением (d_{np}) для информационно-измерительной системы при принятии решения о годности печатной платы. Для классов точности 1–4 верхняя и нижняя границы предельных отклонений равны по модулю. Таким образом, при $|d| < d_{np}$ дефект не критический (печатная плата признается годной), при $|d| \geq d_{np}$ дефект критический (печатная плата отбраковывается). Для классов точности 5–7, имеющих различные по модулю границы верхнего и нижнего предельных отклонений, пороговые значения задаются отдельно. Соответственно для верхней и нижней границ: при $d < d_{np+}$ и $d > d_{n-}$ – дефект не критический (печатная плата признается годной), при $d > d_{np+}$ и $d < d_{np-}$ – дефект критический (печатная плата отбраковывается).

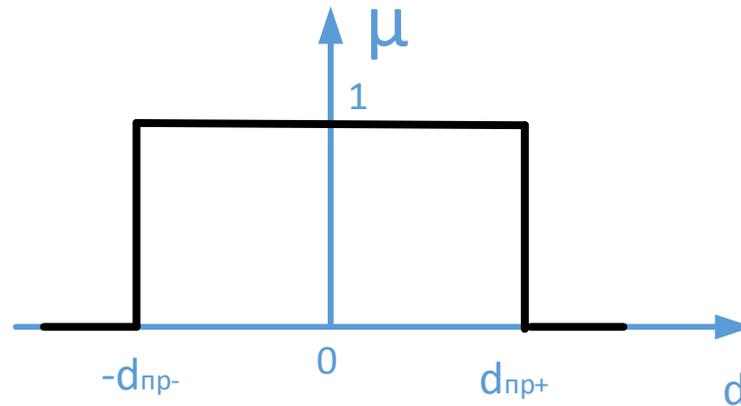


Рис. 4. Критерий обнаружения дефекта с четким порогом при принятии решений

Однако такое бинарное правило (рис. 4) не учитывает влияние условий эксплуатации, вызывающих развитие дефектов. Даже малозначимые дефекты с течением времени и под действием внешних воздействий (накоплении повреждений, усталости элементов печатной платы) переходят в критические, сокращая срок службы (эксплуатации).

Поэтому при построении информационно-измерительной системы обнаружения дефектов печатных плат следует использовать нечеткий порог при принятии решения о годности печатной платы (рис. 5) и включать блок моделирования развития дефектов.

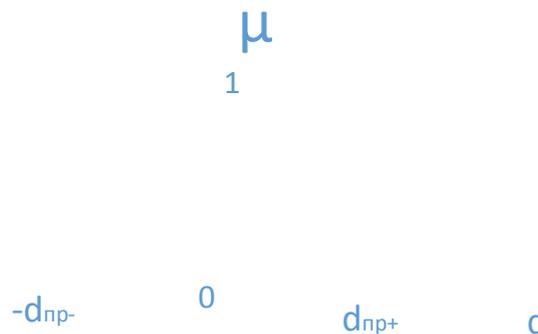


Рис. 5. Критерий обнаружения дефекта с нечетким порогом при принятии решений

Функция принадлежности в данном случае задается как

$$\mu(d) = \begin{cases} 0 & \text{при } d \geq d_{\text{пр}+}, \\ 0 & \text{при } d \leq -d_{\text{пр}-}, \\ \frac{-d + d_{\text{пр}+}}{d_{\text{пр}+}} & \text{при } 0 < d < d_{\text{пр}+}, \\ \frac{d + d_{\text{пр}-}}{d_{\text{пр}-}} & \text{при } -d_{\text{пр}-} < d < 0, \\ 1 & \text{при } d = 0. \end{cases}$$

Методика обнаружения технологических дефектов печатных плат рассмотрена в [6–9] и в общем виде может быть представлена следующими действиями:

1. Получение цифрового изображения печатной платы.
2. Преобразование изображения в черно-белое (пороговая бинаризация).
3. Морфологические преобразования черно-белого изображения (допусковый контроль).
4. Выделение индикаторных кластеров (ИК) и определение их связанности.

5. Классификация ИК по их связанности и выделение дефектов.

6. Классификация дефектов.

Выполним оценку погрешности измерения площади дефекта, которая будет вноситься на этапах 1 и 2. В процессе оцифровки изображение преобразуется в массив пикселей. Будем считать, что площадь одного пикселя равна одной квадратной растровой единице (run^2). При этом истинная элементарная погрешность дискретизации изображения дефекта ε_{pix} равномерно распределена между предельными значениями $\pm\Delta_{pix}$, где $\Delta_{pix} = 0,5run^2$. В результате, дисперсия D_{pix} истинной элементарной погрешности ε_{pix} равна

$$D_{pix} = \frac{(2\Delta_{pix})^2}{12} = \frac{\Delta_{pix}^2}{3} = \frac{(0,5run^2)^2}{3} = \frac{0,25run^4}{3}.$$

Дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме дисперсий этих случайных величин [10–12], поэтому

$$DS_{imt} = D_{pix}N_{pit} = \frac{0,25run^4}{3}N_{pit}. \quad (1)$$

Выразим количество периферийных пикселей N_{pit} изображения дефекта

$$N_{pit} = \frac{2\pi r_{imt}}{Ml_{pix}}. \quad (2)$$

Отметим, что длина сечения периферийного пикселя контуром изображения метки l_{pix} распределена симметрично между двумя предельными значениями ноль и корень из двух run , поэтому среднее, ожидаемое, значение l_{pix} равно

$$Ml_{pix} = \frac{\sqrt{2}}{2}run. \quad (3)$$

Учитывая формулы (2) и (3) и подставляя их в (1), получим значение дисперсии результатов измерения площади изображения метки DS_{imt} :

$$DS_{imt} = \frac{0,25run^4}{3} \cdot 2\pi\sqrt{2}run^{-1}r_{imt} = \frac{0,5\pi\sqrt{2}}{3}run^3r_{imt}.$$

Отсюда имеем среднеквадратичное отклонение этих результатов:

$$\sigma S_{imt} = \sqrt{DS_{imt}} = \sqrt{\frac{0,5\pi\sqrt{2}}{3}run^3r_{imt}}.$$

В соответствии с законом больших чисел закон распределения погрешности измерения площади изображения дефекта S_{imt} является нормальным [13–16]. Нормально распределенная случайная величина ε находится в пределах $\pm 3\sigma\varepsilon$, где $\sigma\varepsilon$ – среднеквадратичное отклонение случайной величины ε с доверительной вероятностью 0,9973. Поэтому принимаем:

$$\Delta S_{imt} = 3\sigma S_{imt} = 3\sqrt{\frac{0,5\pi\sqrt{2}}{3}run^3r_{imt}} = k_{\Delta S_{imt}}\sqrt{r_{imt}},$$

где ΔS_{imt} – предельная абсолютная погрешность измерения площади изображения дефекта; $k_{\Delta S_{imt}}$ – константа дискретизации.

На основе изложенных положений разработана структурная схема информационно-измерительной системы (ИИС) обнаружения дефектов ПП, представленная на рис. 6.

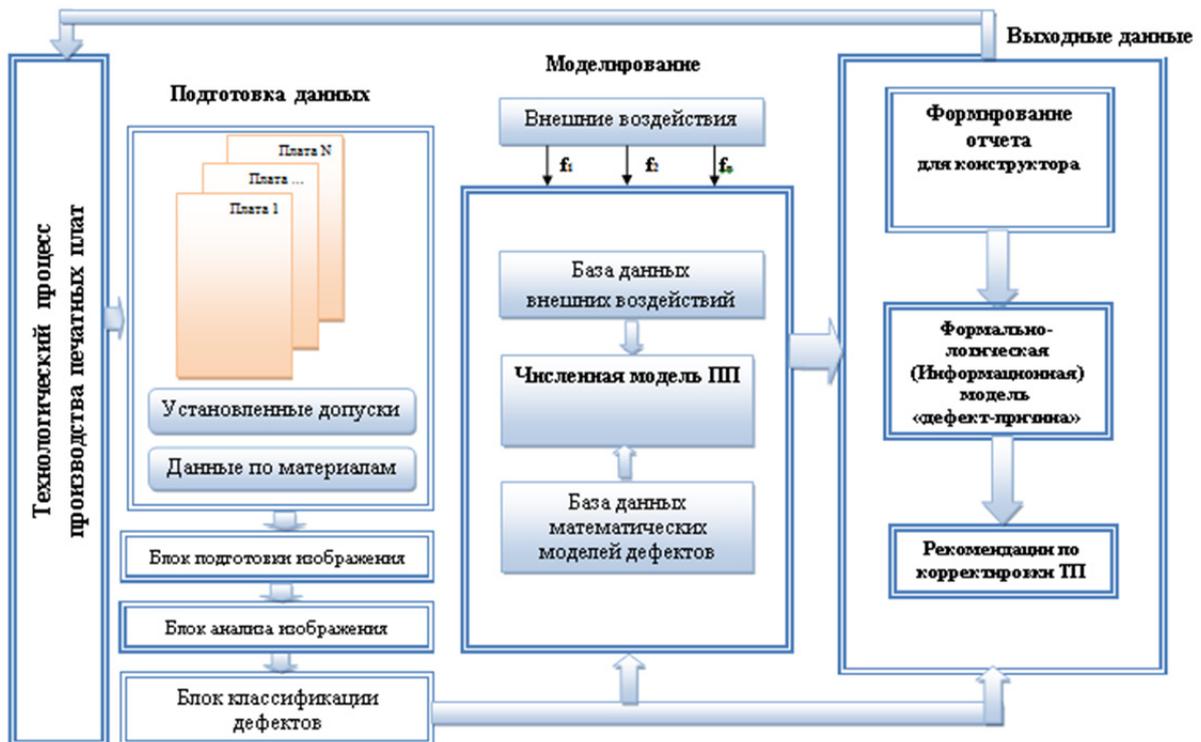


Рис. 6. Структурная схема информационно-измерительной системы

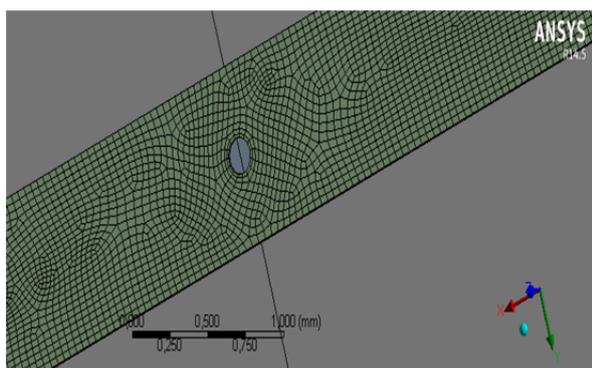
ИИС представляется частью технологического процесса производства ПП. В блоке «Подготовка данных» получаем изображение печатной платы, устанавливаем значение допусков и вводим (или выбираем материал) данные по материалам. Далее осуществляем обработку изображения и отнесение дефекта к определенному виду. В зависимости от принадлежности дефекта к классу критических или малозначимых осуществляется переход либо к моделированию, либо к формированию отчета. В блоке моделирования при взаимодействии с системой ANSYS проводится имитационное моделирование с учетом внешних воздействий [8, 15]. В качестве моделей развития дефектов используются модели, заложенные в базу данных. По результатам моделирования формируется отчет и выдача рекомендаций по корректировке технологического процесса за счет подключения информационной модели «дефект – причина».

Включение блока моделирования развития дефектов является отличительной особенностью данной ИИС. Необходимость данного блока вызвана тем, что в процессе эксплуатации ПП подвергается различным (дестабилизирующим) воздействиям, которые приводят к постепенному накоплению повреждений в элементах платы, в частности печатных проводниках. Пример результатов моделирования в системе конечно-элементного анализа ANSYS показан на рис. 7.

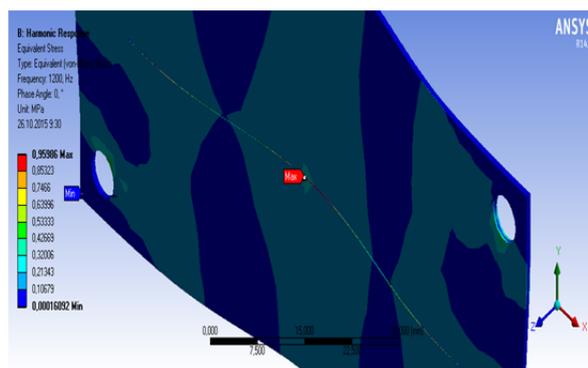
Эти результаты позволяют повысить информативность системы контроля за счет расчета усталостной прочности (числа циклов до разрушения и коэффициента запаса усталостной прочности). Варьируя размеры дефекта при фиксированном внешнем воздействии, можно заранее получить пороговые значения для системы оптического контроля и выполнять оценку печатного узла без дополнительного моделирования [14–16]. Таким же образом можно для фиксированного размера дефекта определить допустимые внешние воздействия и оценить запас прочности изделия.

Информационно-измерительная система обнаружения дефектов реализована в виде лабораторного макета, включающего камеру для получения изображения ПП, систему фиксации ПП и систему обработки данных в интерактивном режиме.

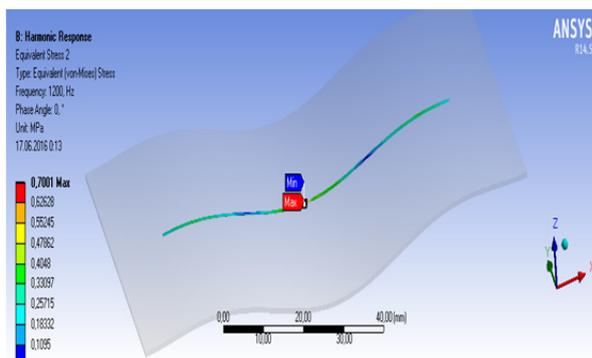
Генерация сетки



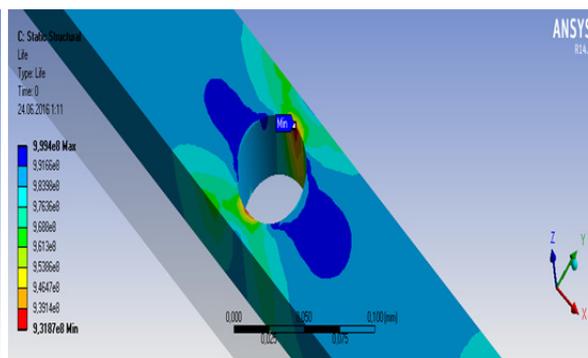
Расчет напряжений печатной платы



Расчет напряжений в проводнике ПП



Расчет числа циклов до разрушения



Расчет коэффициента запаса прочности

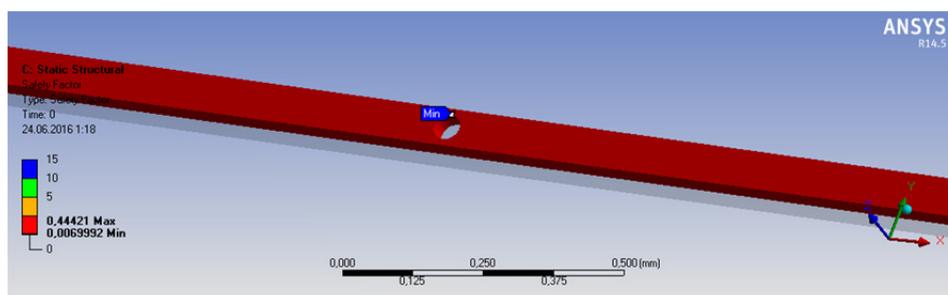


Рис. 7. Порядок проведения расчетов в блоке моделирования и прогнозирования развития дефектов

Список литературы

1. Кочегаров, И. И. Особенности исследования динамических характеристик печатных узлов в двухмерных задачах / И. И. Кочегаров, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 13–22.
2. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2014. – 474 с.
3. Kochegarov, I. Dynamic Characteristics of Printed Circuit Assembly under the Influence of Temperature / I. Kochegarov, G. Tankov, E. Danilova // XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – SPb, 2016. – С. 131–134.
4. Увайсов, С. У. Метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры и ее тепловая диагностическая модель / С. У. Увайсов, С. П. Сулейманов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 109–118.
5. Герасимов, О. Н. Способ организации производственного контроля и диагностики РЭС с заданным уровнем остаточного ресурса // О. Н. Герасимов, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1. – С. 94–98.
6. Структурное обнаружение и различие вырывов проводящего рисунка печатных плат / А. В. Григорьев, Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, Е. А. Данилова, А. Л. Држевецкий // Из-

- вестия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 97–108.
7. Алгоритм выявления латентных технологических дефектов печатных плат методом оптического контроля / И. И. Кочегаров, И. В. Ханин, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков, В. Б. Алмаметов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 105–114.
 8. Кочегаров, И. И. Межсистемное взаимодействие систем САД и САЕ при моделировании / И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, В. Б. Алмаметов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 161–166.
 9. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
 10. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
 11. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели / А. К. Гришко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 85–90.
 12. Гришко, А. К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 51–57.
 13. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111.
 14. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
 15. Grishko, A. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
 16. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.

Данилова Евгения Анатольевна

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

Danilova Evgeniya Anatol'evna

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

УДК 681.2.082

Данилова, Е. А.

Построение информационно-измерительной системы обнаружения дефектов проводящего рисунка печатных плат / Е. А. Данилова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 76–84.