

С. Г. КОЧУРА, Н. А. КУЗНЕЦОВ, А. А. НОСЕНКОВ

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Проанализирована известная математическая модель, рекомендуемая для использования при испытаниях устройств космической техники. Представлена математическая модель, позволяющая устранить недостатки анализируемой модели, но сочетающая ее достоинства с предложениями авторов по повышению комплексности и практической ценности математического моделирования электрических испытаний космических аппаратов связи.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрические испытания, космическая техника, космические аппараты связи.

Электрические испытания относятся к важнейшим и наиболее трудоемким видам испытаний изделий приборостроения, в том числе космической техники (КТ), требующим достаточно четкого планирования и совершенной технологии выполнения [1—5]. Для повышения эффективности и качества испытаний применяются методы математического моделирования. Однако математическое моделирование испытаний устройств КТ еще далеко от практической реализации. Кроме того, теоретическая его разработка не может быть признана достаточно завершённой.

Тем не менее известна математическая модель, рекомендуемая для использования при испытаниях устройств КТ [6], которая рассматривалась рядом отечественных авторов (см. например, [2]) и заслуживает детального изучения на предмет ее приемлемости для моделирования электрических испытаний космических аппаратов (КА) связи, в частности. Основным постулатом модели является утверждение о том, что программы испытаний предназначены для обнаружения и локализации N дефектов, первоначально (до испытаний) имеющихся в изделиях (как результат несовершенства их разработки и производства). Кроме того, сам процесс обнаружения дефектов обладает случайными характеристиками, подобными рассматриваемым в теории надежности. Например, время до обнаружения дефекта является аналогом времени наработки на отказ элементов изделия. Эта аналогия, а также ряд принятых допущений легли в основу анализируемой модели.

Рассмотрим исходные математические положения модели. Так, случайная величина $Q_j(\tau)dt$ определена как вероятность обнаружения дефекта на интервале $\tau \leq t \leq \tau + dt$ при условии, что на этом интервале проводится испытание j -го типа и дефект не был обнаружен до момента $t = \tau$. При этом предполагается, что тип рассматриваемого одиночного испытания не изменяется в течение всего процесса. Значит, индекс j в обозначении $Q_j(t)$ может быть опущен. Другая случайная величина $P(t)$ определена как вероятность того, что дефект не был обнаружен по прошествии времени t процесса испытаний. На основании этих предпосылок получено уравнение для вероятности $P(t+dt)$ того, что дефект не будет обнаружен за время $t + dt$.

$$P(t+dt) = P(t) [1 - Q(t)dt], \quad (1)$$

откуда следуют дифференциальные уравнения

$$\frac{d}{dt} \ln P(t) = -Q(t); \quad (2)$$

$$Q(t) = -\frac{d}{dt} \ln P(t), \quad (3)$$

являющиеся фундаментальными при описании процесса обнаружения дефектов (т.е. процесса испытаний) и аналогичными дифференциальному уравнению для функции надежности $R(t)$, где роль переменной $Q(t)$ играет интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Решение уравнения (2) для $P(t)$ имеет следующий вид:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t Q(t) dt \right]. \quad (4)$$

Если проводится испытание одного типа (например, электрическое), то решением уравнения (4) при $Q(t) = \text{const} = b$ будет выражение

$$P(t) = \exp(-bt), \quad t \geq 0. \quad (5)$$

Когда программой испытания определена его полная длительность T , то

$$P(T) = \exp(-bT). \quad (6)$$

При многофазном характере испытания

$$Q_1(t) = b_1, \quad Q_2(t) = b_2, \quad \dots, \quad Q_n(t) = b_n, \quad (7)$$

где n — количество фаз испытания.

Описание модели одиночного испытания завершается введением такого параметра, как безусловная плотность распределения $\Phi(\tau)$, для которой $\Phi(\tau)d\tau$ — вероятность того, что дефект будет обнаружен в интервале $\tau \leq t \leq \tau + d\tau$. При этом

$$P(t) = \int_t^{\infty} \Phi(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Дифференцирование по t обеих частей уравнения (8) и деление их на $P(t)$ приводят к соотношению

$$\frac{d}{dt} \ln P(t) = -\Phi(t) / P(t), \quad (9)$$

а с учетом уравнения (2) — к соотношению

$$\Phi(t) = P(t) Q(t). \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) — основные уравнения рассматриваемой модели [6], они получены для одиночного испытания, но носят достаточно общий характер и рекомендованы к использованию даже при комплексных испытаниях.

Здесь же рассмотрена ситуация, когда тип испытания, при котором можно выявить наибольшее количество дефектов, не определен и величина $Q(t)$ задана в виде суммы $\sum_{i=1}^n b_i \rho_i$ (где ρ_i — интервал времени T , затрачиваемого на i -ю фазу испытания), обозначенной через B . Для этого случая получены уравнения

$$\frac{d}{dt} \ln P(t) = -B, \quad t \geq 0; \quad (11)$$

$$P(t) = \exp(-Bt), \quad t \geq 0, \quad (12)$$

которые совместно с уравнениями (9) и (10) позволяют определить функциональную зависимость

$$\Phi(t) = B \exp(-Bt), \quad t \geq 0. \quad (13)$$

Оценка параметров B и N рассматриваемой математической модели проблематична в двух аспектах: во-первых, в оценке качества (эффективности) испытаний, т.е. определении величины B , и, во-вторых, в оценке качества изделия, т.е. в оценивании количества дефектов N ,

априори имеющихся в объекте испытаний. Суть проблемы заключается в неразрывной связи оценок величин B и N . Так, если при испытании изделия дефекты в нем не обнаружены, то этот факт может быть объяснен как высоким качеством объекта испытаний, так и низким качеством процесса испытаний. Следовательно, результат испытания зависит и от B , и от N . В такой ситуации оценивать эти параметры предложено двумя статистическими методами: методом максимального правдоподобия и байесовским методом анализа априорного и апостериорного распределений. Однако оба метода имеют серьезные недостатки.

Недостаток первого метода заключается в отсутствии практически полезных результатов, если априори не известны величины обоих параметров. Реализация второго метода дает уверенный результат, если время проведения оцениваемого испытания $T \rightarrow \infty$. Такое условие, разумеется, не может быть практически выполнено, особенно для изделий КТ, поскольку одним из основных требований к их испытаниям является оперативность, диктуемая различными обстоятельствами: фиксированной датой запуска, жестким графиком выполнения работ, ограниченными ресурсами и т. д.

Кроме того, если при испытаниях даже с использованием сложного оборудования не обнаружены дефекты в объекте, то причиной тому, скорее, является несовершенство испытаний, чем высокое качество изделия. Правда, предлагается учесть это мнение путем введения дельта-функции Дирака $\delta(B)$ в априорное распределение параметров B и N , определяемой соотношениями

$$\delta(B) = \begin{cases} 0 & \text{при } B \neq 0; \\ \infty & \text{при } B = 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$\int_{0-}^{0+} \delta(B) dB = 1. \quad (15)$$

Но эта математическая мера не исключает полностью тот факт, что отсутствие выявленных дефектов в ходе длительных испытаний изделий современной (тем более, космической) техники свидетельствует об их бесполезности. Однако создатель анализируемой модели [6] не считает ее в чем-либо неполноценной и в подтверждение этому предлагает ряд мероприятий, „вроде бы“ позволяющих позиционировать данную модель как единственную и незаменимую при решении задач подобного класса, а именно:

1) ввести классификацию дефектов по степени трудности их выявления; при этом утверждается, что обнаружение дефектов электрического характера менее проблематично, чем механических;

2) для оценки эффективности испытаний использовать соотношение количества обнаруженных дефектов к количеству априорных;

3) на стадиях разработки и модификации программ испытаний использовать математические методы линейного и нелинейного программирования.

Факт единственности рассматриваемой модели авторы настоящей статьи не намерены опровергать, поскольку другой вариант подобной модели им действительно не известен. В то же время не известны и факты практической реализации этой модели для современных изделий КТ. А ранг незаменимости сам по себе противоречит диалектике научно-технического прогресса. (Общеизвестно, что все в мире, даже самое оригинальное, устаревает.) Тем более, что предложенные мероприятия не являются неоспоримыми. Например, предложение по классификации дефектов. Здесь вызывает несогласие суждение о том, что электрические дефекты более легко выявляются, чем механические. По мнению авторов, наоборот, механические дефекты, как правило, более легко выявляемы, так как сопровождаются визуальными, акустическими, тепловыми и другими признаками. А электрические дефекты обычно являются „вещью в себе“, т.е. относятся к категории наиболее скрытых дефектов. Они могут стихийно возникать и неконтролируемо расти до катастрофических размеров. Причем этот процесс далеко

не всегда заранее предсказуем. С другой стороны, испытателям изделий КТ, конечно, известны проблематичные по непредсказуемости дефекты любой физической природы. Но формировать из них самостоятельный класс дефектов нет смысла по причине именно их непредсказуемости и крайне низкой вероятности проявления даже для однотипных изделий.

Реальность второго предложения также вызывает большое сомнение. Дефекты КТ являются случайными событиями и в количественном отношении, и по своей физической природе. Здесь ситуация аналогична предыдущей, т.е. совокупность потенциальных априорных дефектов какого-либо изделия может оказаться неповторимой для других изделий. Теория вероятности вполне допускает такие случаи. Тогда какой же смысл производить общую оценку эффективности испытаний на основании статистики дефектов какого-то конкретного изделия?

Что касается третьего предложения, то, как известно, основное назначение математического программирования — поиск экстремума в исследуемых процессах, т.е. их оптимальности. Об оптимальности же электрических испытаний КА связи весьма проблематично вести речь, поскольку количество только штатно контролируемых параметров этих изделий уже превысило 10^4 , а зависимости их значений от потенциальных дефектов носят случайный характер, и, кроме того, физическая суть этих зависимостей, как правило, априори не поддается определению.

Изложенными обстоятельствами, видимо, и объясняется скептическое отношение испытателей к математическому моделированию электрических испытаний КТ. Тем не менее, по мнению авторов, для КА связи, например, существует возможность построения комплексной и практически полезной модели электрических испытаний с использованием математических методов. Но для этого необходимо указать на еще один недостаток анализируемой модели, представленной выражениями (1)—(15).

Дело в том, что в этих выражениях не учитывается полная совокупность выполняемых при электрических испытаниях работ и влияние на них человеческого фактора, который играет определяющую роль на всех этапах испытаний объекта и при его проектировании. Для устранения этого недостатка авторы настоящей статьи предлагают вариант математической модели оценки вероятности обнаружения дефектов:

$$Q(t) = G_1(t_1) G_2(t_2) G_3(t_3) G_4(t_4), \quad (16)$$

где $G_1(t_1)$, $G_2(t_2)$, $G_3(t_3)$, $G_4(t_4)$ — вероятности полноценного выполнения этапов создания объекта, планирования, разработки и проведения его электрических испытаний соответственно, t_1 , t_2 , t_3 , t_4 — продолжительности выполнения каждого из этапов.

Первый компонент $G_1(t_1)$ выражения (16) характеризует уровень управляемости и контролепригодности объекта испытаний, заложенный разработчиками и реализованный изготовителями изделия. Компонент $G_2(t_2)$ определяет место, средства и порядок испытаний, а также состав группы специалистов для их выполнения. При реализации компонента $G_3(t_3)$ должны быть определены контролируемые режимы, последовательность выполнения испытательных операций, порядок и методика оценки результатов испытаний. Основное содержание четвертого компонента $G_4(t_4)$ — качество работы персонала, аппаратно-программных средств и процесса электрических испытаний в целом.

Методическое обеспечение каждого из рассмотренных компонентов выражения (16) предполагает разработку детальных математических моделей с учетом достоинств проанализированной модели [6] (например, ряда ее математических выражений и умозаключений), а также необходимость выполнения совокупности исследовательских работ с учетом имеющихся статистических данных и анализа полноценности полученных результатов. При этом авторы намерены рассмотреть вопрос обеспечения технической совместимости процессов изготовления изделия и метода его контроля (испытаний) [7] с использованием аппарата математического планирования эксперимента [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарактанэ А. С., Железнов И. Г. Испытания сложных систем. М.: Высш. школа, 1974. 184 с.
2. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / В. И. Городецкий, А. К. Дмитриев, В. М. Марков и др.; Под ред. Р. М. Юсупова. Л.: Энергия, 1978. 192 с.
3. Носенков А. А. Исследование путей повышения эффективности контроля технического состояния космических аппаратов связи: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск-26, 1979. 23 с.
4. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. Г. Планирование эксперимента в технике. Киев: Техника, 1984. 200 с.
5. Федоров В. К., Сергеев Н. П., Кондрашин А. А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005. 500 с.
6. Линд М. М. Математическая модель процесса испытаний изделий // Военная авиация и ракетная техника. 1977. № 7. С. 1—14.
7. ГОСТ 30709-2002. Техническая совместимость. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2003.

Сведения об авторах

- Сергей Григорьевич Кочура** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; зам. генерального конструктора; E-mail: KOCHURA@iss-reshetnev.ru
- Николай Анатольевич Кузнецов** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; зам. нач. отдела; E-mail: NK230@iss-reshetnev.ru
- Александр Алексеевич Носенков** — д-р техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, Красноярск

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию
19.11.10 г.