

---

---

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 517.958.52

## К ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РИСКА ОТКАЗА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛИТЕЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ<sup>1</sup>

*Статья поступила в редакцию 21.09.2015 г., в окончательном варианте 20.10.2015 г.*

**Юрков Николай Кондратьевич**, доктор технических наук, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: yurkov\_nk@mail.ru

**Кочегаров Игорь Иванович**, кандидат технических наук, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: kipra@mail.ru

**Петрянин Дмитрий Львович**, аспирант, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: kipra@pnzgu.ru

Радиоэлектронная аппаратура длительного функционирования (РЭА ДФ), занимает все большую часть рынка. Для РЭА ДФ профилактический осмотр и ремонт затруднены или вовсе невозможны. Поэтому к такой аппаратуре предъявляются повышенные требования по надежности функционирования. Для удовлетворения этих требований предпринимается целый ряд мер, включая конструктивные решения по обеспечения запасов прочностей (механической, электрической, радиационной и т.п.); выявлению неисправностей в процессе приемо-сдаточных испытаний – в т.ч. с использованием различных стендов. При этом возрастает роль методов и средств контроля и диагностики – не только технических средств, но и программного обеспечения, включая средства имитационного моделирования отказов оборудования. В статье рассмотрены особенности существующих аппаратно-программных решений и методов, предназначенных для контроля и диагностики параметров электронных средств (ЭС) такого класса РЭА ДФ, как бортовая аппаратура. На основе математической модели оценки надежности ЭС РЭА ДФ получены выражения для оценки максимального правдоподобия при условии наличия интервалов между проявлением явных дефектов. Это дало возможность оценивать среднее время до появления очередного дефекта ЭС РЭА ДФ.

**Ключевые слова:** радиоэлектронная аппаратура, длительное функционирование, бортовая аппаратура, электронные средства, диагностика, надежность, математическая модель, печатная плата, латентные дефекты, программное обеспечение

## MODEL FOR RISK ESTIMATION OF FAILURE OF ELECTRONIC MEANS, INTENDED FOR LONG-TERM PERFORMANCE

**Yurkov Nikolay K.**, D.Sc. (Engineering), Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: yurkov\_nk@mail.ru

**Kochegarov Igor I.**, Ph.D. (Engeneering), Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: kipra@mail.ru

**Petryanin Dmitriy L.**, post-graduate student, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: kipra@pnzgu.ru

---

<sup>1</sup> Статья написана в рамках проектной части государственного задания выполнения государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» «№ 8.389.2014/К» по теме «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ».

Long-time functioning of radioelectronic equipment, occupies most of the market. For radio-electronic equipment a long-term functionality preventive routine inspection and repair difficult or even impossible. Therefore, for such equipment are increased requirements for reliability. For creations satisfies these requirements taken a number of measures to ensure a margin of safety (mechanical, electrical, radiation, etc.); troubleshooting during acceptance testing – including using different stands. At the same time, increasing the role of methods and tools for monitoring and diagnostics – not just hardware, but also software, including the simulation and modeling of equipment failures. The article describes the features of the existing methods and tools intended for the monitoring and diagnosis of electronic parameters of the class of electronic equipment long-term functioning as on-board equipment. On the basis of mathematical models for assessing the reliability of the electronic means of electronic equipment long operation expressions are obtained for the maximum likelihood estimate provided that the interval between the manifestation of obvious defects. This made it possible to estimate the average time until the next defect of the electronic means of long-term operation of electronic equipment.

**Keywords:** electronic tools, long-term functioning, onboard equipment, electronics, diagnostics, reliability, mathematical model, the printed circuit board, latent defects, software

**Введение.** Стремительный рост структурной сложности технических систем, повышение их размерности, усложняющиеся условия эксплуатации влекут за собой ужесточение требований по безотказности выполняемых аппаратурой функций. При этом объективно возрастает роль методов и средств контроля и диагностики – как технических средств, так и программного обеспечения (ПО). Эти вопросы в существующих публикациях рассмотрены недостаточно полно. Поэтому целью данной работы является комплексный анализ соответствующих вопросов и построение математической модели прогнозирования будущих отказов – на основе данных о времени проявления отказов в прошлом.

**Общая характеристика проблематики работы.** Современная радиоэлектронная аппаратура длительного функционирования (РЭА ДФ) все в большей степени приобретает черты сложных систем со значительным числом возможных дефектов, требующих их быстрой локализации – с целью предотвращения серьезных аварийных последствий как для изделий в целом, так и для их эксплуатантов. В связи с этим возрастает роль математического моделирования, разработки методов эффективного обнаружения и прогнозирования дефектов, применимых для широкого класса технических систем.

Рост размерности и структурной сложности РЭА ДФ опережает возможности существующих методов поддержания их в работоспособном состоянии за счет своевременного обнаружения дефектов. Поэтому необходима разработка новых эффективных моделей для оценки вероятностей возникновения отказов РЭА ДФ, состоящих из нескольких сотен и даже тысяч единиц. Это облегчит процесс прогнозирования поведения сложных РЭА на длительный период их эксплуатации. Здесь и в дальнейшем под термином «риск» будем понимать вероятность возможной нежелательной потери чего-либо при неблагоприятном стечении обстоятельств (неблагоприятных событиях). При этом функция риска оценки  $\delta(x)$  для параметра  $\theta$ , вычисленная при некоторых его наблюдаемых значениях  $X$ , определяется как математическое ожидание функции потерь  $L$ :

$$R(\theta) = \int L(\theta, \delta(x)) \times f(x | \theta) dx,$$

где  $\delta(x)$  – оценка,  $\theta$  – параметр оценки.

Обеспечение гарантированной безопасности функционирования РЭА ДФ за счет своевременного (оперативного) предотвращения перехода штатных ситуаций в критические, чрезвычайные или аварийные является основой стратегии управления рисками. Эта стратегия должна основываться на своевременном обнаружении и устранении причин перехода

объекта из работоспособного состояния в неработоспособное. Такое обнаружение осуществляется на основе системного анализа многофакторных рисков нештатных ситуаций; построения и анализа «деревьев отказов»; достоверного оценивания уровней допустимых рисков для различных режимов функционирования РЭА ДФ; объективного прогнозирования основных показателей живучести системы в течение заданного (планового) периода её эксплуатации. В связи с этим необходима разработка модели оценивания функции риска, пригодной для анализа современных сложных технических систем, работающих в различных условиях эксплуатации.

Такая модель должна обеспечивать оценку максимального правдоподобия для риска появления явных дефектов – с учетом фактических интервалов времени между их проявлениями в прошлый период времени. Это даст возможность определять (оценивать) среднее (вероятное) время до появления очередного дефекта РЭА ДФ. В конечном счете, все это позволит объективно прогнозировать и своевременно обнаруживать нештатные ситуации; оценивать степени их серьезности с позиций надежности эксплуатации РЭА ДФ; определять уровни рисков в отношении выхода из строя РЭА ДФ; получать информацию об имеющихся ресурсах для предотвращения нештатных ситуаций, определения допустимых уровней рисков [1, 5, 9].

Следует отметить, что в системе управления безопасностью функционирования сложных систем РЭА ДФ требования к количественным и качественным показателям исходной информации, используемой для расчетов, должны быть ситуационно-динамическими и адаптивными; подстраиваемыми под современные реалии надежности компонентной базы и условий эксплуатации. При этом необходимо обеспечить требуемые уровни полноты и достоверности информации, используемой для принятия решений по управлению рисками.

Физико-химические и иные процессы, приводящие к отказам элементов и систем РЭА в целом, очень сложны – их природа до сих пор не исследована достаточно полно. Число параметров, которые потенциально необходимо учитывать при построении математических моделей явлений старения РЭА, постепенного изменения свойств изделий и др., очень велико. Поэтому в рамках формализации задач «сохраняется» учет только основных факторов, которые должны быть обоснованно выбраны на основе имеющейся информации. Как следствие, необходима разработка новых подходов к построению системы оценки эксплуатационной безопасности сложных систем произвольной структуры. Требуется серьезная разработка, адаптация, развитие некоторых методов математической статистики, теории вероятностей, теории планирования эксперимента и др.

В соответствии с предложенным в работе [14] информационным критерием безопасности, последний достигает своего максимума только в том случае, когда все выполняемые элементарные операции (атомы), из которых состоит процесс как субъект безопасности, имеют минимальную вероятность сбоя. Другими словами, они должны находиться под постоянным контролем, что обеспечивается выбранной частотой выполнения контрольных операций. Эта частота может соответствовать равномерной сетке по времени (с постоянным шагом) или изменяться динамически – в т.ч. с учетом изменения условий эксплуатации, фактических частот появления отказов и пр. [3, 4].

**Модели латентных дефектов РЭА ДФ.** В ходе эксплуатации РЭА ДФ необходимо контролировать появление различных дефектов, физические причины возникновения которых достаточно разнообразны. Основной объем информации о состоянии объекта контроля человек получает непосредственно зрительным осмотром или путем визуализации различных физических эффектов, выявляющих неоднородности поверхности и объема объекта наблюдения. Однако многие латентные дефекты (внешне не проявляющиеся, скрытые) РЭА не удается выявить традиционными оптическими (визуальными) методами [10, 12].

Для печатных плат (ПП) РЭА большая часть признаков внешнего вида является основополагающей при оценке их качества (пригодности к эксплуатации). Более того, любой другой вид контроля в случае обнаружения дефекта, как правило, подтверждается внешним осмотром поверхности или вскрытием ПП, позволяющим зрительно убедиться в наличии дефектов по их внешним проявлениям [8, 13, 11].

Важным приемом подготовки к выявлению дефектов может быть кратковременное воздействие на проверяемые блоки РЭА критически допустимых (или даже превышающих их) нагрузок – с использованием вибростендов, термокамер и пр. Однако такие воздействия обычно сокращают срок службы РЭА ДФ – поэтому часто их применение оправдано лишь на отдельных изделиях в партиях.

Для контроля за наличием как явных, так и латентных дефектов, большинство из которых в процессе эксплуатации неизбежно приводит к отказам РЭА, широко применяются традиционные методы анализа отказов (или предрасположенности к отказам) в ПП, в т.ч. и с уже установленными на них элементами. Эти методы включают в себя электрическое тестирование, визуальный контроль, рентгеновский анализ (рентгенографию). В некоторых случаях перспективным также может быть использование тепловизионных методов (для контроля плат, работающих «под нагрузкой») – с целью выявления «перегретых» участков или, наоборот, «не работающих» компонентов.

Указанные методы позволяют выявить часть латентных дефектов непосредственно на ПП, имеющих такие визуальные признаки как заужение проводника, трещина или обрыв. Многие из перечисленных дефектов образуются в процессе изготовления ПП различными методами, т.е. носят технологический характер.

В связи с этим укажем, что для фотолитографических методов изготовления ПП основным требованием к качеству фотошаблонов является недопустимость дефектов в виде пятен, разрывов, проколов и пр. на прозрачных и непрозрачных элементах изображений. Важно также соблюдение режимов покрытия заготовок ПП фотоэмульсией, ее сушки, экспонирования, последующего травления медного слоя на «незащищенных» участках. При использовании шелкографических технологий изготовления ПП причины появления дефектов частично иные. Также частично другой характер дефектов будет при изготовлении ПП путем удаления ненужных участков металлической фольги с использованием фрезерной головки – однако такие методы используются в основном для изготовления единичных изделий.

Примеры некоторых типичных дефектов топологии проводников на ПП показаны на рисунке 1 [2].

Обозначения геометрических размеров на рисунке 1:  $d_{np\min}$  – минимальная ширина проводника;  $d_{np\text{ном}}$  – номинальная ширина проводника;  $d_{\phi\min}$  – минимальное расстояние между печатными проводниками;  $d_{np\text{ном}}$  – номинальное расстояние между печатными проводниками;  $d_{кпл\min}$  – минимальный диаметр контактной площадки;  $d_{кпл\text{ном}}$  – номинальный диаметр контактной площадки;  $\Delta_{см}$  – смещение центра контактного отверстия относительно центра контактной площадки.

Подчеркнем, что в случае многослойных ПП приводимый далее материал должен считать относящимся к каждой из составляющих его «плат-компонент».

«Неровная» форма краев проводника, даже в случае соблюдения условий в отношении минимальных расстояний между проводниками, может приводить к ухудшению «часотных характеристик» для «линии передачи сигнала».

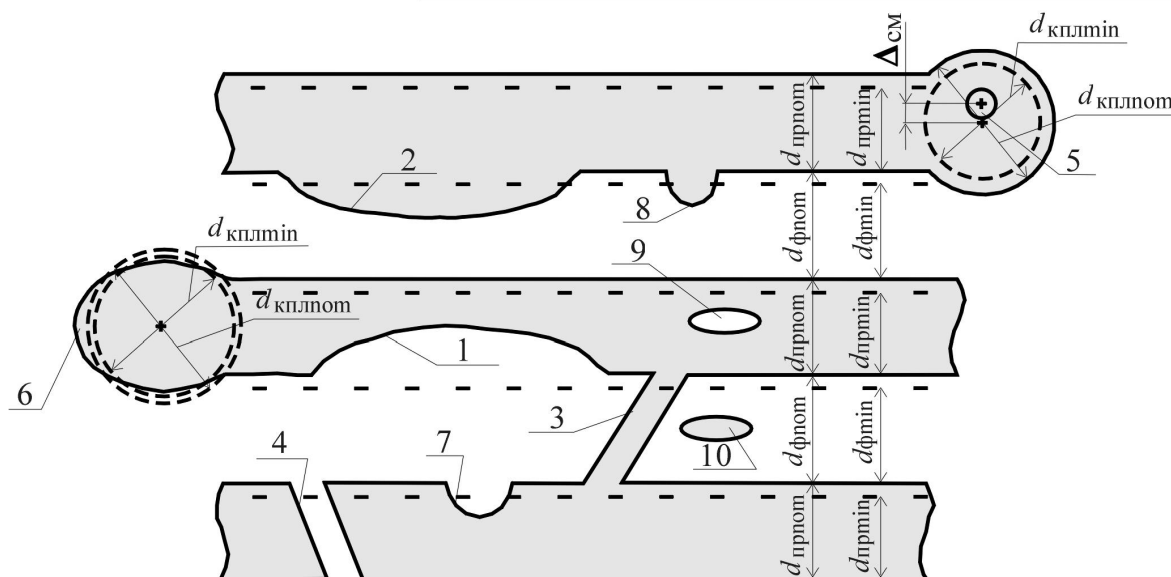


Рис. 1. Характерные дефекты проводников на ПП

Обозначения дефектов: 1 – заужение проводника; 2 – заужение фона;

3 – перемычка, т.е. не «вытравленный» участок металлического покрытия (фольги);

4 – трещина – приводит к нарушению сплошности проводника;

5 – смещение центра контактного отверстия относительно центра контактной площадки;

6 – нарушение формы контактной площадки; 7 – вырыв; 8 – выступ; 9 – раковина;

10 – вкрапление металла на основании ПП

Контроль параметров ПП позволяет выявить их формальное соответствие нормативным значениям (с учетом конструктивных и технологических допусков). Для ПП, успешно прошедших такой контроль, затем производится поиск потенциальных мест отказа (латентных или скрытых дефектов). Обычно это бывают заужения печатных дорожек, трещины, смещения центров отверстий и ряд других дефектов, показанных на рисунке 1. Выявленные латентные дефекты локализуются, классифицируются и фиксируются в базе данных. Отметим, что в ряде случаев (например, при «выступах» на печатном проводнике, приводящих к уменьшению расстояния до соседних проводников) возможна ручная «доработка» плат, позволяющая с помощью специального скальпеля устранить такие выступы. При этом понятно, что такая доработка должна осуществляться до установки (пайки) элементов на ПП.

Выявление большого количества дефектов, не носящих критического характера, может указывать на целесообразность дополнительного (углубленного) контроля ПП – с целью выявления дефектов, не обнаруженных при первоначальном контроле.

Отметим, что автоматизация контроля дефектов проводников на ПП с помощью компьютерных методов анализа изображений в принципе возможна, но затрудняется значительным разнообразием топологий проводников. Перспективным представляется подход на основе сравнения фактических изображений проводников на ПП со сканированными изображениями фотошаблонов, используемых в фотолитографических процессах. Такой подход требует высокого разрешения сканеров и видеокамер.

Далее для обнаруженных неявных дефектов необходимо создать модели их поведения во времени и определить вероятности безотказной работы ПП в течение заданного периода.

**Использование методов, разработанных для оценки надежности программного обеспечения, для печатных плат.** При промышленном или лабораторном изготовлении особо тщательную проверку (контроль и диагностику) проходят «ответственные» ПП, кото-

рые играют основную роль в появлении / развитии дефектов, в превращении отказов оборудования в катастрофические. Во время такой проверки отбраковываются изделия с недопустимыми отклонениями от номинальных значений, а также имеющие количества «допустимых отклонений» превышающие нормативные величины. Однако в ПП, прошедших такой контроль могут быть латентные (скрытые) дефекты, которые позже проявляют себя случайным образом в процессе эксплуатации. Приведем аналогию – в сложном ПО невозможно выявить все дефекты (недочеты) на начальной стадии отладки.

В связи с этим авторы считают целесообразным применить теорию надежности, разработанную для ПО, к оценке надежности сложной РЭА ДФ, в которой основные дефекты проявляются под влиянием внешних воздействий. При этом, как указывалось выше, характер проявления дефектов в РЭА столь же сложен, что и ошибок в ПО.

Надежность ПО отличается от надежности РЭА ДФ по следующим показателям [7, 17]:

- элементы (компоненты) ПО физически не стареют с течением времени;
- число способов контроля ПО (в т.ч. с применением специально разработанных / сгенерированных тестов) значительно больше количества методов контроля РЭА и, в частности ПП;
  - в сложном ПО значительно больше объектов для контроля (подпрограмм, описателей переменных, логических блоков/ветвей, отдельных операторов и т.д.), чем в РЭА;
  - в ПО гораздо проще вносить оперативные исправления и дополнения (и затем повторять процесс контроля), чем в РЭА – однако это трудно делать корректно и безошибочно, особенно в режиме оперативной отладки;
  - имеющиеся во многих «средах разработки» ПО средства контроля позволяют выявить ряд ошибок (неточностей) уже на стадии написания программного кода, в т.ч. и за счет встроенных средств синтаксического контроля;
  - существующие инструментальные средства отладки ПО позволяют реализовать технологии «пошагового» выявления дефектов логики ПО. Для РЭА со всеми установленными элементами отдаленным аналогом такой методологии может служить измерение параметров (например, напряжений) в отдельных точках принципиальных электрических схем (и сравнение их с расчетными значениями или величинами, полученными при компьютерном моделировании таких схем).

В сложных электронных системах, основанных на использовании микропроцессоров, перепрограммируемых интегральных схем (в т.ч. ПЛИС) большая часть ошибок соответствует именно ПО, а не дефектам изготовления ПП, пайки элементов РЭА. Поэтому для таких изделий необходимо учитывать особенности контроля «недочетов» в ПО [6, 15, 16, 18, 19].

На основе вышесказанного будем определять (оценивать) количество дефектов, которые потенциально могут быть обнаружены на последующих этапах жизненного цикла РЭА ДФ. Обозначим через  $B$  количество фактически имеющихся латентных дефектов в изделии (оно заранее неизвестно).

Пусть  $P(t)$  вероятность того, что ни один латентный дефект не проявит себя (не «переродится» в явный) на временном интервале  $[0, t]$ . Тогда вероятность хотя бы одного явного отказа за этот период будет  $Q(t) = 1 - P(t)$ . При этом плотность вероятности выглядит так:

$$q(t) = dQ/dt = -dP(t)/dt.$$

Для вышеприведенной формулы мы предполагаем, что переход одного латентного дефекта в явную форму не влияет на вероятность такого же «превращения» для других (оставшихся) латентных дефектов.

Введем функцию риска  $R(t)$  как условную плотность вероятности отказа печатного узла в момент времени  $t$ , при условии, что до этого момента отказа не было:

$$R(t) = \lim[Q(t, t + \Delta t)] = -(1/P(t))(dP(t)/dt). \quad (1)$$

Функция риска имеет размерность [1/время] и она будет использована для классификации основных распределений отказов. Распределения с возрастающей функцией риска соответствуют работе сложных РЭА ДФ, когда статистические характеристики надежности ухудшаются со временем в связи с физическим старением элементов, точек пайки и пр.

Из выражения (1) следует, что  $dP(t)/P(t) = -R(t)/dt$ , и, следовательно,  $\ln P(t) = -\int_0^t R(t)dt$  или:

$$P(t) = \exp\left\{-\int_0^t R(t)dt\right\}. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет построить модели надежности РЭА ДФ. Интенсивность обнаружения (выявления) явных дефектов (функция риска) вместе с вероятностью безотказной работы и количеством оставшихся латентных дефектов являются важнейшими показателями надежности РЭА ДФ.

**Математическая модель оценки надежности радиоэлектронных средств длительного функционирования.** Простейшими являются модели, основанные на использовании функции риска. Одной из них является так называемая модель Джелинского-Моранды, которая основана на следующих предположениях.

1. Интенсивность обнаружения отказов  $R(t)$  пропорциональна текущему количеству не выявленных дефектов, т.е. изначальное количество латентных дефектов за вычетом количества дефектов, уже обнаруженных на данный момент.

2. Все латентные дефекты равновероятны в отношении их превращения в явную форму и не зависят друг от друга.

3. Все дефекты имеют одинаковую степень важности с позиций эксплуатации изделия.

4. Время до следующего отказа (связанного с превращением латентного дефекта в явный) распределено экспоненциально.

5. Исправление проявившихся (выявленных) дефектов происходит без внесения в РЭА ДФ новых дефектов.

6.  $R(t) = const$  в промежутке между двумя соседними моментами обнаружения (проявления) дефектов.

При выполнении этих предположений функция риска имеет вид:

$$R(t) = K[B - (i - 1)],$$

где  $t$  – это произвольный момент времени обнаружения  $i$  – ого дефекта;  $K$  – неизвестный коэффициент масштабирования;  $B$  – начальное количество оставшихся в РЭА ДФ дефектов (также неизвестная величина). Таким образом, если в течении времени  $t$  было обнаружено  $(i - 1)$  дефектов, то это означает, что в РЭА ДФ еще остается « $B - (i - 1)$ » необнаруженных (не проявившихся) дефектов. Полагая, что:

$$X_i = t_i - t_{i-1}, i = \overline{1, n},$$

а также учитывая равенство (2), можно заключить, что все  $X_i$  имеют экспоненциальное распределение:

$$P(X_i) = \exp\{-K[B - (i - 1)]X_i\},$$

а плотность вероятности отказа, соответственно, равна:

$$q(X_i) = K[B - (i - 1)]\exp\{-K[B - (i - 1)]X_i\}.$$

Тогда функцию правдоподобия можно записать как:

$$L(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n q(X_i). \quad (3)$$

Переходя к логарифму функции правдоподобия, имеем:

$$\ln L(X_1, \dots, X_n) = \sum_{i=1}^n [\ln(K(B-i+1) - K(B-i+1)X_i)]. \quad (4)$$

Максимум функции правдоподобия можно найти, используя следующие условия:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial B} = \sum_{i=1}^n [1/(B-i+1) - KX_i] = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial K} = \sum_{i=1}^n [1/K - (B-i+1)X_i] = 0. \quad (6)$$

Из выражения (5) получается оценка максимального правдоподобия для  $K$ :

$$K = n / \left( \sum_{i=1}^n (\hat{B} - 1 + i)X_i \right) = n / \left( (\hat{B} + 1) \sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n iX_i \right). \quad (7)$$

Подставляя выражение (7) в (6), находим нелинейное уравнение для вычисления  $\hat{B}$  – оценки максимального правдоподобия для  $B$ :

$$\sum_{i=1}^n 1/(\hat{B} - i + 1) = B_1 / B_2, B_1 = n \sum_{i=1}^n X_i; B_2 = (\hat{B} + 1) \sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n iX_i; \quad (8)$$

Это уравнение можно упростить перед тем, как искать его решение, если при записи использовать следующие обозначения:

$$f_n(\hat{B} + 1) = g_n(\hat{B} + 1, A), \quad (9)$$

где:

$$f_n(m) = \sum_{i=1}^n 1/(m-i); \quad g_n(m, A) = n/(m-A); \quad m = \hat{B} + 1;$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^n iX_i; A_2 = \sum_{i=1}^n X_i; A = A_1 / A_2.$$

В таком виде полученная модель оценивания риска пригодна для решения поставленных задач. Так как физический имеют смысл лишь целочисленные значения  $\hat{B}$ , то функции из выражения (9) справедливы только для целочисленных аргументов. Более того,  $m \geq n+1$ , поскольку  $n$  дефектов РЭА ДФ уже было обнаружено. Таким образом, оценка максимального правдоподобия для  $B$  получена с помощью вычисления начальных значений функций  $f_n(m)$  и  $g_n(m)$  для  $m = n+1, n+2, \dots$ , а также анализа разницы  $|f_n(m) - g_n(m)|$ .

Поскольку правая и левая части выражения (9) одинаково монотонны, то это порождает проблемы единственности решения и его существования. Конечное решение  $\hat{B}$  в области  $\hat{B} \geq n$  существует тогда и только тогда, когда выполняется неравенство

$$B_1 / B_2 > \left( \sum_{i=1}^n X_i \right) / n; B_1 = \sum_{i=1}^n (i-1)X_i; B_2 = \sum_{i=1}^n (i-1). \quad (10).$$



В противном случае оценка максимального правдоподобия будет  $\hat{B} = \infty$ . Условие (10) можно переписать в более удобном виде:

$$A > (n + 1)/2, \quad (11)$$

где  $A$  – то же самое выражение, что и в формуле (9). Необходимо отметить, что  $A$  является интегральной характеристикой  $n$  выявленных в РЭА ДФ дефектов за время существования и представляет (в стратегическом смысле) набор интервалов  $X_i$  между проявившимися дефектами.

**Пример использования разработанной методики расчета.** Рассмотрим в качестве примера ситуацию, когда при эксплуатации РЭА были обнаружены и устранены 10 дефектов. Длительность интервалов времени между обнаружениями дефектов: 0, 20, 50, 100, 180, 200, 350, 480, 620, 1100 часов. Начальное значение (нулевое) в этом списке соответствует тому, что первый дефект проявился сразу – в момент начала эксплуатации РЭА. Второе – тому, что дефект № 2 проявился через 20 часов эксплуатации РЭА после выявления дефекта №1 и т.д. Представим эту информацию в виде двух векторов. Далее определяем параметр из уравнения (9).

Записав вышеописанные этапы решения в среде MathCAD (рис. 2), получаем  $A = 8,245$ .

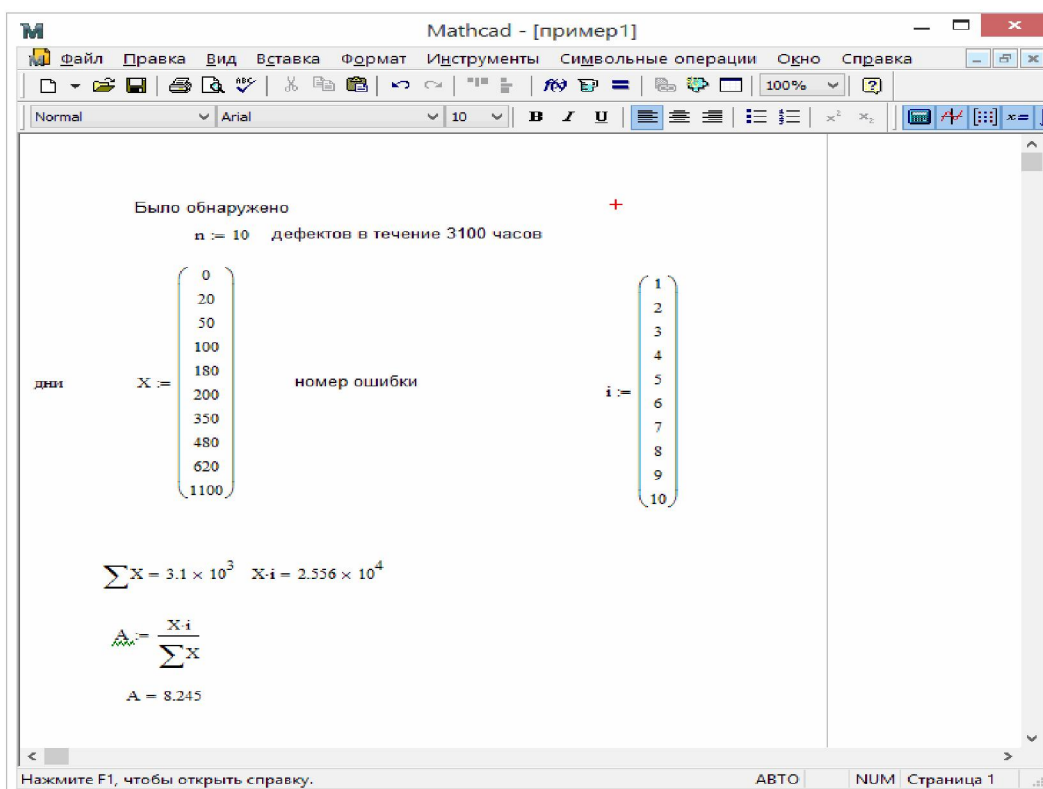


Рис. 2. Пример выполнения расчета в MathCAD

Устанавливается единственность решения оценки максимального правдоподобия – проверкой условия (10). В данном случае  $(8,245 > 5,5)$ .

Производим вычисление начальных значений функций, входящих в уравнение (9), с анализом разницы  $|f_n(m) - g_n(m)|$  для множества аргументов  $m = n + 1$ :

$m = 11;$	$f_n(m) = 2,929;$	$g_n(m, A) = 2,142;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,701$
$m = 12;$	$f_n(m) = 2,02;$	$g_n(m, A) = 1,934;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,643$
$m = 13;$	$f_n(m) = 1,603;$	$g_n(m, A) = 1,764;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,5$
$m = 14;$	$f_n(m) = 1,347;$	$g_n(m, A) = 1,621;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,391$
$m = 15;$	$f_n(m) = 1,168;$	$g_n(m, A) = 1,499;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,312$
$m = 16;$	$f_n(m) = 1,035;$	$g_n(m, A) = 1,395;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,255$
$m = 17;$	$f_n(m) = 0,931;$	$g_n(m, A) = 1,304;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,211$
$m = 18;$	$f_n(m) = 0,847;$	$g_n(m, A) = 1,224;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,178$
$m = 19;$	$f_n(m) = 0,777;$	$g_n(m, A) = 1,153;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,153$
$m = 20;$	$f_n(m) = 0,719;$	$g_n(m, A) = 1,091;$	$ f_n(m) - g_n(m)  = 0,132$

Минимальное значение  $|f_n(m) - g_n(m)|$ , а, следовательно, и наилучшее решение уравнения (9) достигается при  $m = 20$ . Таким образом,  $\hat{B} = m - 1 = 19$ .

Из выражения (7) получаем оценку максимального правдоподобия  $K = 2,744 \times 10^{-4}$ .

Теперь можно определить вероятное время, оставшееся до обнаружения  $(n + 1)$ -ого дефекта, т.е. следующего по отношению к последнему выявленному:

$$X_{n+1} = 1 / \left[ K(\hat{B} - n) \right] = 405 \text{ часов.}$$

Кроме того, можно оценить время, оставшееся до полного завершения обнаружения дефектов:

$$t = \left[ \sum_{i=1}^9 1/i \right] / K = 1,031 \times 10^4 \text{ часов.}$$

Полученные результаты позволяют оценить риски отказов РЭА ДФ.

Укажем, что возможен и более простой подход к прогнозированию последующего (очередного) отказа на основе набора данных  $\{X_i\}, i = 1..I$ . Он состоит в построении регрессионного уравнения для  $\{X_i\}$  с использованием экспоненциальной функции (на основе метода наименьших квадратов). Однако этот метод будет давать менее точные результаты по сравнению с описанным выше.

**Заключение.** Таким образом, на основе предположения о сходстве статистических характеристик ошибок ПО и латентных дефектов ПП, определяемых на стадии выходного контроля их производства, были получены выражения для определения оценки максимального правдоподобия при условии наличия интервалов времени между проявившимися дефектами. На основе этих выражений можно определять (оценивать) среднее время до появления (проявления) очередного дефекта РЭА ДФ.

#### Список литературы

1. Абрамов О.В. Проектирование технических систем с элементами настройки / О.В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2 (6). С. 51-55.
2. Алгоритм выявления латентных технологических дефектов ПП методом оптического контроля / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, И. В. Ханин, А. В. Лысенко, В. Б. Алмаметов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3(27). – С. 105 – 114.
3. Брумштейн Ю.М., Тарков Д.А., Дюдиков И.А. Анализ моделей и методов выбора оптимальных совокупностей решений для задач планирования в условиях ресурсных ограничений и рисков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - Астрахань, 2013.-№3.-С.169-179

4. Брумштейн Ю.М., Иванова М.В. Одно- и многомерные временные ряды: анализ возможных методов оптимизации отсчетов и оценки характеристик // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - Астрахань, 2012, №4, с.34-43.

5. Гришко А.К. Системный анализ параметров и показателей качества многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств / А.К. Гришко, Н.К. Юрков, Д.В. Артамонов и др. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 2 (26). С. 77-84.

6. Кемалов, Б.К. Формирование моделирующей среды авиационного тренажера / Б.К. Кемалов, Б.Ж. Каутов, Н.К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 9–16.

7. Кирьянчиков, В. А. Качество и надежность программного обеспечения: Конспект лекций / В. А. Кирьянчиков, Э. А. Опалева // СПб.: Изд-во ЛЭТИ. – 2002. – 85 с.

8. Медведев, А. М. Контроль ПП по признакам внешнего вида / А. М. Медведев // Технологии в электронной промышленности, – № 3, – 2005, – С. 34 – 39.

10. Панкратова, Н. Д. Системный анализ в динамике диагностирования сложных технических систем/ Н. Д. Панкратова// Системні дослідження та інформаційні технології. 2008. – № 1. – С. 33 – 49.

11. Полтавский, А.В. Модель отказов автоматизированных средств контроля / А.В. Полтавский, Н.К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 63–67.

12. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н.К. Юрков, А.В. Затылкин, С.Н. Полесский, И.А. Иванов, А.В. Лысенко / Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 184-187.

13. Хилман, К. Анализ физики отказов / К. Хилман // Печатный монтаж, – № 5, – 2007, – С. 6 – 8.

14. Юрков, Н. К. Безопасность сложных технических систем / Н. К. Юрков // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – №1. – С. 129 – 134.

9. Юрков, Н.К. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н.К. Юрков, А.В. Затылкин, С.Н. Полесский, И.А. Иванов, А.В. Лысенко / Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 101-102.

15. Ali Asad Ch., Muhammad Irfan Ullah, Muhammad Jaffar-Ur Rechman An approach for software reliability model selection. – IEEE Computer Society Press, – 2004. – 243 p.

16. Coutinho J. deS. Software Reliability Growth. – IEEE Symposium on Computer Software Reliability, – 1973. – p. 234 –238.

17. Shishulin D., Yurkov N., Yakimov A. Research of the Vibration Effects on the Mirror Antenna's Radiation Using ANSYS. MODERN PROBLEMS OF RADIO ENGINEERING, ELECOMMUNICATIONS, AND COMPUTER SCIENCE"Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University Lviv-Slavske, Ukraine February 25 – March 1, 2014 – С. 135-136.

18. Musa J. D., Okumoto, K. Software Reliability Models: Concepts, Classification, Comparisons, and Practice. – Electronic Systems Effectiveness and Life Cycle Costing. – 2000. – 278 p.

19. Shooman, M. L. Operational Testing and Software Reliability Estimation During Program Developments. – IEEE Computer Society, – 1973. – p. 174 – 179.

### References

1. Abramov O.V. Proektirovanie tekhnicheskikh sistem s elementami nastroyki [Design of technical systems with elements of settings] / O.V. Abramov // Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem [Reliability and quality of complex systems]. 2014. № 2 (6). S. 51-55.

2. Algoritm vyavleniya latentnykh tekhnologicheskikh defektov pechatnykh plat metodom opticheskogo kontrolya [Algorithm for detection of latent defects technological printed circuit boards by optical inspection] / N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, I. V. Khanin, A. V. Lysenko, V. B. Almametov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki. [News of Higher Schools. Volga region. Engineering.] – 2013. – № 3(27). – S. 105 – 114.

3. Brumshhteyn Yu.M., Tarkov D.A., Dyudikov I.A. Analiz modeley i metodov vybora optimal'nykh sovokupnostey resheniy dlya zadach planirovaniya v usloviyakh resursnykh ogranicheniy i riskov [Analysis of the models and methods of selection of optimum set of solutions for the problems of planning in terms of resource constraints and risks] //Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii. [Caspian Journal: management and high technology] – Astrakhan', 2013-№3.-S.169-179

4. Brumshteyn Yu.M., Ivanova M.V. Odno- i mnogomernye vremennye ryady: analiz vozmozhnykh metodov optimizatsii otschetov i otsenki kharakteristik [Single- and multi-dimensional time series: an analysis of possible methods of optimization and performance evaluation samples] //Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii. [Caspian Journal: management and high technology] – Astrakhan', 2012, №4, s. 34-43.
5. Grishko A.K. Sistemnyy analiz parametrov i pokazateley kachestva mnogourovnevnykh konstruktivnykh radioelektronnykh sredstv [System analysis of the parameters and quality of multi-level designs of radio electronic means] / A.K. Grishko, N.K. Yurkov, D.V. Artamonov i dr. // Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii. [Caspian Journal: management and high technology] 2014. № 2 (26). S. 77-84.
6. Kemalov, B.K. Formirovanie modeliruyushchey sredy aviatsionnogo trenazhera [Formation of the modeling environment simulators] / B.K. Kemalov, B.Zh. Kautov, N.K. Yurkov // Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem. [Reliability and quality of complex systems.] – 2015. – № 1 (9). – S. 9–16.
7. Kir'yanchikov, V. A. Kachestvo i nadezhnost' programmnoy obespecheniya: Konspekt lektsiy [The quality and reliability of software: Lectures] / V. A. Kir'yanchikov, E. A. Opaleva // SPb.: Izd-vo LETI. – 2002. – 85 s.
8. Medvedev, A. M. Kontrol' pechatnykh plat po priznakam vneshnego vida [The control circuit boards on the basis of appearance] / A. M. Medvedev // Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti [Technology in the electronics industry], – № 3, – 2005, – S. 34 – 39.
9. Pankratova, N. D. Sistemnyy analiz v dinamike diagnostirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [System analysis of the dynamics of complex technical systems diagnostics] / N. D. Pankratova// Sistemni doslizheniya ta informatsiyi tekhnologii. [Systemic research and information technologies.] 2008. – № 1. – S. 33 – 49.
10. Poltavskiy, A.V. Model' otkazov avtomatizirovannykh sredstv kontrolya [Model bounce automated controls] / A.V. Poltavskiy, N.K. Yurkov // Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem. [Reliability and quality of complex systems.] – 2015. – № 1 (9). – S. 63–67.
11. Funktsional'naya model' informatsionnoy tekhnologii obespecheniya nadezhnosti slozhnykh elektronnykh sistem s uchetom vneshnykh vozdeystviy [The functional model of information technology to ensure the reliability of complex electronic systems, taking into account external influences] / N.K. Yurkov, A.V. Zatylnin, S.N. Polesskiy, I.A. Ivanov, A.V. Lysenko / Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2014. T. 1. S. 184-187.
12. Khilman, K. Analiz fiziki otkazov [An analysis of the physics of bounce] / K. Khilman // Pechatnyy montazh [Printed wiring], – № 5, – 2007, – S. 6 – 8.
13. Yurkov, N. K. Bezopasnost' slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Security complex technical systems] / N. K. Yurkov // Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta. [Journal of Penza State University.] – 2013. – №1. – S. 129 – 134.
14. Yurkov, N.K. Osobennosti razrabotki makromodeley nadezhnosti slozhnykh elektronnykh sistem [Features of the development of macro models of reliability of complex electronic systems] / N.K. Yurkov, A.V. Zatylnin, S.N. Polesskiy, I.A. Ivanov, A.V. Lysenko / Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2014. T. 1. S. 101-102.
15. Ali Asad Ch., Muhammad Irfan Ullah, Muhammad Jaffar-Ur Rechman An approach for software reliability model selection. – IEEE Computer Society Press, – 2004. – 243 p.
16. Coutinho J. deS. Software Reliability Growth. – IEEE Symposium on Computer Software Reliability, – 1973. – p. 234 –238.
17. D. Shishulin, N. Yurkov, A. Yakimov Research of the Vibration Effects on the Mirror Antenna's Radiation Using ANSYS. MODERN PROBLEMS OF RADIO ENGINEERING, ELECOMMUNICATIONS, AND COMPUTER SCIENCE"Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University Lviv-Slavske, Ukraine February 25 – March 1, 2014 – S. 135-136.
18. Musa J. D., Okumoto, K. Software Reliability Models: Concepts, Classification, Comparisons, and Practice. – Electronic Systems Effectiveness and Life Cycle Costing. – 2000. – 278 p.
19. Shooman, M. L. Operational Testing and Software Reliability Estimation During Program Developments. – IEEE Computer Society, – 1973. – p. 174 – 179.