

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Кащеев Н. А., Чаплинский В. С. ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ.....	3
Кащеев Н. А., Чаплинский В. С. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ С ПОЗИЦИЙ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	11
Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Бикеев Р. Р. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	16
Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Айжариков К. А. ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ	24
Ирзаев Г. Х., Юрков Н. К., Кузина Е. А. ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ НА ЭТАПЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛООТВОДА ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ	31
Роганов В. Р., Семочкина И. Ю., Тюрин М. В. О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ПРИ СОЗДАНИИ И ИССЛЕДОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА ТРЕНАЖЕРНЫХ СИСТЕМ	38
Костин А. В., Пиганов М. Н., Бозриков В. С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ВЫЗВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА	46

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Богорош А. Т., Воронов С. А., Шайко-Шайковский А. Г., Бильяк С. В., Тимофеева Е. Н., Перчик Д. З. К ПРОБЛЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ДОМЕНОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ	56
Затылкин А. В., Калашников В. С., Телегин А. М. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОЗАЩИТЫ РЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ НЕЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОИЗОЛЯТОРА	65

Голушко Д. А., Лысенко А. В., Калаев М. П. ЦИФРОВОЙ ГЕНЕРАТОР ПРЯМОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СИГНАЛА С ПЛАВАЮЩЕЙ ЧАСТОТОЙ.....	73
---	----

МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

Камбург В. Г., Бодажков Н. Ю., Агафонкина Н. В. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СТОИМОСТНОЙ КРИТЕРИЙ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ТРУДНОФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ.....	79
Михайлов С. А., Горячев В. Я., Бростилова Т. Ю. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ УДЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ УСТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ В ЦЕХЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	85

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Ванцов С. В., Медведев А. М. НАДЕЖНОСТЬ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ.....	91
Садыков С. С., Кульков Я. Ю. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ РЕАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИХ БЕЗРАЗМЕРНЫХ КОНТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ	101
Свиридов А. С., Лисицын И. Ю., Колганов А. А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ПРЕСЕЛЕКТОРА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ЗАЩИТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ.....	110
Герасимов О. Н., Пивкин А. В., Юрков Н. К. О ПРИМЕНЕНИИ ИСПЫТАНИЙ РЭС НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ ЭТАПАХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ	116

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 629.7

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

Н. А. Кащеев, В. С. Чаплинский

Актуальность задач синтеза информационно-управляющих комплексов

Информационно-управляющий комплекс (ИУК) космической системы (КС) в настоящее время является структурным формированием, выполняющим функции автоматизированной системы управления (АСУ) космическими аппаратами (КА) и средств передачи-приема и распространения данных информации целевого назначения (ИЦН).

Автоматизированный наземный сегмент ИУК (АНИУК) включает наземный комплекс управления (НКУ) КА и наземный комплекс приема, обработки и распространения данных ИЦН (спецкомплекс – СК), взаимодействующие с соответствующими бортовыми комплексами и потребителями ИЦН.

В известных структурах НКУ и СК функционируют как организационно и технически раздельные комплексы, взаимодействующие друг с другом и образующие так называемую большую систему (большие системы классифицируются как совокупность разнородных сложных систем со сравнительно слабыми связями между ними).

Дальнейшее развитие ИУК определилось в направлении унификации и интеграции его средств с образованием в перспективе *новой сложной системы* – автономного регионального унифицированного наземного комплекса (АРУ ИУК).

Автономный региональный (в пределе однопунктный) унифицированный наземный сегмент ИУК в отличие от ранних прототипов представляется как развивающееся структурное унифицированное формирование, интегрирующее функции НКУ КА и СК.

Если рассматривать АРУ ИУК как НКУ КА с *дополнительной функцией приема с КА больших потоков ИЦН*, ее обработки и распространения, а также больших потоков телеметрической информации, то такой объект переводит НКУ КА в статус унифицированного наземного сегмента ИУК.

Концептуальный подход формирования АРУ ИУК определился появившимися новыми технологиями обмена информацией с КА и тенденциями развития самих КА и ИУК, обусловившими возможность создания автономных (самодостаточных, ресурсосберегающих) региональных унифицированных комплексов [1–2]:

– технологиями ретрансляционного обмена информацией с КА, включающего также перспективные варианты сетевого обмена с использованием наземно-космических информационных сетей (НКИС), технологиями координатно-временного обеспечения (КВО) с применением на КА навигационной аппаратуры потребителя (НАП) космических навигационных систем (КНС); т.е. технологиями, минимизирующими наземный сегмент ИУК вплоть до одного пункта;

– реализацией концепции создания малых и микро-КА (МКА) и, соответственно, создания многоспутниковых космических систем, которые могут быть организованы в НКИС, функционирующую с применением как традиционных специализированных спутников-ретрансляторов (СР) на геостационарной орбите (ГСО), так и без них (на основе многофункциональных целевых КА наблюдения, навигации и связи).

Эти направления развития современной космической техники в совокупности логически обусловили возможность создания АРУ ИУК и необходимость решения соответствующих сопутствующих проблемных вопросов. Обоснование такой возможности (реализуемости) представляется актуальной прикладной целевой установкой и при решении сопутствующих задач может рассматриваться как общественно значимый обобщенный научный результат.

Автономные (самодостаточные) региональные унифицированные ИУК представляются объектами исследования, занимающими особое научное положение как объекты, реализующие широко востребованные однопунктные методы обмена информацией с КА и, соответственно, повышающими оперативность и устойчивость функционирования космических информационных систем, а также характеризующимися экономическим эффектом их создания и применения.

Задачи с использованием схем малопунктного обмена информацией с КА решались и ранее. Однако сформулированная задача, характеризующаяся известным комплексом нерешенных проблем, по-прежнему остается актуальной.

Постановка и декомпозиция задачи синтеза ИУК в целом

Задача синтеза ИУК в целом предполагает оптимизационную постановку минимизации стоимости $C_{\text{ИУК}}$ создания и применения ИУК при заданном максимальном требовании $P_{0\text{max}}$ к вероятности выполнения целевой задачи ИУК [3–4]:

$$\min C_{\text{ИУК}},$$

$$P_{\text{бр}}(t+T)K_{\text{ПС}}P_{\text{рл}}(T) \geq P_{0\text{max}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{бр}}(t+T)$ – вероятность безотказной работы комплекса в течение времени выполнения целевой задачи на интервале $[0, t+T]$; t – общее время функционирования комплекса на интервале $[0, t]$; T – собственно время выполнения целевой задачи (определяется характеристиками надежности ИУК); $K_{\text{ПС}}$ – характеристика пропускной способности ИУК (вероятность того, что состав средств ИУК и их количество достаточны для выполнения целевых задач всей орбитальной группировки КА, закрепленной за ИУК); $P_{\text{рл}}(T)$ – вероятность выполнения ℓ -го сеанса связи длительностью T при воздействии помех (определяется характеристиками помехозащищенности радиолиний и электромагнитной совместимости системы взаимодействующих радиоэлектронных средств (РЭС) при условии наличия требуемой совокупности функционально необходимых жизнеспособных средств и надежного их функционирования при выполнении целевой задачи).

Для ремонтнопригодных комплексов справедливо соотношение

$$P_{\text{бр}}(t+T) = K_{\Gamma}(t)P_{\text{бр}}(T) \approx K_{\Gamma}(t), \quad (2)$$

$$t \gg T,$$

где K_{Γ} – коэффициент готовности ИУК.

Для неремонтнопригодных комплексов, в том числе функционирующих в условиях конфликтной среды, убывающая во времени функция *живучести* комплекса $P_{\text{ж}}(t) = K_{\Gamma}(t)P_{\text{бр}}(T)$ определяется как вероятность сохранения минимального функционально необходимого состава и количества средств ИУК.

Область приемлемых значений сомножителей в ограничении (1) определяется соотношениями

$$P_{0\text{max}} \leq [P_{\text{бр}}(t), K_{\text{ПС}}, P_{\text{рл}}(T)] < 1. \quad (3)$$

Неравенства (3) справедливы для каждого сомножителя.

Левая часть неравенства в (1) характеризует наиболее сложную по трудоемкости в анализируемых вариантах операцию (сеанс связи).

Такая постановка задачи предполагает установление зависимостей $C_{ИУК}(X)$, $K_T(t, X)$, $P_{бр}(t, X)$, $K_{ПС}(X)$, $P_{ж}(t, X)$, $P_{рл}(T, X)$, где X – совокупность характеристик ИУК, подлежащих определению в результате синтеза.

Выражение (1) представлено в классическом виде для критериального подхода «эффективность–стоимость».

Показатель $C_{ИУК}(X)$ является эмпирической зависимостью приращения стоимости ИУК относительно некоторого базового значения от совокупности его характеристик.

В соответствии с выражением (1) совокупность основных оптимизируемых характеристик ИУК, подлежащих определению, для режимов функционирования в условиях индифферентной среды может быть представлена следующим перечнем [5–6]:

- интенсивности физических отказов ИУК в целом и его элементов (средств) в режиме функционирования по назначению; коэффициенты резервирования средств (исходя из требований к сомножителю $P_{бр}$);

- характеристики радиолиний ИУК, обеспечивающих их помехозащищенность при выполнении сеансов связи с требуемой информативностью и электромагнитную совместимость радиоэлектронных космических средств и средств региона в общих рабочих зонах (исходя из требований к сомножителю $P_{рл}$);

- характеристики пропускной способности ИУК *без учета случайных дестабилизирующих факторов* (случайные дестабилизирующие факторы в (1) учитываются другими сомножителями, определяющими вероятность выполнения целевой задачи), т.е. на этапе планирования выполнения операций для всей орбитальной группировки КА, закрепленной за ИУК (исходя из требований к сомножителю $K_{ПС}$).

Сомножитель $K_{ПС}$ по определению должен быть принят равным единице – представляется логически неприемлемым создание ИУК, в котором при заданных характеристиках КА уже на этапе планирования применения средств это условие не выполняется из-за недостаточности средств.

Однако задача обеспечения требуемой пропускной способности ИУК на уровне $K_{ПС} \approx 1$ как исследовательская задача остается актуальной и требует своего решения при определении достаточного количества требуемых средств. Случайный характер показателя пропускной способности ИУК в исследовательских задачах перспектив развития космических систем обусловлен рандомизацией ряда неполностью определенных в исходных данных характеристик, например, баллистических.

В задачах типа (1) одним из важнейших проблемных вопросов остается вопрос получения регрессионных зависимостей стоимости ИУК от его характеристик (особенно в условиях экономической нестабильности развития предприятий) или корректной замены этого показателя другим более удобным при количественных оценках, но не нарушающим смысловое содержание оптимизационной задачи.

Для условий применения ИУК в конфликтной среде совокупность основных оптимизируемых характеристик ИУК, подлежащих определению, представляется следующим перечнем:

- интенсивности поражения ИУК и его средств (приводящего к функциональной невозможности решения хотя бы одной целевой задачи);

- коэффициенты резервирования средств (исходя из требований к сомножителю $P_{ж}$);

- характеристики радиолиний ИУК, обеспечивающих их помехозащищенность в условиях радиоэлектронного подавления (РЭП) при выполнении сеансов связи с требуемой информативностью (исходя из требований к сомножителю $P_{рл}$).

Если средства ИУК являются унифицированными для различных условий их применения, то характеристики пропускной способности ИУК остаются теми же, что и для функционирования в условиях индифферентной среды. В противном случае задача оценки пропускной способности должна решаться при соответствующей коррекции исходных данных [7–9].

Определение требуемых уровней оптимизируемых показателей предполагает предварительную декомпозицию задачи с обоснованием соотношения в выражении (1) между сомножителями $P_{бр}$, $P_{рл}$ или $P_{ж}(t)$, $P_{рл}$ при заданном требовании P_0 к произведению этих сомножителей и постулируемом ограничении относительно показателя $K_{ПС}$.

Задачу декомпозиции формально представим в виде оптимизации распределения усилий между двумя сомножителями произведения $P_1 P_2$.

Определение требований к составляющим произведения $P_1 P_2$ при ограничении $P_1 P_2 \geq P_0$ основано на анализе затратных механизмов обеспечения показателей и их сравнении и позволяет далее традиционно раздельно решать задачи по оптимизации характеристик надежности (живучести) и помехозащищенности.

Предположим, что в требуемой области значений показателей P_1 , P_2 , близких к единице, удалось получить аппроксимирующие зависимости стоимости $C_B(P_1)$, $C_R(P_2)$. Тогда в окрестности точки P_0 эти зависимости можно представить линейными функциями:

$$C_B(P_{бр}) \approx B P_1, \quad C_R(P_{рл}) \approx R P_2. \quad (4)$$

Разработка методов определения зависимостей (4) должна сопутствовать решению сформулированной задачи.

С учетом (1) процесс декомпозиции задачи представляется в следующем формализованном виде:

$$\begin{aligned} \min M; \quad M(P_1, P_2) &= B P_1 + R P_2, \\ P_1 P_2 &\geq P_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Значения величин B , R , P_0 считаются заданными.

При введении обозначений

$$x = B P_1, \quad y = R P_2 \quad (6)$$

задача (5) приобретает следующую каноническую форму:

$$\begin{aligned} \min(x + y), \\ xy \geq E, \quad E = P_0 B R. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение: $x = \frac{E}{y}$;

$$\begin{aligned} M = \frac{E}{y} + y; \quad \min\left(\frac{E}{y} + y\right); \quad \frac{dM}{dy} = -\frac{E}{y^2} + 1 = 0; \\ x = y = E^{0.5}; \\ P_1 = \sqrt{\frac{P_0 R}{B}}, \quad P_2 = \sqrt{\frac{P_0 B}{R}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Решение (8) может быть принято только при условии $B = R$. При невыполнении этого условия в силу разнородности решаемых технических задач по реализации показателей P_1 , P_2 один из сомножителей произведения $P_1 P_2$ (обеспечение которого реализуется с меньшими затратами) может быть больше единицы. При этом теряется физический смысл такого показателя (вероятность).

Тогда, дополняя полученное решение ограничением

$$P_0 < P_1 < 1, \quad P_0 < P_2 < 1,$$

имеющим физический смысл, показатели P_1 , P_2 могут быть определены следующим образом.

Показатель P_1 со значением в (8) больше единицы определяется как максимально возможный (потенциально реализуемый), второй показатель при этом определяется из соотношения

$$P_2 = \frac{P_0}{P_1}.$$

Минимум унимодальной функции $M(P_1, P_2)$ может быть уточнен путем итераций.

Следует заметить, что при обосновании характеристик в [1] предложено использовать положение о «равнопрочности» частей системы, однако при этом не учитываются стоимостные составляющие, что определяет погрешности на системном уровне, которые могут оказаться существенными.

Основные задачи синтеза ИУК, требующие методического обеспечения

Задача синтеза ИУК в целом представлена постановкой (1) на основе критериального подхода «эффективность–стоимость», для которой сомножители в ограничении определяют основные частные задачи (по терминологии [1] определяют X-качества) синтеза ИУК.

Однако, исходя из того, что наиболее адекватным универсальным инструментом оценки эффективности информационных систем в целом признаются имитационные статистические модели, разработанные для ЭВМ [3], то представляется целесообразной разработка такой модели, соответствующей постановке задачи (1), предназначенной: для оценки (анализа) эффективности (устойчивости) комплексов в целом, приближенным к реальным; синтеза характеристик ИУК (хотя бы доступным методом перебора вариантов); разработки алгоритмов поведения ИУК в индифферентных и конфликтных сценариях; контроля и подтверждения адекватности аналитических оценок частных показателей эффективности.

Согласно (1) приоритетными частными задачами, требующими методического обеспечения, являются задачи установления зависимостей показателей K_{Γ} , $P_{\text{бр}}$, $P_{\text{ж}}$ от соответствующих параметров надежности (живучести) ИУК и его средств (необходимых качеств, характеризующих жизнеспособность систем, без которых реализация остальных качеств теряет смысл). В постановке (1) эти задачи должны решаться как оптимизационные, определяющие оптимальные параметры надежности (живучести) ИУК.

Составляющим показателя надежности $P_{\text{бр}}(t)$ формально может быть определен и показатель $K_{\text{ПС}}$, характеризующий пропускную способность, – достаточность привлекаемых средств ИУК для выполнения целевой задачи. Действительно, если для каких-либо случайных условий функционирования в течение времени t для выполнения заданных технологических операций обмена информацией обнаруживается недостаток средств ИУК, приводящий к отказу ИУК, то такой отказ может интерпретироваться в терминах теории надежности как функциональный отказ комплекса.

Однако показатель $K_{\text{ПС}}$, логически дополняющий в (1) события до полной группы, представлен как независимый показатель пропускной способности ИУК.

Оправданием такого декомпозиционного разделения показателей $P_{\text{бр}}(t)$ и $K_{\text{ПС}}$ может быть различная физическая природа отказов:

- отказы для условия $P_{\text{бр}}(t) < 1$ связаны с естественным старением рабочих элементов системы при их функционировании;
- отказы для условия $K_{\text{ПС}} < 1$ характеризуются недостаточным количеством задействованных для решения целевой задачи ИУК жизнеспособных надежных средств;
- методы вычисления показателей надежности и пропускной способности систем существенно разнятся.

Аналогичная аргументация представляется убедительной и при разделении в (1) показателей надежности ИУК и помехозащищенности его радиолиний, также характеризуемых отказами различной физической природы.

Сомножитель $P_{\text{рл}}$ в ограничении (1), характеризующий вероятность выполнения одиночного сеанса связи для различных условий электромагнитной обстановки, определяет некоторый пе-

речень частных задач, отличающихся особенностью их решения на фоне известных результатов теории помехозащищенности радиолиний.

Таким образом, основные задачи синтеза ИУК, требующие методического обеспечения, могут быть представлены следующим перечнем:

- задачи, решаемые на основе имитационного статистического моделирования функционирования ИУК;
- обоснование (определение, синтез) минимального функционально необходимого состава привлекаемых средств для заданной орбитальной группировки, закрепленной за ИУК, обеспечивающего заданные требования к пропускной способности ИУК $K_{ПС} \approx 1$;
- обоснование характеристик ИУК и его средств, обеспечивающих надежность (живучесть) ИУК (сомножители $P_{бр}$, $P_{ж}$);
- обоснование характеристик радиолиний, обеспечивающих помехозащищенность ИУК при выполнении одиночных сеансов связи в различных условиях электромагнитной обстановки (сомножитель $P_{рл}$).

Особенности решения задач синтеза информационно-управляющих комплексов – основные выводы

1. Адекватная имитационная статистическая модель (универсальное средство анализа и исследования систем) должна основываться на принципах искусственной рандомизации не определенных исходными данными значений ряда параметров со следующими отличительными признаками (особенностями, характерными для ИУК):

- реализацией возможности задания и изменения приоритетности выполняемых операций, определяющей очередность их планирования и разрешения конфликтных ситуаций (при равных приоритетах обслуживаемая операция должна выбираться случайно по равномерному закону);
- введением в состав исходных данных схем информационных контуров, в соответствии с которыми может быть выполнена операция. Это требование обусловлено разнообразием в настоящее время структурных вариантов схем выполнения операции (однопунктный, многопунктный режимы; различные схемы ретрансляционного обмена информацией и др.);
- введением универсальных (для модели) характеристик разнотипных средств, позволяющих разнотипные средства рассматривать с единых позиций как типовой элемент трансляции и преобразования с требуемыми задержками информационных посылок;
- модель должна формировать планы привлечения средств ИУК с максимально плотной укладкой во времени выполнения операций для всей орбитальной группировки, закрепленной за ИУК, минимизирующие состав средств с учетом специфических особенностей региона, их дислокации и условий функционирования;
- модель должна обеспечивать возможность определения минимально необходимого состава средств, предназначенных для выполнения всей совокупности целевых задач ИУК, в том числе в конфликтных ситуациях с заданными сценариями информационно-энергетического обмена.

2. При декомпозиции задачи (1) обоснован системный постулат $K_{ПС} \approx 1$, имеющий принципиальное значение при решении задачи синтеза ИУК.

Постулат $K_{ПС} \approx 1$ определяет требование к составу средств ИУК и планированию выполнения операций (сеансов связи) средствами ИУК, т.е. к процессам, которые по определению являются детерминированными. Случайные факторы, влияющие на результаты реализации планов, учитываются другими показателями в ограничении выражения (1). Случайный характер показателя $K_{ПС}$ пропускной способности ИУК в исследовательских задачах перспектив развития космических систем сохраняется и определяется рандомизацией ряда неполностью определенных в исходных данных характеристик.

Планирование применения средств ИУК с определением их минимального состава при условии $K_{ПС} \approx 1$ должно быть обеспечено соответствующей автоматизированной системой, в том числе с использованием имитационной статистической модели.

Минимальный состав привлекаемых средств в этом смысле является нетрадиционной характеристикой пропускной способности ИУК для заданной орбитальной группировки.

В соответствии с декомпозицией задачи синтеза ИУК в целом, эта задача может быть методически представлена двумя независимыми задачами:

- синтеза характеристик ИУК, обеспечивающих его надежность (живучесть);
- синтеза характеристик радиолиний ИУК, обеспечивающих его помехозащищенность при выполнении одиночных сеансов связи в различных условиях электромагнитной обстановки.

3. Основные особенности и ограничения при решении задачи синтеза характеристик ИУК, обеспечивающих его надежность (живучесть):

- качества (свойства) надежности и живучести ИУК являются формально *однородными*, отличающимися лишь составом дестабилизирующих факторов, приводящих к отказам;
- задача обоснования характеристик надежности (живучести) должна быть представлена аналогично задаче (1) как оптимизационная в соответствии с критериальным подходом «эффективность–стоимость».

Обоснованию (определению в результате решения оптимизационной задачи) подлежат интенсивности отказов и соответствующие показатели резервирования средств в системе (комплексе).

Задача обеспечения требуемой надежности основывается на методах создания высоконадежной элементной базы, предупреждения и поиска неисправностей, резервирования элементов.

Задача обеспечения живучести средств ИУК отличается высокой динамикой исследуемых процессов, неопределенностью условий функционирования конфликтующих систем и характеризуется основными направлениями, требующими комплексирования или альтернативного выбора.

Вероятности безотказной работы ИУК (средств ИУК) аппроксимируются выражениями на основе экспоненциальных функций, которые рассматриваются для значений, близких к единице, имеющих практический смысл.

4. Основные особенности и ограничения при решении задачи синтеза характеристик радиолиний, обеспечивающих помехозащищенность ИУК при выполнении одиночных сеансов связи в различных условиях электромагнитной обстановки, сводятся к следующим.

Структурное построение ИУК предполагает непосредственный и ретрансляционный, в том числе сетевой, режимы обмена информацией по радиолиниям с различными характеристиками.

Рассматриваются ИУК с использованием средств обмена информацией радиотехнических диапазонов частот, в перспективе – миллиметрового и оптического диапазонов волн.

Расчетная вероятность ошибочного приема одного двоичного символа информации определена на уровне 10^{-6} , поскольку практика работы с радиотехническими системами космического назначения показывает, что требования в вариантах безызыточного формирования информации в области значений вероятностей, меньших 10^{-6} , реализовать проблематично – собственные шумы приемников в этой области становятся несущественными, преобладают внешние возмущающие факторы, не поддающиеся статистическому учету [2].

Основной режим ИТНП реализуется бортовым навигационно-временным устройством на основе НАП КНС.

Минимальный коэффициент усиления бортовой антенны при управлении КА в неориентированном режиме – «минус» (10...13) дБ.

Основные направления, обобщенные исходные предпосылки и ограничения по обеспечению помехозащищенности радиолиний, определяются соответствующими моделями.

Список литературы

1. Флейшман, Б. С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем / Б. С. Флейшман. – М. : Советское радио, 1971. – 224 с.
2. Кашеев, Н. А. Радиотехнические средства управления космическими аппаратами / Н. А. Кашеев. – М. : Изд-во МИРЭА, 2005. – 202 с.
3. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 400 с.
4. Власюк В. В. Метод определения оптимальных характеристик резервирования и надежности наземных средств многопунктовых комплексов управления космическими аппаратами / В. В. Власюк, Н. А. Кашеев, В. С. Чаплинский // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – № 5. – С. 8–14.
5. Дивеев, А. И. Синтез управления движением мобильного робота по траектории методом интеллектуальной эволюции / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько, Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 188–190.
6. Yurkov N. K. Characteristic Features of the Control of Complex Systems Utilizing Conceptual Models / N. K. Yurkov // Measurement Techniques. – 2004. – Vol. 47, № 4. – April. – P. 339–342.

7. Северцев, Н. А. Системный анализ определения параметров состояния и параметры наблюдения объекта для обеспечения безопасности / Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 4–10.
8. Северцев, Н. А. К вопросу об утрате работоспособности систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. М. Самокутяев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 268–270.
9. Баранов, Н. А. Управление состоянием готовности системы безопасности к отражению угрозы / Н. А. Баранов, Н. А. Северцев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 8–10.

Кащеев Николай Александрович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл, г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 9)
E-mail: niiks@khrunichev.com

Чаплинский Владимир Степанович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл, г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 9)
E-mail: niiks@khrunichev.com

Аннотация. Статья содержит классификацию положений, выделяющих особенности решения задач синтеза информационно-управляющих комплексов (ИУК). В ней представлены основные системные характеристики существующих ИУК, постановки актуальных задач синтеза перспективных ИУК, в частности, автономных региональных унифицированных (АРУ) ИУК. Приведены основные задачи синтеза ИУК, требующие методического обеспечения, и основные направления их решения, в том числе с позиций задач сложных систем.

Ключевые слова: автономные региональные унифицированные информационно-управляющие комплексы, эффективность ИУК, оптимизация характеристик ИУК, космические системы наблюдения.

Kashcheev Nikolay Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev
(141091, 9 Tihonravova street, Yubileyny,
Moscow region, Russia)

Chaplinskiy Vladimir Stepanovich

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev
(141091, 9 Tihonravova street, Yubileyny,
Moscow region, Russia)

Abstract. Article contains classification of the positions allocating features of the decision of problems of synthesis of information-operating complexes (IOC). In it the basic system characteristics existing IOC, statements of actual problems of synthesis perspective IOC, in particular, independent regional unified (IRU) IOC are presented. The primary goals of synthesis IOC demanding methodical maintenance, and the basic directions of their decision are resulted.

Key words: the independent regional unified information-operating complexes, efficiency IOC, optimisation of characteristics IOC, space systems of supervision.

УДК 629.7

Кащеев, Н. А.

Особенности решения задач синтеза информационно-управляющих комплексов / Н. А. Кащеев, В. С. Чаплинский // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 3–10.

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ С ПОЗИЦИЙ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Н. А. Кащеев, В. С. Чаплинский

Задача определения закономерностей процессов синтеза информационно-управляющих комплексов (ИУК) с позиций свойств сложных систем, обеспечивающих методическую общность подходов, представляет не только теоретический, но и практический интерес, поскольку ИУК является технической системой, широко востребованной при обеспечении процессов дистанционного зондирования Земли и специального наблюдения из космоса, в том числе в интересах двойного применения космических систем (КС).

Основы междисциплинарной теории сложных систем сформированы с использованием математических постулатов и методов от общих подходов Бераланфи до конструктивной теории помехоустойчивости (В. А. Котельников, К. Шеннон), надежности и др., в том числе элементов прикладных направлений синтеза. Однако «теория» сложных систем – понятие условное, поскольку «теория» требует формирования непротиворечивых теорем, из которых должны следовать свойства сложных систем. В настоящее время такой подход не принес каких-либо существенных результатов [1–4].

На вопрос, существует ли теория синтеза оптимальных, адаптивных, самоорганизующихся и самонастраивающихся систем [5], нет единства мнений, что позволяет развивающуюся теорию сложных технических систем и ее прикладные аспекты, в том числе методы и результаты синтеза информационно-управляющих комплексов, считать актуальными.

Информационно-управляющие комплексы и свойства сложных систем

Информационно-управляющий комплекс является сложной системой, наделенной всеми ее постулируемыми (аксиоматическими) качествами:

- от решающих систем, имеющих постоянные стохастические критерии различения случайных объектов (сигналов) и постоянные стохастические реакции на случайные воздействия; самоорганизующихся систем, имеющих гибкие критерии различения и гибкие реакции, приспособляющиеся к заранее неизвестным сигналам и воздействиям;

- до предвидящих систем, превосходящих по сложности некоторые воздействия внешней среды, полагаясь на повторение прежних ситуаций.

Наивысшее развитие сложных систем достигается на уровне превращающихся систем, для которых проблема устойчивости сводится к проблеме помехоустойчивого перекодирования, хотя в практике применения перспективных космических систем имеется определенный опыт коррекции математического обеспечения в процессе эксплуатации, в том числе в полете космических аппаратов (КА). Примеры целевого превращения элементной базы действительно не выявлены.

Сложность системы характеризуется сложностью ее поведения, т.е. разнообразием реакций на внешние воздействия.

Сложные системы в отличие от простых характеризуются наличием функции принятия решений на фоне стохастического описания среды и самих систем.

Классификация свойств сложных систем целиком применима к описанию свойств ИУК:

- принцип обратной связи возник на уровне автоматических систем и присущ всем сложным системам;

- надежность (получившая у автора [2] приоритет в виде проблемы «номер один», связанной с возрастанием сложности технических систем.

Стратегическая цель сложных систем – выжить вопреки воздействиям внешней среды.

Особый интерес представляет оптимистическая уверенность автора [2] в отношении повышения надежности технических систем с увеличением их сложности. При сравнении надежности биологических и технических систем автор [2] приходит к выводу, что по мере возрастания сложности биологических систем возрастает их надежность. Этот вывод указывает на аналогичную возможность и для технических систем.

Помехоустойчивость обусловлена необходимостью правильной ориентации в среде и информированности о ней, определяющая, в свою очередь, возникновение качества управляемости (возможности активных действий).

Информированность о внешней среде (ориентации в ней) предполагает:

- различение объектов внешней среды на фоне помех (шумов);
- хранение в памяти абстрактных образов объектов внешней среды для последующей идентификации.

Помехоустойчивость (составляющее качество информированности о внешней среде) является свойством решающей системы, имеющей цель различения и выделения сигналов (сообщений) на фоне помех различной природы, в частности, флуктуационных шумов.

В фундаментальной работе В. А. Котельникова получена зависимость $P_d(T)$ максимальной вероятности правильного различения M сигналов за время T в канале связи с гауссовыми шумами [6, 7]. Цель такой системы состоит в оптимальном (M, t) -обмене. Это достигается выбором оптимальной структуры – способа кодирования и оптимального поведения – способа декодирования, представляющих суть теории помехоустойчивости.

Согласно [2] предложенный Хэммингом способ асимптотического декодирования в целом входных слов с конечной задержкой, основанного на оптимальном методе декодирования по минимальному хемминговскому расстоянию (эквивалентному критерию максимального правдоподобия), приводит к неоптимальным по M результатам из-за несовершенного способа кодирования, также основанного на идее минимального кодового расстояния.

Более совершенные коды, предложенные К. Шенноном [1], используют для своего генерирования так называемое случайное кодирование. Автор [2] при этом утверждает, что «построение оптимальных кодов случайным выбором является в настоящее время реальной перспективой».

В настоящее время практически все системы управления КА используют широкополосные шумоподобные сигналы (ШШС), которые можно отнести к классу сигналов, генерируемых «случайным образом». Преимущества таких сигналов известны.

В этой иерархии качество самоорганизации обусловлено просто накоплением опыта использования всех перечисленных качеств.

В теории сложных систем выделяют качества по сечениям (X -качества: надежность, помехоустойчивость и др.). Целостное исследование сложной системы требует совместного рассмотрения указанных качеств.

Исследуемые модели и синтез сложных технических систем

Технические науки направлены на поддержку решений по созданию и применению технических систем различной сложности. Соответственно, такой целевой установке процесс исследования технической системы должен сопутствовать поддержке технических решений на всех стадиях жизненного цикла системы в виде анализа предполагаемого ее функционирования и синтеза структуры (морфологический синтез) и ее параметров (характеристик). Основным исследуемым объектом при анализе и синтезе технической системы является модель.

Имеется два подхода при выборе моделей реальных сложных систем:

- аналитический подход, состоящий в приближении модели к реальной системе (анализ реальной системы);
- синтетический подход, рассматривающий лишь реальные системы, близкие к своим оптимальным прототипам (он начинается с синтеза оптимальных моделей).

Аналитический подход состоит в построении отдельных моделей, приближающихся по сложности к оригиналам. Здесь адекватность модели объекту достигается за счет понижения общности результатов. Основной преградой на пути этого подхода является «проклятие многомерности».

Синтетический подход в теории сложных систем предполагает исследование широкого класса простых моделей, обеспечивающих «общность результатов за счет неадекватности моделей объекту», носящих оценочный характер, и основывается на введенном в теорию сложных систем понятии оптимальности, эквивалентному критериальному подходу «эффективность–стоимость», что не противоречит существующим методическим концептуальным положениям синтеза технических систем.

Модель и создаваемая техническая система взаимно обусловлены. Кроме того, исследовательских моделей технических систем различной сложности, имеющих право на существование, может быть много, что усложняет решение исследовательских задач и требует доказательства адекватности каждой модели реальным процессам в технической системе, функционирующей в различных условиях.

Адекватность моделей может быть доказана экспериментом, в инженерных терминах – натурными испытаниями технической системы, подтверждающими результаты испытаний модели функционирования системы [8–10].

Разделение понятий на анализ и синтез технических систем представляется не совсем корректным, поскольку анализ – это этап синтеза технической системы, предшествующий и сопровождающий синтез, неразрывно связан с синтезом.

Синтез как основа создания системы (конечная цель прикладных исследований) – понятие техническое (в современной практике и биологическое, а возможно и многопредметное, различающееся элементами, составляющими систему), суть которого состоит в целевом изменении структуры и характеристик аналогов и прототипов, а поэтому дополняющим и неотрывно вписывающимся в ранние и последующие этапы развития системы.

Синтез приобретает большую общественную значимость, чем законы познания каких-либо явлений, поскольку он направлен на поиск методов создания, за которым следует общественный эффект.

Основные системные качества при синтезе ИУК в целом

В соответствии с тезисом о необходимости целостного исследования сложной системы по всем ее качествам при постановке задач синтеза ИУК выделяются следующие основные качества: **надежность, пропускная способность, помехозащищенность.**

Показатели управляемости и самоорганизации в выражениях для эффективности ИУК, определяющие критериально-показательную базу оценки эффективности и синтеза ИУК [7], в явном виде не фигурируют. Предполагается, что они в полной мере присутствуют, обеспечивая требования к представленным в этих выражениях показателям эффективности.

Соответственно структурно-информационная устойчивость ИУК должна обеспечиваться заменой вышедших из строя элементов, постоянным самовоспроизведением, в перспективе – помехоустойчивым перекодированием.

Цель и эффективность сложной системы

Синтез сложной системы (ИУК) требует введения понятия «цели», «эффективности» и обобщенного скалярного показателя эффективности в виде вероятности достижения цели.

Вероятностная форма определения эффективности системы при достижении отдельных ее тактических целей (Х-качеств) позволяет оценивать вероятность достижения стратегической цели в целом с помощью неравенства Буля [2]. Однако нельзя согласиться с рекомендуемым в [2] требованием «равнопрочности» по вероятностным показателям частей системы в виде ее отдельных Х-качеств, поскольку при этом не учитываются стоимостные характеристики. Такой подход определяет погрешности уже на системном уровне, которые могут оказаться существенными. Основным реализуемым подходом при синтезе является критериальный подход «эффективность–стоимость» [7].

Помехозащищенность

Нельзя безоговорочно согласиться и с положением о том, что помехоустойчивость определяется только двумя направлениями:

– кодирование (структурный синтез, по К. Шеннону) – обоснованно определяющий неоптимальный подход по поведению сложных систем, базирующийся на выделении геометрически

равноудаленных из ансамбля принимаемых сигналов по Р. У. Хэммингу и В. А. Котельникову и, соответственно, на статистическом методе максимума апостериорной вероятности, приведший к признанию неоптимальности такого поведения;

– декодирование информации.

Например, на уровне помехозащищенности введено понятие скрытности, с которым приходится оперировать. Существуют также сторонники реализации ортодоксальных банальных мер повышения, собственно, энергетических характеристик сигналов в канале связи, в частности, мощности передатчика, при котором проблемы кодирования-декодирования становятся несущественными.

Надежность (живучесть)

По отношению к свойству надежности и живучести существующие обобщенные закономерности процессов синтеза сложных систем и синтеза ИУК практически аналогичны:

- критериальный подход с позиций показателя типа вероятности безотказной работы системы;
- терминологические, но не антагонистические различия надежности и живучести;
- предпочтительность использования экспоненциального закона надежности для систем с трудно предсказуемым будущим;
- сложившиеся усилия специалистов в направлении обеспечения жизнеспособности смертных систем.

Основной вывод из анализа закономерностей процессов синтеза информационно-управляющих комплексов с позиций теории сложных систем заключается в необходимости формирования цели, эффективности достижения цели в вероятностной форме, скалярного показателя эффективности, характеризующего совместное свойство комплекса «надежность (живучесть)–пропускная способность–помехозащищенность».

Список литературы

1. Шеннон, К. Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М. : ИИЛ, 1963. – 168 с.
2. Флейшман, Б. С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем / Б. С. Флейшман. – М. : Советское радио, 1971. – 224 с.
3. Питерсон, У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон. – М. : Мир, 1965. – 257 с.
4. Фано, Р. Передача информации. Статистическая теория связи / Р. Фано. – М. : Мир, 1965. – 241 с.
5. Кашеев, Н. А. Методы и основные результаты оценки, требования и рекомендации по обеспечению эффективности автономных региональных унифицированных информационно-управляющих комплексов космических систем наблюдения / Н. А. Кашеев, О. И. Герасимов, В. С. Чаплинский // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 4 (28). – С. 109–119.
6. Юрков, Н. К. Методология управления качеством сложных систем / Н. К. Юрков, А. К. Гришко, И. И. Кочегаров // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 377–379.
7. Yurkov, N. K. Synthesis of a Conceptual Model of a Subject Domain. Characteristic Features of Modeling Complex Systems / N. K. Yurkov // Measurement Techniques. – 2004. – Vol. 46, № 2. – February. – P. 128–133.
8. Северцев, Н. А. Системный анализ определения параметров состояния и параметры наблюдения объекта для обеспечения безопасности / Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 4–10.
9. Северцев, Н. А. К вопросу об утрате работоспособности систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецов, А. М. Самокутяев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 268–270.
10. Баранов, Н. А. Управление состоянием готовности системы безопасности к отражению угрозы / Н. А. Баранов, Н. А. Северцев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 8–10.

Кашеев Николай Александрович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл, г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 9)
E-mail: niiks@khrunichev.com

Kashcheev Nikolay Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev,
(141091, 9 Tihonravova street, Yubileyny,
Moscow region, Russia)

Чаплинский Владимир Степанович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл, г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 9)
E-mail: niiks@khrunichev.com

Аннотация. Рассматриваются основные аспекты придания информационно-управляющим комплексам (ИУК) статуса сложных систем и использования в процессе синтеза ИУК элементов теории сложных систем. Показано, что современные методы синтеза ИУК практически не противоречат аксиоматическим положениям теории сложных систем. Сформулировано основное положение о необходимости при синтезе ИУК в целом совместного учета таких качеств, как надежность, пропускная способность, помехозащищенность.

Ключевые слова: информационно-управляющий комплекс, синтез ИУК, сложная система.

УДК 629.7

Кашеев, Н. А.

Некоторые закономерности процессов синтеза информационно-управляющих комплексов с позиций свойств сложных систем / Н. А. Кашеев, В. С. Чаплинский // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 11–15.

Chaplinskiy Vladimir Stepanovich

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev,
(141091, 9 Tihonravova street, Yubileynyy,
Moscow region, Russia)

Abstract. The basic aspects of giving to information-operating complexes (IOC) the status of difficult systems and use in the course of synthesis IOC of elements of the theory of difficult systems are considered. It is shown, that modern methods of synthesis IOC practically do not contradict axiomatic positions of the theory of difficult systems. The substantive provision about necessity is formulated at synthesis IOC as a whole the joint account of such qualities, as reliability, throughput, noise immunity.

Key words: an information-operating complex, synthesis IOC, difficult system.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Р. Р. Бикеев

Введение

Комплекс беспилотных летательных аппаратов (КБЛА) ДН представляет собой совокупность взаимоувязанных в единую организационно-техническую систему (ОТС) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и наземных технических средств, обеспечивающих применение БЛА в воздухе, а также техническую эксплуатацию на земле. Структурный состав КБЛА может меняться в зависимости от решаемых задач, их масштабов, видов действий и условий применения БЛА [1].

Повышение качества функционирования КБЛА ДН опирается на комплексное исследование проблем качества их разработки. Задача синтеза системы новых методов и алгоритмов структурно-параметрической оптимизации параметров КБЛА ДН, синтеза новых технических обоснованных решений в ОТС, обеспечивающих заданные ТТХ КБЛА ДН на ранних стадиях предварительного проектирования, является актуальной. Для решения поставленной проблемы необходимы компьютеризированная система аналитико-имитационного моделирования (САИМ) и комплексная компьютеризированная система поддержки принятия управленческих решений (КСППУР). Необходимо создать компьютеризированную технологическую систему оптимизации математических моделей КБЛА ДН, способную отображать работу алгоритма имитационного моделирования в принятой стратегии разработки новых перспективных комплексов БЛА.

Технологическая среда разработки основных характеристик КБЛА ДН

Структура предлагаемой компьютеризированной технологической системы оптимизации математических моделей КБЛА ДН представлена на рис. 1,а. Основные блоки данной системы представлены на рис. 1,б,в, отображена блок-схема процесса оптимизации математических моделей КБЛА ДН процедурами неградиентного случайного поиска (НСП) с поясняющим графиком сущности описываемого явления. В контуре управления процедурами НСП не хватает самой динамической системы, т.е. непосредственно самих объектов оптимизации, адекватных физическим процессам их функционирования [1–3]. Центральным звеном в общей структуре являются модели функционирования и применения БЛА ДН.

Эффективность процесса случайного поиска НСП и оптимизация моделей системы в области определения параметров Ω_{O1} и области решений Ω_{O2} находится согласно [2]

$$P(\theta) = P(\theta | S_{O1}, A_O), \forall S_{C1} \in \Omega_{O1}, \forall A_v \in \Omega_{O2} : P(\theta | S_C) = P(\theta); \quad (1)$$

$$P(\theta | S_C) = P(\theta | S_{C1}, A_v),$$

где $P(\theta)$ – вероятность появления события θ ; S_{O1} – матрица заданных параметров; S_{C1} – матрица искомых параметров, A_v – событие, состоящее в появлении v -го сочетания элементов матрицы SC , $P(A_v)$ – вероятность появления события A_v ; $P(\theta | S_C)$ – условная вероятность появления события θ ; $P(A_v | \theta)$ – условная вероятность появления события (модели) A_v , $P(\theta | S_{O1}, A_O)$ – условная вероятность появления события θ при заданных параметрах и событий A_O .

Для решения задачи оптимизации и управления сложной системой БЛА ДН как динамическим объектом в s структуре применим модель, входящую в структуру общей математической модели КБЛА ДН (1) [1, 2, 4, 5]

$$\dot{Y} = \xi^{(s)}(Y, u, N_y; t), \quad Y(t_0) = Y_0, \quad s = \overline{1, S}, \quad (2)$$

где $\xi^{(s)}(Y, u, N_y; t) = A^{(s)}(t)\varphi^{(s)}\xi(Y, t)\xi + B^{(s)}(Y, t)u(t) + F^{(s)}(Y, t)N_y(t)$; $\varphi^{(s)}\xi$, $A^{(s)}(t)\xi$, $B^{(s)}(Y, t)$, $F^{(s)}(Y, t)$ – заданные нелинейные дифференцируемые функции, Y_0 – случайный вектор начального состояния системы, $N_y(t)$ – n -мерный векторный центрированный белый шум, $u(t)$ – r -мерный вектор управления ($r \leq n$). Управление в бортовом комплексе управления (БКУ) [3] $u(t)$ формируется с учетом наблюдения вектора состояния $Y(t)$ в (2) или его части как

$$Z(t) = C^{(s)}(Y, t) + Nz(t), \quad (3)$$

где $Nz(t)$ – вектор белого гауссова шума, условно не коррелируемый с векторами N_y и Y_0 , $C(Y, t)$ – известная матрица измерителя (контролируемого процесса наблюдения).

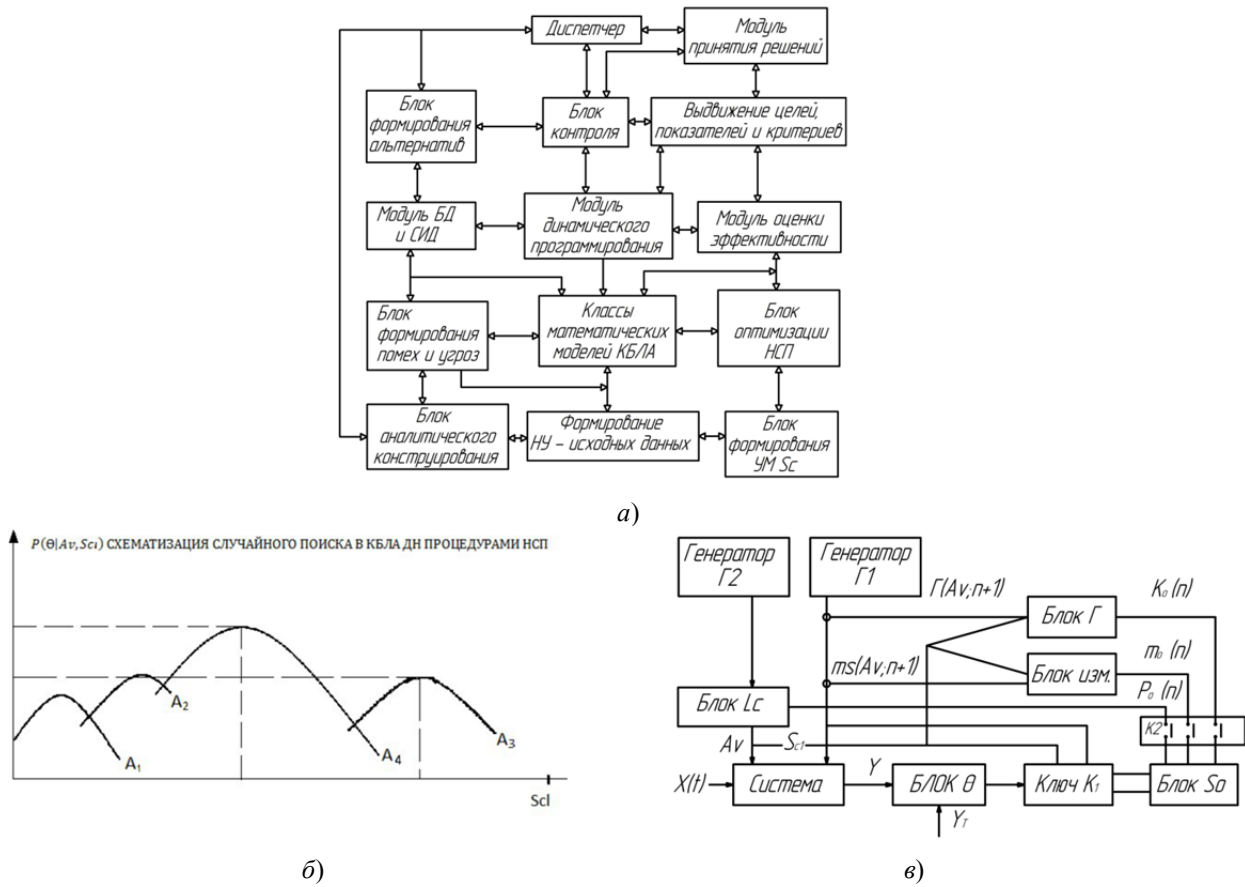


Рис. 1. Схема технологической системы оптимизации моделей объектов КБЛА ДН

Критерием оптимизации моделей объектов управления БЛА ДН будет

$$J^{(s)}ko = \zeta^{(s)}(Y, Y_t, u; t | Z(t), t_0 \leq \tau \leq t), \quad s = \overline{1, S}, \quad (4)$$

где Y_t – вектор требуемого значения состояния системы в структуре s управления.

Для s структуры, представленной (2), определим вектор управления $u(t)$. В общем случае для s структуры нелинейного объекта $Y(t)$, описываемого уравнением (2), функционал качества (4) принимает следующий вид:

$$J^{(s)}ko = MZ[l(Y, tk)] + MZ[\int (L(Y, \tau) + u^T(\tau)K^{-1}u(\tau))d\tau], \quad (5)$$

где $L(Y, \tau)$, $l(Y, tk)$ – заданные положительно определенные функции; $MZ[A]$ – математическое ожидание от A ; K – диагональная матрица коэффициентов. Оптимальным управлением объектом будет минимизация функционала (5), которая осуществляется при условии:

$$u^{(s)}(t) = -\frac{1}{2} \{K[B^{(s)}(\hat{Y}^{(s)}, t)]^T \partial U(\hat{Y}^{(s)}, t) / \partial \hat{Y}\}, \quad (6)$$

где $\hat{Y} = MZ[Y, t]$, функция в (6) $U(\hat{Y}^{(s)}, t)$ является решением уравнения $\partial U / \partial t + [\partial U / \partial \hat{Y}]^T \chi^{(s)} + 0,5 \text{tr}[(\partial^2 U / \partial \hat{Y} \partial \hat{Y}^T) \sigma^{(s)}] + 1/4 [\partial U / \partial \hat{Y}]^T B^{(s)} K B^{(s)} [\partial U / \partial \hat{Y}] = MZ[L]$ для равенства

$$U(\hat{Y}^{(s)}, t) = MZ[l_1(Y, tk)]. \quad (7)$$

В выражении (7) $\chi^{(s)}(\hat{Y}^{(s)}, t)$ – вектор коэффициентов сноса, а $\sigma^{(s)}(\hat{Y}^{(s)}, t)$ – матрица диффузии для динамической системы (2). При этом полученное управление как для линейного объекта, так и для нелинейного объекта БЛА при неизменном векторе состояния будет оптимальным. В бортовом комплексе управления формируются сигналы

$$u^{(s)}(t) = -K^{(s)} B^{(s)T} \Lambda^{(s)} \hat{Y}^{(s)} \rightarrow |u| \leq U_{oi} \rightarrow u^{(s)}(t) = -\text{sat}[K^{(s)} B^{(s)T} \Lambda^{(s)} \hat{Y}^{(s)}], \quad (8)$$

в котором компоненты описываются зависимостями для s этапа управления как $\Lambda \xi^{(s)} = -\Lambda^{(s)} A^{(s)T} + A^{(s)} \Lambda^{(s)} + \Lambda^{(s)} B^{(s)T} K B^{(s)} \Lambda^{(s)} - \Gamma_2$, $\Lambda^{(s)}(to) = \Gamma_1$; Γ_2 , Γ_1 – известные матрицы,

$$d\hat{Y}^{(s)} / dt = A^{(s)} \hat{Y}^{(s)} + B^{(s)} u^{(s)} + R^{(s)} C^{(s)T} Q^{-1} (Z - C^{(s)} \hat{Y}^{(s)}) + \sum_{r=1}^S (P_r / P_s) \lambda_{rs} (\hat{Y}(r) - \hat{Y}(s)), \quad \hat{Y}(to) = \hat{Y}_0,$$

$$dR^{(s)} / dt = F^{(s)} G Y F^{(s)T} + A^{(s)} R^{(s)} + R^{(s)} A^{(s)T} - R^{(s)} C^T Q^{-1} C R^{(s)} + \sum_{r=1}^S (P_r / P_s) \lambda_{sr} (R(r) - R(s)), \quad R(to) = R_0,$$

$$dP_s / dt = -P_s \sum_{r=1}^S \lambda_{sr}(t) + \sum_{r=1}^S P_r \lambda_{rs}(t); \quad P_r, P_s - \text{апостериорные вероятности состояния, } \lambda_{sr}, \lambda_{rs} - \text{со-}$$

ответствующие интенсивности переходов (уравнения Колмогорова положены в основу вероятностной модели применения КБЛА ДН). При построении и исследовании вероятностной модели применения БЛА ДН (рис. 2) может быть использовано описание ее в виде модели условно марковского случайного процесса [1, 2, 4, 5]:

- S_1 – БЛА исправен и находится в ожидании команды на применение ЛПР;
- S_2 – БЛА находится в состоянии ожидания к выполнению полетного задания;
- S_3 – БЛА выполняет полетное задание этапа старта;
- S_4 – решение навигационной задачи при полете БЛА к объекту-цели;
- S_5 – преодоление потенциальных угроз БЛА при полете к объекту-цели;
- S_6 – решение задачи выхода БЛА на объект-цель;
- S_7 – выполнение поставленной задачи БЛА (доставки груза к объекту);
- S_8 – преодоление БЛА угроз при полете на заданный аэродром базирования;
- S_9 – решение навигационной задачи при полете на аэродром базирования;
- S_{10} – БЛА поврежден, но может решать задачу полета в район посадки;
- S_{11} – БЛА потерян на одном из этапов применения;
- S_{12} – БЛА в состоянии выполнения полетного задания назначенной посадки;
- S_{13} – БЛА находится в состоянии ремонта (подготовки к выполнению задач).

Система может находиться в одном из состояний $\{S_1, S_2, \dots, S_n; n = 13\}$ (n – конечное число). В некоторые моменты времени $t_k (k = 1, \dots, \nu)$ система может случайным образом переходить из одного состояния S_i в другое состояние S_j с некоторой интенсивностью $\lambda_{ij}(t)$, которая в общем случае зависит от времени. В стационарном случае эти уравнения и граф вероятностей состояний в модели применения КБЛА ДН имеют вид

$$P_1 = P_{11} \lambda_{11.1} + P_{12} \lambda_{12.1} + P_{13} \lambda_{13.1} - P_1 \lambda_{1.2};$$

$$P_2 = P_1 \lambda_{1.2} - P_2 \lambda_{2.3};$$

$$P_3 = P_2 \lambda_{2.3} - P_3 (\lambda_{3.4} + \lambda_{3.10} + \lambda_{3.11});$$

$$P_4 = P_3 \lambda_{3.4} - P_4 (\lambda_{4.5} + \lambda_{4.11});$$

$$P_5 = P_4 \lambda_{4.5} - P_5 (\lambda_{5.6} + \lambda_{5.11});$$

$$P_6 = P_5 \lambda_{5.6} - P_6 (\lambda_{6.7} + \lambda_{6.8} + \lambda_{6.11});$$

$$P_7 = P_6 \lambda_{6.7} - P_7 \lambda_{7.8};$$

$$P_8 = P_6\lambda_{6,8} + P_7\lambda_{7,8} - P_8(\lambda_{8,9} + \lambda_{8,11});$$

$$P_9 = P_8\lambda_{8,9} - P_9(\lambda_{9,11} + \lambda_{9,12});$$

$$P_{10} = P_3\lambda_{3,10} + P_{12}\lambda_{12,10} - P_{10}\lambda_{10,13};$$

$$P_{11} = P_3\lambda_{3,11} + P_4\lambda_{4,11} + P_5\lambda_{5,11} + P_6\lambda_{6,11} + P_8\lambda_{8,11} + P_9\lambda_{9,11} + P_{12}\lambda_{12,11} + P_{13}\lambda_{13,11} - P_{11}\lambda_{11,1};$$

$$P_{12} = P_9\lambda_{9,12} - P_{12}(\lambda_{12,1} + \lambda_{12,10} + \lambda_{12,11});$$

$$P_{13} = P_{10}\lambda_{10,13} - P_{13}\lambda_{13,1} + \lambda.$$

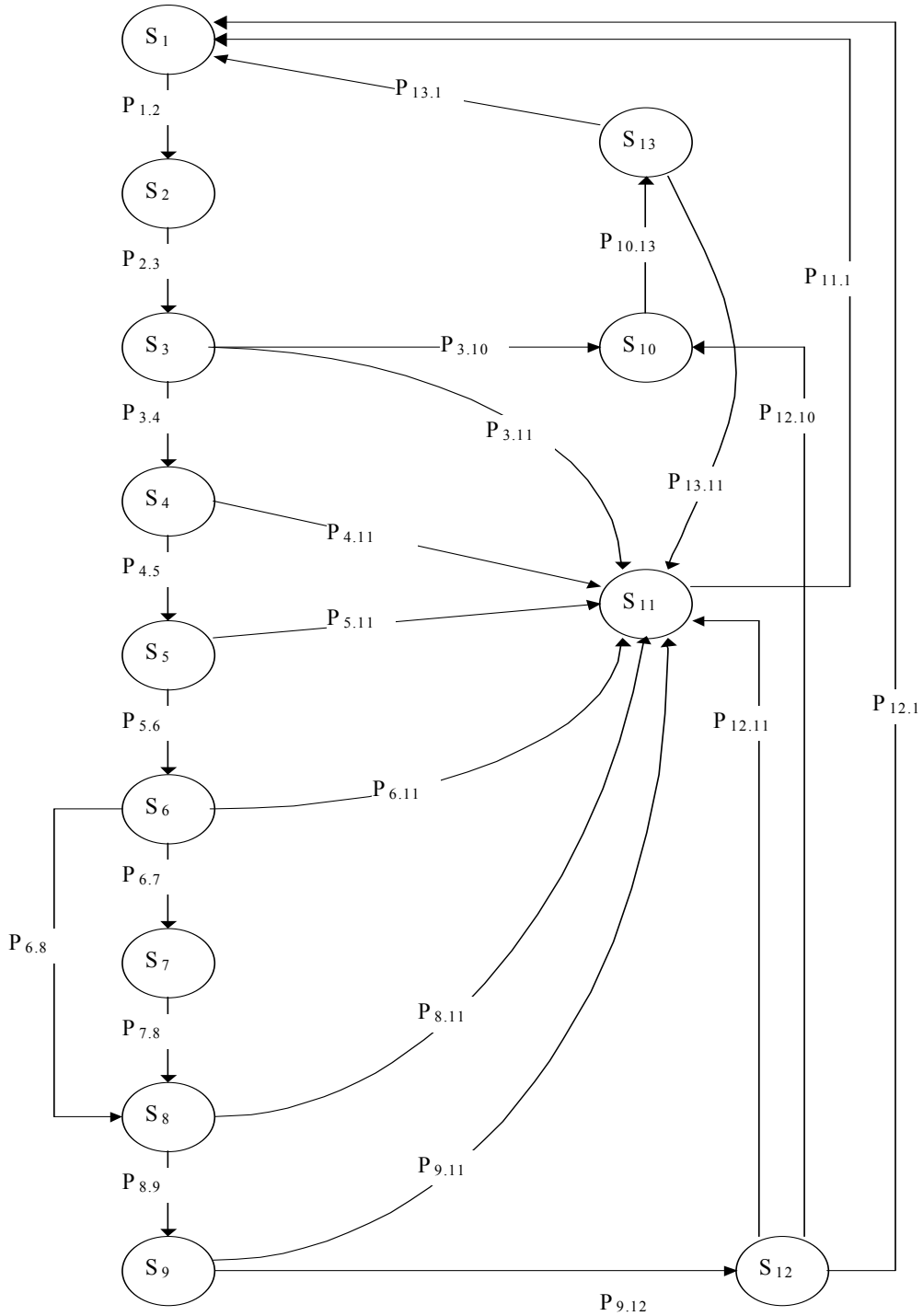


Рис. 2. Вероятности состояний процесса применения БЛА ДН

Добавим к ним нормировочное условие: $\sum_{i=1}^n P_i = 1$.

По смыслу решаемых задач КБЛА ДН интеграл $P_S(t) = \int_{\Omega_y} f(Y, s; t) dY$ и функции $f(Y, s; t)$

имеют смысл нахождения системы (2) в состоянии s (соответствующего этапа модели применения КБЛА ДН), моментными характеристиками в регистрации взвешиваемого компонента (отклонений в системе) h являются зависимости вида [1, 2]

$$M[h^{(s)}] = \int_{\Omega_y} y_h f(Y, s; t) dY \text{ и } K_{hk}^{(s)}(t) = \int_{\Omega_y} (y_h - m_h^{(s)})(y_k - m_k^{(s)}) f(Y, s; t) dY.$$

Вероятностная математическая модель применения БЛА ДН представляет собой обобщенную вероятностную модель процесса в пространстве состояний, отображает основные этапы применения КБЛА ДН и определяет аналитическую связь вероятностей состояний и переходных вероятностей. Последние по существу представляют собой вероятности решения задач того или иного этапа применения комплекса с БЛА ДН [4].

Метод оценивания характеристик КБЛА ДН на этапе проектирования

Многофункциональность динамической системы КБЛА ДН (1) предопределяет многокритериальное оценивание множества показателей качества разработки в технологической компьютерной среде КСППУР и соответствующей концепции (см. рис. 2). Критерий (4) для системы (подсистемы) задается исходя из смысла решаемой на s этапе задачи. Для принятия решения в процедурах НСП, входящего в среду КСППУР, в моделях САИМ предлагается использовать метод *многокритериального оценивания показателей функциональной эффективности* КБЛА ДН на этапе разработки, что позволяет в процессе проводить последовательные действия по выбранным критериям оценивания показателей качества при управлении в (4). Поиск моделей объектов позволяет проводить многокритериальную оптимизацию в КБЛА. Предварительный анализ возможных вариантов их моделей и отсев тех из них, которые являются не формализуемыми, осуществляется с использованием квантификации предпочтений. Таким образом, математическая постановка задачи выглядит так: обозначим через a допустимую альтернативу модели объекта и через A – множество всех допустимых альтернатив. Каждому действию или выбору a из A поставим в соответствие показатели $J_1(a), \dots, J_m(a)$. Можно считать, что m показателей $J_1, \dots, J_m$ отображает каждое a из A в точку m -мерного пространства исходов действий (последствий). Очевидно, что во всякой точке $(J_1, J_2, \dots, J_m)$ пространства последствий невозможно непосредственно сравнивать величины J_i и J_j при $i \neq j$, ибо в большинстве случаев это было бы просто бессмысленно. Задача состоит в таком выборе a из A , чтобы получить оптимальный в отношении принятого критерия (4) вариант $J_1(a), \dots, J_m(a)$. Поэтому нужна такая «свертка» критерия, которая трансформировала бы совокупность $J_1(a), \dots, J_m(a)$ в скалярный показатель предпочтительности. В другой формулировке это равносильно заданию скалярной функции $J(J_1, J_2, \dots, J_m) \geq J(J'_1, J'_2, \dots, J'_m) \Leftrightarrow (J_1, J_2, \dots, J_m) \geq (J'_1, J'_2, \dots, J'_m)$, где символ $\geq$ означает «не менее предпочтителен, чем». Показателем $J(\cdot)$ будет свертка критерия (4) при выборе альтернативы принятия решения. Теория исследования операций предполагает целый ряд способов формирования единого критерия $J(\cdot)$ из набора частных критериев J_i . Метод введения ограничений на выходные параметры в форме «свертки» позволяет решать многие задачи оптимизации в (1). Идея преобразования задачи оптимизации с ограничениями в задачу оптимизации без ограничений путем изменения целевой функции является основой для целой группы методов, называемых методами штрафных функций [2, 4]. Алгоритмы адаптивного поиска (на стадии предварительного проектирования) объектов ОТС методом НСП в системе САИМ могут дать не только оптимальные решения выбора систем (подсистем) КБЛА ДН, но и указать на меру их конкурентоспособности в соответствии с выбранными критериями качества и функциональной эффективности [2, 4, 6].

Имитационное моделирование основных задач функционирования КБЛА ДН

Основными этапами и задачами имитационного моделирования *типовой операции применения* КБЛА ДН и оценки результатов по показателю s -го выполняемого этапа (условные вероятности основных этапов в модели применения (2)) являются:

- успешный старт и выход БЛА на заданную высоту полета ($P(\theta_{ст}) = P_{ст}$);
- полет в заданный район (навигационный этап полета БЛА $P(\theta_{н}) = P_{н}$);
- преодоление зоны ($P(\theta_{пу}) = P_{пу}$) угроз (основных учитываемых рисков для БЛА) радиационного, химического и бактериологического заражения, преодоление грозовых облаков и других возможных угроз (прогнозируемых рисков в среде КСППУР);
- выход в исходное положение в заданной области пространства для решения задачи обнаружения и распознавания объекта-цели $P_{по}(\theta_{по})$;
- доставка груза (сброс-пуск) непосредственно к объекту-цели $P_{ц} = P(\theta_{ц})$;
- контроль сброса, возвращение в назначенный район посадки ($P_{в}$), посадку ($P_{пс}$).

Эффективность применения многофункционального комплекса с БЛА ДН (JW) в *типовой операции* определяется по следующей «свертке» векторного критерия [6, 7]:

$$JW = P(\theta) = f(P_{ст}; P_{н}; P_{пу}; P_{по}; P_{ц}; P_{в}),$$

где $P_{ст}$ – вероятность успешного старта, $P_{н}$ – вероятность наведения БЛА в заданный район (этап навигации), $P_{пу}$ – вероятность преодоления потенциальных угроз, $P_{по}$ – вероятность правильного обнаружения объекта, $P_{ц}$ – вероятность доставки груза объекту-цели, $P_{в}$ – вероятность возвращения в район назначенной ЛПР посадки БЛА ДН.

Способы определения условных вероятностей $P_{ст}$, $P_{н}$, $P_{пу}$, $P_{по}$, $P_{в}$ достаточно изложены в рецензируемых публикациях по данным исследованиям [5–7]. В этих же изданиях опубликованы основные результаты имитационного моделирования [8–11].

Заключение

Методы автоматизированного случайного (направленного и ненаправленного) поиска в задачах идентификации и оптимизации математических моделей новых объектов в современных комплексах с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА) находят широкое применение, особенно на ранней стадии исследований и предварительного проектирования. Исследования данных моделей, как правило, проводятся путем имитационного моделирования и лабораторных испытаний. В практике научных исследований и оптимизации подобных динамических систем часто применяют функцию потерь [1, 2, 4, 8–11], которая в таких задачах является недифференцируемой, и поэтому в этих случаях находит широкое применение метод неградиентного случайного поиска. Наряду с развитыми адаптивными методами управления, например, часто используемые в исследованиях динамических систем координатно-параметрической оптимизации и с распределенными параметрами, автоматизированные процедуры случайного поиска алгоритмами НСП также находят достаточно широкое научно-практическое применение к различным этапам и типам задач в оптимизации широкого спектра динамических систем, которые условно можно разделить на два основных класса. Первый класс оптимизируемых задач – это задачи, связанные с оптимизацией параметров динамической системы, второй – это задачи, связанные с оптимизацией решений (выбором объектов модельных звеньев из баз данных КСППУР).

Список литературы

1. Полтавский, А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
2. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М. : Наука, 1987. – 134 с.
3. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В. В. Кульба, Е. Н. Микрин, Б. В. Павлов, В. Н. Платонов. – М. : Наука, 2006. – 579 с.
4. Казаков, И. Е. Анализ стохастических систем в пространстве состояний / И. Е. Казаков, С. В. Мальчиков. – М. : Наука, 1983. – 247 с.

5. Полтавский, А. В. Комплексная методика оценки эффективности многоцелевых КБЛА / А. В. Полтавский, С. С. Семенов, А. А. Бурба // Боеприпасы. – 2010. – № 2. – С. 34–38.
6. Мубаракшин, Р. В. Бортовые информационно-управляющие средства оснащения ЛА / Р. В. Мубаракшин, Н. В. Ким, М. Н. Красильщиков. – М. : МАИ, 2003. – 134 с.
7. Полтавский, А. В. Управление безопасностью движения беспилотного ЛА / А. В. Полтавский. – М. : Датчики и системы. – 2008. – № 9. – С. 4–8.
8. Когерентный контроль координат основных модулей нежесткой фазированной антенной решетки беспилотного летательного аппарата / А. В. Полтавский, В. М. Бородуля, В. В. Маклаков, Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 100–103.
9. Полтавский, А. В. Модификация модели системы управления подвижным объектом / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 65–70.
10. Полтавский, А. В. Интеграции сигналов когерентной системы ГЛОНАСС/GPS / А. В. Полтавский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2 (6). – С. 46–50.
11. Полтавский, А. В. Методы когерентного контроля подвижных объектов / А. В. Полтавский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 22–31.

Полтавский Александр Васильевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления
Российской академии наук им. В. А. Трапезникова
(117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: avp57avp@yandex.ru

Жумабаева Асель Сагнаевна

старший преподаватель,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(010000, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2)
E-mail: almatyaseri@mail.ru

Бикеев Ринат Равхатович

преподаватель,
кафедра воздушной навигации
и боевого применения авиации,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(463024, Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: rinat_bikeev@mail.ru

Аннотация. Показано, что методы автоматизированного случайного (направленного и ненаправленного) поиска в задачах идентификации и оптимизации математических моделей новых объектов в современных комплексах с беспилотными летательными аппаратами находят все более широкое применение. Исследование предложенных методов проведено на основе имитационного моделирования и лабораторных испытаний. Обоснована возможность использования в практике научных исследований и оптимизации подобных динамических систем функции потерь в виде некоторой не дифференцируемой функции. Доказана возможность исследования динамических систем на основе координатно-параметрической оптимизации автоматизированными процедурами случайного поиска.

Ключевые слова: комплекс с БЛА, состав, вооружение, структура, система.

Poltavskiy Aleksandr Vasil'evich

doctor of technical sciences, leading researcher,
Institute of management problems
of Russian academy of sciences
named after V. A. Trapeznikov
(117997, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Zhumabaeva Asel' Sagnaevna

senior lecturer,
sub-department of space engineering and technology,
Eurasian National University named after L. N. Gumilyov
(010000, 2 Satpaeva street, Astana, Kazakhstan)

Bikeev Rinat Ravkhatovich

lecturer,
sub-department of air navigation
and combat employment of the aviation,
Military Institute of the Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
named after T. Ya. Begel'dinov
(463024, 16 A. Moldagulovoy avenue, Aktobe,
Kazakhstan)

Abstract. It is shown that automated methods of random (directional and non-directional) search in the tasks of identification and optimization of mathematical models of new objects in modern complexes with unmanned aerial vehicles are increasingly used. The study proposed methods based on simulation and laboratory tests. Grounded in research and practice of optimization of such dynamic systems function losses as some not differentiable functions. Proven ability to study dynamic systems based on coordinate-parametric optimization automated random search procedures.

Key words: UAV complex, composition, weaponry, structure, system.

УДК 681.036

Полтавский, А. В.

Имитационное моделирование характеристик комплекса беспилотных летательных аппаратов /
А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Р. Р. Бикеев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. –
№ 4 (12). – С. 16–23.

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ

А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, К. А. Айжариков

Введение

Проведенный анализ научно-технических источников показал, что 80–90 % операций, проводимых с применением КБЛА, приходится на пересекающуюся область военного и гражданского назначения. В связи с этим актуальна проблема создания многофункциональных комплексов с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА) двойного назначения (ДН), предназначенных для решения народнохозяйственных и специальных задач. Многофункциональный КБЛА – это КБЛА ДН, выполняющий функции (задачи) разведки, доставки различных грузов, удара, ретранслятора, мониторинга пространства, патрулирования, который может успешно использоваться в радиационной, химической, бактериологической обстановке и разведках и др. [1, 2].

КБЛА ДН представляет собой совокупность взаимоувязанных в единую организационно-техническую систему (ОТС) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и наземных технических средств, обеспечивающих применение БЛА в воздухе, а также техническую эксплуатацию на земле. Структурный состав КБЛА может меняться в зависимости от решаемых задач, их масштабов, видов действий и условий применения БЛА [1]. Под обликом ОТС будем понимать комплекс разрабатываемых моделей в виде систем аналого-имитационных моделей (САИМ) и соответствующие тактико-технические характеристики (ТТХ) объектов КБЛА ДН [1–4].

Для повышения качества функционирования КБЛА ДН требуется всестороннее исследование проблем и оценки качества их разработки, отвечающих уровню современных требований с учетом мировых тенденций развития таких ОТС [1, 5]. Разработка новых методов и алгоритмов структурно-параметрической оптимизации параметров КБЛА ДН, синтеза новых технических обоснованных решений в ОТС, обеспечивающих заданные ТТХ КБЛА ДН на ранних стадиях предварительного проектирования является собой трудно формализуемую проблему. Для решения поставленной проблемы необходимы компьютеризированная система аналитико-имитационного моделирования (САИМ) и комплексная компьютеризированная система поддержки принятия управленческих решений (КСППУР). Следует напомнить, что основная задача моделирования – это обоснование выбора оптимального решения. Средствами моделирования являются многомерные и многосвязные системы уравнений, описывающие и объясняющие связь между интересующими показателями (параметрами) явления (процесса или объекта) ОТС; программные средства (ПС), моделирования и отображения информации; средства испытания и интерпретации результатов принимаемых решений в КСППУР.

Основные положения модельного синтеза КБЛА ДН

Эффективность многоцелевого КБЛА ДН характеризуется степенью соответствия цели и результатов проводимой им операции, что обуславливается качеством системы, измеряется показателями качества, оценивается по критериям пригодности и оптимальности (функциональной эффективности). Критерии функциональной эффективности ОТС связаны иерархией с вероятностью выполнения поставленной задачи (ПЗ), стоящей перед динамической системой $\hat{P}_{вз} = P(\theta)$, в которой $\hat{P}_{вз}$ – оценка вероятности выполнения ПЗ; $P(\theta)$ – вероятность выполнения ПЗ в математическом моделировании; θ – событие, которое связано условием выполнения ПЗ перед множеством БЛА ДН, т.е. с конечной целью и задачами функционирования КБЛА ДН. Случайность данного события является следствием воздействия на комплекс с БЛА внешних и внутренних возмущений. Для многофункционального КБЛА ДН приняты следующие условия логического вывода (условия о соответствии объекта целевым требованиям): $\alpha_1 : \hat{P}_{вз} = \hat{P}_{вз}^{опт}$ – (критерий при-

годности КБЛА ДН по оптимальности (в оптимизационных задачах модельного синтеза и предварительных испытаниях ОТС); $\mathfrak{x}_2: \hat{P}_{\mathfrak{e}3} \in \{\hat{Y}_{<n>}^{\partial}\}$ – (критерий пригодности КБЛА ДН по принадлежности); где $\{\hat{Y}_{<n>}^{\partial}\}$ – область допустимых значений оцениваемых показателей качества ОТС; $\mathfrak{x}_3: \hat{P}_{\mathfrak{B}3} \geq \hat{P}_{\mathfrak{B}3}^{\text{TP}}$; – (критерий пригодности КБЛА ДН по превосходству).

Стратегия модельного синтеза объектов КБЛА ДН в среде КСППУР заключается в определении назначения системы и включении в нее моделей новых структур с соответствующими целями, задачами и показателями их функциональной эффективности.

Основные задачи и показатели функциональной эффективности перспективных многофункциональных КБЛА двойного назначения следующие [1, 5]:

1) обнаружение и распознавание объектов-целей – $P_{\mathfrak{B}31} = P_{\text{по}}$, где $P_{\text{по}}$ – вероятность правильного обнаружения объекта-цели $P_{\text{по}} = F(P_{\text{обн}}, P_{\text{р}})$, $P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения объекта-цели в заданных диапазонах условий применения (УП); $P_{\text{р}}$ – вероятность распознавания объекта-цели в заданных диапазонах УП;

2) доставка грузов (целевого оборудования (ЦО) – авиационных неуправляемых грузов (АНГ) и управляемых авиационных грузов (УАГ)) к объекту-цели – $P_{\mathfrak{B}32} = P_{\text{ц}}$. Здесь $P_{\text{ц}}$ – вероятность доставки груза к объекту-цели, связанная с основным событием θ ;

3) контроль (мониторинг) окружающей среды, объекта, доставки УАГ – $P_{\text{ко}}$.

Дополнительными задачами для многофункционального КБЛА ДН являются: ретрансляция данных (РТР), постановка помех (ПП) $P_{\text{рзб}}$, радиационная $P_{\text{рр}}$, бактериологическая $P_{\text{рб}}$ и химическая разведка $P_{\text{рхр}}$, патрулирование границ, поиск людей и множество других функциональных задач с соответствующими показателями (в пересекающихся задачах народного хозяйства и силовых ведомств).

Иерархия этих характеристик условно разбивается на три уровня и отображена на рис. 1, в котором, кроме перечисленных выше показателей, включены: $P_{\text{вж}}$ – вероятность выживаемости БЛА; μ – характеристика интенсивности вылетов БЛА; $P_{\text{г}}$ – вероятность готовности БЛА к вылету на задание; $P_{\text{пу}}$ – вероятность преодоления БЛА потенциальных угроз (ПУ); $P_{\text{с}}$ – вероятность сброса груза в первом заходе; $P_{\text{н}}$ – вероятность наведения БЛА в заданный район; $P_{\text{пр}}$ – вероятность прицеливания; $P_{\text{зрп}}$ – вероятность попадания груза в заданную область; $P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения БЛА средствами ПУ; $P_{\text{бж}}$ – вероятность, определяющая уровень живучести БЛА; $P_{\text{отк}}$, $P_{\text{рм}}$ – показатели уровня надежности и ремонтпригодности системы, а также $P_{\text{рм}}$, $P_{\text{эг}}$ – интегральные показатели технической эксплуатации и эргономики. На множестве этих характеристик с помощью математических моделей и алгоритмов определяется условный уровень КБЛА ДН [1, 2].

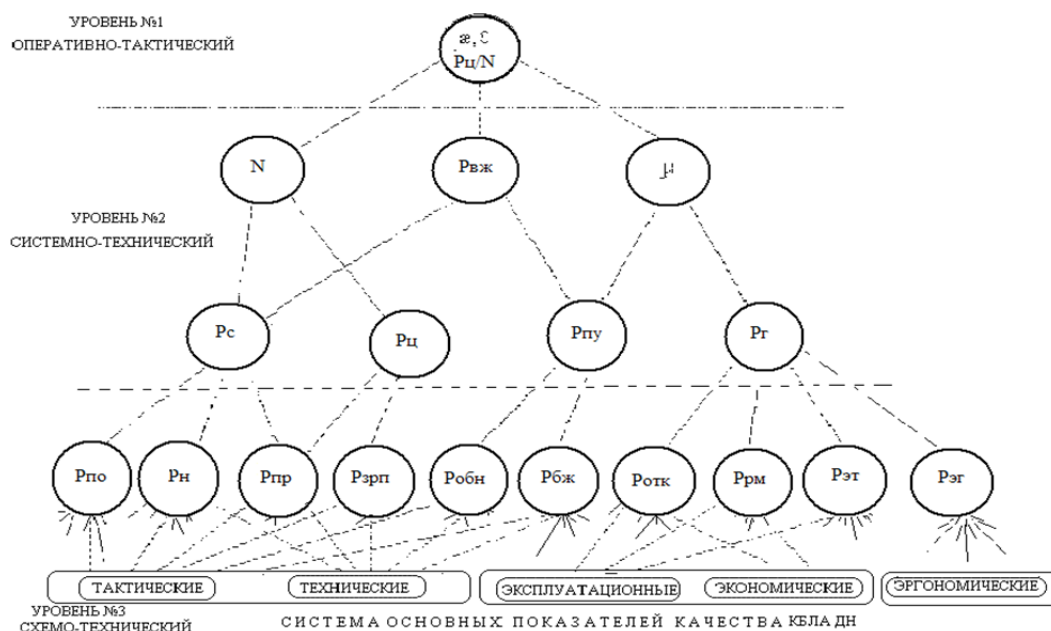


Рис. 1. Схема основного множества показателей функционирования КБЛА ДН

Множество показателей ТТХ (облик КБЛА ДН) в системе аналого-имитационного моделирования функционально связано с выполнением основной задачи $\mathfrak{A} = \mathfrak{A}f(\hat{P}_{вз} = P(\theta)/N)$, т.е. основной и конечной целью в типовой операции – обнаружение, распознавание объекта-цели $P_{по} = F(P_{обн}, P_p)$ и доставка груза к объекту-цели, оцениваемой вероятностью доставки груза $P_{ц}$, которая является *ведущей компонентой* (метод ведущих компонент в теории выбора решений) суждения о качестве новой системы. Развиваемый в работе метод оптимизации сложной ОТС основывается на сравнении реального выходного сигнала $Y(t)$ с выходным сигналом, который может быть задан в виде меры желаемого (или требуемого ЛПП) к процессу сигнала YT , т.е. по существу это означает, что в основу оптимизационных задач положены признаки, связанные с функционированием и задачами динамической системы. Связь характеристик входного $X(t)$ и выходного сигналов $Y(t)$ (как принято в математике) полностью определяется оператором системы $A(Y, X; t)$. Изменяя оператор $A(Y, X; t)$ с помощью некоторых управляющих звеньев (набора структур модельного ряда) в системе САИМ, которые будем характеризовать управляющей матрицей S_c , можно осуществить сближение (управление) векторов $Y(t)$ и Y_t . Отсюда следует, что $Y(t) = A(Y, X, S_c; t)X(t)$. Связав управляющий сигнал (Y и YT) сложным событием θ , получим критерий оптимизации в виде $P(\theta|S_c, A_v) \max_v$, в которой параметры управляющей матрицы будут опти-

мизированными при равенстве $S_o = S_c$ для модели A_v из модельного ряда базы данных (БД, модельный ряд – это набор однородных типовых структур моделей объектов в КБЛА, характеризующихся именем, признаками, входными, выходными параметрами и средой функционирования).

Таким образом, оптимизированные ТТХ (облик) многофункционального КБЛА ДН находим по условию максимума критерия $P(\theta) = \max P(\theta|S_o)$, изменяющегося под воздействием управляющей матрицы S_c , связанной звеньями модельного ряда $A_1, A_2, \dots, A_v, \dots, A_N$, с учетом основных принимаемых в моделировании ограничений (внутренних и внешних) [1, 3, 4]

$$P(\theta|S_o) = \max_{A_v, S_{C1}} F(S_{C1}, A_v), \quad F(S_{C1}, A_v) = \frac{P(A_v|\theta)f_\theta(S_{C1}|\theta, A_v)}{P(A_v)f_v(S_{C1}|A_v)}, \quad (v = \overline{1, N}),$$

где S_{C1} – матрица искомых параметров; A_v – событие, состоящее в появлении v -го сочетания элементов матрицы SC ; $f_\theta(\cdot)$ – плотность вероятности события θ и события A_v ; $f_v(\cdot)$ – плотность вероятности события A_v ; $P(A_v)$ – вероятность появления события A_v и $P(A_v|\theta)$ – условная вероятность появления события (модели) A_v .

Достоинством изложенного подхода является получение согласованной системы показателей, характеризующей качество математических моделей новой структуры с точки зрения их функциональной эффективности многоцелевого КБЛА ДН.

С помощью такой системы показателей производится оценка качества новой структуры на протяжении всего жизненного цикла. При различных испытаниях используется та или иная группа показателей качества. При этом в зависимости от решаемой задачи на множестве частных показателей формируется критерий определенного типа. Приведенный выше перечень пересекающихся целей и задач определяет концепцию (рис. 2), основную структуру и направление математического моделирования, составляющих предмет модельного синтеза в системах КБЛА ДН [5].

Общую математическую модель функционирования КБЛА ДН представим как модель динамической стохастической системы переменной структуры [1, 3, 4]:

$$\dot{Y}^{(l)} = E^{(l)}(t)F^{(l)}Y^{(l)} + G^{(l)}(t)X^{(l)}(t), \quad Y^{(l)}(t_o) = Y_o^{(l)}, \quad (l = \overline{1, L}), \quad (1)$$

где E, F, G – известные матрицы коэффициентов размерности $(n \times n)$, $(n \times 1)$, $(m \times n)$; $X(t)$ – входной вектор-сигнал является случайным; $Y(t)$ – выходной вектор-сигнал полагается случайным, т.к. он является реакцией на случайный входной сигнал в рассматриваемой структуре; L – число переключений системы с одной структуры (структурный состав объектов КБЛА может меняться в зависимости от решаемых задач, их масштабов, видов действий и условий применения (УП)) на другую, в каждой структуре система работает в течение времени $T_l = t_k^l - t_o^l$, отрезки времени T_l и моменты переключения структур могут быть случайными и неслучайными. Вектор-

ные сигналы в каждой структуре $X(t)$ и $Y(t)$ связаны с вероятностями $P(X)$, $P(Y)$. Выходной сигнал $Y(t)$ характеризует динамическую систему (1) и ее качество, несет полную информацию о ее функциональном совершенстве, надежности, ремонтпригодности, затратам на разработку и обслуживание. Поэтому к выходному сигналу $Y(t)$ и предъявляются особые требования в виде требуемого (желаемого) сигнала YT . Минимизация разности сигналов Y и YT – это и есть управление качеством на протяжении всего жизненного цикла комплекса. Например, при оптимизации структуры моделей применения КБЛА ДН на основе (1) показатель YT связан с $X(t)$ по условию задающего сигнала S_c . Поиск наилучшей модели применения комплекса с БЛА ДН производится с помощью генерации управляющей матрицы S_c , которая состоит из матриц S_{c1} и S_{c2} (S_{c1} – управление параметрами и S_{c2} – управление решениями). Требуется определить такую матрицу $S_c = S_o$, чтобы вероятность $P(\theta|S_o)$ события θ была бы максимально возможной. Предлагаемая компьютеризированная технология взаимодействия системы «человек-машина» КСППУР реализует *метод структурно-параметрической идентификации* (модельного ряда БД), в основу которого положены алгоритмы функционирования системы аналитико-имитационных моделей объектов КБЛА ДН в контуре управления процедурами случайного поиска метода неградиентного случайного поиска (НСП) и технологической компьютерной среды КСППУР [1].

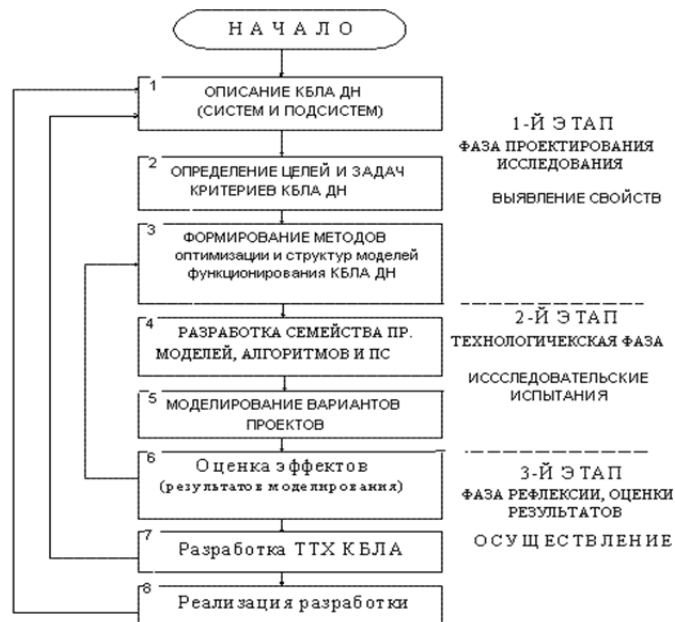


Рис. 2. Алгоритм системной стратегии (организации деятельности) разработки многофункциональных объектов КБЛА ДН на стадии модельного синтеза предпроектных решений

Сущность структурно-параметрической оптимизации объектов КБЛА ДН

Сущность метода структурно-параметрической (совместной) оптимизации в САИМ модельного ряда БД динамических объектов КБЛА ДН заключается в следующем.

Критерием оптимизации широкого класса динамических систем (подсистем) процедурами НСП в имитационном моделировании функционирования объектов ОТС и КБЛА ДН принимается минимальное среднее значение функции потерь [3, 4]

$$\rho(S_o) = \max_{\forall S_c \in \Omega_c} P(\theta | S_c),$$

где S_o – оптимальная управляющая матрица; Ω_c – допустимые границы поиска в области параметров Ω_1 и в области принимаемых решений Ω_2 . Критерий является достаточно универсальным при оптимизации детерминированных и стохастических (линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных) динамических систем и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к системе. В результате решения задачи оптимизации динамической системы

процедурами НСП определяется оптимальное значение вектора S_o , удовлетворяющее критерию максимума вероятности события θ . Запишем два основных условия, обеспечивающих максимальную эффективность поиска процедурами НСП в совместной оптимизации параметров и решений (связанные блоками модельного ряда – звеньев в управляемой компьютеризированной системе САИМ) [10, 11]

$$\forall S_{C1} \in \Omega_1, \forall A_v \in \Omega_2 : f(S_{C1} | A_v) = f_\theta(S_{C1} | \theta, A_v); \forall A_v \in \Omega_2 : P(A_v) = P(A_v | \theta).$$

При этом свидетельством возможности повышения эффективности поиска может быть невыполнение хотя бы одного из равенств. Процесс адаптации ненаправленного случайного поиска в процедурах НСП основан на сближении структур $f(S_{C1} | A_v)$ с $f_\theta(S_{C1} | \theta, A_v; n)$ и вероятностей $P(A_v)$ с вероятностями $P(A_v | \theta)$, ($v = \overline{1, N_p}$); основой для такого сближения будет выражение в виде равенств

$$f(S_{C1} | A_v; n+1) = f_\theta(S_{C1} | \theta, A_v; n); P(A_v; n+1) = P(A_v | \theta; n).$$

Практически в оптимизации динамической модели используются условия

$$m_c = (A_v; n+1) = m_\theta(A_v; n),$$

$$K_c = (A_v; n+1) = K_\theta(A_v; n),$$

в которых $m_c = (A_v; n+1)$ – условное апостериорное математическое ожидание (МО):

$$m_c = (A_v; n+1) = \int_{\Omega_2} S_{C1} f(S_{C1} | A_v; n+1) dS_{C1};$$

$m_\theta = (A_v; n)$ – условное априорное МО:

$$m_\theta = (A_v; n) = \int_{\Omega_1} S_{C1} f_\theta(S_{C1} | \theta, A_v; n) dS_{C1};$$

$K_c = (A_v; n+1)$ – условная апостериорная корреляционная матрица:

$$K_c = (A_v; n+1) = \int_{\Omega_1} [S_{C1} - m_c(A_v; n+1)][S_{C1} - m_c(A_v; n+1)]^T f(S_{C1} | A_v; n+1) dS_{C1};$$

$K_\theta = (A_v; n)$ – условная априорная корреляционная матрица:

$$K_\theta = (A_v; n) = \int_{\Omega_1} [S_{C1} - m_\theta(A_v; n)][S_{C1} - m_\theta(A_v; n)]^T f_\theta(S_{C1} | \theta, A_v; n) dS_{C1};$$

где Ω_1, Ω_2 – области всех возможных значений параметров и решений исследуемой динамической системы.

Матрица апостериорных значений параметров системы формируется как [8, 9]

$$S_{C1}(A_v; n+1) = m_s(A_v; n+1) + \Gamma(A_v; n+1)S_{\Gamma 1}, (v = \overline{1, N_p}),$$

где $S_{\Gamma 1}$ – матрица случайных величин с равными нулю МО и единичными дисперсиями

$$m_c = (A_v; n+1) = m_\theta(A_v; n),$$

$$\Gamma(A_v; n+1)\Gamma^T(A_v; n+1) = K_\theta(A_v; n),$$

где Γ – треугольная матрица коэффициентов, получаемых из решения уравнений

$$\sum_{p=1}^P \gamma_{ip}(A_v; n+1)\gamma_{jp}(A_v; n+1) = K_{ij}(A_v; n);$$

$$\gamma_{ip}(A_v; n+1) = 0 \rightarrow j > i (v = \overline{1, N_p}).$$

Окончанием случайного поиска процедурами НСП в автоматизированной среде КСППУР принято следующее условие, накладываемое на меру приращения матрицы математических ожиданий параметров динамической системы [3]:

$$\frac{1}{n_p} \sum_{i=0}^{n_p} \frac{|H_{n_{y-i}} - H_{n_{y-i-1}}|}{H_{n_{y-i}}} \leq C^*,$$

где $H_{n_{y-i}}$ – норма матрицы МО на n_{y-i} -м сеансе случайного поиска; n_p – интервал усреднения; C^* – заданное число, определяющее допустимую меру приращения норм матрицы МО, характеризующее необходимую степень стационарности случайного процесса поиска процедурами НСП.

Заключение

Методы автоматизированного случайного (направленного и ненаправленного) поиска в задачах идентификации и оптимизации математических моделей новых объектов в современных комплексах с беспилотными летательными аппаратами КБЛА находят широкое применение, особенно на ранней стадии исследований и предварительного проектирования. Исследования данных моделей, как правило, проводятся путем имитационного моделирования и лабораторных испытаний. В практике научных исследований и оптимизации подобных динамических систем часто применяют функцию потерь $\ell(Y, Y_T)$ [1, 3, 4], которая в таких задачах является недифференцируемой, и поэтому в этих случаях находит широкое применение метод неградиентного случайного поиска, разработанный академиком Д. И. Гладковым в ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского. Наряду с развитыми адаптивными методами управления, например, часто используемые в исследованиях динамических систем координатно-параметрической оптимизации (разработан профессором Рутковским В. Ю. в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН) и с распределенными параметрами, автоматизированные процедуры случайного поиска алгоритмами НСП также находят достаточно широкое научно-практическое применение к различным этапам и типам задач в оптимизации широкого спектра динамических систем, которые условно можно разделить на два основных класса. Первый класс оптимизируемых задач – это задачи, связанные с оптимизацией параметров динамической системы, второй – это задачи, связанные с оптимизацией решений (выбором объектов модельных звеньев из баз данных КСППУР) [6–11].

Список литературы

1. Полтавский, А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
2. Полтавский, А. В. Комплексная методика оценки эффективности многоцелевых КБЛА / А. В. Полтавский, С. С. Семенов, А. А. Бурба // Боеприпасы. – 2010. – № 2. – С. 34–38.
3. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М. : Наука, 1987. – 134 с.
4. Казаков, И. Е. Анализ стохастических систем в пространстве состояний / И. Е. Казаков, С. В. Мальчиков. – М. : Наука, 1983. – 247 с.
5. Полтавский, А. В. Управление безопасностью движения беспилотного ЛА / А. В. Полтавский // Датчики и системы. – 2008. – № 9. – С. 4–8.
6. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В. В. Кульба, Е. Н. Микрин, Б. В. Павлов, В. Н. Платонов. – М. : Наука, 2006. – 579 с.
7. Мубаракшин, Р. В. Бортовые информационно-управляющие средства оснащения ЛА / Р. В. Мубаракшин, Н. В. Ким, М. Н. Красильщиков. – М. : МАИ, 2003. – 134 с.
8. Когерентный контроль координат основных модулей нежесткой фазированной антенной решетки беспилотного летательного аппарата / А. В. Полтавский, В. М. Бородуля, В. В. Маклаков, Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 100–103.
9. Полтавский, А. В. Модификация модели системы управления подвижным объектом / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 65–70.
10. Полтавский, А. В. Интеграции сигналов когерентной системы ГЛОНАСС/GPS / А. В. Полтавский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2 (6). – С. 46–50.
11. Полтавский, А. В. Методы когерентного контроля подвижных объектов / А. В. Полтавский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 22–31.

Полтавский Александр Васильевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления
Российской академии наук им. В. А. Трапезникова
(117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: avp57avp@yandex.ru

Жумабаева Асель Сагнаевна

старший преподаватель,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(010000, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2)
E-mail: almatyaseri@mail.ru

Айжариков Куат Айдангалиевич

преподаватель,
кафедра радиоэлектронного оборудования
летательных аппаратов,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(463024, Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: aizharikov@mail.ru

Аннотация. Рассматривается один из подходов в задачах формирования обличковых характеристик сложных организационно-технических систем (ОТС) на ранней стадии их разработки. В качестве ОТС рассматривается математическая модель комплекса с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА) двойного назначения (ДН), необходимая для проведения структурно-параметрической оптимизации и оценки характеристик объектов КБЛА ДН алгоритмическими процедурами неградиентного случайного поиска (НСП).

Ключевые слова: комплекс с БЛА, состав, вооружение, структура, система.

УДК 681.036

Полтавский, А. В.

Формирование обличковых характеристик беспилотных систем и комплексов / А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, К. А. Айжариков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 24–30.

Poltavskiy Aleksandr Vasil'evich

doctor of technical sciences, leading researcher,
Institute of management problems
of Russian academy of sciences
named after V. A. Trapeznikov
(117997, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Zhumabaeva Asel' Sagnaevna

senior lecturer,
sub-department of space engineering and technology,
Eurasian National University named after L. N. Gumilyov
(010000, 2 Satpaeva street, Astana, Kazakhstan)

Ayzharikov Kuat Aydangalieievich

lecturer,
sub-department of radio-electronic equipment
of the flight vehicles,
Military Institute of the Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
named after T. Ya. Begel'dinov
(463024, 16 A. Moldagulovoy avenue, Aktobe,
Kazakhstan)

Abstract. Presented is one of the approaches in problems of shaping of describing characteristics for complex organizational and technical systems at an earlier stage of development. As one of these systems is considered the mathematical model of a complex with an unmanned air vehicle with twofold purpose, necessary for executing a structural and parametrical optimization of organizational and technical systems objects with algorithmic procedures on the basis of the method of non-gradient.

Key words: UAV complex, composition, weaponry, structure, system.

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ НА ЭТАПЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛОТВОДА ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Г. Х. Ирзаев, Н. К. Юрков, Е. А. Кузина

Введение

При проектировании изделий инженер-конструктор стремится в большей степени достичь функциональности составных частей и всего изделия в целом, забывая о его технологичности, т.е. приспособленности к изготовлению с минимальными затратами. Правильнее было бы еще на ранних стадиях проектирования, в том числе на этапе выбора материала детали, закладывать в конструкцию решения, минимизирующие технологическую себестоимость, сокращающие как будущие издержки производства, так и время выхода продукта на рынок, в то же время не жертвуя функциональностью и производительностью детали.

В соответствии с действующими нормативными документами [1] технологичностью конструкции изделия принято считать совокупность свойств, определяющих его приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте. Для того, чтобы трудоемкость и технологическая себестоимость деталей были минимально возможными, следует еще на ранних стадиях проектирования обеспечить применение наиболее экономичных методов их изготовления. Однако оценка технологичности конструкции детали на этих этапах может быть приближенной, зачастую качественной, основанной на опыте специалистов предприятия. Выявление факторов, влияющих на технологичность деталей по материалу, их классификация, анализ и использование для оценки приспособленности к производству заготовок и деталей позволили бы формализовать метод раннего прогнозирования технологичности конструкции, сократить непроизводительные затраты на последующих этапах проектирования, технологической подготовки и производства изделий [2, 3].

Методика качественной оценки технологичности конструкции детали на этапе выбора материала

Рациональный выбор материала в значительной степени влияет на технологичность конструкции любой детали и должен учитываться еще на стадии проработки идеи изделия. Он зависит от эксплуатационных требований к детали, сложности его конструкции, способов получения и обработки заготовок, степени податливости материала различным видам обработки и сборки, требований минимальной стоимости.

Согласно разработанной методике экспертам из числа специалистов (конструкторов, технологов, материаловедов) предприятия предлагается перечень факторов, влияющих на технологичность детали с точки зрения рационального выбора материала его конструкции. Экспертиза организуется по двухэтапной схеме для упрощения работы экспертов и повышения достоверности результатов их оценки (рис. 1).

На первом этапе эксперты выделяют наиболее значимые факторы 1-го уровня, оказывающие значительное влияние на рациональный выбор материала конструкции. Затем предлагаемые для конструкции материалы оцениваются экспертами по выделенным факторам методом непосредственного ранжирования. При этом экспертам предоставляется весь необходимый информационно-справочный материал по свойствам и характеристикам как материала, так и проектируемой детали.

Каждому j -му эксперту предлагается упорядочить материалы так, чтобы наиболее повышающему технологичность конструкции из них по данному фактору присвоить ранг $r_{ij} = 1$, следующему по степени повышения технологичности конструкции материалу – ранг $r_{ij} = 2$ и т.д. до

ранга $r_{ij} = n$, где n – число оцениваемых наименований материалов. Такую оценку эксперты проводят по всем факторам k . Эксперт может использовать и связанные ранги, если считает материалы равноценными по данному фактору. Показания экспертов выводятся в виде обобщенного среднего ранга i -го материала по k -му фактору:

$$\bar{R}_{ik} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij}}{m}. \quad (1)$$

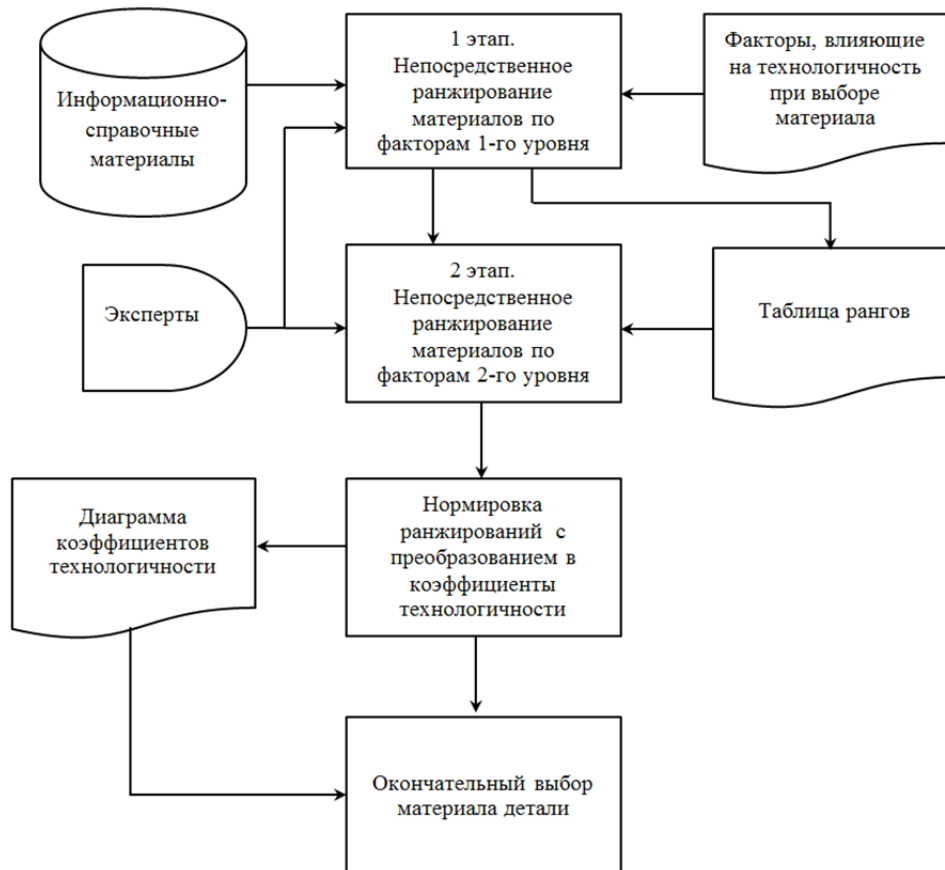


Рис. 1. Алгоритм качественной оценки технологичности конструкции детали на этапе выбора материала

Значимость i -го материала тем выше, чем ниже значение обобщенного среднего ранга, вычисленного по формуле (1). Первый этап завершается формированием перечня материалов, значение $\bar{R}_{ik}$ которых меньше заданного наперед некоторого порогового уровня $\bar{R}_{iknop}$.

На втором этапе выделенные ранее материалы подлежат оценке этой же группой экспертов по оставшимся факторам аналогично первому этапу методом непосредственного ранжирования. Для выражения полученных ранжирований в виде коэффициента технологичности конструкции по материалу K_{Ti} проводится нормировка балльной шкалы на диапазон $[0;1]$, в которой обычно измеряется технологичность конструкции детали. Так как градация для всех факторов, влияющих на выбор материала, одинакова, для нормировки применяется формула

$$K_{Ti} = 1 - \frac{\bar{R}_{ik} - \bar{R}_{ikmin}}{\bar{R}_{ikmax} - \bar{R}_{ikmin}}, \quad (2)$$

где $\bar{R}_{ik}$ – текущее значение среднего ранга i -го материала по k -му фактору, которое нормируется в шкалу $[0;1]$; $\bar{R}_{ikmax}$ – максимально возможное значение среднего ранга i -го материала по k -му фактору; $\bar{R}_{ikmin}$ – минимально возможное значение среднего ранга i -го материала по k -му фактору.

Таким образом, окончательные значения коэффициентов технологичности конструкции по материалу позволяют выбрать тот материал, у которого K_{Ti} наиболее близок или равен 1, т.е. который наиболее оптимален по всем факторам, влияющим на рациональный выбор материала конструкции детали.

Список факторов, влияющих на выбор материала конструкции, в зависимости от типа детали, условий его эксплуатации, сложности конструкции, технологических особенностей и оборудования предприятия или иных особых критериев может быть различным как по количественному, так и качественному составу. Целесообразно предварительное построение типового списка для номенклатуры выпускаемых предприятием деталей.

Группа экспертов формируется из квалифицированных специалистов предприятия заранее с учетом их компетентности [4] и требований к количественному составу [5]. Расчет значимости оценок, проверка согласованности мнения экспертов выполняются по известным методикам статистических исследований [6].

Результаты экспериментальных исследований

Методика была применена для выбора материала, обеспечивающего технологичность конструкции теплоотвода (радиатора) электронного модуля (рис. 2). На первом этапе экспертизы 10 экспертам из числа высококвалифицированных инженеров был представлен перечень из 10 факторов (табл. 1), непосредственно влияющих на выбор материала конструкции радиатора, из которых практически 90 % экспертов выбрали два показателя 1-го уровня: коэффициент теплопроводности материала λ и стоимость материала. Был сформирован перечень материалов для оценки и выбора из них экспертами наиболее подходящих по теплопроводности и стоимости. Эксперты имели под рукой также справочные данные по значениям коэффициентов λ и стоимости теплопроводных материалов.

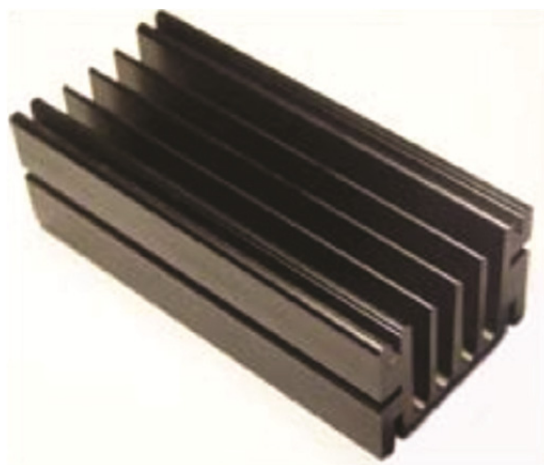


Рис. 2. 3D-модель теплоотвода

Таблица 1

Обозначение	Факторы, влияющие на технологичность конструкции радиатора по материалу	Характер фактора
K_1	Теплопроводность	Количественный
K_2	Относительная стоимость	Количественный
K_3	Плотность	Количественный
K_4	Механическая прочность	Количественный
K_5	Обрабатываемость резанием	Качественный
K_6	Приспособленность к литью	Качественный
K_7	Приспособленность к прессованию (экструзии)	Качественный
K_8	Приспособленность к листовой штамповке	Качественный
K_9	Возможность формирования сложных форм	Качественный
K_{10}	Способность к пайке, сварке, склеиванию	Качественный

Эксперты при оценке руководствовались тем, что материал, используемый для изготовления радиатора, должен быть выбран с учетом его основного функционала – осуществлять теплоотвод и эффективно передавать тепловую энергию от места контакта с охлаждаемым компонентом к внешней поверхности радиатора, т.е. обладать хорошей теплопроводностью. Выбор золота или серебра для радиатора в качестве основного материала был бы неразумным для обеспечения технологичности конструкции вследствие их дороговизны и дефицитности, хотя серебро за его высокую теплопроводность иногда используют для изготовления оснований радиаторов. Для сравнения приведем соотношения цен на мировом рынке, сложившиеся на эти металлы в начале 2015 г.: алюминий – 1; медь – 2,3; серебро – 263,2; золото – 21052,6. Таким образом, выбор экспертов ограничился практически алюминием, медью и их сплавами, которые по предварительной оценке оптимально подходят для конструкции теплоотводящего элемента (табл. 2).

Таблица 2

Группа	Марка материала	Обозначение	Теплопроводность, Вт/(м · К)	Относительная стоимость (алюминий принят за 1)
Медь	<i>M1, M1p, M2, M2p, M3, M3p</i>	I_1	394	2,3
Сплав системы Cu-Ag	БрСр1	I_2	302	6,2
Сплав системы Cu-Cd	БрКд0,1	I_3	297	3,9
Алюминий	A995, A99, A98, A97, A95, A85, A8, A7, A6, A5, A35	I_4	221,5	1
Сплав системы Al-Mn	АМц	I_5	180	1,1
Сплав системы Al-Mg	АМг1	I_6	184	0,6
Сплав системы Al-Mg-Si	АД31	I_7	192	0,5
Сплав системы Al-Mg-Si	АВ	I_8	176	0,4
Сплав системы Al-Si	АК12ч, АК12пч, АК12оч, АК12ж	I_9	176	0,4

После ранжирования экспертами каждого материала по факторам, влияющим на технологичность по материалу, были найдены обобщенные средние ранги материалов по k -му фактору с использованием формулы (1) и нормированные коэффициенты технологичности (2), представленные на рис. 3.

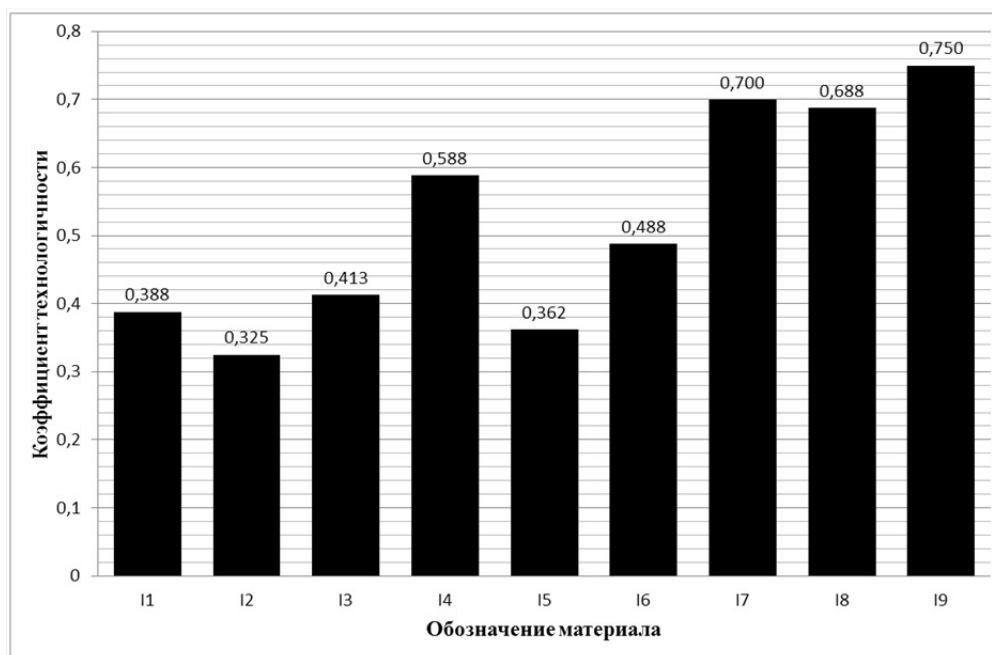


Рис. 3. Коэффициенты технологичности по материалам для радиатора

Таким образом, эксперты рекомендовали в качестве наиболее рациональных материалов для изготовления конструкции технологичного теплоотвода сплав силумин марки АК12 ($K_T = 0,750$) и сплав системы Al-Mg-Si АД31 ($K_T = 0,700$).

Обсуждение результатов

Анализ оценок экспертов по отдельным факторам позволяет сделать следующие замечания и выводы.

Казалось бы, медь имеет удельную теплопроводность ($\lambda = 394 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) почти в 1,9 раза выше, чем алюминий ($\lambda = 221,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$), и ему следует отдать предпочтение при выборе материала теплоотвода. Однако эксперты учитывали, что технологичность и эффективность радиатора зависят не только от λ материала, но и других свойств. Медь имеет большую удельную плотность – $8,94 \text{ г/см}^3$, чем алюминий ($2,7 \text{ г/см}^3$), следовательно, радиатор, изготовленный из меди, будет в 3,3 раза тяжелее своей алюминиевой копии. Это немаловажно для обеспечения миниатюризации электронной аппаратуры и уменьшения массо-габаритных характеристик блоков и модулей. Кроме того, радиатор из меди не может быть изготовлен по технологии прессования (экструзии) из-за технологических свойств этого материала. Высокая теплопроводность меди усложняет сборочно-монтажные работы с деталями из этого материала, требует концентрированного нагрева.

Медь считается одним из наиболее труднообрабатываемых материалов, и сила резания ее имеет большую величину из-за значительной площади контакта на передней поверхности инструмента. Стружка трудно поддается удалению, из-за низкой скорости резания шероховатость обработанной поверхности меди низкая [7, 8].

Чистая медь обладает небольшой прочностью и высокой пластичностью, поставляется предприятиям в виде листов холодного проката, проволоки, ленты, труб, чушек. Высокую теплопроводность и в то же время улучшенные за счет примесей прочность и твердость имеют низколегированные бронзы – кадмиевая БрКд1 с теплопроводностью $297 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ и серебряная БрСр 0,1, содержащая 0,08...0,12 % Ag, с теплопроводностью – $302 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Однако их высокая стоимость и низкая обрабатываемость не позволили экспертам присвоить им высокие ранги.

Большая часть экспертов отдала предпочтение для производства теплоотводов электронных компонентов алюминиевым сплавам. Выбор материала объясняется как низкой стоимостью, так и сравнительно высокой теплопроводностью и удовлетворительными механическими характеристиками. Только силумины из-за твердых зерен кристаллического кремния оказывают влияние на износ режущего инструмента. В принципе алюминиевые сплавы и чистый алюминий обладают хорошей обрабатываемостью при резке, нет необходимости прикладывать значительную силу.

Алюминиевые сплавы благодаря пластичности также легко поддаются экструзии, ковке, штамповке, что дает возможность изготавливать из них профили с практически неограниченным разнообразием форм поперечного сечения. Для многих сплавов алюминия основной технологией получения деталей является литье под давлением. Детали из алюминиевых сплавов легко соединяются сваркой, пайкой и склеиванием – основными способами сборки для радиаторов.

Таким образом, на стадии выбора материала заготовки конструктору важно заранее знать количественное значение обрабатываемости материала резанием. Обрабатываемость представляет собой комплексный показатель, зависящий от физико-механических и теплофизических свойств материала: прочности, твердости, ударной вязкости, относительного удлинения, коэффициента теплопроводности и др. Однако при любых условиях наиболее важным показателем обрабатываемости материала резанием является уровень допустимых скоростей резания, поскольку этот показатель в наибольшей степени влияет на производительность операции и себестоимость обработки. Считают, что лучшую обрабатываемость имеет тот материал, который при прочих равных условиях допускает более высокую скорость резания. Если для медного сплава БрАЖ9-4 (эталонная группа медных сплавов) коэффициент обрабатываемости для чернового фрезерования плоскостей и уступов составляет 2,0 по сравнению со сталью 45 [2], то для чистой меди – 4,4.

Заключение

Предложена методика определения технологичности конструкции на ранних стадиях проектирования при выборе материала. Экспериментальное исследование показало жизнеспособность и эффективность методики, которая позволяет предварительно выбрать наиболее

технологичные с точки зрения стоимости материала и методов обработки конструкции деталей. Конструктору-проектировщику изделий при выборе материала следует учесть следующие требования: соответствие материала условиям эксплуатации и выполняемым деталью функциям; учет физических, механических свойств материала; минимальную стоимость исходного материала; технологические требования приспособленности конструкции к получению из материала различными способами обработки.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – М. : Лань, 2014. – 480 с.
2. Юрков, Н. К. Технология радиоэлектронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 640 с.
3. Технология радиоэлектронных средств : учеб. пособие / А. К. Гришко, Л. А. Тюрина, М. В. Чернецов, Н. К. Юрков ; под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – 344 с.
4. Ирзаев, Г. Х. Система отбора компетентных экспертов для решения проектно-производственных задач / Г. Х. Ирзаев // Автоматизация. Современные технологии. – 2008. – № 1. – С. 40–46.
5. Ирзаев, Г. Х. Выбор количественного состава экспертной группы при оценке свойств промышленных изделий / Г. Х. Ирзаев // Автоматизация. Современные технологии. – 2010. – № 4. – С. 44–46.
6. Павлов, А. И. Система поддержки принятия решений в задачах группового выбора / А. И. Павлов, Г. С. Малтугуева, А. Ю. Юрин // Программные продукты и системы. – 2011. – № 2. – С. 54–57.
7. Петровский, А. Б. Теория принятий решений / А. Б. Петровский. – М. : Академия, 2009. – 400 с.
8. Даниленко, Б. Д. Анализ обрабатываемости медных сплавов резанием / Б. Д. Даниленко // Вестник машиностроения. – 2008. – № 3. – С. 86–87.

Ирзаев Гамид Хайбулаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий
и прикладной информатики,
Дагестанский государственный
технический университет
(367006, Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала,
Семендер, ул. Пирамидальная, д. 49)
E-mail: irzajev@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Кузина Екатерина Андреевна

студент,
Московский государственный университет
информационных технологий, радиотехники
и электроники
(107996, Россия, г. Москва, ул. Стромынка, 20)
E-mail: ketrinkuz97@mail.ru

Аннотация. Предложена методика качественной оценки технологичности детали на ранних этапах проектирования при выборе материала конструкции. Эксперты из числа специалистов предприятия непосредственным ранжированием выделенных заранее факторов, влияющих на выбор материала детали, присваивают обобщенный средний ранг каждому материалу. Этот ранг влияет на формирование показателя технологичности по каждому материалу и позволяет осуществить окончательный выбор наиболее технологичного материала для детали.

Irzaev Gamid Khaybulaevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technologies
and the applied information theory,
Daghestan State Technical University
(367006, 49 Pirovidalnaja street, Semender,
Mahachkala, Dagestan, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

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

Kuzina Ekaterina Andreevna

student,
Moscow State University of Information Technologies,
radio and electronics
(107996, 20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Abstract. A method for qualitative assessment manufacturability details early in the design when choosing the material of construction. Experts from among the specialists of the enterprise directly allocated to advance the ranking of factors affecting the choice of material items, consolidated average rank assigned to each material. Rank affects the formation of the technological index of each material, and allowed to carry out a final choice of the most tech material for details. The effectiveness of techniques experimentally confirmed expert assessment of manufacturability for heat dissipation

Результативность методики экспериментально подтверждена экспертной оценкой конструкции теплоотвода для компонентов электронных модулей. Эксперты рекомендовали в качестве наиболее рациональных материалов для изготовления теплоотвода сплав силумин марки АК12 и сплав системы Al-Mg-Si АД31.

Ключевые слова: технологичность, экспертная оценка, конструкция детали, обобщенный средний ранг, нормированный коэффициент технологичности, теплоотвод, алюминиевый сплав, медь, бронза.

components of electronic modules. The experts recommended as the most efficient materials for manufacturing the heat sink of the brand alloy silumin AK12 and an alloy of Al-Mg-Si AD31.

Key words: manufacturability, expert assessment, design details, generalized average rank, normalized ratio manufacturability, heat dissipation, aluminum alloy, copper, bronze.

УДК 658.512.26:621.38

Ирзаев, Г. Х.

Оценка технологичности конструкции детали на этапе выбора материала на примере теплоотвода для компонентов электронных модулей / Г. Х. Ирзаев, Н. К. Юрков, Е. А. Кузина // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 31–37.

О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ПРИ СОЗДАНИИ И ИССЛЕДОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА ТРЕНАЖЕРНЫХ СИСТЕМ

В. Р. Роганов, И. Ю. Семочкина, М. В. Тюрин

Авиационный тренажер (АТ) создается как комплекс технических средств, каждый из которых является системой, моделирующей поведение отдельных приборов кабинного оборудования в заданный момент времени в зависимости от положения моделей органов управления в кабине авиационного тренажера и условий полета, заданных инструктором. Отдельно следует рассматривать задачу создания вокруг кабины АТ модели окружающего пространства, воспринимаемого обучаемым как трехмерное (с возможностью визуального обучения определению расстояний до видимых моделей окружающей среды для тренировки глазомера, так же как пилот летательного аппарата (ЛА) определяет расстояние до реальных объектов в реальных условиях при реальных полетах). Основная задача АТ – прививать профессиональные навыки управления ЛА, в заданных конкретных учебных ситуациях, как при нормальных режимах полета, так и в предаварийных.

Для получения и закрепления профессиональных навыков на АТ обучаемый пилотирует модель ЛА, представляя, что он пилотирует реальный ЛА. Это чувство возникает у обучаемого за счет комплексной взаимоувязки информации, поступающей к нему от моделей приборов кабинного оборудования (называемых имитаторами¹) в зависимости от его воздействий на модели органов управления в кабине АТ.

Каждый имитатор – это аппаратно-программный комплекс, построенный с целью создания определенной модели, которая не может быть полной моделью [1]. Следовательно, АТ не может заменить реальный ЛА в процессе обучения [2] и он разрабатывается для обучения пилотирования ЛА в конкретных ситуациях [3], число которых меньше числа всех ситуаций, возникающих при пилотировании ЛА.

Качество обучения на АТ во многом зависит от качества имитатора визуальной обстановки (ИВО), который моделирует в реальном масштабе времени визуально наблюдаемую часть пространства, окружающего кабину АТ. В настоящее время экспериментально определено, что цикл смены отдельных кадров – не более 120 мс и что все типы устройств индикации (УИ), позволяющие тренировать глазомер, относятся к псевдообъемным устройствам. Термин «псевдообъемные» означает, что зрительный аппарат человека используется в процессе построения трехмерной модели визуально наблюдаемой части пространства, окружающего кабину АТ. Все люди разные, следовательно, каждый человек по-разному воспринимает трехмерную модель визуально наблюдаемой части пространства, окружающего кабину АТ.

При анализе всего комплекса АТ из разных имитаторов необходимо учитывать методику восстановления ориентации в полете, по которой проходят обучение все пилоты всех типов ЛА. Решение задачи визуального ориентирования через остекление кабины в АТ должно быть согласовано с получением пилотом информации от других имитаторов, моделирующих изображения на экране радиолокаторов, теле- и тепловизоров, а также с показаниями индикаторов отдельных приборов в кабине АТ. В реальных условиях показания индикаторов отдельных приборов согласовываются за счет предварительной юстировки. В тренажере показания индикаторов зависят и от качества моделирования видимой части внешнего виртуального пространства, и от согласования информации, получаемой обучаемым от каждого i -го имитатора Ω_i [4–7]. Формирование Ω_i

¹ Имитатор – аппаратно-программный комплекс, моделирующий в реальном масштабе времени информацию, поступающую к обучаемому.

начинается с обработки базы данных конкретной i -й подсистемы или работы j -й математической модели соответствующего агрегата АТ и заканчивается выводом информации в виде

$$A_i = f_i(\Omega_i) \quad (1),$$

(это может быть отклонение стрелки соответствующего прибора или формирование визуальной картины, или речевое сообщение бортового информатора и т.д.).

В целом обучаемый должен иметь максимально полное представление об окружающей среде S . Это возможно при совпадении получаемой информационной модели I_T от имитаторов АТ с имеющейся у обучаемого информационной моделью полета I_O , выработанной его опытом:

$$I_T = \sum_{i=1}^N f_i(A_i), \quad M \in N, \quad (2)$$

$$I_O = \sum_{j=1}^M f_O(A_j), \quad I_1 \neq I_2, \quad (3)$$

где $f_i(A_i)$ – информация, поступающая к обучаемому от i -й подсистемы тренажера в процессе его работы (N – число информационных подсистем тренажера); $f_O(A_j)$ – информация, поступающая к обучаемому от j -й подсистемы реального ЛА в процессе полета, или прогнозируемая им на основе его жизненного опыта (M – число информационных подсистем, формирующих у обучаемого его собственное представление об окружающей среде и взаимодействии ЛА с ней, $N \subset M$).

В момент времени t_k полета на тренажере S не должна искажать взаимодействие находящихся в ней моделей пассивных S_p элементов числом V (модели участков земной поверхности с инженерными сооружениями, видимые всегда) и моделей активных элементов S_a числом W (модели радиомаяков, подвижных объектов и т. д.) с моделью ЛА S_l , т.е.

$$S = \bigcup_{p=1}^V S_p \bigcup_{a=1}^W S_a \bigcup S_l \quad (4)$$

при

$$f_i(S_l) \cap f_O(S) = 1. \quad (5)$$

Учитывая, что показания приборов в кабине летчика, как правило, дублируются в каждый момент времени t_i , информация $\Omega t_i = \Omega_i(t_k)$, полученная обучаемым при считывании показаний соответствующего i -го прибора или индикатора, или наблюдаемой через остекление кабины части сцены визуализации и т.д., должна быть согласована, т.е.

$$Q_{ji} \cap Q_{iR} = 1, \quad (6)$$

где $Q_{ji} = f_i(\Omega t_i)$ – множество, описывающее допустимую область нахождения модели j -го объекта в модели внешней среды S , сформированное одним из имитаторов АТ, который сформировал Ωt_i (что соответствует показанию одного из приборов кабины); $Q_{Rj} = f_R(\Omega t_R)$ – множество, описывающее допустимую область нахождения модели этого же j -го объекта в модели внешней среды S , но сформированное другим имитатором АТ, обрабатывающим информацию Ωt_R (что соответствует показанию другого прибора кабины или имитатора визуальной обстановки).

В противном случае

$$Q_{ji} \cap Q_{iR} = 0. \quad (7)$$

При выполнении условия (7) тренажер не может быть использован для обучения. В реальных условиях бывают как отдельные моменты времени t_k , так и интервалы Δt_k , когда выполняется (7). Це-

лесообразно исключить ситуации, описываемые выражением (7), из списка учебных или использовать другие методы моделирования. Устранить ситуации, описываемые выражением (7), можно несколькими способами:

- ввести обратную связь с целью корректировки начальных условий формирования рассматриваемой информации Ωt_i ;
- задать время коррекции всех Ωt_i для приведения выражения (7) к состоянию, описываемому выражением (6);
- ограничить время обучения на тренажере, задав расчетный интервал Δt , при котором всегда выполняется условие (6);
- использовать математические модели обработки информации, обеспечивающие выполнение условия (6).

Жесткие требования реального времени (цикл обработки информации от 60 до 120 мс) [8–10], как правило, не позволяют выполнить условие (6) во время «полета» на тренажере методом полного пересчета всех необходимых параметров.

Эта задача решается за счет наполнения баз данных, разработанных в нереальном масштабе времени с одновременным согласованием занесенной в них информации по всем необходимым параметрам. При этом существует ряд закономерностей. Рассмотрим их более детально.

Жесткие требования реального времени не позволяют ни одному из существующих и разрабатываемых имитаторов АТ абсолютно точно смоделировать на тренажере показания, которые пилот ЛА получает в полете [11–15]. Но не вся информация, поступающая пилоту в полете от k -го устройства $I(k)$, необходима для обучения. Во множестве полной информации $I(k)$ существует подмножество информации $I_u(k)$, достаточной для обучения: $I_u(k) \subset I(k)$. Если k -й имитатор позволяет получить информацию $I_u(k)$, считается, что этого достаточно для целей обучения. В ряде случаев можно выделить дополнительное подмножество желаемой информации $I_g(k)$, $I_u(k) \subset I_g(k)$, которое по возможности надо получить от рассматриваемого имитатора. Присутствие $I_g(k)$ улучшает качество обучения за счет приближения желаемой информации $I_R(k)$ к полной информации $I(k)$;

$$I_R(k) = I_u(k) + I_g(k). \quad (8)$$

Вместе с тем от k -го имитатора может поступать дополнительная ложная информация $I_l(k)$ (или информация, отсутствующая в реальных условиях) и мешать процессу обучения:

$$I_l(k) \cap I(k) = 0. \quad (9)$$

Причинами появления ложной информации $I_l(k)$ могут служить как несовершенство используемых технических средств, так и заложенное в базах данных или используемых математических моделях нарушение условия, описываемого выражением (5), при сопоставлении «однородной» информации от всех имитаторов АТ.

При строгом рассмотрении любого имитатора АТ информация $I_l(k)$ присутствует всегда. Соответственно, его появление ухудшает формирование у летчика навыков пилотирования ЛА. Для снижения информации $I_l(k)$ и выполнения условия

$$I_l(k) \ll I(k) \quad (10)$$

необходимо проводить ряд мероприятий, как при разработке каждого имитатора АТ, так и при объединении их в единый комплекс. Кроме этого, при разработке методик обучения с использованием АТ также необходимо учитывать наличие информации $I_l(k)$.

В каждом конкретном случае выполнения условия, описываемого выражением (10), добиваются разными путями. Эти операции проводятся на этапе разработки тренажеров для каждого имитатора в отдельности и для совокупности имитаторов в целом. В других случаях возможно ограничение набора учебных ситуаций, а также модернизация или замена отдельных имитаторов.

В частности, при создании баз данных, в первую очередь, предложено заносить модели объектов, позволяющих выполнить условие (10). Ранжирование объектов, как правило, проводится по определенным правилам, называемым запросами. Основными характеристиками проведенного ранжирования объектов являются полнота и точность поиска требуемых объектов. Для получения полноты информации необходимо учитывать парадигматические (или родовитые) отношения между отдельными объектами, модели которых воспроизводятся разными имитаторами АТ. Парадигматические отношения устанавливаются на основании опыта разработчиков АТ. Полученная информация о парадигматических отношениях фиксируется в тезаурусе запроса.

Обработка общего списка объектов внешней среды по запросам должна помочь получить ассоциативные отношения между моделями объектов, одновременно отражаемых различными имитаторами. В дальнейшем полученные ассоциативные отношения могут быть применены вместо парадигматических отношений для уточнения информации $I_R(k)$.

Обработка списка объектов внешней среды для получения ранжированного списка может проводиться с применением систем с векторным поиском или с булевой либо булево-контекстовой логикой. В ряде случаев для этих целей можно успешно применять системы с ранжированием по методу ассоциативных отношений.

Разработка метода ранжирования сводится к нахождению первоначальной формализованной меры смысла появления данной модели конкретного объекта в модели внешней среды. В качестве меры смысла используется вероятность увеличения информации $I_R(k)$ с целью выполнения условия (10). Будем считать, что имеем формализованную процедуру обработки запроса необходимости включения модели рассматриваемого объекта в модель внешней среды. При этом считаем, что необходимость включения модели рассматриваемого объекта в модель внешней среды может быть описана терминами, соединенными булевыми или контекстными операторами.

Процедура ранжирования – это просмотр всех известных баз данных и составление списка наиболее часто встречающихся объектов. Списки можно обрабатывать, используя выраженные в специальных терминах запросы. Как правило, запросы обозначают имя конкретного объекта (озеро, дом, взлетно-посадочная полоса (ВПП) и т.п.). Для большей полноты это имя может сопровождаться прилагательным, изменяющим вес запроса (например, «основная ВПП»).

В соответствии с принятыми условиями для начала рассмотрим запрос, состоящий из единственного термина T_1 . Этот термин является именем понятия E_1 . Если термин T_1 является именем нескольких различных понятий, то в этом случае E_1 представляет собой совокупность этих понятий. Если в модель внешней среды входит термин T_1 , то это не означает, что действительно мы имеем E_1 . Будем говорить о вероятности рассмотрения понятия E_1 или о вероятности релевантности рассматриваемой модели объекта внешней среды понятию E_1 при условии, что в моделях баз данных внешней среды АТ при описании модели рассматриваемого объекта имеется термин T_1 .

Предположим, что вероятность релевантности рассматриваемой модели объекта внешней среды понятию E_1 возрастает с увеличением частоты термина T_1 при рассмотрении баз данных различных имитаторов АТ. Кроме того, вероятность релевантности рассматриваемой модели объекта внешней среды зависит также от значимости термина – имени понятия. Таким образом, вероятность релевантности рассматриваемой модели объекта внешней среды понятию E_1 зависит от частоты термина T_1 в рассматриваемых базах данных АТ и его значимости. В работах [9–11] при описании метода ранжирования для составления запросов с булевой логикой учитывается частота и значимость терминов запроса. Тогда $P(T_1)$ – вероятность релевантности модели рассматриваемого объекта внешней среды понятию E_1 равна

$$P(T_1) = 1 - \frac{A_1(N_1)}{N_1 + 1}, \quad (11)$$

где N_1 – число появлений термина в базах данных имитаторов АТ; $A_1(N_1)$ вычисляется по рекуррентной формуле, обеспечивающей ограничение его роста для терминов с малой значимостью с увеличением, в частности:

$$A_1(0) = 1, \quad A_1(1) = \frac{D_{\max} - D_1}{D_{\max} - D_{\min}}, \quad (12)$$

где $D_{\max}$ и $D_{\min}$ – соответственно, максимальная и минимальная значимость среди всех терминов, входящих в информационный фонд.

В выражениях (12) не учтены отношения между терминами. Так например, при отсутствии в базах данных имитаторов АТ термина T_1 именами понятия E_1 могут быть другие термины баз данных (что наблюдается, когда один и тот же объект может быть описан неоднократно, но в одном имитаторе он играет первостепенное значение, а в другом – второстепенное, как, например, невысокий обрывистый берег озера, практически неразличимый в обычном зрительном диапазоне, но существенный при составлении базы данных имитатора радиолокационной обстановки, так как этот обрыв «делает» озеро «читаемым» на экране радиолокатора), и вероятность $P(T_1)$ в этом случае тоже отлична от нуля. Тогда вероятность релевантности рассматриваемых моделей объекта внешней среды в базах данных АТ понятию E_1 при учете ассоциативных отношений между терминами выразится следующим образом:

$$P(T_1) = 1 - \prod_{j=1}^K [1 - P(\frac{T_i}{T_j}) P_0(T_j)], \quad (13)$$

где $P(\frac{T_i}{T_j})$ – вероятность релевантности рассматриваемых моделей объекта внешней среды в базах данных АТ понятию E_1 при условии, что именем этого понятия является термин T_j ; K – число различных терминов, описывающих модели объектов внешней среды в базах данных АТ; $P_0(T_j)$ – вероятность релевантности модели объекта внешней среды в базах данных АТ понятию E_1 при условии, что именем этого понятия является только термин T_1 ; $P_0(T_j)$ вычисляется на основании выражения (11).

При построении ассоциативных отношений определяется количественная оценка совместной встречаемости терминов. Эта оценка и может быть использована в качестве значения $P(T_i / T_j)$. Следует отметить, что выражение (13) можно использовать и в случае поиска по построенному тезаурусу. В таком тезаурусе обычно указывается только наличие парадигматических отношений между терминами, т.е. вероятность $P(T_i / T_j)$ принимает лишь значения 0 и 1. Однако парадигматическому отношению можно приписать вес из интервала (0, 1) (например, когда термин T_1 синонимичен термину T_2 с вероятностью 0,8). Этот вес и является значением $P(T_i / T_j)$ для определенного вида парадигматических отношений. Окончательное значение вероятности $P(T_i / T_j)$ может быть получено экспериментальным или расчетным путем определения относительной важности различных типов парадигматических отношений.

Рассмотрим запросы при обработке более сложных терминов, состоящих из нескольких терминов, соединенных булевыми и контекстными операторами. Это может быть дизъюнктивный запрос при оценке повторяемости в локальных базах данных в целом несвязанных никакими понятиями объектов (например, сложный запрос: «озеро» и «дом») или конъюнктивный запрос, когда в запросе указываются качественные характеристики объекта поиска (например, запрос: «основная ВПП»). Рассмотрим для начала дизъюнктивный запрос из L терминов, соединенных оператором ИЛИ.

По правилам булевой алгебры в нашем случае модель объекта внешней среды не будет релевантна дизъюнктивному запросу в том случае, если она не релевантна каждому из понятий. Поэтому вероятность релевантности баз данных запросу составит

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P(T_i)). \quad (14)$$

При использовании запроса конъюнктивного типа из L терминов, соединенных логическим оператором И, а также контекстными операторами, задающими совместную встречаемость тер-

минов в различных базах данных, модель объекта внешней среды будет ревалентна запросу в том случае, если он ревалентен каждому из понятий. Поэтому вероятность ревалентности базы данных запросу можно определить следующим образом:

$$P_c = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P(T_i)) . \quad (15)$$

Это выражение соответствует случаю независимости терминов, входящих в конъюнктивный запрос. Предположение не всегда выполняется. Однако выражение (15) может быть использовано для ранжирования объектов баз данных по убыванию их соответствия запросу. Поэтому более важно определение не точной релевантности рассматриваемой модели объекта внешней среды запросу, а относительной вероятности для различных баз данных. Из выражения (15) наибольшие вероятности будут присвоены тем моделям объектов внешней среды, в которых достаточно полно освещаются все понятия, соответствующие терминам запроса. Поэтому на практике для получения приемлемых результатов выражение (15) вполне допустимо.

Зная вероятности ревалентности моделей объектов внешней среды дизъюнктивному и конъюнктивному запросам, легко получить вероятность ревалентности моделей объектов внешней среды любому запросу, содержащему логические операторы *ИЛИ*, *И*, а также контекстные операторы. Например, вероятность релевантности моделей объектов внешней среды комбинированному конъюнктивному запросу можно выразить в виде

$$P = 1 - \prod_{i=1}^L [(1 - \prod_{j=1}^{M_i} (1 - P(T_{ij})))] . \quad (16)$$

При определении вероятности релевантности рассматриваемой базы данных запросу логический оператор *НЕ* учитывается аналогично оператору *И*. Так, при запросе $Q = T_1 \text{ НЕ } T_2$ вероятность релевантности базы данных составит

$$P = H(T_1)[1 - P(T_2)] . \quad (17)$$

Для определения значимости терминов чаще всего применяют метод оценки различительной силы. По этому методу предлагается считать хорошим объектом базы данных тот объект, который, будучи удален, делает базы данных максимально непохожими друг на друга, т.е. увеличивает различие между ними. Эта хорошо заметная различительная сила определяется как разность между средним по парным подобиям объектов в базах данных, когда объект в них присутствует [12–15].

Таким образом, проранжировав объекты всех баз данных отдельных имитаторов АТ по их значимости и встречаемости и создав единый список объектов модели внешней среды S , можем:

- избежать (8) за счет согласования информации от разных имитаторов, а также за счет проведения единой политики формирования S ;
- выбрать из имеющихся компьютерных генераторов изображений (КГИ) тот, мощность которого позволяет моделировать необходимое виртуальное пространство, необходимое для обучения действиям обучаемого в заданной ситуации;
- убрать из баз данных КГИ информацию об объектах, моделирование которых несущественно с точки зрения выполнения программы обучения.

Список литературы

1. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования / В. А. Веников. – М., 1976. – 479 с.
2. Роганов, В. Р. Методы формирования виртуальной реальности / В. Р. Роганов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2002. – 127 с.
3. Роганов, В. Р. Организация визуальных баз данных и управление компьютерными генераторами изображений имитаторов визуальной обстановки тренажеров : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Роганов В. Р. – Пенза, 1995.
4. Четвергова, М. В. Использование оптико-аппаратно-программных комплексов для обучения управления подвижными объектами / М. В. Четвергова, В. Р. Роганов, А. В. Семочкин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 174.

5. Проектирование систем виртуальной реальности с позиции системного подхода / В. Р. Роганов, М. В. Четвергова, А. В. Семочкин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 199.
6. Problem of virtual space modelling in aviation simulators / V. R. Roganov, E. A. Asmolova, A. N. Seredkin, M. V. Chetvergova, N. B. Andreeva, V. O. Filippenko // Life Science Journal. – 2014. – Т. 11, № 12. – P. 1097.
7. Capacity assessment of visual conditions imitators / V. R. Roganov, M. J. Miheev, A. N. Seredkin, V. O. Filippenko, A. V. Semochkin // Eastern European Scientific Journal. – 2014. – № 6. – P. 321–326.
8. Математические и компьютерные методы в медицине, биологии и экологии : монография / В. Р. Роганов, А. А. Казанцев, А. М. Бабич [и др.]. – Пенза : Приволжский Дом знаний ; М. : МИЭМП, 2012. – 132 с.
9. Растрин, Л. А. Математические модели обучения / Л. А. Растрин, М. Х. Эренштейн // Адаптация в системах обработки информации. – Рига : Зинайне, 1977. – 148 с.
10. Прохоров, А. В. Ранжирование документов по убыванию их смыслового соответствия запросу на основе автоматического учета построенных ассоциативных отношений / А. В. Прохоров, Н. П. Харин // Экспертные системы реального времени : материалы семинара. – М. : Центральный Российский Дом знаний, 1995. – С. 113–131.
11. Обработка информационных потоков в авиационных тренажерах / А. И. Годунов, М. В. Петухов, В. Р. Роганов [и др.] // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. – 1997. – № 2 (4). – С. 37–47.
12. Годунов, А. И. Обеспечение комплексной адекватности авиационных тренажеров / А. И. Годунов, Б. К. Кемалов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 15–24.
13. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 340.
14. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
15. Шишкин, В. В. Методика обеспечения информационной безопасности / В. В. Шишкин, Н. К. Юрков, Н. Ж. Мусин // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 9–13.

Роганов Владимир Робертович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: vladimir_roganov@mail.ru,

Семочкина Ирина Юриевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ius1961@gmail.com

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8)
E-mail: preobrazovatel@niifi.ru

Аннотация. Авиационный тренажер (АТ) создается как комплекс технических средств, каждый из которых является системой, моделирующей поведение отдельных приборов каabinного оборудования в заданный момент времени в зависимости от положе-

Roganov Vladimir Robertovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of information technology and systems,
Penza State University of Technology
(440039, 1a/11 Baydukov avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

Semochkina Irina Yurievna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technology and systems,
Penza State University of Technology
(440039, 1a/11 Baydukov avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

Tyurin Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior staff scientist,
Scientific Research Institute of Physical Measurement
(440026, 8 Volodarsky street, Penza, Russia)

Abstract. Flight simulator (FS) is created as a set of technical tools, each of which is a system for simulating the behavior of individual devices cabin equipment at a given time, depending on the position of the model controls in the cockpit flight simulator and flight conditions

ния моделей органов управления в кабине авиационного тренажера и условий полета, заданных инструктором. Обучаемый при полетах на АТ приобретает профессиональные навыки управления летательным аппаратом (ЛА) в заданных учебных ситуациях. Как и любая модель, АТ не может заменить обучение пилотов на летательном аппарате. Кроме этого, при разработке АТ необходимо проводить согласование информации, получаемой обучаемым от каждого имитатора в каждый момент времени, для уменьшения ложных навыков управления летательным аппаратом в конкретной учебной ситуации. В статье приводится математический аппарат, позволяющий оценить вклад отдельного имитатора в создание общей модели перемещения АТ в виртуальном пространстве.

Ключевые слова: информационные модели, виртуальное пространство, имитатор, авиационный тренажер.

specified instructor. Trained at flights to the FS acquires skills in the management of the aircraft specified educational situations. As with any model, the FS can not replace the pilot training on the aircraft. In addition, the development of antibodies necessary to carry out coordination of data obtained from each simulator trained at any one time to reduce false skills of aircraft control in each learning situation. The article provides a mathematical tool for assessing the contribution of a single simulator to create a common model of the FS movement in virtual space.

Key words: information models, virtual space, simulator, flight simulator.

УДК 51-74, 004.047

Роганов, В. Р.

О необходимости учета комплексного подхода при создании и исследовании информационных моделей виртуального пространства тренажерных систем / В. Р. Роганов, И. Ю. Семочкина, М. В. Тюрин // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 38–45.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ,
ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ
БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ,
ВЫЗВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА**

А. В. Костин, М. Н. Пиганов, В. С. Бозриков

Современный мир отличается стремительным ростом структурной сложности технических систем, ростом их размерности, усложняющимися условиями эксплуатации, что влечет за собой рост требований по безотказности выполняемых функций. Возрастает роль методов и средств контроля и диагностики как технических средств, так программного обеспечения [1]. Для оценки надежности сложных электронных систем используют макромодели. Макромодель представляет собой функцию, аргументами которой являются уровень качества, внешних воздействующих факторов, электрическая нагрузка и температура окружающей среды [2]. Однако для космической техники разработка таких макромоделей вызывает затруднения.

Космическая техника развивается в сторону увеличения срока активного существования, расширения функциональных возможностей, снижения габаритов и массы. Такая тенденция привела к необходимости применения полупроводниковых приборов с высоким быстродействием. В отличие от электромагнитных реле, программных механизмов и полупроводниковых приборов с низким быстродействием они более чувствительны к помехам, вызванным различными явлениями (как природными, так и антропогенного характера). Одним из таких явлений природы является электризация космического аппарата (КА). В результате электризации неметаллизированные элементы конструкции заряжаются таким образом, что между ними образуются разности потенциалов [2–6]. Эти разности потенциалов достигают значений 20 кВ и выше [5]. Последнее приводит к возникновению электростатических разрядов (ЭСР). ЭСР порождают импульсное электромагнитное поле (ЭМП), которое воздействует как на бортовую кабельную сеть (БКС), так и на бортовую аппаратуру (БА), вызывая наводки. Наводки могут привести не только к сбоям, но и к необратимым отказам. Необратимый отказ БА может привести к потере КА.

В настоящее время для определения необходимости и достаточности принятых мер по защите бортовой аппаратуры космических аппаратов от факторов электростатического разряда на этапе ее проектирования применяется теоретическая оценка [7]. Для подтверждения устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к факторам электростатического разряда проводятся наземные отработочные испытания [8].

Исследованию помех, наведенных в БКС, посвящено очень много научных работ. Исследованию помех, наведенных в цепях БА КА, посвящено гораздо меньше научных работ. Настоящая работа посвящена разработке методики экспериментального исследования пагубного влияния помех, наведенных в цепях БА КА, а также оценке свойств экранирующих элементов, снижающих это влияние.

Для проведения эксперимента использовался специально изготовленный макет. Макет представлял собой один типовой блок в виде рамки, закрытый сверху крышкой. Блок был установлен на основание. Общий вид макета приведен на рис. 1. Посередине рамки находится пластина (см. рис. 1), на которой в реальных приборах располагаются печатные платы, электрорадиоизделия (ЭРИ) и жгуты. Пластина является единым целым с рамкой. В макете на эту пластину были уложены провода, с помощью которых имитировались цепи БА КА. На нее также были установлены имитаторы заполнения прибора, макеты ЭРИ и плат, а также коммутатор (назначение которого указано ниже). Пластина не являлась сплошной, а имела множество отверстий различной формы и размеров. Рамка, крышка и основания были изготовлены из сплава АМгб.

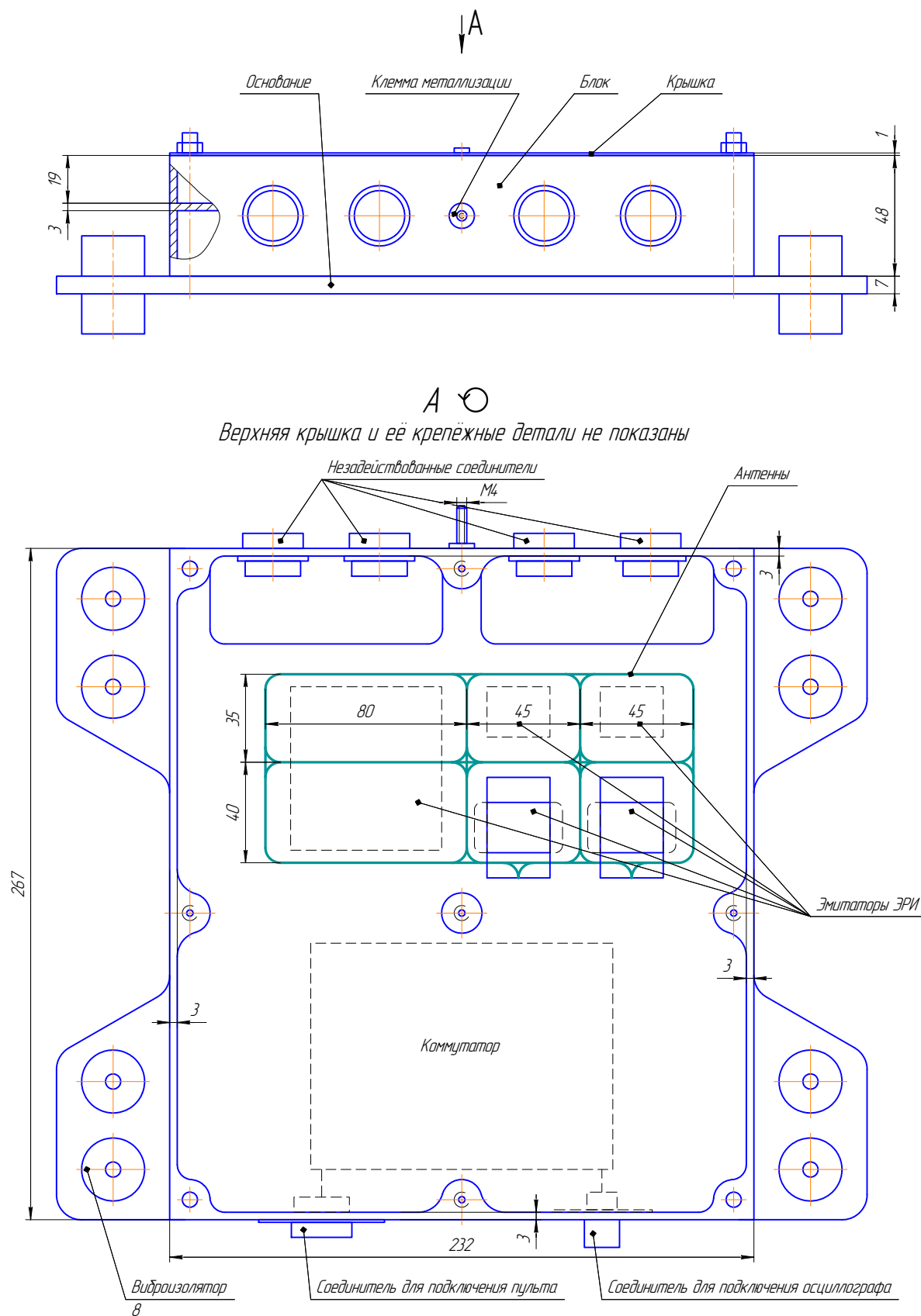


Рис. 1. Общий вид макета

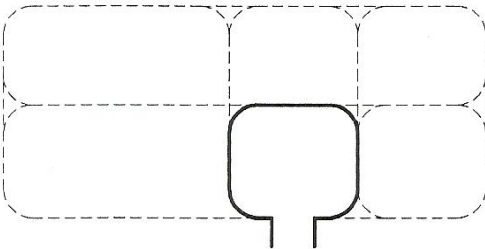
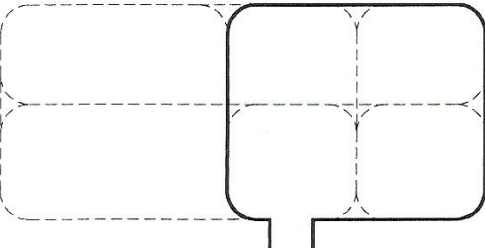
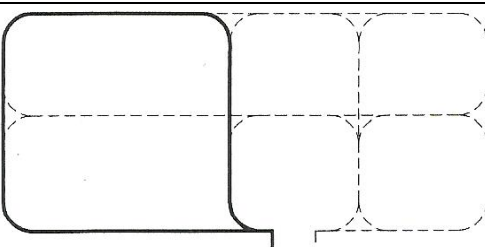
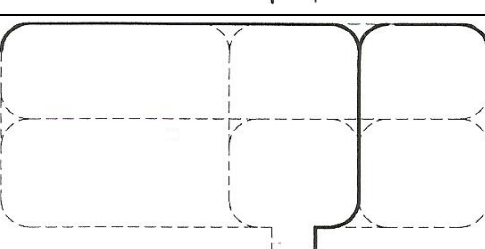
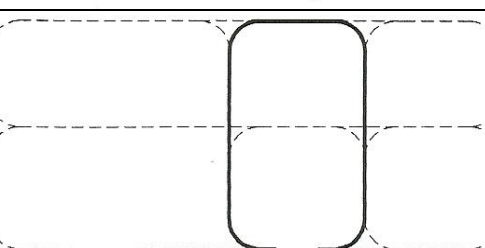
Провода внутри макета представляют собой антенны. Имеются рамочные и вибраторные антенны (приемники магнитного и электрического поля соответственно). Антенны подключаются

к высокочастотному соединителю со значением волнового сопротивления 50 Ом через коммутатор, каждая по отдельности. Коммутатор выполнен на основе электромагнитных реле. Им управлял оператор, производивший измерения через специальный пульт, который подключался к макету. Через высокочастотный соединитель к антеннам подключался цифровой осциллограф с помощью специального кабеля. Значение волнового сопротивления кабеля 50 Ом. Длина кабеля составляла 1 м. Для осциллографирования использовался прибор DPO 4104 фирмы Tektronix со значением полосы пропускания 1 ГГц. Схема установки для измерения напряжения помех в антеннах представлена на рис. 2.

В макете было двенадцать антенн. Был получен огромный массив данных. Привести его в настоящей статье не представляется возможным. Рассмотрим только пять антенн из двенадцати. Конфигурации рассматриваемых антенн приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конфигурации рассматриваемых антенн

Номер антенны	Конфигурация антенны	Тип антенны
1		Рамочная
2		Рамочная
3		Рамочная
4		Вибраторная
5		Рамочная

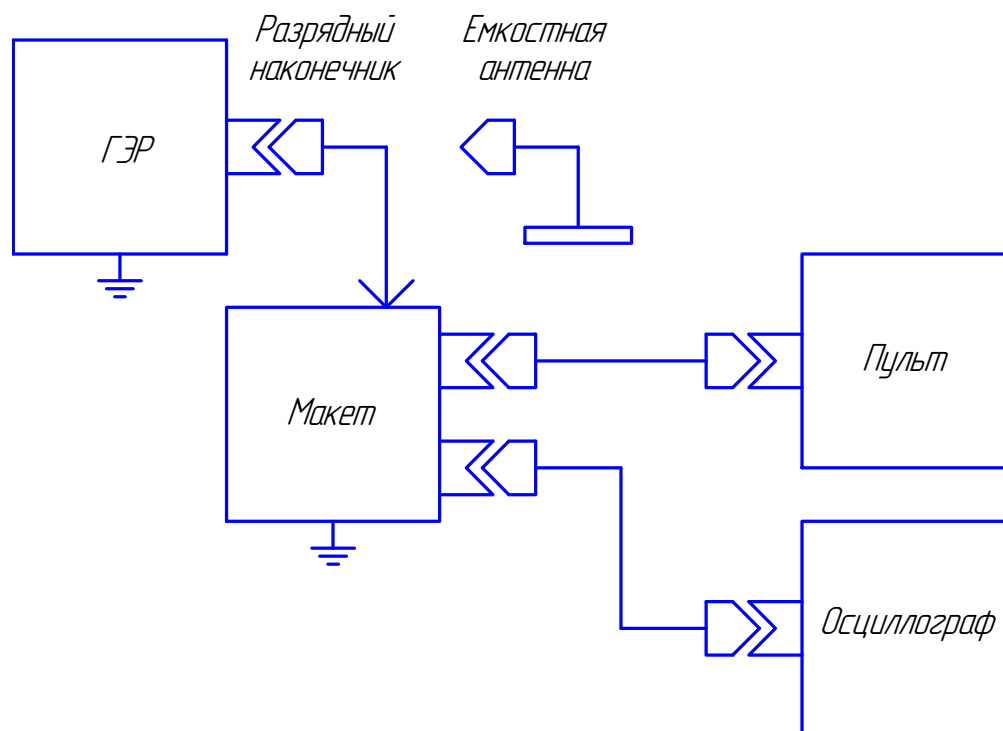


Рис. 2. Схема установки

Поле ЭСР создавалось специальным генератором электростатического разряда (ГЭР). Форма импульса создаваемого ГЭР представлена на рис. 3. Значение длительности фронта разрядного импульса составляет 13,8 нс. Значение длительности импульса по уровню 0,5 составляет 117,9 нс.

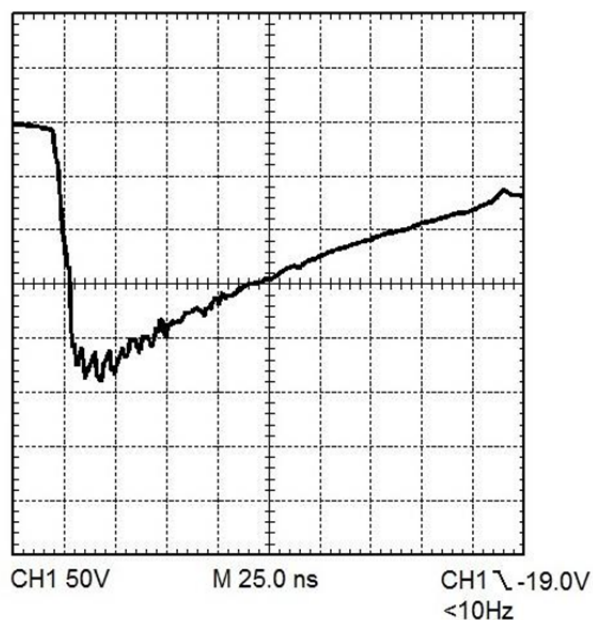


Рис. 3. Осциллограмма импульса тока ГЭР

Таблица 2

Значения амплитуд импульсов при воздействии разрядным наконечником

Номер антенны	1	2	3	4	5
Значение амплитуды импульса в антенне без нагрузки, В	170	300	130	180	130
Значение амплитуды импульса в антенне с нагрузкой, В	120	120	90	110	95

Таблица 3

Значения амплитуд импульсов при воздействии емкостной антенны

Номер антенны	1	2	3	4	5
Значение амплитуды импульса в антенне без нагрузки, В	80	100	130	96	135
Значение амплитуды импульса в антенне с нагрузкой, В	92	92	96	96	100

На макет воздействовали полем, созданным емкостной антенной и разрядным наконечником из комплекта ГЭР. Экспериментально было выявлено, что такие воздействия ЭСР вызывают самые большие помехи. Макет был установлен на пластину из АМгб. Закрепление производилось винтами через виброизоляторы, входящие в состав макета. Такой способ установки применяется достаточно часто для БА КА. Цель его – защита БА от механических воздействий. Макет металлизировался к пластине через клемму металлизации (см. рис. 1) с помощью перемычки. Сопротивление цепи металлизации не превышало 2 мОм (согласно ГОСТ 19005-81). Указанные виброизоляторы изготовлены из металла и являются проводниками. Можно сказать, что макет был дополнительно металлизирован в точках закрепления.

Заземляющий провод ГЭР был подключен к пластине. Пластина была заземлена в двух точках. Антенна располагалась напротив незадействованных соединителей. Плоскость антенны располагалась параллельно плоскости панели. Значение расстояния между антенной и верхней крышкой макета 30 мм. При измерении применялось усреднение по 32 периодам. Измерения производились при воздействии импульса ЭСР с амплитудой напряжения 20 кВ.

В результате экспериментов были получены осциллограммы напряжения в антеннах в условиях воздействия ЭМП, вызванного ЭСР. Поскольку все осциллограммы даже для рассматриваемых антенн привести в настоящей статье не представляется возможным, то ограничимся лишь типовыми, а для остальных укажем только амплитуды импульсов напряжения. На рис. 4–7 представлены осциллограммы импульсов напряжения, наведенных в приемной антенне 1. В табл. 2 и 3 представлены значения амплитуд импульсов напряжения, наведенных в рассматриваемых антеннах. Если сравнивать рисунки и таблицы, то можно увидеть впоследствии, что амплитуда импульсов в сто раз больше. Это из-за того, что кабель, соединяющий макет и осциллограф подключался к последнему через делитель, уменьшающий напряжение сигнала в сто раз.

Анализируя результаты, можно сделать ряд выводов. Во-первых, под действием ЭМП ЭСР в цепях БА КА могут наводиться импульсы напряжения существенной величины. Такие импульсы могут привести не только к ложному переключению ключей интегральных схем, но и необратимому отказу. Таким образом, существует реальная опасность, вызванная воздействием ЭМП ЭСР на БА КА. Во-вторых, нагрузка, включенная в цепи БА КА, существенно влияет на напряжение помехи и даже его форму.

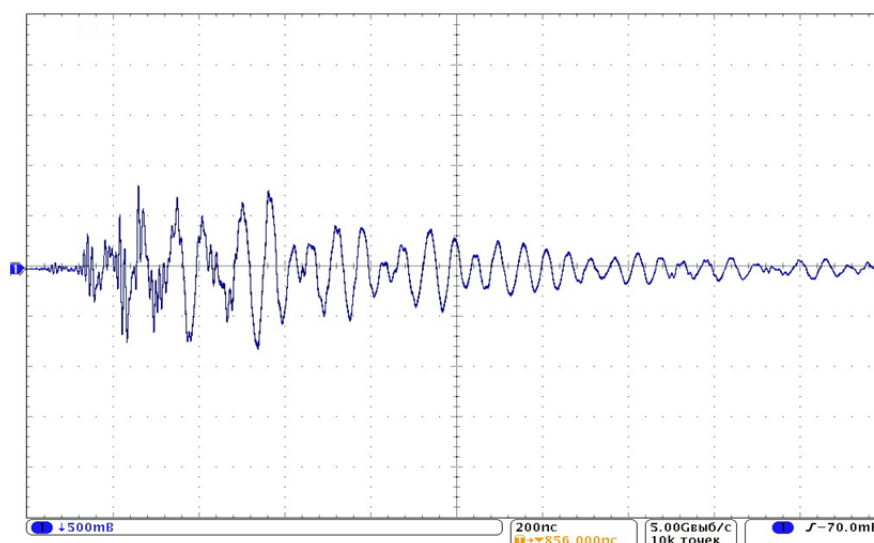


Рис. 4. Осциллограмма импульса напряжения, вызванного воздействием поля емкостной антенны (приемная антенна без нагрузки)

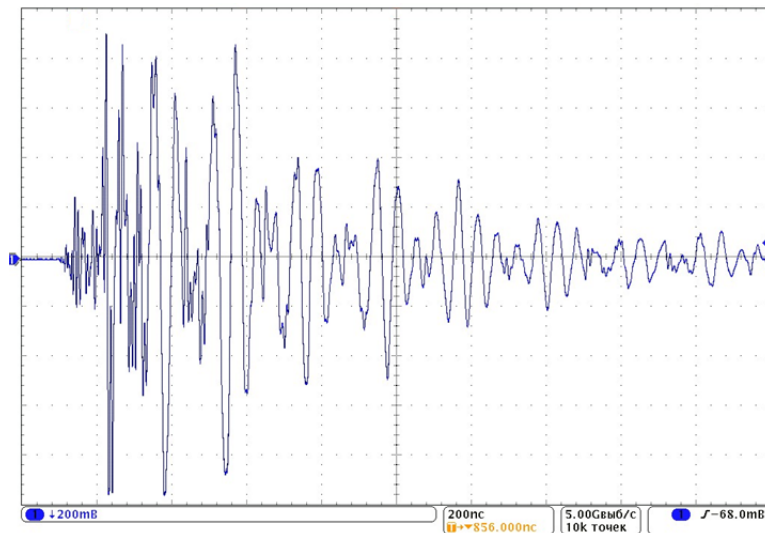


Рис. 5. Осциллограмма импульса напряжения, вызванного воздействием поля емкостной антенны (приемная антенна с нагрузкой)

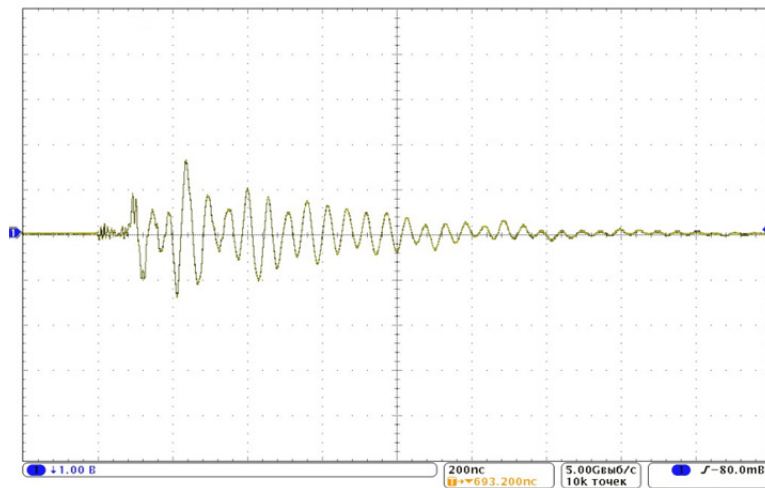


Рис. 6. Осциллограмма импульса напряжения, вызванного воздействием поля, созданного разрядным наконечником (приемная антенна без нагрузки)

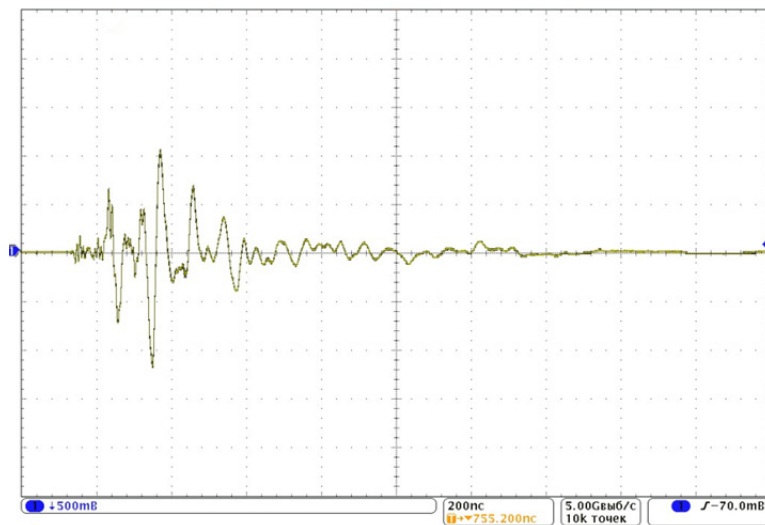


Рис. 7. Осциллограмма импульса напряжения, вызванного воздействием поля, созданного разрядным наконечником (приемная антенна с нагрузкой)

Моделью холостого хода может служить цепь, нагруженная на функциональный узел с большим входным сопротивлением, или интегральную схему со входом в высокоимпедансном состоянии. Нагрузка в основном снижает амплитуду импульса напряжения помехи. Это связано с шунтированием выхода приемной антенны. Вообще, осциллограммы импульсов напряжения представляют собой сложный, затухающий колебательный процесс. Скорее всего он является результатом свободных колебаний в сложной резонансной системе, состоящей как из емкости, индуктивности и активного сопротивления антенны, коммутатора, кабеля, делителя и осциллографа (измерительного тракта), так и тех же параметров самого корпуса, как сложного объемного резонатора.

Наконец, сравнивая напряжения в антеннах, можно сказать, что не во всех рамочных антеннах с большей площадью амплитуда напряжения больше, хотя ЭДС, наводимая в токовом контуре, пропорциональна магнитному потоку через площадь этой рамки. Но силовые линии магнитного поля, пронизывающие токовый контур, не везде могут быть сонаправленными. В некоторых местах они могут быть направлены противоположно. Магнитный поток через больший контур, охватывающий такие зоны, может быть меньше магнитного потока через меньший контур, охватывающий зоны с более однородным полем. Таким образом, поле внутри БА КА при воздействии ЭСР сильно неоднородно.

Для оценки экранирующих свойств экранов использовали такой параметр как эффективность экранирования. Эффективность экранирования экрана есть отношение напряженностей поля (электрического или магнитного) в защищаемой области пространства при отсутствии экрана и при наличии его [9]. ЭДС помехи, наведенной в рамочной антенне, прямо пропорциональна напряженности магнитного поля

$$e = -\frac{d}{dt}\mu_0 \int_S \vec{H} d\vec{S} \approx -\mu_0 \frac{\sum_{i=1}^N H_{\perp i} S_i}{\Delta t}, \quad (1)$$

где t – время; μ_0 – магнитная постоянная; S – площадка, ограниченная контуром (рамочной антенной); $\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $H_{\perp i}$ – нормальная составляющая (относительно малой площадки S_i) вектора напряженности магнитного поля в пределах i -й малой площадки; N – число площадок.

Считается, что в пределах малой площадки нормальная составляющая магнитного поля не меняется. Запишем (1) для той же антенны, но в свободном пространстве, без экрана

$$e_0 = -\frac{d}{dt}\mu_0 \int_S \vec{H}_0 d\vec{S} \approx -\mu_0 \frac{\sum_{i=1}^N H_{0\perp i} S_i}{\Delta t}. \quad (2)$$

Разделив (2) на (1), получим

$$\frac{e_0}{e} \approx \sum_{i=1}^N \frac{H_{0\perp i}}{H_{\perp i}}. \quad (3)$$

Предположим, что ЭМП, вызванное ЭСР внутри прибора, не зависит от координат, а равно некоторому усредненному значению по всему объему. Аналогично для поля в тех же точках, но вне корпуса. Тогда выражение (3) можно записать

$$\frac{e_0}{e} \approx \frac{\bar{H}_{0\perp i}}{\bar{H}_{\perp i}}. \quad (4)$$

Прологарифмировав и умножив выражение (4) на 20, получим

$$\bar{\Xi} = 20 \lg \frac{e_0}{e} \approx 20 \lg \frac{\bar{H}_{0\perp i}}{\bar{H}_{\perp i}}. \quad (5)$$

Выражение (5) можно назвать средней эффективностью экранирования. Величина очень приближенная и подходит только для грубой оценки. Для более точной оценки необходимо расставить множество маленьких антенн по всему объему корпуса. Это сделать весьма проблематично. Поэтому для оценки экранирующих свойств корпусов будем использовать среднюю эффективность экранирования.

Если форма сигнала ЭДС помехи в антенне не меняется при проведении разных экспериментов, то среднюю эффективность экранирования можно рассматривать как отношение амплитуд полученных импульсов.

Аналогичные математические преобразования можно сделать и для электрического поля. Вообще емкостная антенна в ближней зоне создает преимущественно электрическое поле, но магнитная составляющая также присутствует. Рамочные же антенны являются магнитными.

В результате эксперимента была получена осциллограмма, у которой хотя период колебаний изменился, стал больше, амплитуда колебания практически осталась на прежнем уровне. Это говорит о том, что корпус БА КА не обладает экранирующими свойствами, необходимыми для защиты от ЭМП, вызванного ЭСР. Можно предположить, что более высокая частота колебаний помех, полученных в предыдущих опытах, является следствием влияния корпуса, который вносит реактивное сопротивление в контур антенны.

При проведении таких экспериментов остро встает проблема снижения помех в измерительном тракте (кабеле и осциллографе). Для этого был применен экранированный кабель, а осциллограф располагался максимально далеко от ГЭР. Кроме того ГЭР и осциллограф были подключены к разным точкам заземления. Для анализа влияния помех в измерительном тракте на результаты измерения были измерены наводки в кабеле и осциллографе. Для этого кабель был отключен от макета, а воздействие на макет продолжалось. Значения амплитуды ЭДС помех, наведенных в кабеле и осциллографе, не превышала 120 мВ, что значительно ниже (на порядок) наводок в антенне макета. Это позволяет сделать вывод, что величины (уровни) помех в измерительном тракте не сильно влияют на результаты эксперимента.

Таким образом, корпус БА КА не выполняет экранирующих функций в части защиты от ЭМП ЭСР. Наиболее вероятной причиной этого являются многочисленные неоднородности в корпусе: отверстия, щели, плохой контакт между деталями корпуса. В работе [9] экспериментально подтверждено пагубное влияние на эффективность экранирования высокого сопротивления между деталями экрана. Попытки частного решения проблемы, как, например, закрывать незадействованные соединители электропроводящими крышками также не дают результата.

Таким образом, чтобы превратить корпус БА КА в электромагнитный экран необходимо исключить все неоднородности, что сделать весьма проблематично (дорого, трудоемко, неремонтопригодно); кроме того, такое решение может привести к увеличению массы. По этой причине для снижения помех, вызванных ЭСР, лучше всего использовать другие методы, например, рациональную трассировку печатных плат и раскладку жгутов. Однако защита двумя слоями металлизированной ткани показала увеличение эффективности экранирования. О преимуществах металлизированных тканей и возможности их использования для защиты от ЭМП, вызванного ЭСР, говорится также в работах [10, 11]. Это позволяет говорить о том, что маты экранно-вакуумной теплоизоляции, в которые входят слои этой ткани, могут усилить защиту от ЭМП ЭСР, т.е. наряду с выполнением основной функции – теплоизоляции – выполнять дополнительную функцию – защиты от ЭМП, вызванного ЭСР. Таким образом, обеспечивается защита без дополнительных затрат.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. Риски отказов сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 18–24.
2. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
3. NASA-HDBK-4002A Mitigating in-space charging effects guideline, NASA, 2011.
4. Новиков, Л. С. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой : учеб. пособие // Л. С. Новиков. – М. : Университетская книга, 2006. – 120 с.

5. Соколов, А. Б. Обеспечение стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов : дис. ... д-ра тех. наук / А. Б. Соколов. – М. : МИЭМ, 2009.
6. Костин, А. В. Влияние перегородок внутри электромагнитных экранов на эффективность экранирования бортовой аппаратуры космических аппаратов от электромагнитного поля, вызванного электростатическим разрядом / А. В. Костин, М. Н. Пиганов // Сборник научных трудов Sworld : материалы междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2014». – Одесса : Куприенко С. В., 2014. – Т. 9, Вып. 1. – С. 66–72.
7. Костин, А. В. Расчет помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электростатическими разрядами / А. В. Костин, М. Н. Пиганов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 4 (5). – С. 1376–1379.
8. Костин, А. В. Рекомендации по проведению испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к факторам электростатического разряда / А. В. Костин, М. Н. Пиганов // Сборник научных трудов Sworld : материалы междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2012». – Одесса : Куприенко С. В., 2012. – Т. 5, Вып. 2. – С. 74–78.
9. Шапиро, Д. Н. Электромагнитное экранирование : науч. издание / Д. Н. Шапиро. – Долгопрудный : Интеллект, 2010. – 120 с.
10. Кириллов, В. Ю. Зависимость эффективности экранирования кабелей от переходного сопротивления при воздействии электростатического разряда / В. Ю. Кириллов, М. В. Марченко // Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. – № 1 (40). – С. 10–14.
11. Кирилов, В. Ю. Исследование эффективности экранирования гибких материалов при воздействии импульсных излучаемых помех, создаваемых электростатическими разрядами / В. Ю. Кирилов, М. М. Томилин // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 2 (33). – С. 65–66.

Костин Алексей Владимирович

кандидат технических наук,
начальник отдела конструирования
бортовой радиоэлектронной аппаратуры,
Ракетно-космический центр «Прогресс»
(443009, Россия, г. Самара, ул. Земеца, 18)
E-mail: mail@samspace.ru

Пиганов Михаил Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и технологии
электронных систем и устройств,
Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: piganov@ssau.ru

Бозриков Вадим Сергеевич

аспирант,
Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Аннотация. В статье приводится описание эксперимента по измерению помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электромагнитным полем электростатического разряда. Приводятся результаты этого эксперимента. Также исследовались защитные свойства различных методов повышения эффективности экранирования. Сформулированы некоторые рекомендации разработчикам бортовой аппаратуры космических аппаратов. По результатам эксперимента сделаны выводы.

Kostin Aleksey Vladimirovich

candidate of technical sciences,
head of sub-department of construction board
radioelectronic equipment,
Space Rocket Centre «Progress»
(443009, 18 Zemetsa street, Samara, Russia)

Piganov Mikhail Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design and technology
of electronic systems and devices,
Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moscow highway, Samara, Russia)

Bozrikov Vadim Sergeevich

postgraduate student,
Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moscow highway, Samara, Russia)

Abstract. The article describes the experiment to calculate the noise in circuits onboard equipment spacecraft caused by the electromagnetic field of electrostatic discharge. The results of this experiment are given. Also investigated the protective properties of the various methods to increase the efficiency of shielding. Some of the recommendations designers onboard equipment spacecraft formulated. The conclusions of experiment result are given.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, космический аппарат, электромагнитное поле, помеха, электростатический разряд, осциллограммы, макет.

Key words: onboard equipment, spacecraft, electromagnetic field, noise, electrostatic discharge, oscillograms, model.

УДК 621.78:621.311:621.317.1:629.7.05

Костин, А. В.

Экспериментальное исследование, измерение и анализ помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электромагнитным полем электростатического разряда / А. В. Костин, М. Н. Пиганов, В. С. Бозриков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 46–55.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621.315.61

К ПРОБЛЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ДОМЕНОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ

А. Т. Богорош, С. А. Воронов, А. Г. Шайко-Шайковский,
С. В. Билык, Е. Н. Тимофеева, Д. З. Перчик

Введение

Процесс образования домена под действием электрического поля, созданного внешним наноисточником и внутренними микроскопическими дефектами, рассмотрен в рамках термодинамического подхода в работе [1], где избыточная свободная энергия, возникающая при образовании домена, имеет вид

$$\begin{aligned}\Phi(r, l, y_0, U) &= \Phi_S(r, l) + \Phi_D(r, l) + \Phi_U(r, l, y_0, U) + \Phi_d(r, l, y_0), \\ \Phi_U(r, l, y_0, U) &= -2P_S \int_V d\mathbf{x} E_3^q(\mathbf{x}) \approx -\frac{4\pi U P_S d r^2 l / \gamma}{\left(\sqrt{r^2 + d^2 + y_0^2} + d\right) \left(\sqrt{r^2 + d^2 + y_0^2} + d + l / \gamma\right)}, \\ \Phi_d &= -2P_S \int_V d\mathbf{x} E_3^d(\mathbf{x}) \approx -2\pi r_d^2 h_d P_S E_S \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{h_d}\right)\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r_d^2}\right)\right) \exp\left(-\frac{(x_{01} - y_0)^2}{r_d^2}\right),\end{aligned}\quad (1)$$

где Φ_S – поверхностная энергия доменной стенки, пропорциональна плотности поверхностной энергии ψ_S и площади поверхности домена S ; U – электрическое напряжение, приложенное к источнику, который моделируется эффективным зарядом Q , который находится на расстоянии d над поверхностью сегнетоэлектрика; V – объем домена; r – радиус; l – длина домена; y_0 – положение оси домена от начала координат Q ; Φ_D – энергия поля деполяризации, рассчитана при условии полного экранирования спонтанной поляризации, когда на поверхности сегнетоэлектрика присутствует экранирующий заряд или отсутствующий диэлектрический слой между проводящим источником и поверхностью; Φ_U – энергия взаимодействия домена с внешним электрическим полем $E^q(\mathbf{x})$; Φ_d – энергия взаимодействия домена с электрическим полем дефектов $E^d(\mathbf{x})$. Как правило, поля поверхностных дефектов хорошо локализованы [2, 3], поэтому поле $E^d(\mathbf{x})$ может быть разложено по гауссовскому базису, а дальнейшее теоретическое рассмотрение сосредоточено на влиянии поверхностного дефекта, ближайшего до источника Q , который образует гауссово электрическое поле $E_3^d(\mathbf{x}) \cong E_S \exp\left(-\left((x - x_{01})^2 + x_2^2\right)/r_d^2 - x_3/h_d\right)$ с характерной шириной распре-

деления r_d и глубиной проникновения $h_d \ll r_d$. Максимум поля дефекта располагается в точке $\mathbf{x}_0 = \{x_{01}, 0, 0\}$ относительно проекции Q' . Приведенная модель отражает процесс зарождения домена вблизи дефекта под действием гауссовского электрического поля. Вместе с тем на зарождение домена вблизи дефекта действует изменение температуры и концентрации вдоль поверхности, что не учитывает модель [1]. Поэтому дополнительно рассмотрены пространственные распределения температуры T и концентрации C движущегося со скоростью u зонда электронного микроскопа при сканировании поверхности сегнетоэлектрика

$$u = D(C_1 - C_0)/x, \quad (2)$$

где C_1 , C_0 – концентрация пресыщения и насыщения среды у поверхности; x – путь диффундирования; D – коэффициент диффузии, который можно определить из уравнения Эйнштейна:

$$D = kT/\eta, \quad (3)$$

здесь η , k – вязкость среды и константа скорости реакции.

Данные о методике исследования

Рассмотрим пространственное распределение температуры T и концентрации C вдоль грани кристалла, растущей со скоростью.

Пусть среда имеет температуру

$$T_0 = LC_0/pc, \quad (4)$$

где L – тепловой эффект реакции; p , c – плотность и теплоемкость среды, а грань кристалла во время экзотермической реакции роста – более высокую температуру T_1 .

Если эффективная константа скорости реакции k не зависит от температуры, то уменьшение концентрации можно записать в виде

$$\frac{dC_0}{dt} = \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{E}{RT}\right] \sum_{i=1}^N C_i, \quad (5)$$

где E – энергия активации; R – газовая постоянная; $\sum_{i=1}^N C_i$ – сумма концентраций всех N веществ, участвующих в реакции.

Однако поскольку реакция экзотермическая и теплота выделяется в процессе присоединения молекул, то температура будет повышаться пропорционально скорости падения концентрации:

$$\rho C \frac{dT}{dt} = \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{E}{RT}\right] L \sum_{i=1}^N C_i. \quad (6)$$

Поэтому температура повышается пропорционально количеству вещества, осевшего на растущей грани:

$$T = T_0 + L(C_1 - C_0) / pc. \quad (7)$$

При этом величина, пропорциональная скорости реакции $|dC/dt|$ (кривая 6), имеет резкий максимум; вначале скорость реакции мала, поскольку температура незначительна, а в конце реакции, по закону Фика–Нернста, она стремится к нулю вследствие падения концентрации.

Таким образом, если температура поверхности T_1 равна T_0 по уравнению (3), то она равна температуре, до которой среда нагрелась бы и сама. Поэтому вначале слой поверхности начинает нагреваться и изотермически нагревает прилегающий слой. Зона подогрева со временем растет. В нагретом слое начинается реакция, вследствие чего температура может кое-где даже превысить адиабатическую температуру T_1 . Этот скачок температуры (неустойчивость системы) может возникнуть, если слой завихряется (например, аналогично турбулентному вихрю [4, 5], возникающему при физическом воздействии на среду потоком электронов).

В дальнейшем с течением времени будут нагреваться слои поверхности, находящиеся на достаточном расстоянии от кончика кантивелера. При распределении температуры вглубь в по-

следующие моменты времени могут наблюдать волновые процессы. Волна возникает у кончика зонда и движется в слой поверхности от фронта изотермы, при этом концентрация теплового потока от домена и скорость отражения от дефекта резко падают непосредственно у фронта двух изотерм. Теплота прореагировавших слоев проникает в холодные области постепенно затухая. При этом каждый макрообъем слоя вначале забирает энергию от соседних, прореагировавших микрослоев, а затем отдает такое же количество теплоты более холодному микрослою. Таким образом, волна кристаллизации, зародившись у острия зонда, перемещается самостоятельно в объем сегнетоэлектрика, выделяя $LC_0/\rho c$ энергии, и температура в волне равна T_1 .

Если выберем систему координат, связанную с фронтом такой волны, тогда, с одной стороны, во фронт будет поступать холодный микрослой со скоростью u , с другой стороны – выходить, плотности их принять равными, то фронт волны будет двигаться также со скоростью u и разность концентраций C в двух соседних сечениях $x + dx$ и x можно описать кинетическим уравнением

$$u[C(x + dx) - C(x)] = -kC. \quad (8)$$

Левая часть уравнения (8) выражает объем сегнетоэлектрика, прореагировавшего в единицу времени в рассматриваемом слое. Предполагая C функцией периода 2π по Θ , запишем ее значение в виде

$$C = \sum_{m=-1}^I \exp[im\theta] f_m \left(x, \varphi, u, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots \right), \quad (9)$$

что соответствует описанию концентрации по сечению струи в турбулентном вихре [6]. Здесь $(-I)$ – потеря тепла (охлаждение, вторичная эмиссия электронов); $(+I)$ – подогрев слоя поверхности; f_m – целые рациональные функции своих аргументов, достаточно гладкие, т.е. непрерывно дифференцируемые по x на интервале $(0, L)$.

В математической постановке задачи отыскание неизвестной функции u (что соответствует $\frac{dC}{dt}$) состоит в решении квазилинейной краевой задачи для уравнения

$$\frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - b^2 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} - ab^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \in C \left(\varphi, \Theta, x, u, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots \right) \quad (10)$$

типа резонансного случая при $\Theta \neq 0$ с линейными однородными краевыми условиями

$$L(u, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots)|_{x=C} = 0, C \in (0, L). \quad (11)$$

Допустим, что имеет место резонансное соотношение с учетом атомной шероховатости в виде

$$\Omega_n \equiv b\lambda_n = pq^{-1}\gamma + e\sigma, \quad (12)$$

где b, p, λ_n – коэффициенты квантово-механической делокализации точечных дефектов поверхности квантового кристалла, пропорциональности и теплопроводности среды; γ, e, σ – коэффициент кинематической вязкости, параметры амплитуды волны и расстройки частоты, и что нет равновесия в системе, т.е.

$$n_j \Omega_j + n_k \Omega_k \neq 0, j \neq k. \quad (13)$$

При $e = 0$ краевая задача (10)–(11) имеет двухпараметрическое семейство кривых (решений):

$$u_{on}(x, t) = a_n x_n(x) \cos(\Omega_n t + \psi_n), n = 1, 2, \dots, \quad (14)$$

где $\Omega_n = b\lambda_n$; $x_n(x)$ – собственные функции краевой задачи Штурма–Лиувилля,

$$X''(x) + \lambda^2 X(x) = 0, L(X, \frac{\partial x(x)}{\partial x}, \dots)|_{x=C} = 0, C \in (0, L), \quad (15)$$

соответствующих собственному значению λ_n причем функции $x_n(x)$ попарно ортогональны на интервале $(0, L)$; a_n, ψ_n – постоянные.

Применяя асимптотический метод малого параметра, решение квазилинейной краевой задачи (10)–(11) будем искать в виде разложения

$$u(x, t) = aX_n(x)\cos\varphi + eu_1(x, a, \varphi, \Theta) + e^2u_2(x, a, \varphi, \Theta) + \dots, \quad (16)$$

где $\varphi = pq^{-1}\Theta + \psi$; n – номер кривой; $u_j - 2\pi$ – периодические функции скорости по φ и Θ . Величины a, ψ определяются из системы уравнений

$$\begin{aligned} da/dt &= eA_1(a, \psi) + e^2A_2(a, \psi) + \dots, \\ d\psi/dt &= eB_1(a, \psi) + e^2B_2(a, \psi) + \dots \end{aligned} \quad (17)$$

С учетом (11) и (17) подставим (16) в (10) и приравняем коэффициенты при одинаковых степенях e . При этом получим краевую задачу для неизвестной функции u , пригодной для описания атомной шероховатости поверхности сегнетоэлектрика с учетом волновых процессов и резонансных всплесков $|dC/dt|$ (неустойчивости системы) в виде

$$[\Omega_n(\partial/\partial\varphi) + \gamma(\partial/\partial\Theta)]^3u_1 + a[\Omega_n(\partial/\partial\varphi) + \gamma(\partial/\partial\Theta)]^2u_1 - b^2(\partial/\partial x)[\Omega_n(\partial/\partial\varphi) + \gamma(\partial/\partial\Theta)]u_1 - \gamma(\partial/\partial\Theta)u_1 - ab^2(\partial^2u_1/\partial x^2) = C_0(x, a, \varphi, \Theta) + 2(\Omega_nA_1 + abB_1)\Omega_nX_n(x)\cos\varphi + 2(aA_1 - \Omega_nabB_1)\Omega_nX_n\sin\varphi \quad (18)$$

с краевыми условиями

$$L_c(u_1, (\partial u_1/\partial x), \dots)|_{x=c} = 0; C \in (0, L), \quad (19)$$

где $C_0(x, a, \varphi, \Theta) = C(\Theta, x, a, X_n \cos \varphi_1 - \Omega_n a X_n \sin \varphi_1 \dots)$.

Приближенные решения задачи (18)–(19) находим в виде

$$\begin{aligned} u(x, t) &= aX_n(x)\cos\varphi + eu_1(x, a, \varphi, \Theta), \\ u(x, t) &= aX_n(x)\cos\varphi + eu_1(x, a, \varphi, \Theta) + e^2u_2(x, a, \varphi, \Theta), \\ u(x, t) &= aX_n(x)\cos\varphi + eu_1(x, a, \varphi, \Theta) + e^2u_2(x, a, \varphi, \Theta) + e^3u_3(x, a, \varphi, \Theta), \dots \end{aligned} \quad (20)$$

где $\varphi = pq^{-1}\Theta + \psi$;

$$u_1 = 0,025 \sum_{j=1}^N \sum_{m,s=-1}^I \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^L C_0 X_j(x) \exp[-i(m\varphi + s\theta)] dx d\varphi d\theta \exp[i(m\varphi + s\theta)] X_j(x)}{D_j[i(m\Omega_n + s\gamma)] \int_0^L X_j^2(x) dx}; \quad (21)$$

$i = 1, 2, 3, \dots; j = 1, 2, 3, \dots$

Величины a и ψ определяются по системе уравнений

$$\begin{aligned} da/dt &= eA_1(a, \psi), \\ d\psi/dt &= e\sigma + eB_1(a, \psi), \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} A_1(a, \psi) &= K \sum_r \exp(irq\psi) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^L C_0 X_n(x)(\Omega_n \cos\varphi + a \sin\varphi)[-irq\psi] d\varphi d\theta dx; \\ B_1(a, \psi) &= K \sum_r \exp(irq\psi) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^L C_0 X_n(x)(a \cos\varphi - \Omega_n \sin\varphi) \exp[-irq\psi] d\varphi d\theta dx; \end{aligned}$$

здесь $K = -[0,025a\Omega_n(a^2 + \Omega_n^2) \int_0^L X_n^2 dx]^{-1}$.

Если продольное колебание локальной субмикрповерхности сегнетоэлектрика с учетом физико-химических свойств среды представить в виде соотношения (20) и допустить, что имеет место соотношение (12), то асимптотическое решение можно получить в виде

$$u(x, t) = a \sin \lambda_1 x \cos(\Theta + \varphi). \quad (23)$$

Здесь a и ψ определяются из системы уравнений

$$\begin{aligned} da/dt_1 &= -\beta^* ab - E^* \cos \psi; \\ d\psi/dt &= 1 - \eta^* + \Omega_1 \beta^* - b^* a^2 + (E^*/a) \sin \psi, \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} t_1 &= \Omega_1 t; \beta^* = e\beta\lambda_1^2/2\Omega_1(a^2 + \Omega_1^2); E^* = eEc^* h_1/2\Omega_1^2; \eta^* = \gamma\Omega_1; h_1 = h\Phi; \\ b^* &= 3e(1 + Q)b_1^2\lambda_1^4/32\Omega_1^2; Q = -4\lambda_1^2 h_1 / \{(h_1^2 + \lambda_1^2)[(h_1^2 + \lambda_1^2)L] + h_1\}; \\ c^* &= 2(1 - \cos\lambda_1 L)(h_1^2 + \lambda_1^2) / \lambda_1[L(h_1^2 + \lambda_1^2) + h_1], \end{aligned}$$

h – постоянная Планка (квант действия), равная $6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; h_1 – расстояние между «нулевыми» поверхностными дефектами на поверхности квантового кристалла, зависящее от фактора неустойчивости Φ [4]. При этом частота волновых колебаний η связана с амплитудой a зависимостью

$$\eta = 1 + \Omega_1 \beta^* - b^* a^2 \pm E^* [a^2 - (\beta^* a E^{-1})^2]^{1/2}. \quad (25)$$

Зависимость (25) указывает на изменения скорости реакции $|dC/dt|$ с учетом кристаллизационных волн на квантово-шероховатых поверхностях, вызванных Φ , соизмеримым со значением потока энергии с единицей измерения *Джоуль · секунда* в противоположность безразмерной величине Φ .

Численное решение (25) с учетом параметров, приведенных в (9)–(24), в том числе: f_m – объемной плотности энергии физического воздействия в среде, равной разности между объемными плотностями энергии среды в возмущенном и невозмущенном состоянии, описываемой целыми рациональными функциями своих аргументов, достаточно гладких на интервале $(0, L)$; b – коэффициента пропорциональности кинетической и потенциальной энергии деформируемой среды от Φ и i – коэффициента конверсии, равного отношению вероятностей действия Φ при испускании и поглощении кванта энергии новой волной за промежуток времени τ ; l – длины фронта волны; $p = 1/N_A$; где N_A – число Авогадро; q – величины тангенциального смещения гребня волны от оси резонансной кривой, характерной для вещества с валентностью m ; r – массового количества дефектов при критической концентрации доменов S и различных числах Шервуда Sh ; a – коэффициента квантово-механической делокализации точечных дефектов; e – параметров амплитуды; Θ – угла рассогласования скорости реакции и падения концентрации; Ω – перестройки параметра атомной шероховатости квантового кристалла; σ – параметра расстройки частоты от Φ ; $\bar{\Phi}$ и ϕ – мгновенного и устойчивого значений углов атаки фронта тепловой волны, а также угла наклона турбулентного вихря к продольной оси волны ψ .

Экспериментальная часть

Экспериментальная проверка показала, что при импульсном электрофизическом воздействии на образец сегнетоэлектрика энергии потребляется меньше, но эффект получается выше. Например, при импульсном воздействии ультразвуком частотой 22,4 кГц и интенсивностью на магнитострикторе 1,86 Вт/см² через 0,01 с и 0,05 – 1 с аperiodически $\beta^* = 0,1$.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности управлять процессом образования доменов в сегнетоэлектриках внешними физическими воздействиями. Решение задачи указывает также на связь распределения концентраций и температуры в прилежащем к изотермическому объему и перемещение фронта волны T или C с волновыми колебаниями частотой η и амплитудой a . Эти колебания можно вызвать различными физическими воздействиями, а следовательно, управлять (интенсифицировать или подавлять) процессами образования дефектов, что подтверждено многочисленными экспериментами [4, 5].

Предлагаемая теория приповерхностного волнового распределения T и C подтверждает зависимость скорости реакции в гетерогенных системах от неустойчивости при кристаллизации, что ранее не учитывалось при изучении кинетики роста дефектов в сегнетоэлектриках. Именно этим можно объяснить, почему на кривой скорости реакции существует острый пик, совпадающий с пиком тепловыделения (штриховая линия b на рис. 2), отклоняющийся в сторону максимальной концентрации дефектов.

В химической кинетике к большой количественной точности обычно не стремятся в силу сложности элементарных атомно-молекулярных процессов, вызывающих реакцию, и кинетические константы обычно известны с меньшей точностью, чем полученные решением уравнений (5)–(10). Это обстоятельство позволит в дальнейшем решить задачи устойчивости и автоколебаний в гетерогенных системах при зародышеобразовании и росте дефекта или домена у поверхности сегнетоэлектрика, а также задачу перемещения теплового изотермического фронта с захватом дефектов и примесных кластеров на уровне квантового аналога классического атомно-шероховатого состояния.

Анализ математической модели полностью подтверждает эти соображения. Как и для случая обычных механических колебаний, кривые имеют резонансный характер с максимумом при частоте, близкой к частоте собственных колебаний системы. Ширина резонансной кривой и величина максимума связаны с наличием затухания свободных колебаний системы: чем больше затухание, тем слабее выражен резонанс и тем шире резонансная кривая.

Затухание колебаний какой-либо системы обычно характеризуется величиной, называемой декрементом затухания, который, как и собственная частота, является внутренней характеристикой энергии системы, например, с ее диссипацией вследствие трения. Обычно декремент определяется производными скорости процесса и температуры зоны реакции по начальной температуре.

Учет неустойчивости системы приводит к появлению интересных физических явлений, возбуждаемых и гасимых внешними физическими воздействиями, например, турбулентных вихрей, предсказанных в работах [6].

При этом от амплитуды колебаний концентрации или температуры начинает зависеть не только собственная частота системы, что хорошо известно из теории нелинейных колебаний квантовомеханических систем с сосредоточенными параметрами, но и декремент затухания самой системы. Все это приводит к вынужденным колебаниям скорости, в частности, к возможности появления автоколебательного режима.

Неустойчивость послышного перемещения изотермического фронта, приводящая к автоколебательному режиму, наступает при зависимости скорости реакции от температуры. Количественно это выражается в критическом значении константы реакции. Возникновение автоколебаний – своего рода защитная реакция процесса затухания. Если невозможен стационарный режим, то наступает депрессия, когда происходит период накопления энергии (нагревание или охлаждение значительного микрообъема вокруг растущего домена (дефекта) перед решающим захватом близко расположенных кластеров и термодинамически устойчивых вновь сформировавшихся центров образования доменов. Эти этапы экспериментально обнаружены при скоростной киносъемке под микроскопом по методу, описанному в работе [6].

Иногда предел устойчивости процесса возникает одновременно с искажением формы фронта изотермы. При этом точное решение задачи приводит к простому критерию фактора устойчивости в виде

$$\Phi \equiv [(T_1 - T_0) / u(T_0)] du/dT_1 = (T_1 - T_0)E / 2RT_1^2, \quad (27)$$

где T_0 , T_1 – начальная и текущая температура; u – скорость реакции; E – энергия активации роста дефекта (в пределах $E \approx (5,9...48,2) \cdot 10^3$ Дж/моль при Дб ≈ 80 – 100 % и 30 – 80 °С по данным В. Ван-Гука, М. С. Жигалова и И. С. Гулого), или неустойчивости, физический смысл которого рассмотрен в [4].

Если $\Phi_0 > \Phi$, то режим устойчив, а при $\Phi_0 < \Phi$ реакция носит автоколебательный характер. При небольшом превышении критической величины $\Phi_0 \approx 4,37$ скорость процесса имеет слабые и почти синусоидальные колебания. Увеличение Φ ведет к росту амплитуды колебаний и деформации формы кривой. При этом переход через предельное значение Φ_1 , которое значительно отличается от Φ_0 , соответствующего потере устойчивости плоского фронта, сопровождается превращением плоского фронта в двух- или трехмерную структуру, т.е. охватывает весь домен.

При решении этой задачи численным методом можно обнаружить следующее. Наиболее простая форма такой структуры – гофрированная поверхность, когда некоторые участки фронта фазового перехода обгоняют соседние. В пространстве эти участки расположены периодически. Следовательно, при потере устойчивости наиболее неустойчивой формой является гармоника с определенной длиной волны (неустойчивость плоского фронта, которую мы рассматриваем, соответствует длине волны $\lambda \leq \infty$).

При потере устойчивости и переходе Φ в Φ -фронт кристаллизации приобретает форму гармоника с длиной полуволны, равной отрезку $\lambda/2$.

Исследования В. В. Кафарова, Д. А. Франк-Каменецкого, Б. В. Новожилова, Я. Б. Зельдовича и других показали, что картина фронта химической реакции изменяется во времени. Фронт представляет собой ячеистую структуру, в которой периодически расположены квантовые возвышения и впадины, причем последние могут перемещаться по поверхности фронта. На возвышениях наблюдаются более высокие значения температуры и концентрации для веществ прямой растворимости (и наоборот, для веществ обратной растворимости), а следовательно, и большая скорость реакции. Однако эти возвышения не обгоняют впадины (квантовые ямы в гетероструктурах), поскольку между всеми элементами фронта при неплоской его структуре существует тепло- и массообмен, который и обуславливает движение фронта как целого вдоль своей оси. Если реакция во впадинах затухает, фронт изотермы может распасться на ряд не связанных между собой ячеек, имеющих определенные размеры и довольно сложную слоисто-вихревую или скалено-эдрическую структуру. Микрофотографии таких поверхностей приведены в работах [4–7, 8–10]. Кроме того, в этих впадинах происходит скопление и захват примесных кластеров, которые меняют свойства веществ.

Выводы

Сочетание термодинамической теории образования нанодоменов в сегнетоэлектрических материалах аналитической теории их локального пьезоэлектрического отклика на возбуждение внешним электрическим полем открывает возможности самосогласованного количественного анализа экспериментальных данных.

Установлено, что поверхностные дефекты имеют формы петель локального пьезоэлектрического гистерезиса, как прыжки пьезовидугу и асимметрия коэрцитивных напряжений. Полученные аналитические зависимости энергии активации зародыша, его размеров и радиуса устойчивого домена от конфигурации электрических и тепловых полей внутренних дефектов и внешнего наноразмерного источника позволяют определить размеры нанодоменов, образующихся вблизи дефектов путем деконволюции экспериментальных петель гистерезиса локального пьезоэлектрического отклика.

Результаты численного моделирования и аналитические выражения для зависимости пьезоотклика и размеров доменов от внешнего электрического поля и параметров сегнетоэлектрического материала хорошо согласуются как с экспериментальными зависимостями для тонких пленок и монокристаллов типичных сегнетоэлектриков, так и с многочисленными результатами, полученными независимо методом моделирования фазовых полей других авторов, обеспечивает достоверность полученных результатов.

Полученные результаты открывают возможности моделирования петель гистерезиса локального пьезоэлектрического отклика и самосогласованного количественного анализа экспериментальных данных пьезоэлектрической силовой микроскопии, петель сегнетоэлектрического, диэлектрического и пьезоэлектрического гистерезиса в полярно-активных кристаллических и керамических материалах, имеет практическое значение для миниатюризации приборов нанoeлектроники.

Список литературы

1. Local Polarization Switching in the Presence of Surface Charged Defects: Microscopic Mechanisms and Piezoresponse Force Spectroscopy Observations / A. N. Morozovska, S. V. Svechnikov, E. A. Eliseev, B. J. Rodriguez, S. Jesse, S. V. Kalinin // *Phys. Rev. B* – 2008. – Vol. 78, № 5. – P. 054101-1-17.
2. Probing the role of single defects on thermodynamics of electric-field induced phase transitions / S. V. Kalinin, S. Jesse, B. J. Rodriguez, Y. H. Chu, R. Ramesh, E. A. Eliseev, A. N. Morozovska // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 100, № 15. – P. 155703-1-4.
3. Direct Imaging of the Spatial and Energy Distribution of Nucleation Centers in Ferroelectric Materials / S. Jesse, B. J. Rodriguez, S. Choudhury, A. P. Baddorf, I. Vrejoiu, D. Hesse, M. Alexe, E. A. Eliseev, A. N. Morozovska, J. Zhang, L.-Q. Chen, S. V. Kalinin // *Nature Materials*. – 2008. – Vol. 7, № 3 – P. 209–215.
4. The Effect of Elastic Vibrations on Monodispersity and Kinetics Crystallization. / A. T. Bogorosh // *J. Program.* – 1983, Vol. 10011. – P. 49–52.
5. Богорош, А. Т. Кристаллизационные волны при зарождении и росте монокристаллов / А. Т. Богорош // *Доповіді НАНУ*. – 1999. – № 12. – С. 82–90.
6. Diagnostics of mechanical defects in navigation electronic devices / A. Bogorosh1, S. Voronov, N. Višniakov, J. Novickij // *Materials science*. – 2006. – Vol. 12, № 4, P. 30–39.

7. Северцев, Н. А. Проблема оценивания измеряемых параметров технических систем / Н. А. Северцев, А. В. Мухин, Л. В. Логинова // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2003. – С. 313–317.
8. Туганова, Г. Ф. Нейросетевая модель прогнозирования состояния технических систем / Г. Ф. Туганова // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2002. – С. 330–331.
9. Слюсарев, Г. В. Энергетические методы оценки физико-механических свойств упругих конструкций при вибрационных испытаниях / Г. В. Слюсарев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2002. – С. 412–415.
10. Кинетика образования доменов под воздействием электрических и тепловых полей дефектов в приборах и устройствах на основе сегнетоэлектриков / А. Т. Богорош, С. А. Воронов, А. Г. Шайко-Шайковский, С. В. Билык, Е. Н. Тимофеева, Д. З. Перчик // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 157–160.

Богорош Александр Терентьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра прикладной физики,
Киевский политехнический институт,
Национальный технический университет Украины
(03056, Украина, г. Киев, пр-т Победы, 37)

Воронов Сергей Александрович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой прикладной физики,
Киевский политехнический институт,
Национальный технический университет Украины
(03056, Украина, г. Киев, пр-т Победы, 37)

Шайко-Шайковский Александр Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра профессионального и технологического
образования и общей физики,
Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича
(58012, Украина, г. Черновцы, ул. Коцюбинского, 2)
E-mail: shayko@bk.ru

Билык Сергей Викторович

кандидат медицинских наук,
врач высшей категории, ассистент,
кафедра ортопедии и травматологии,
Буковинский государственный
медицинский институт
(58000, Украина, г. Черновцы, Театральная пл. 2)

Тимофеева Елизавета Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра профессионального и технологического
образования и общей физики,
Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича
(58012, Украина, г. Черновцы, ул. Коцюбинского, 2)
E-mail: shayko@bk.ru

Перчик Дмитрий Захарович

инженер-исследователь,
кафедра профессионального и технологического
образования и общей физики,
Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича
(58012, Украина, г. Черновцы, ул. Коцюбинского, 2)

Bogorosh Aleksandr Terent'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of applied physics,
Kiev Polytechnic Institute,
National Technical University of Ukraine
(03056, 37 Pobedy avenue, Kiev, Ukraine)

Voronov Sergey Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of applied physics,
Kiev Polytechnic Institute,
National Technical University of Ukraine
(03056, 37 Pobedy avenue, Kiev, Ukraine)

Shayko-Shaykovskiy Aleksandr Grigor'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of professional and technological
education and general physics,
Chernovitsky National University
named after Yuriya Fedkovych
(58012, 2 Kotsyubinskogo street, Chernovtsy, Ukraine)

Bilyk Sergey Viktorovich

candidate of medical sciences,
doctor of higher category, assistant,
sub-department of orthopedics and traumatology,
Bukovina State Medical University
(58000, 2 Teatral'naya square, Chernovtsy, Ukraine)

Timofeeva Elizaveta Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of professional and technological
education and general physics,
Chernovitsky National University
named after Yuriya Fedkovych
(58012, 2 Kotsyubinskogo street, Chernovtsy, Ukraine)

Perchik Dmitriy Zakharovich

engineer-researcher,
sub-department of professional and technological
education and general physics,
Chernovitsky National University
named after Yuriya Fedkovych
(58012, 2 Kotsyubinskogo street, Chernovtsy, Ukraine)

E-mail: shayko@bk.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования процесса образования доменов в сегнетоэлектрических материалах при воздействии на них электрических и тепловых полей, рассмотрена кинетика процессов образования доменов, показаны механизмы изменения параметров сегнетоэлектрических материалов, их характеристик, взаимосвязь между параметрами образования доменов и воздействующих полей, показаны возможные пути регулирования параметров этих процессов, возможности минимизации нежелательных параметров процессов образования доменов или практически полного их устранения в зависимости от реальных требований практики и возможностей современных технологий. Статья может быть полезной специалистам, работающим в области электронного материаловедения, аспирантам и студентам соответствующих специальностей, производственникам, технологам и разработчикам новой техники.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, домены, дефекты, тепловые и электрические поля.

Abstract. The results of the study of the formation of domains in ferroelectric materials when exposed to electric and thermal fields, examine the kinetics of the formation of domains are shown mechanisms of parameters of ferroelectric materials and their characteristics, the relationship between the parameters affecting the formation of domains and fields, possible ways of regulating the parameters of these processes opportunities to minimize undesirable processes parameters of formation of domains or substantially complete their elimination depending on the actual requirements of practice and the capabilities of modern technology. The article can be useful for professionals working in the field of electronic materials science and students in related disciplines, production workers, technologists and developers of new technology.

Key words: ferroelectric domains, defects, thermal and electric fields.

УДК 621.315.61

К проблеме образования доменов в сегнетоэлектриках при воздействии электрических и тепловых полей / А. Т. Богорош, С. А. Воронов, А. Г. Шайко-Шайковский, С. В. Билык, Е. Н. Тимофеева, Д. З. Перчик // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 56–64.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОЗАЩИТЫ РЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ НЕЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОИЗОЛЯТОРА

А. В. Затылкин, В. С. Калашников, А. М. Телегин

Введение

На конструкцию радиоэлектронных средств (РЭС) влияют как внутренние, так и внешние воздействующие факторы (ВВФ), поэтому одной из основных задач при конструировании РЭС является обеспечение их надежного функционирования в реальных условиях эксплуатации. Механические воздействия являются причиной возникновения чрезмерно больших механических напряжений, деформаций или ускорений в элементах и узлах РЭС, что в свою очередь приводит к нарушению механической прочности, разрушению и, как следствие, отказу. Согласно статистическим данным, до 70 % всех отказов РЭС происходит по причине воздействия ударов и вибрации [1]. Поэтому задача защиты РЭС от внешних механических воздействий является актуальной.

Методы и средства защиты РЭС от внешних вибрационных воздействий

Существующие методы защиты РЭС от вибраций удобно рассмотреть, если использовать зависимость коэффициента динамичности μ от частоты внешнего воздействия f . Указанная зависимость позволяет выделить три характерных поддиапазона (рис. 1), для каждого из которых сложилась устойчивая практика применения тех или иных методов и средств виброзащиты [2–4].

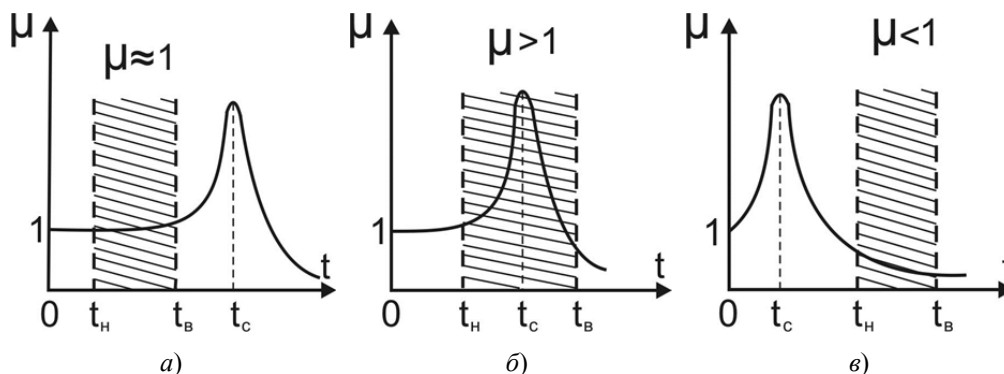


Рис. 1. Зависимость коэффициента динамичности μ от частоты внешнего воздействия f :
а – дорезонансный; б – резонансный; в – зарезонансный поддиапазоны

Для защиты РЭС от вибрационных воздействий с частотой ниже резонансной частоты РЭС (см. рис. 1,а) принято увеличивать жесткость конструктивных элементов. Наибольшее распространение получило применение дополнительных площадок крепления электрорадиоэлементов (ЭРЭ) с помощью клея; применение дополнительных точек крепления печатных узлов; применение профилирования и отбортовок (для пластин из металла) основания блока; применение ребер жесткости и т.д. Тем не менее эти методы являются локальными и эффективны лишь для защиты отдельных элементов РЭС и не способны обеспечить качественную защиту всей конструкции [2].

Для защиты РЭС от вибрационных воздействий с частотой, попадающей в область резонансной частоты РЭС (см. рис. 1,б) принято использовать конструктивные элементы с увеличенной степенью демпфирования [5]. Наибольшее распространение получило применение вибропоглощающих покрытий, слоев и вибропоглощающих заливочных материалов.

Применение слоистых конструкций и демпфирующих покрытий позволяет снизить значения коэффициентов динамичности печатных плат с нескольких десятков до нескольких единиц [2].

К недостаткам этих методов виброзащиты можно отнести возникновение больших внутренних напряжений в виброизоляционном материале при его полимеризации, изменение свойств покрытий и заливок с течением времени, зависимость характеристик покрытий и заливок от температуры, ухудшение ремонтоспособности РЭС.

Для защиты РЭС от вибрационных воздействий с частотой выше резонансной частоты РЭС (см. рис. 1,в) принято использовать виброизоляторы. Виброизоляция в данном поддиапазоне обеспечивается тем, что между объектом защиты (или его элементом) и вибрирующей поверхностью устанавливаются специальные элементы – виброизоляторы, образующие систему амортизации. Подобный способ виброзащиты может быть использован как для блоков, так и для отдельных элементов РЭС.

Применение виброизоляции признано наиболее эффективным методом виброзащиты РЭС [6, 7]. Тем не менее при проектировании РЭС с системой амортизации (виброизоляции) необходимо предусматривать комплексный подход обеспечения виброзащиты, т.е. нельзя пренебрегать ни увеличением жесткости конструктивных элементов, ни применением конструктивных элементов с увеличенной степенью демпфирования, поскольку лишь совокупность всех методов позволит обеспечить максимальный уровень надежности РЭС.

Поскольку универсальной системы виброизоляции не существует, разработка системы амортизации для конкретного блока или элемента РЭС и оценки ее эффективности является важной задачей, от решения которой будет зависеть надежность работы устройства.

Методы и средства оценки эффективности виброизоляции РЭС

В настоящее время существует большое количество виброизоляторов (амортизаторов), на основе которых проектируют как пассивные, так и активные системы амортизации РЭС. Активные системы амортизации РЭС эффективны, но чрезвычайно дороги, их применение оправдано в редких случаях. Информация, касающаяся описания общего принципа их работы, содержится в источниках [7, 8], при этом конкретные реализации, как правило, закрыты.

Конструкторский расчет пассивных систем амортизации РЭС регламентирован ГОСТ 26568-85 [9], примеры приведены в [2, 3]. Конструкторский расчет в основном сводится к проведению статического и динамического расчетов. При выполнении статического расчета проводят определение сил реакций виброизоляторов и величин статического прогиба, по которым с учетом возможного влияния дестабилизирующих факторов выбирают нужный типоразмер виброизолятора. При выполнении динамического расчета проводят оценку эффективности выбранной системы виброизоляции.

Наиболее сложная часть расчета пространственных систем виброизоляции – определение силы реакции виброизоляторов. Виброизоляторы выбирают с учетом всех направлений действия сил. В системах пространственного нагружения можно использовать только такие виброизоляторы, которые гарантируют работу по осям X , Y , Z (например виброизоляторы следующих типов: АВД, АКСС, АПН, АСД, АР, АТ).

Силы реакции виброизоляторов P_{ix} , P_{iy} , P_{iz} должны удовлетворять уравнениям [2, 3]

$$\sum_i^N P_{ix} = G_x, \quad \sum_i^N P_{iy} = G_y, \quad \sum_i^N P_{iz} = G_z, \\ \sum_i^N (P_{ix}y_i - P_{iy}x_i) = 0, \quad \sum_i^N (P_{iy}z_i - P_{iz}y_i) = 0, \quad \sum_i^N (P_{iz}x_i - P_{ix}z_i) = 0; \quad (1)$$

где m_i – компоненты массы по осям X , Y и Z ; x_i , y_i и z_i – координаты точки крепления к блоку i -го виброизолятора.

При этом оси прямоугольной системы координат X , Y , Z направлены параллельно главным осям, одна из которых совпадает с осью виброизолятора, а другие две перпендикулярны ей.

Выбор виброизоляторов происходит исходя из определения их несущих способностей и жесткости в осевых направлениях P_{ix} , P_{iy} , P_{iz} . При этом $P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}$.

При расстановке виброизоляторов следует учитывать, что большие по горизонтали расстояния от виброизоляторов до их центра жесткости, лежащего на вертикали, проходящей через

центр тяжести блока, приводят к высоким частотам собственных вращательных колебаний блока. Расстановка виброизоляторов должна быть симметричной, хотя бы относительно одной из главных центральных осей инерции амортизируемого блока [2, 3].

Статические прогибы амортизаторов:

$$x_{\text{ист}} = \frac{P_{ix}}{k_{ix}}; \quad y_{\text{ист}} = \frac{P_{iy}}{k_{iy}}; \quad z_{\text{ист}} = \frac{P_{iz}}{k_{iz}}, \quad (2)$$

где k_i – расчетная жесткость каждого виброизолятора:

$$k_i = \frac{k_p}{N},$$

где k_p – расчетная жесткость всех виброизоляторов:

$$k_p = 40mf^2,$$

где f – частота возмущающих вибраций.

Если величина статических прогибов виброизоляторов получилась различной, то проводится выравнивание блока РЭС с помощью установки компенсирующих прокладок [2]. Поэтому для расчета пассивной системы виброизоляции РЭС важно знать компоновку и расположение виброизоляторов (амортизаторов). Наибольшее распространение имеют системы виброизоляции с одной (рис. 2,а) и двумя (рис. 2,б) плоскостями симметрии.

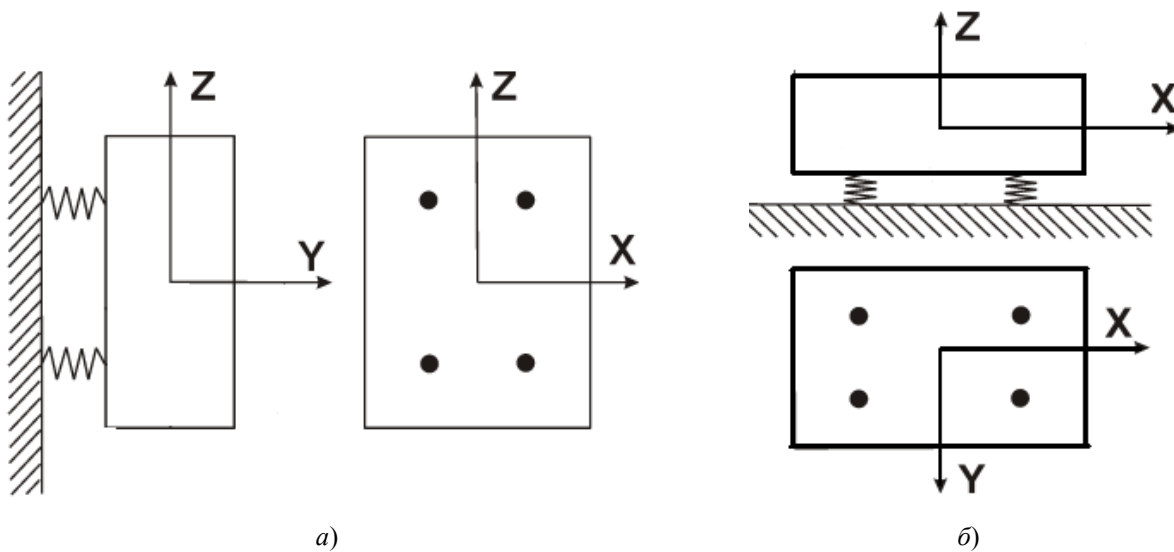


Рис. 2. Схемы систем амортизации РЭА с одной (а) и двумя (б) плоскостями симметрии

На рис. 3 показан пример промышленной пассивной системы виброизоляции с двумя плоскостями симметрии на основе виброизоляторов АПН 4 (рис. 3,а) и сам виброизолятор (рис. 3,б).

После проведения статического расчета, когда известны места установки виброизоляторов и их марка, проводят динамический расчет системы виброизоляции. Эффективность пассивной системы виброизоляции в зарезонансной области оценивается следующей формулой [2]

$$\Xi = (1 - \eta) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где η – величина коэффициента динамичности, определяемая отношением

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + 4\beta^2 k^2}}{\sqrt{(1 - k^2)^2 + 4\beta^2 k^2}},$$

где $k = f/f_0$ – относительная частота; β – коэффициент демпфирования.

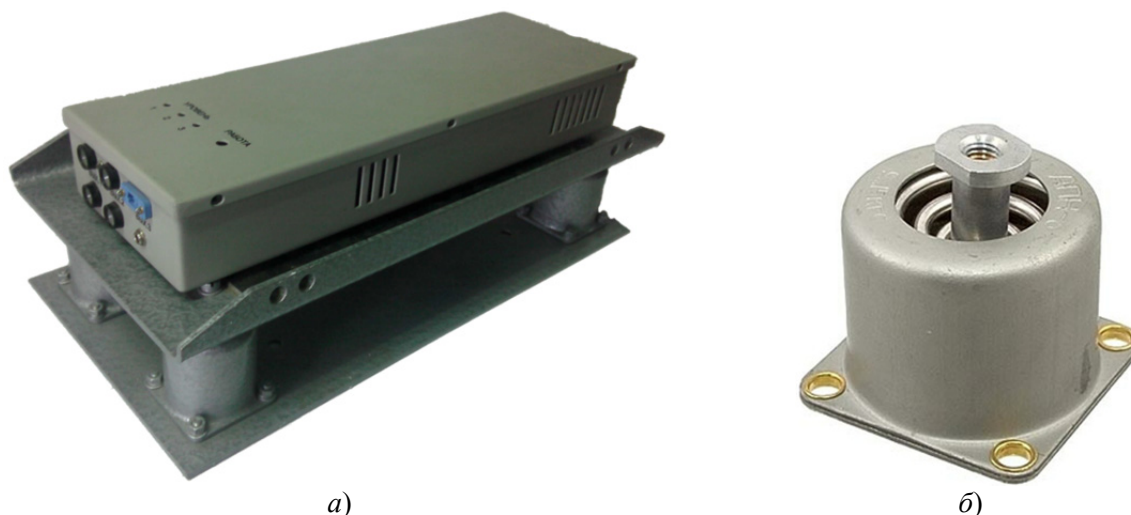


Рис. 3. Система амортизации на основе виброизоляторов АПН 4 (а)
и внешний вид виброизолятора АПН 4 (б)

Выражение (3) позволяет дать оценку эффективности пассивной системы виброизоляции на протяжении всего диапазона рабочих частот. На практике принято оценивать эффективность на нижней частоте границы рабочего диапазона. Причина заключается в том, что все виброизоляторы подразделяются на низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные. У низкочастотных виброизоляторов частота собственных колебаний в нагруженном состоянии не превышает 4 Гц, для среднечастотных находится в пределах 8–10 Гц и у высокочастотных – в пределах 20–35 Гц [2]. Поэтому, выбирая виброизолятор, необходимо обеспечить нахождение его резонансной частоты, ниже границы рабочего диапазона, а расчет эффективности виброизоляции проводить на граничной частоте.

Согласно ГОСТ 11478-88, устанавливающим нормы климатических и механических воздействий, для РЭС I–IV групп эксплуатации нижняя граница частотного диапазона составляет 10 Гц [9, 10]. На рис. 4 показаны графики эффективности двух пассивных систем виброизоляции в частотном диапазоне от 0 до 1 кГц. Для каждой из рассматриваемых систем виброизоляции на нижней граничной частоте, равной 10 Гц, эффективность будет составлять 44,6 %. Традиционная методика не регламентирует дальнейшие действия инженера-конструктора по выбору системы виброизоляции.

Руководствуясь тем, что система виброизоляции 1 (показана сплошной линией на рис. 4) имеет резонанс на частоте 3,5 Гц и является низкочастотной, а система виброизоляции 2 (показана пунктирной линией на рис. 4) имеет резонанс на частоте 5 Гц и является среднечастотной, то следует выбрать систему 1, т.к. ее резонанс находится дальше от нижней границы рабочего диапазона частот.

Однако такой выбор ошибочен. Проведя расчет эффективности рассматриваемых систем виброизоляции на частотах выше границы нижней части рабочего диапазона, увидим, что система 2 эффективней системы 1 (заштрихованная область на рис. 4).

Вероятность возникновения ситуации, в которой эффективность двух систем виброизоляции равна (или приблизительно равна), невысока. Тем не менее эта вероятность существует, и неверный выбор системы виброизоляции приведет к снижению устойчивости проектируемой РЭС к воздействию вибрации.

Кроме этого, возможен другой случай, также не рассмотренный в рамках традиционной методики. Из-за своих конструктивных особенностей различные типы виброизоляторов имеют резонансные кривые, отличающиеся своей добротностью. Это может привести к тому, что на нижней граничной частоте (снова возьмем 10 Гц) эффективность системы 1 (показана сплошной линией на рис. 5), равная 27,5 %, окажется выше, чем эффективность системы 2 (показана пунктирной линией на рис. 5), равная 15,5 %. В данном случае (если проводить расчеты только на граничной частоте нижнего диапазона) следует, что необходимо выбрать систему 1. Однако, во-первых обе системы не входят в резонанс в рабочем диапазоне частот, а значит, могут быть ис-

пользованы. Во-вторых, эффективность системы 2 после частоты в 11 Гц до границы верхнего диапазона превышает эффективность системы 1. С учетом того, что весь диапазон находится в пределах от 10 до 1000 Гц, выбор системы 1 становится спорным.

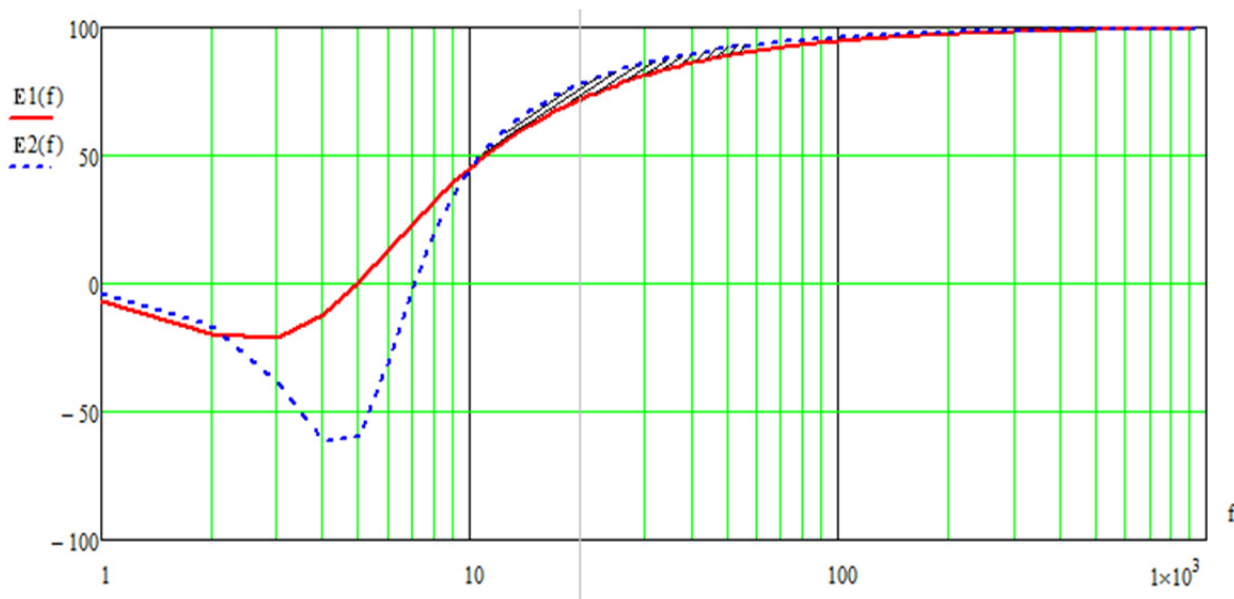


Рис. 4. Пример эффективности двух систем виброизоляции РЭС
(эффективность на граничной частоте нижнего диапазона совпадает)

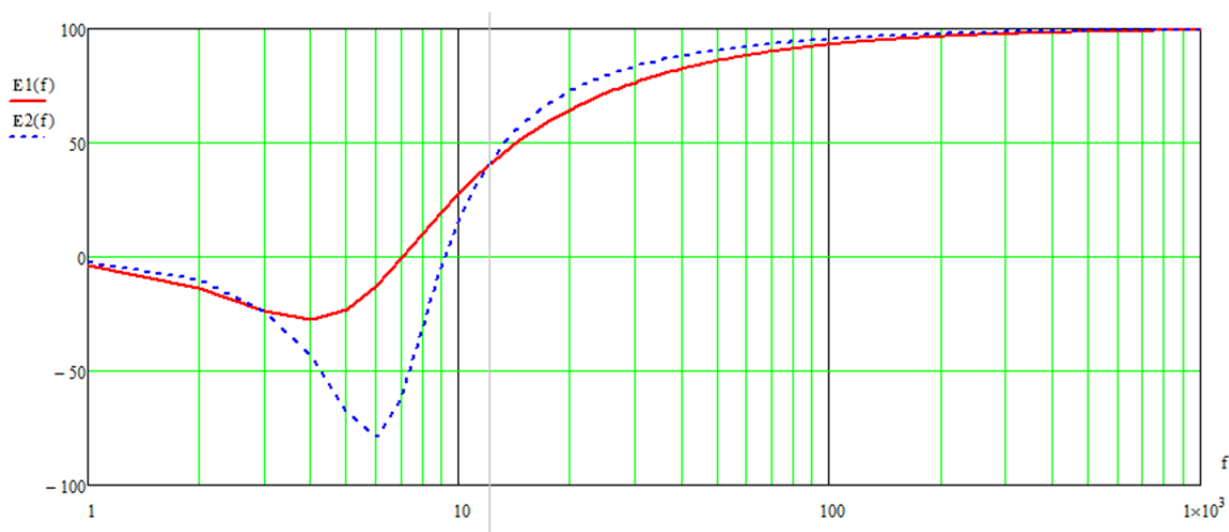


Рис. 5. Пример эффективности двух систем виброизоляции РЭС
(эффективность на граничной частоте нижнего диапазона различна)

Из рассмотренных примеров следует вывод о том, что совершенствование известной методики [2, 3] оценки эффективности системы виброизоляции блока РЭС с целью оценки эффективности на всем рабочем диапазоне частот является важной научно-практической задачей.

***Методика оценки эффективности системы виброизоляции блока РЭС,
отличающаяся применением интегрального критерия неэффективности виброизолятора***

Для оценки эффективности системы виброизоляции блока РЭС на всем рабочем диапазоне частот прежде всего необходимо проверить наличие эффекта вибровозбуждения системы на нижней частоте рабочего диапазона. Сделать это следует, подставив в выражение (3) значение нижней частоты рабочего диапазона, взятого из технического задания. В результате возможно получение лишь трех вариантов ответа: положительного, отрицательного и нулевого.

Нулевой и положительный варианты говорят об отсутствии вибровозбуждения. Такую систему виброизоляции можно применить, руководствуясь тем, что в остальной области рабочего диапазона ее эффективность будет однозначно положительной. Отрицательный ответ покажет наличие вибровозбуждения. В этом случае систему следует однозначно совершенствовать: менять марку виброизоляторов, их количество, места установки и т.д. Методы защиты РЭС от внешних вибрационных воздействий и очередность их применения рассмотрены в источниках [2, 4].

Как правило, возможность совершенствовать системы виброизоляции есть всегда, и зачастую более остро стоит вопрос сравнения эффективности нескольких возможных реализаций. Для оценки эффективности в частотной области можно оценить площадь, ограниченную функцией эффективности, пределами частотного диапазона и осью абсцисс. Но такой подход будет нецелесообразен, т.к. разность указанной площади для двух сравниваемых систем виброизоляции будет ничтожно мала, что следует из анализа рис. 4 и 5. Поэтому целесообразно провести прием, принятый, например, в теории надежности, когда вероятность безотказной работы РЭС (параметр надежности) заменяют на вероятность отказа РЭС (параметр ненадежности) и заменить эффективность систем виброизоляции на вновь введенный критерий неэффективности виброизолятора.

Для выполнения задачи оценки неэффективности виброизолятора используем интегральные исчисления, тогда, используя выражение (3), получим критерий неэффективности

$$H_3 = \int_{f_n}^{f_b} \left(1 - \left(1 - \frac{\sqrt{1 + 4\beta^2 (f/f_0)^2}}{\sqrt{(1 - (f/f_0)^2)^2 + 4\beta^2 (f/f_0)^2}} \right) \right) df.$$

Применение предложенного критерия неэффективности позволяет дать количественную оценку заштрихованной области, показанной на рис. 6.

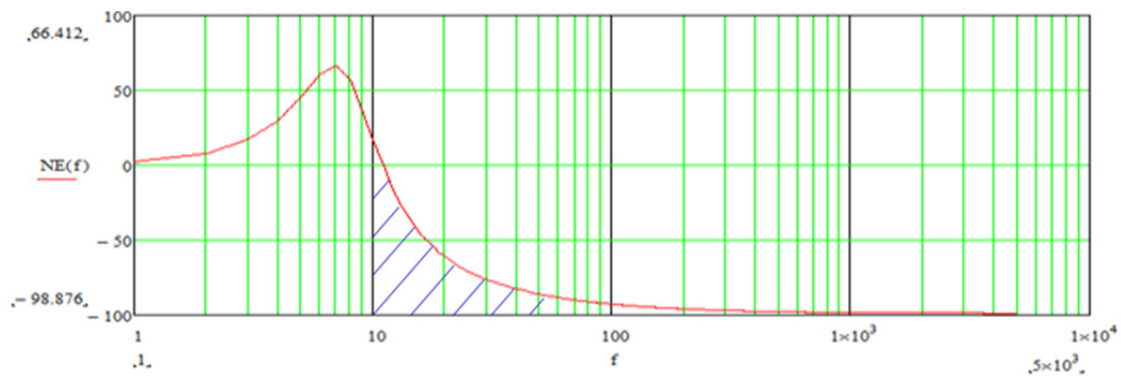


Рис. 6. Зависимость неэффективности виброизоляции блока РЭС от частоты внешнего воздействия (виброизоляторы АКСС-10)

Заменяя виброизоляторы АКСС-10 на АП-2-0,9, построим график зависимости интегрального критерия неэффективности виброизолятора для РЭС от частоты внешнего воздействия (рис. 7). Анализ заштрихованных областей на рис. 6 и 7 показывает, что система виброизоляции, график которой представлен на рис. 6, намного неэффективнее системы, график неэффективности которой представлен на рис. 7.

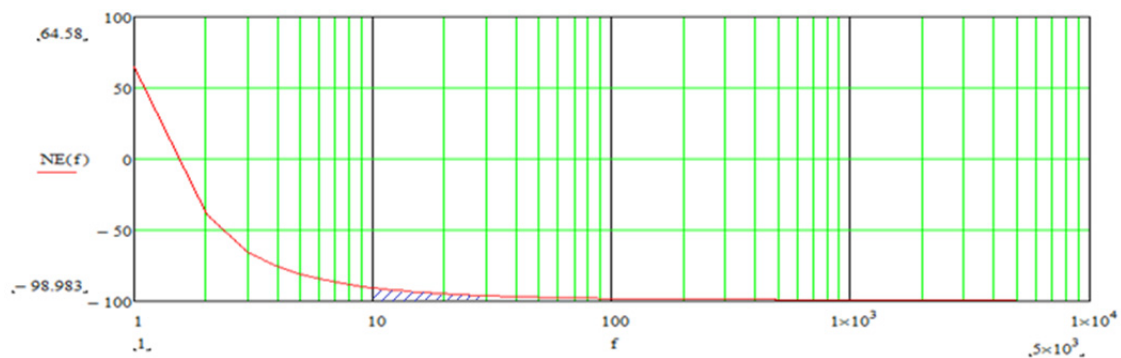


Рис. 7. Зависимость неэффективности виброизоляции блока РЭС от частоты внешнего воздействия (виброизоляторы АП-2-0,9)

Как видно, применение предложенного интегрального критерия неэффективности виброизолятора позволяет дать количественную оценку системы виброизоляции в частотной области (при условии совпадения частотного диапазона).

Таким образом, предложенная методика оценки эффективности системы виброизоляции блока РЭС выглядит следующим образом:

1) проверить наличие эффекта возбуждения системы виброизоляции на нижней частоте рабочего диапазона, подставив значение частоты нижнего рабочего диапазона в выражение (3). Удостоверившись в его отсутствии ($\Xi \geq 0$), перейти к оценке неэффективности системы виброизоляции. В случае наличия возбуждения следует изменить параметры системы виброизоляции;

2) рассчитать предложенный критерий неэффективности системы виброизоляции РЭС в рабочем диапазоне частот;

3) при наличии нескольких систем виброизоляции РЭС сравнить их критерии неэффективности в одинаковом диапазоне частот и выбрать ту систему, которая обладает наименьшим критерием неэффективности.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить эффективность системы виброизоляции РЭС во всем диапазоне рабочих частот, уделяя особое внимание низкочастотной области. Проведение расчетов, связанных с выбором и оценкой систем виброизоляции блоков РЭС, подразумевает выполнение огромного количества расчетов, поэтому уместно рассмотрение вопроса о целесообразности их автоматизации за счет разработки новой программной системы.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Карпушин, В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / В. Б. Карпушин. – М. : Сов. радио, 1971. – 344 с.
2. Талицкий, Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы : учеб. пособие / Е. Н. Талицкий. – Владимир, 2001. – 256 с.
3. Андреев, П. Г. Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий : учеб. пособие / П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 130 с.
4. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / под ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 564 с.
5. Chung, P. W. A finite element thermoviscoelastic creep approach for heterogeneous structures with dissipative correctors / P. W. Chung, K. K. Tamma, R. R. Namburu // Finite Elements in Analysis and Design. – 2000. – Vol. 36 (3–4). – P. 279–313.
6. Юрков, Н. К. Методы и средства проектирования высоконадежных электронных средств / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров ; под ред. проф. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – 266 с.
7. Лысенко, А. В. Анализ особенностей применения современных активных систем виброзащиты для нестационарных РЭС / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Д. А. Рындин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 155–158.
8. Евграфов, А. Н. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах / А. Н. Евграфов, В. И. Каразин, И. О. Хлебосолов // Теория механизмов и машин. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 92–96.
9. ГОСТ 26568-85. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация.
10. ГОСТ 11478-88 Аппаратура радиоэлектронная. Нормы и методы испытаний на воздействие внешних механических и климатических факторов.

Затылкин Александр Валентинович

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

Zatylnik Alexander Valentinovich

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

Калашников Владимир Сергеевич

аспирант,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko7891@rambler.ru

Телегин Алексей Михайлович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: talex85@mail.ru

Аннотация. Дан обзор методов повышения эффективности средств защиты радиоэлектронной аппаратуры от внешних вибрационных воздействий на основе анализа зависимости коэффициента динамичности от частоты внешнего воздействия. Анализ существующих методик расчета и оценки эффективности пассивных систем амортизации радиоэлектронных средств показал их неработоспособность в области нижних частот за счет того, что проводится учет лишь отдельных частот рабочего диапазона. Для устранения указанного недостатка предложено проводить оценку эффективности пассивной системы амортизации радиоэлектронных средств с применением интегрального критерия неэффективности виброизолятора на всей частотной области. Разработанный математический аппарат доведен до алгоритмической и программной реализации. Проведены численные эксперименты, подтвердившие справедливость указанного подхода и повышение эффективности виброизоляции в области нижних частот.

Ключевые слова: вибрационные воздействия, виброизоляторы, коэффициент динамичности, система амортизации, алгоритм, программа, база данных.

Kalashnikov Vladimir Sergeevich

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

Telegin Aleksey Mikhaylovich

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

Abstract. A review of methods for increasing the effectiveness of protecting electronic equipment from external vibration impacts based on the analysis of the dependence of the dynamic factor from the frequency of the external impact. Analysis of existing methods of calculation and assessment of the effectiveness of passive systems depreciation of radio-electronic means showed their loss in the lower frequencies, due to the fact that an account of only some of the frequency. To eliminate this drawback it is suggested to evaluate the effectiveness of passive systems depreciation of radio-electronic equipment with application of integral criterion of effectiveness isolator throughout the frequency domain. The mathematical apparatus brought to the algorithmic and software implementation. Numerical experiments are carried out which confirmed the validity of this approach and increase the effectiveness of vibration isolation in the lower frequencies.

Key words: vibration exposure, vibration isolators, dynamic coefficient, damping system, algorithm, program, database.

УДК 629.01

Затылкин, А. В.

Методика оценки эффективности виброзащиты РЭС с применением интегрального критерия неэффективности виброизолятора / А. В. Затылкин, В. С. Калашников, А. М. Телегин // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 65–72.

ЦИФРОВОЙ ГЕНЕРАТОР ПРЯМОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СИГНАЛА С ПЛАВАЮЩЕЙ ЧАСТОТОЙ

Д. А. Голушко, А. В. Лысенко, М. П. Калаев

Введение

В настоящее время к бортовым техническим системам (ТС) изделий военного назначения (ИВН) предъявляются высочайшие требования по надежности [1]. Поэтому как в процессе разработки, так и во время производства все ТС ИВН проходят различные виды испытаний, в том числе испытания на устойчивость к влиянию внешних воздействующих факторов (ВВФ) в соответствии с требованиями российских комплексов государственных военных стандартов [2].

Одним из наиболее опасных ВВФ, приводящих к отказам бортовых ТС, является внешнее вибрационное воздействие, поскольку согласно статистическим данным от 30 до 50 % отказов приходится именно на них [3].

При проведении испытаний на устойчивость к влиянию ВВФ основополагающим принципом является соответствие испытательных режимов режимам эксплуатации [4]. Несмотря на значительные достижения в области стендовых испытаний [4–7], режимы функционирования ТС в реальных условиях эксплуатации значительно отличаются от испытательных режимов [8], что приводит к появлению отказов ТС на этапе эксплуатации. Поэтому в общей проблеме повышения надежности бортовых ТС ИВН задачи разработки и совершенствования методов и средств проведения испытаний ТС на устойчивость к внешним вибрационным воздействиям являются актуальными.

Постановка задачи

Одной из причин несоответствия режимов функционирования бортовых ТС от испытательных режимов является различие в способах введения внешнего вибрационного воздействия в ТС. На существующих испытательных стендах ТС крепится к вибростолу, в результате все точки крепления, через которые передается внешнее вибрационное воздействие на ТС от вибростола, двигаются синхронно (синфазно). В условиях реальной эксплуатации движение точек крепления бортовых ТС не является синфазным [8], что приводит к различному поведению ТС при проведении стендовых испытаний и в реальных условиях эксплуатации [9].

В работе [10] предложен способ определения спектральных колебательных характеристик конструктивных элементов ТС и установка для его реализации, которые позволяют передать внешнее вибрационное воздействие в точки крепления ТС с управлением фазой гармонического сигнала для каждой точки крепления. Однако реализация предложенной установки требует разработки специфического оборудования, а именно, генератора формирования испытательного сигнала по нескольким параллельным каналам и позволяющего управлять значением фазы сигнала по каждому каналу. Количество каналов должно соответствовать количеству точек крепления бортовой ТС.

Существующие генераторы тестовых сигналов [4] не позволяют осуществить управление фазой испытательных сигналов по каждому из имеющихся каналов относительно друг друга. Кроме того, генератор должен осуществлять формирование испытательных сигналов в заданном диапазоне частот (с плавающей частотой).

Структура цифрового генератора прямого синтеза

Современные функциональные генераторы обеспечивают широкий диапазон частот, калиброванные выходные уровни, разнообразные формы сигналов, имеют режимы модуляции, компь-

ютерный интерфейс и множество других возможностей. Наличие этих возможностей, которые ранее были добавляемыми к функциональным генераторам, в настоящее время реализуются на основе технологии прямого цифрового синтеза (ПЦС).

Разработанная структура цифрового генератора прямого синтеза показана на рис. 1.

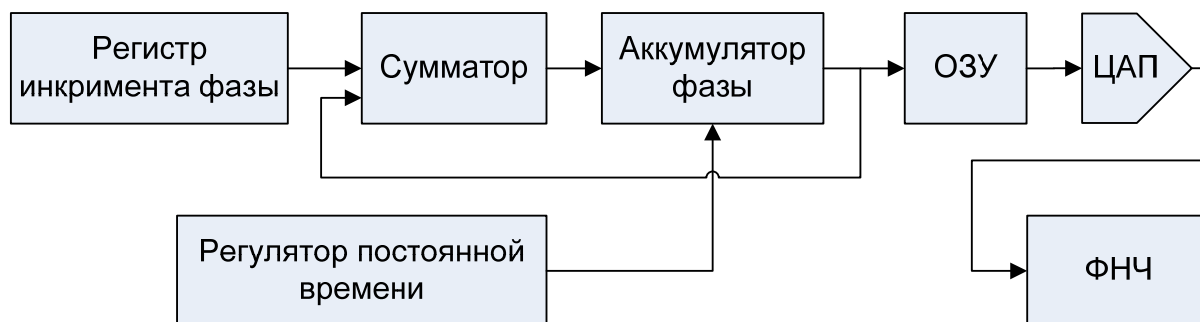


Рис. 1. Структура цифрового генератора прямого синтеза

Частота синусоидального сигнала зависит от регулируемой скорости обращения к таблице оперативного запоминающего устройства (ОЗУ). Адрес генерируется добавлением в фазовый аккумулятор константы, хранимой в регистре инкремента фазы (*PIR* – *phase increment register*). Скорость добавления константы и частота меняются изменением числа в *PIR*.

Разрешение по частоте зависит от разрядности *PIR*. Если *PIR*, сумматор и фазовый аккумулятор поддерживают 48-битные операции, относительное разрешение составит одну часть на 247 (порядка 1×10^{14}). Практически это означает, что 48-разрядный ПЦС генератор способен при выходной частоте 10 МГц обеспечить разрешение лучше 1 мГц.

После 12-разрядного цифроаналогового преобразователя сигнал поступает на ФНЧ. В качестве ФНЧ выбрана схема фильтра Бесселя седьмой степени с затуханием –3 дБ. Фильтр Бесселя имеет более пологий спад по сравнению с фильтром Кауэра, зато его фазовая характеристика почти линейна. Отсутствие дисперсии в линейно-фазовом фильтре сохранит форму импульса и предотвратит «звон» во временной области.

Регулятор постоянной времени тестовых сигналов изменяет значение длительности генерируемых импульсов τ и тем самым текущую частоту в соответствии с разработанным алгоритмом, приведенным далее.

Алгоритм работы цифрового генератора прямого синтеза

Алгоритм для формирования испытательного сигнала цифровым генератором ПЦС предназначен для работы с 8-разрядным микроконтроллером. Блок-схема алгоритма работы генератора ПЦС представлена на рис. 2.

Работа генератора ПЦС начинается с загрузки в ОЗУ одного периода синусоидальных колебаний, представленных в виде таблицы, содержащей последовательность из 256 чисел. Формирование уровня «нуля» на выходе генератора осуществляется передачей в порты ввода-вывода значения «7F» в бесконечном цикле.

Запуск генерации испытательных сигналов осуществляется командой «Start», полученной через последовательный интерфейс в цикле основной программы. *Assum* – это аккумулятор фазы, состоящий из трех 8-разрядных регистров. В младший регистр добавляется слагаемое ΔF , определяющее текущее значение частоты F согласно выражению

$$F = \frac{\Delta F F_{\text{clock}}}{m 2^B},$$

где F_{clock} – тактовая частота; m – количество тактов в цикле генерации; B – разрядность аккумулятора (в данном случае 24).

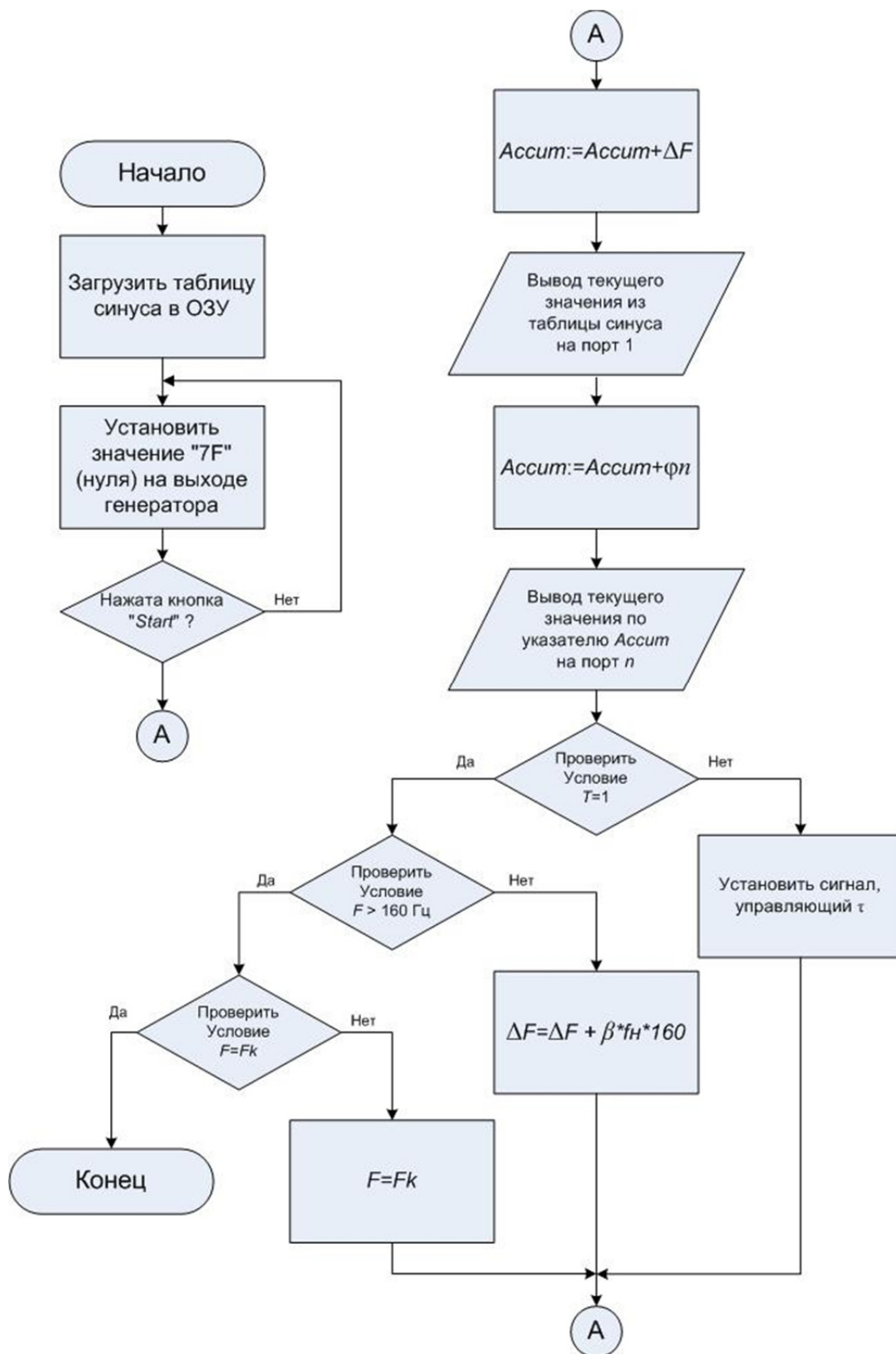


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы цифрового генератора прямого синтеза

Фазовый сдвиг n -го канала определяется 8-разрядной переменной φ , добавляемой к старшему регистру аккумулятора непосредственно перед передачей в порт его значения из ОЗУ. Условие $T = 1$ определяет, закончилось ли формирование одного периода колебаний. Если да, то

необходимо заново рассчитать значение ΔF . Если нет, то необходимо установить значение сигнала управляющего τ выдачей в порт двух старших регистров ΔF .

На частотах выше 160 Гц шаг приращения значения текущей частоты постоянен и равен одной октаве в минуту

$$\Delta F_n = \Delta F_{n-1} + \beta,$$

где $\beta = \frac{160 \cdot 2^B m}{F_{\text{clock}}}.$

На частотах ниже 160 Гц шаг приращения значения текущей частоты не постоянен и определяется согласно выражению

$$\Delta F_n = \Delta F_{n-1} + \frac{\beta F_n}{160},$$

где F_n – нижняя фиксированная частота рабочего диапазона. Таким образом, чем ниже частота, тем меньше скорость изменения частоты. Условие $F = F_k$ необходимо для выхода из цикла при завершении формирования испытательного сигнала.

Вывод

Разработанный цифровой генератор прямого синтеза для формирования многоканального испытательного сигнала с плавающей частотой, работающий по предложенному алгоритму, позволяет формировать испытательный сигнал по нескольким параллельным каналам и управлять значением фазы сигнала в каждом из каналов. Реализация предложенного генератора прямого синтеза в виде программно-аппаратного комплекса в составе установки [10] позволит при проведении стендовых испытаний бортовых ТС на устойчивость к внешнему вибрационному воздействию вводить в каждую точку крепления ТС испытательный сигнал с различным фазовым сдвигом. Тем самым достигается повышение соответствия режимов стендовых испытаний бортовых ТС и режимов их реальной эксплуатации.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. Методы и средства проектирования высоконадежных электронных средств / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров ; под ред. проф. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014 – 266 с.
2. ГОСТ РВ 20.39.304-98 КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.
3. Малов, А. В. Разработка автоматизированной подсистемы обеспечения стойкости радиоэлектронных средств к механическим воздействиям на основе систем виброизоляции : дис. ... канд. техн. наук / Малов А. В. – М., 2011.
4. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под ред. А. И. Коробова. – М. : Радио и связь, 2002. – 272 с.
5. Тумковский, С. Р. Виброакустический контроль бортовой космической аппаратуры / С. Р. Тумковский, С. У. Увайсов, И. А. Иванов, Р. И. Увайсов // Мир измерений. – 2007. – № 12. – С. 4–7.
6. Груничев, А. С. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность / А. С. Груничев. – М., 2012. – 271 с.
7. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л. Н. Александровская, В. И. Круглов, А. Г. Кузнецов, В. А. Кузнецов, А. А. Кутин, А. М. Шолом. – М. : Логос, 2003. – 735 с.
8. Голушко, Д. А. Анализ акселерограмм, полученных в различных точках крепления бортовых электронных средств / Д. А. Голушко // Вопросы радиоэлектроники. – 2015. – № 1. – С. 64–69.

9. Голушко, Д. А. Исследование особенностей возбуждения собственных частот в конструктивных элементах электронных средств / Д. А. Голушко, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Вопросы радиоэлектроники. – 2015. – № 1. – С. 66–76.
10. Пат. на изобретение 2536325 РФ : МПК G 01 M 7/06. Способ определения спектральных колебательных характеристик конструктивных элементов РЭС и установка для его реализации / Голушко Д. А., Затылкин А. В., Лысенко Н. К., Таньков Г. В., Юрков Н. К. – № 2012130735 ; заявл. 05.02.2013 ; опубл. 10.08.2014, Бюл. № 35.

Голушко Дмитрий Александрович

кандидат технических наук,
начальник отдела исследований,
Научно-производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: oldalez@yandex.ru.

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysrenko7891@rambler.ru

Калаев Михаил Павлович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lsgau5@yandex.ru

Аннотация. Показано, что при проведении стендовых испытаний бортовых технических систем на устойчивость к внешним вибрационным воздействиям существует несоответствие испытательных режимов режимам функционирования технических систем в реальных условиях эксплуатации, вызванное несовершенством способа введения внешнего вибрационного воздействия в конструкцию технической системы. С целью повышения соответствия испытательных режимов режимам реальной эксплуатации предложен цифровой генератор прямого синтеза, предназначенный для формирования многоканального испытательного сигнала, в котором сигнал каждого канала формируется для конкретной точки крепления бортовой технической системы. Испытательный сигнал формируется генератором согласно представленному алгоритму, который отличается от известных управлением величиной фазового сдвига сигнала в каждом канале. Такой подход позволяет осуществить управление перемещением каждой точки крепления бортовой технической системы во время стендовых испытаний на устойчивость к внешнему вибрационному воздействию независимо друг от друга, и тем самым, приблизить соответствие режимов стендовых испытаний бортовых технических систем к режимам реальной эксплуатации.

Golushko Dmitriy Aleksandrovich

candidate of technical sciences,
chief of the research department,
Scientific Production Enterprise «Rubin»
(2 Baydukov street, Penza, Russia)

Lysenko Aleksey Vladimirovich

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

Kalaev Mikhail Pavlovich

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

Abstract. It is shown that during bench testing board of technical systems for resistance to external vibration effects there is a mismatch test modes of the mode of functioning of technical systems in actual use, due to the imperfection of the route of administration of the external effects of vibration in the design of the technical system. To improve compliance test modes of operation is provided a real digital direct synthesis generator for generating a multi-channel test signal, wherein the signal of each channel is formed for a specific attachment point of a technical system board. The test signal generator is formed according to the present algorithm, which differs from the known phase shift amount control signal in each channel. This approach allows the management of the movement of each point of attachment of on-board technical system during the bench tests for resistance to the effects of external vibration independently of each other, and thereby bring the appropriate mode of bench tests onboard technical systems to real use.

Ключевые слова: генератор, прямой синтез, испытательный сигнал, плавающая частота, фазовый сдвиг, техническая система.

Key words: generator, direct synthesis, the test signal, floating frequency, phas shift, the technical system.

УДК 620; 629.01

Голушко, Д. А.

Цифровой генератор прямого синтеза для формирования многоканального испытательного сигнала с плавающей частотой / Д. А. Голушко, А. В. Лысенко, М. П. Калаев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 73–78.

МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

УДК 517.4

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СТОИМОСТНОЙ КРИТЕРИЙ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ТРУДНОФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ

В. Г. Камбург, Н. Ю. Бодажков, Н. В. Агафонкина

Одними из работоспособных инструментов оценки и управления качеством системы являются, как известно, интегральные (обобщенные) критерии качества [1].

Наряду с нахождением оптимального значения стоимости и качественного состояния системы можно ставить задачи выбора рациональных путей повышения уровня качества, влиянием на выбранный фактор или группу факторов по заданной стоимости, например, решать задачу управления качеством с минимизацией затрат.

Покажем это на примере интегрального критерия в виде линейной свертки

$$Z = \sum_j \alpha_j K_j, \quad j = 1, \dots, l \quad (1)$$

естественного условия нормирования: $\sum_j \alpha_j = 1$, $0 \leq \alpha_j \leq 1$ – весовые множители, $K_j \geq 0$ – частные критерии свойств системы для одной из оптимизационных задач создания строительных материалов, трудность формализации которой состоит в выборе экспертных оценок α_j и частных критериев K_j .

Задача 1. Найти состав компонентов $(x_1, \dots, x_n)$ с заданными удельными стоимостями $(c_1, \dots, c_n)$, обеспечивающий максимальное значение интегрального критерия Z при минимальной удельной стоимости общего состава смеси

$$S = \sum_i^n c_i x_i \quad (2)$$

и заданных ограничениях:

$$\begin{aligned} & \max Z(x_1, \dots, x_n), \min S \\ & \min x_i \leq x_i \leq \max x_i, \quad i = 1, \dots, n \\ & 0 \leq K_j(k_1, \dots, k_p) \leq 1, \quad j = 1, \dots, l \\ & \min k_j \leq k_j \leq \max k_j, \quad j = 1, \dots, p. \end{aligned}$$

Ограничения определяются нормативными документами, экспертными оценками, приобретенным опытом и др. При такой параметризации все функции многих переменных, зависящие от составов, становятся функциями от одной стоимостной переменной S , а выражение (1) можно рассматривать как стоимостной интегральный критерий качества.

Задача 2. Обосновать принятие решений по вложению затрат заданного уровня в приращение значения определенного частного критерия или группы критериев качества для повышения общего качества системы.

Рассмотрим выражение полного дифференциала интегрального критерия в некоторой выбранной точке:

$$\begin{aligned} Z - Z_0 &= \alpha_1 \left(\frac{\partial Z}{\partial K_1} \right)_0 (K_1 - K_1^0) + \dots + \alpha_l \left(\frac{\partial Z}{\partial K_l} \right)_0 (K_l - K_l^0) = \\ &= \left[\alpha_1 \left(\frac{\partial Z}{\partial K_1} \right)_0 \left(\frac{\partial K_1}{\partial S} \right)_0 + \dots + \alpha_l \left(\frac{\partial Z}{\partial K_l} \right)_0 \left(\frac{\partial K_l}{\partial S} \right)_0 \right] * (S - S_0), \end{aligned} \quad (3)$$

где нулевым индексом и без него обозначены значения параметров в фиксированной нулевой и произвольной точках. K_j – шкалированные коэффициенты j -го свойства материала, зависящие от частных критериев качества $k_i = k_i(x_1, \dots, x_n)$, $i = 1, \dots, p$, $\left(\frac{\partial Z}{\partial K_l} \right)_0, \left(\frac{\partial K_l}{\partial S} \right)_0$ – соответствующие част-

ные производные от свойств и стоимости.

Шкалирование производится либо из экспериментальных данных по стандартным методикам (что предпочтительнее, но не всегда возможно) [2], либо с использованием экспертных оценок и функции Харрингтона (как правило, ввиду отсутствия более обоснованных данных) [3]. Численное значение Z характеризует состояние системы, а его выражение (3) позволяет анализировать влияние каждого из факторов на изменение критерия качества при изменении удельной стоимости частного фактора на величину удельной стоимости $S - S_0$ и оценивать его стоимостной вклад в общее значение критерия при условии роста. Условие роста $Z - Z_0 \geq 0$.

В линейном приближении из полного приращения для выбранной стадии состояния $K_1^0, \dots, K_l^0$ согласно (3)

$$Z = Z_0 + \left[\alpha_1 \left(\frac{\partial Z}{\partial K_1} \right)_0 \left(\frac{\partial K_1}{\partial S} \right)_0 + \dots + \alpha_l \left(\frac{\partial Z}{\partial K_l} \right)_0 \left(\frac{\partial K_l}{\partial S} \right)_0 \right] * (S - S_0). \quad (4)$$

Таким образом, переход системы из одной стадии состояния с независимыми частными характеристиками $K_1^0, \dots, K_l^0$ в другое, с характеристиками $K_1, \dots, K_l$, можно проанализировать как изменение общего критерия Z , так и изменение вкладов каждого из частных факторов.

Для прогноза изменения стадии состояния системы рассмотрим влияние каждого из частных факторов на ее поведение. При этом частные приращения шкалированных единиц, легко приводимых к реальным размерным физическим единицам через обратные взаимно-однозначные преобразования, характеризуют уровень необходимых финансовых затрат для перевода системы в качественно лучшее состояние. Сравнительным анализом приращений частных факторов и или группы факторов можно выбрать больший рост общего критерия с меньшими затратами, что позволяет управлять процессом выбора рациональных путей повышения качества системы.

Алгоритм такого выбора включает следующие основные стадии:

1) определение частных производной от интегрального критерия и составляющих от полученной эмпирической (МНК) зависимости K_j или функции Харрингтона от состава и удельной стоимости S ;

2) выбор вектора желательного изменения признака K_j для текущего состояния интегрального критерия Z_0 в состояние Z ;

3) определение затрат на перевод системы в очередное состояние качества с использованием значений стоимости для таких изменений.

Практическое применение указанного алгоритма позволяет оценить общее состояние системы, находящейся под управляемым воздействием, обосновать способ улучшения и выбрать рациональные пути перевода ее в более качественное состояние.

Эффективность применения такого подхода будет зависеть от обоснованности выбранного интегрального критерия качества и методов численного решения оптимизационной задачи (1)–(2).

Заметим, что если удастся связать свойства системы и ее качества непосредственно со стоимостью, то алгоритм нахождения максимума критерия формализуется вместе с анализом частных производных, например для вышеупомянутых задач строительства, из (3) несложно получить

$$Z = Z_0 + \left[\alpha_1 \left(\frac{\partial Z}{\partial K_1} \right)_0 \left(\frac{\partial K_1}{\partial S} \right)_0 + \dots + \alpha_l \left(\frac{\partial Z}{\partial K_l} \right)_0 \left(\frac{\partial K_l}{\partial S} \right)_0 \right] (S - S_0) =$$

$$= Z_0 + \left[\alpha_1 \left(\frac{\partial Z}{\partial K_1} \right)_0 \sum_i^n \left(\frac{1}{C_i} * \left(\frac{\partial K_1}{\partial X_i} \right)_0 \right) + \dots + \alpha_l \left(\frac{\partial Z}{\partial K_l} \right)_0 \sum_i^n \left(\frac{1}{C_i} * \left(\frac{\partial K_l}{\partial X_i} \right)_0 \right) \right] (S - S_0). \quad (5)$$

Отсюда видно, что каждый из членов несет содержательный смысл при переходе в очередное состояние системы на единицу удельной стоимости и может быть проанализирован с рекомендациями для содержательного решения поставленной задачи.

Пример практической реализации данного подхода в виде задачи 1 подробно рассмотрен авторами [4].

Ключевым звеном предложенного алгоритма является задача (2) определения оптимального состава x_i^0 при заданных стоимостях c_i и ограничениях. Таким образом, для найденного оптимального S^0 на первом этапе решения задачи необходимо определить соответствующие оптимальные значения x_i^0 . Сводя эту задачу к задаче квадратичного программирования

$$F(x) = (S^0 - \sum_i^n c_i x_i)^2, \quad (6)$$

можно утверждать, что она имеет единственное решение. Мы отдаем себе отчет, что в силу вида целевой функции минимизации, а также возможной ее «овражистости» многое зависит от начальных приближений [5], поэтому в выборе начальных приближений использовали различные варианты. Учитывая характерные значения для S^0 и ограничения, необходимо получить реальные практические оценки для устойчивости коридоров погрешностей в находимых x_i в зависимости от погрешностей и ограничений входных данных. Для этого нами использовался классический подход имитационного моделирования [6], использованный авторами в решении задач строительства. В качестве модельных выбиралось следующее: уравнение (2), значения стоимости $0,1 \leq S \leq 0,5$ с ограничениями $\min x_i \leq x_i \leq \max x_i$ и значениями c_i (табл. 1), характерными для реальных многокомпонентных систем:

$$5 < x_0 < 35; 0,5 < x_1 < 10; 55 < x_2 < 70;$$

$$0,05 < x_3 < 2; 0,55 < x_4 < 0,8; 17 < x_5 < 20; 0,1 < x_6 < 1. \quad (7)$$

Таблица 1

Цены компонентов

Компоненты	Цена
Известь, кг	5
ГСК, кг	13
Песок, кг	0,15
С-3, кг	49
Neolith, кг	75
Наполнитель: кг	
желтый	175
синий	230

Точные модельные значения x_i в уравнении (2) и ограничениях (7) «портились» на 3, 5, 10, 20, 30 %, затем по «испорченным» данным находились восстановленные значения компонентов. Далее подсчитывались среднее значение $\bar{X}$ и относительный эмпирический стандарт:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X}{n}, \quad \bar{S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X)^2}{n-1}}, \quad (8)$$

n – количество серий расчетов; X – восстановленные значения компонентов.

Для оценки погрешности оптимальных компонентов смеси брался конкретный пример, условной стоимостью $S = 0,254$ на 100 г навески. С заданными ограничениями по компонентам

$$15 < x_0 < 22; 0,9 < x_1 < 5; 59,1 < x_2 < 62;$$

$$0,13 < x_3 < 1,5; 0,63 < x_4 < 0,64; 18,8 < x_5 < 19,9; 0,15 < x_6 < 0,75 \quad (9)$$

и точным начальным приближением x_i

$$x_1 = 15,24, x_2 = 4,57, x_2 = 59,45, x_3 = 0,14, x_4 = 0,64, x_5 = 19,81, x_6 = 0,15.$$

Далее с помощью функции *rnd* среды *MathCad* начальное приближение x_i «портилось» на 3, 5, 10, 20, 30 % и просчитывалось 1000 раз. Из полученных результатов подсчитывались среднее значение $\bar{X}$ и относительный эмпирический стандарт (рис. 1, 2).

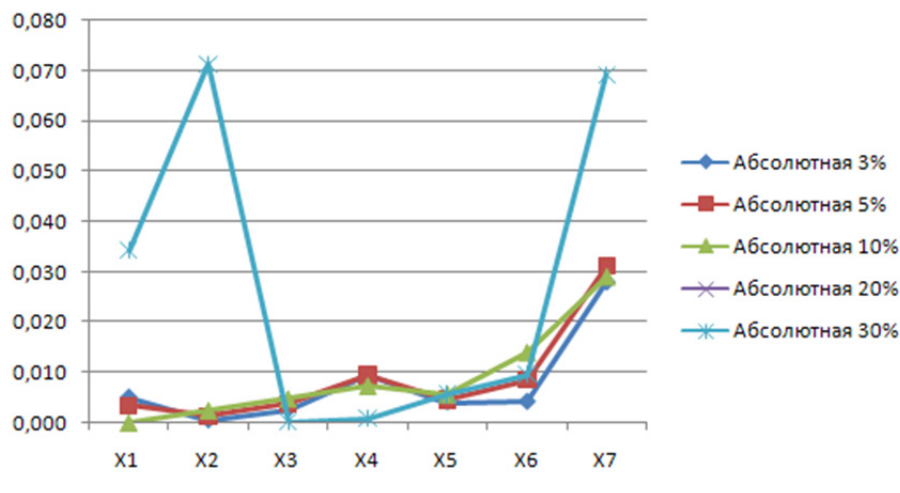


Рис. 1. Среднее имитационное значение $\bar{X}$ выборки $n = 1000$

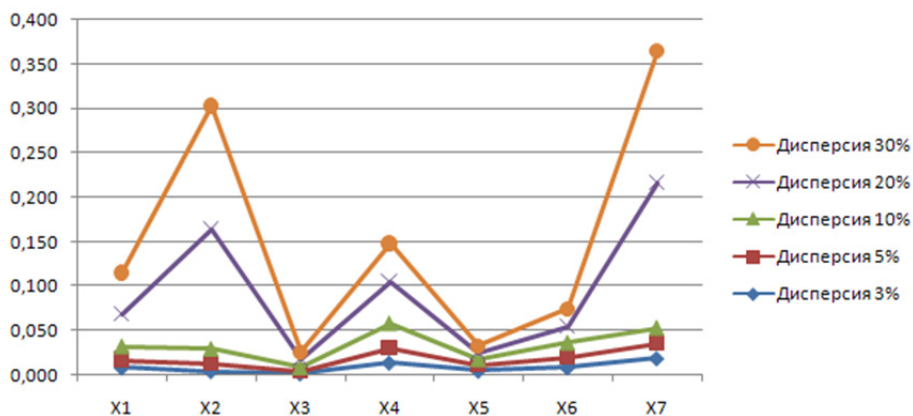


Рис. 2. Относительный эмпирический стандарт $n = 1000$

Для более детального анализа выберем компоненты x_i , которые имеют максимальные, минимальные и средние значения (рис. 3, 4).

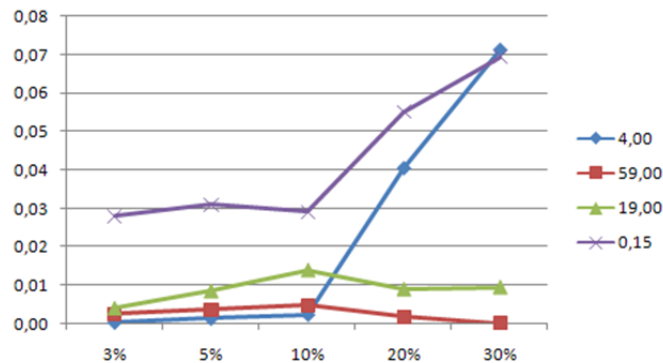


Рис. 3. Среднее имитационное значение $\bar{X}$ выборки $n = 1000$

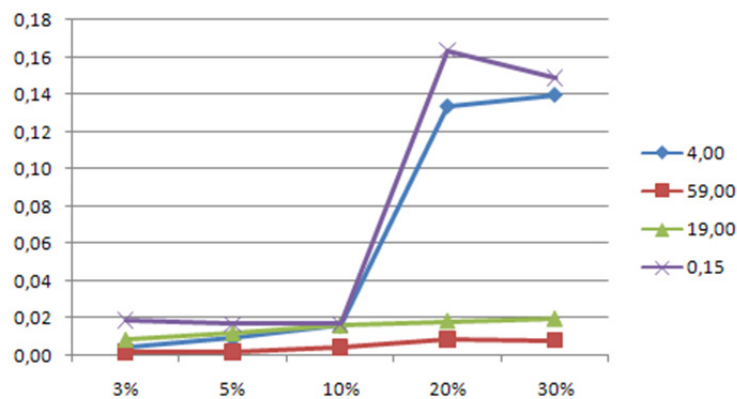


Рис. 4. Относительный эмпирический стандарт $n = 1000$

По графикам можно определять погрешность оценок содержания компонентов x_i при различных погрешностях начальных приближений (3, 5, 10, 20, 30 %).

Несмотря на большую начальную погрешность, конечные результаты варьируются в пределах 7 % по средним значениям $\bar{X}$ и до 16 % относительного эмпирического стандарта, это связано с тем, что допустимый диапазон содержательных ограничений на компонентный состав, меньший имитационной погрешности [7].

Для выбранного нами реального значения состава (0,254) и ограничений (7) были получены следующие значения (табл. 2).

Таблица 2

Полученные компоненты

Известь, %	ГСК, %	Песок, %	С-3, %	Neolith, %	H2O, %	Наполнитель, %	Стоимость, удельных ед.
15,276	4,578	59,466	0,14	0,64	19,822	0,15	0,254

Предложенный подход и приведенные примеры относятся к строительной сфере, но может быть использован при рассмотрении социально-экономических систем, где количественными оценками факторов, как правило, являются экспертные оценки.

Список литературы

1. Камбург, В. Г. Об управлении качеством в задачах строительства по результатам оптимизации интегрального стоимостного критерия / В. Г. Камбург, Н. Ю. Бодажков, Н. В. Агафонкина // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 176–177.

2. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : ВШ, 1985. – 166 с.
3. Бубнов, Е. А. Шкалирование входной информации в корабельных системах информационной поддержки / Е. А. Бубнов, Д. А. Скороходов // Вахтенный журнал. – 2007. – № 12.
4. Камбург, В. Г. Оптимизация состава сухих строительных смесей с учетом их стоимости / В. Г. Камбург, В. И. Логанина, Н. Ю. Бодажков, Л. В. Макарова // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 6. – С. 44–50.
5. Пшеничный, Б. Н. Численные методы в экстремальных задачах / Б. Н. Пшеничный, Ю. М. Данилин. – М. : Наука, 1975. – С. 320.
6. Строгалев, В. П. Имитационное моделирование / В. П. Строгалев, И. О. Толкачева. – М. : МГТУ им. Баумана, 2008. – С. 697–737.
7. Камбург, В. Г. Исследование надежности оценок оптимальных значений параметров стоимостного интегрального критерия качества методами имитационного моделирования / В. Г. Камбург, Н. Ю. Бодажков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 174–175.

Камбург Владимир Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: kamburg@rambler.ru, Npo-org@yandex.ru

Бодажков Никита Юрьевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: kamburg@rambler.ru

Агафонкина Наталья Викторовна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра управления качеством
и технологий строительного производства,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: kamburg@rambler.ru

Аннотация. В работе предложен новый подход к описанию и оптимизации интегрального критерия качества выбранных свойств системы методами нелинейного программирования, где в качестве параметризации выбираются стоимостные характеристики. Приведены примеры постановок задач и алгоритмы их решения для получения оптимальных по стоимости сухих строительных смесей, удовлетворяющих заданным техническим требованиям по их свойствам и устойчивости системы к погрешностям входных данных. Приводится обоснование критериальных соотношений для нахождения рациональных путей их улучшения.

Ключевые слова: шкалирование, интегральный критерий качества, стоимостная параметризация, минимизация, задача с ограничениями, рациональные пути.

Kamburg Vladimir Grigor'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University of Architecture and Construction
(440028, 28 German Titov street, Penza, Russia)

Bodazhkov Nikita Yur'evich

podtgraduate student,
Penza State University of Architecture and Construction
(440028, 28 German Titov street, Penza, Russia)

Agafonkina Natal'ya Viktorovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of construction technology
and quality control of production,
Penza State University of Architecture and Construction
(440028, 28 German Titov street, Penza, Russia)

Abstract. In this paper we propose a new approach to the description and optimization of integrated quality criterion is selected, the system properties by methods of nonlinear programming, where the parameterization of selected cost characteristics. Examples of formulations of problems and their solution algorithms to obtain the optimal cost of dry building mixtures meeting the specified technical requirements on their properties and the stability of the system to inaccuracies of the input data. Justification of criterion ratios for finding rational ways of their improvement.

Key words: scaling, the integral criterion of quality, cost parameterization, minimization, task constraints, rational way.

УДК 517.4

Камбург, В. Г.

Интегральный стоимостной критерий в управлении качеством трудноформализуемых систем /
В. Г. Камбург, Н. Ю. Бодажков, Н. В. Агафонкина // Надежность и качество сложных систем. – 2015. –
№ 4 (12). – С. 79–84.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ УДЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ УСТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ В ЦЕХЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

С. А. Михайлов, В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова

Введение

Более двух третей вырабатываемой в нашей стране электроэнергии распределяется и потребляется в цеховых электросетях (ЦЭС). При существующих на сегодняшний день требованиях по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, определенных ФЗ № 261, этот факт требует рассмотрения эффективности ЦЭС. Во многом эффективность определяется структурой сети. Типичная ЦЭС имеет иерархичную структуру. На нижнем уровне располагаются электроприемники (ЭП), а на верхнем уровне этой структуры располагаются цеховые трансформаторные подстанции (ЦТП). Расположение подстанций оказывает большое значение на структуру ЦЭС и в конечном счете определяет ее эффективность. От правильного выбора места установки подстанции зависит величина потерь электроэнергии в линиях электропередач, а также качество напряжения, подводимого к потребителям.

Задача определения мест расположения ЦТП

На сегодняшний день сформулированы основные методики определения мест расположения ЦТП [1–4]. Этому вопросу были посвящены работы А. А. Федорова. В его работах определено, что за оптимальное место расположения ЦТП по условию минимального расхода проводникового материала может приниматься центр электрических нагрузок (ЦЭН), определенный следующим образом:

$$\xi_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \text{ и } \eta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i y_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (1)$$

где ξ_0 , η_0 – это координаты ЦЭН; x_i , y_i – координаты i -й нагрузки; P_i – мощность i -й нагрузки [4].

Для удобства назовем этот метод «классическим».

В [5] для отыскания координат ЦЭН предложен метод распределенных удельных мощностей. Достоинства и недостатки данного метода по сравнению с классическим рассмотрены на примере цеха машиностроительного предприятия.

Из оборудования в цехе имеются фрезерные, сверлильные, шлифовальные, токарные станки, кран-балки, вытяжные системы, электропечи и бариевые ванны для обработки металла. В качестве исходных данных в обоих методах используются координаты и мощности ЭП.

Для расчета будем использовать значения мощностей нагрузки, приведенные к длительному режиму $P_{пр}$:

$$P_{пр} = P_n \sqrt{ПВ}, \quad (2)$$

где P_n – номинальная активная мощность потребителя; ПВ – продолжительность включения.

Метод распределенных удельных мощностей основан на рассеянии мощности отдельных ЭП в соответствии с (3):

$$p_{уд}(x, y) = P_{при} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где $p_{уд}(x, y)$ – это удельная мощность в точке x, y , кВт/м²; $P_{при}$ – мощность ЭП, приведенная к длительному режиму; (a, b) – координаты ЭП; σ – величина, определяющая степень рассеяния и названная «радиус рассеяния» удельной мощности, м.

В соответствии с (3) удельная мощность каждого ЭП рассеивается по колоколообразной поверхности. Объем, заключенный под этой поверхностью, пропорционален мощности ЭП.

На рис. 1 изображено распределение удельных мощностей всех ЭП рассмотренного для примера цеха при значении $\sigma = 0,2$ м. Поскольку в соответствии с условиями метода радиус рассеяния задается одинаковым для каждого ЭП, мощности их будут характеризоваться высотой поверхностей.

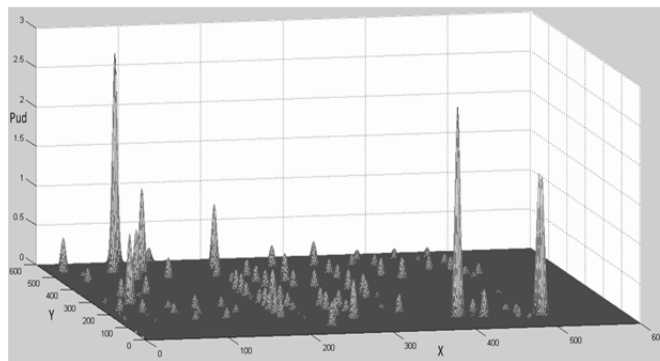


Рис. 1. Поверхность распределенных удельных мощностей потребителей цеха при малом радиусе рассеяния

Для определения координат (ЦЭН) необходимо увеличить значение радиуса рассеяния σ до 15 м. Распределение удельных мощностей при этом значении σ изображено на рис. 2.

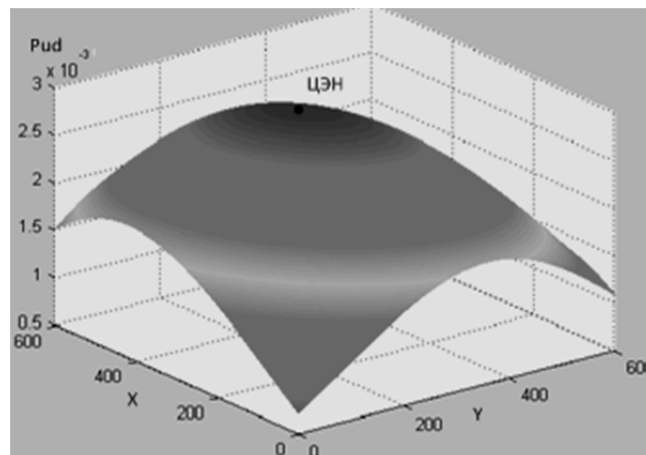


Рис. 2. Распределение удельных мощностей при $\sigma = 15$ м

Вершина результирующей поверхности проецируется в ЦЭН в соответствии с описанием метода [5]. Объем под результирующей поверхностью равен сумме объемов, заключенных под поверхностями, изображенными на рис. 1. Определенный таким образом ЦЭН имеет координаты $x = 32$ м, $y = 25$ м. Следует отметить, что координаты ЦЭН, полученные классическим методом совпадают с координатами, приведенными выше. Это дает основание говорить о справедливости метода распределенных удельных мощностей для определения места расположения одной ЦТП.

Распределения удельных мощностей в соответствии с рис. 1 и 2 являются крайними случаями распределения. Распределения при значениях σ между 0,2 и 15 м определяют координаты узлов ненаправленного графа схемы ЦЭС.

Решение задачи выбора критериев

В качестве критериев сравнения методов определения ЦЭН приняты [6]:

- величина потерь электрической энергии в ЦЭС;
- металлоемкость ЦЭС.

Для оценки величины потерь электроэнергии на передачу при установке одной подстанции в ЦЭН предположим, что каждая нагрузка подключается к источнику отдельной радиальной линией. Такой режим на практике не встречается, однако он подходит для оценочного сравнения величины потерь.

Длина радиальных линий определится следующей зависимостью:

$$l = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (4)$$

где $(x_i; y_i)$ – координаты ЭП; $(x_0; y_0)$ – координаты ЦЭН.

Зная длины линий, можно определить и величины потерь на передачу электрической энергии. Суммарные потери мощности будут определяться

$$\Delta P = \sum_{n=1}^i I_{\partial i}^2 \cdot R_i, \quad (5)$$

где $I_{\partial i}$ – эффективный ток, протекающий по проводнику к i -му приемнику; R_i – сопротивление i -го проводника.

Помимо оценки величины потерь мощности на передачу, необходимо оценивать величину капитальных вложений в систему электроснабжения цеха. Эта величина будет характеризоваться металлоемкостью прокладываемых линий электропередач, т.е. затратой металла проводников питающих нагрузки электрических сетей. Металлоемкость определится произведением длины провода на его сечение, поскольку эти параметры и характеризуют стоимость линии электропередач. Обозначим металлоемкость C_m , сечение провода s :

$$C_m = \sum_{n=1}^i l_i s_i, \quad (6)$$

где l_i – длина i -го участка сети; s_i – сечение i -го участка сети. Сечение выбрано из условия длительно допустимого тока по нагреву проводника.

Рассчитав значения металлоемкости и потерь мощности, можно получить достаточную информацию об эффективности проектируемой системы электроснабжения. Поскольку координаты ЦЭН, определенные классическим методом и методом распределенных удельных мощностей, совпадают, то и полученные значения потерь мощности и металлоемкости будут одинаковыми.

Для выбранного примера из рис. 1 видно, что наиболее мощные ЭП (их поверхности выше) расположены по диагоналям цеха. Это дает основания полагать, что при каком-то значении σ распределение удельных мощностей образует двухвершинную поверхность. Это соответствует двум ЦЭН. Получить такое решение классическим методом нельзя.

Для получения двухвершинной поверхности зададим радиус рассеяния равным $\sigma = 6$ м. Результат распределения удельных мощностей представлен на рис. 3.

Вершина 1 имеет координаты $x_1 = 53$, $y_1 = 11$, вершина 2 – $x = 10$, $y = 44$. Поскольку установка дополнительной ЦТП в цехе – весьма затратное мероприятие и эти расходы могут поглотить всю экономию, полученную от сокращения суммарной длины линий внутрицеховой сети, предлагается такой вариант не использовать. Пусть мощность трансформаторов в ЦТП выбирается из суммарной мощности ЭП всего цеха. ЦТП устанавливается в первом ЦЭН, тогда во втором ЦЭН необходимо установить распределительный пункт (РП), запитанный от ЦТП. Такой вариант повлечет удорожание только на стоимость РП.

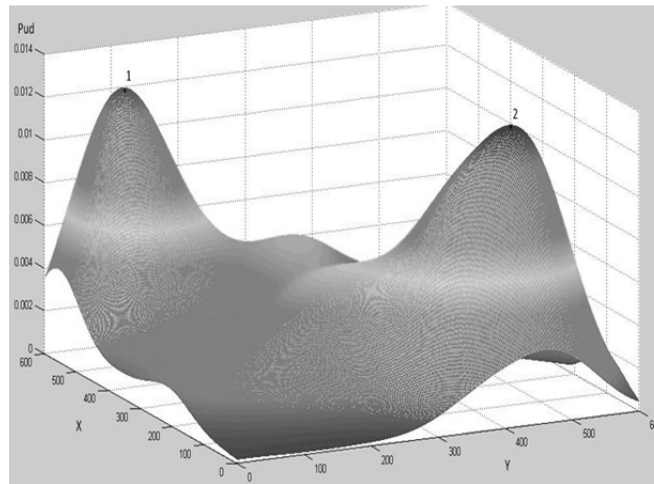


Рис. 3. Распределение удельных мощностей по площади цеха при радиусе рассеяния $\sigma = 6$ м

После определения мест установки подстанций следует решить вопрос о распределении ЭП между источниками питания (ЦТП и РП). На сегодняшний день такую задачу принято решать методом кластерного анализа [7–9]. Метод распределенных удельных мощностей позволяет решить и эту проблему. Граница зон подключения потребителей будет определена линией минимальных значений удельных мощностей при том же значении радиуса рассеяния σ . Граница, полученная таким образом, изображена на рис. 4.

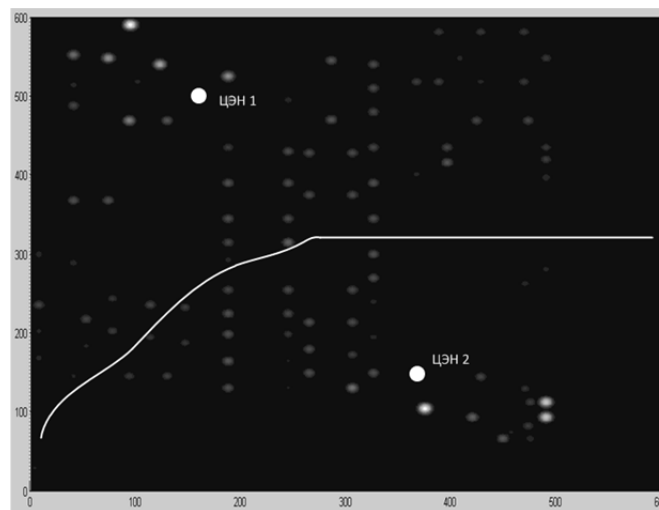


Рис. 4. Границы подключения потребителей к подстанциям

Будем считать, что длины кабелей, соединяющих потребителей с подстанциями, равны расстоянию от потребителей до ЦТП и РП.

Длины кабелей потребителей ЦТП

$$l_{1i} = \sqrt{(x_{1i} - x_1)^2 + (y_{1i} - y_1)^2}. \quad (7)$$

Длины кабелей потребителей РП

$$l_{2i} = \sqrt{(x_{2i} - x_2)^2 + (y_{2i} - y_2)^2}, \quad (8)$$

где (x_{1i}, y_{2i}) и (x_{2i}, y_{2i}) – координаты потребителей, относящихся к первой и второй группе соответственно; (x_1, y_1) и (x_2, y_2) – это координаты ЦТП и РП соответственно.

Металлоемкость системы с двумя ЦЭН пропорциональна суммарной длине проводников, так как сечения кабелей, питающих потребителей, не изменились.

Это заключение справедливо только для принятого допущения, что потребители подключены к ЦТП и РП радиальными линиями.Metalлоемкость сети электроснабжения при наличии двух ЦЭН в цехе определяется суммой

$$C'_m = C_{m1} + C_{m2}, \quad (9)$$

где C'_m – суммарная металлоемкость сети при использовании двух ЦЭН; C_{m1} – металлоемкость кабелей от ЦТП; C_{m2} – металлоемкость кабелей от РП.

В свою очередь

$$C_{m1} = \sum_{i=1}^i l_{1i} \cdot s_{1i} \quad (10)$$

и

$$C_{m2} = \sum_{i=1}^i l_{2i} s_{2i}, \quad (11)$$

где l_{1i}, l_{2i} – длины кабелей от ЦТП и РП соответственно; s_{1i}, s_{2i} – сечения кабелей, подключаемых к ЦТП и РП соответственно.

Расчеты указывают на то, что экономия металла при двух ЦЭН составляет 31 %.

Величина потерь мощности на передачу электрической энергии будет пропорциональна квадрату тока нагрузки и сопротивлению линий электропередач. Поскольку мощности нагрузок в цехе не изменятся при двух ЦЭН, значения токов останутся неизменными. Сумма потерь на передачу электрической энергии будет пропорциональна металлоемкости системы. Снижение металлоемкости в данном случае сопровождается уменьшением потерь на передачу электрической энергии.

Расчет величин потерь мощности на передачу и сравнение этих величин для двух рассматриваемых случаев показывают, что при установке ЦТП и РП в двух ЦЭН в цехе потери мощности на передачу также снижаются на 31 %.

Заключение

Анализ систем электроснабжения предприятий указывает на то, что использование «центра масс» для определения мест расположения подстанций не всегда эффективен, так как позволяет определить место расположения одной подстанции для предварительно сгруппированных потребителей. Предварительное разделение на группы проводится произвольно без учета критериев оптимальности. Описанный выше метод распределенных удельных мощностей позволяет спроектировать систему электроснабжения, обладающую лучшими характеристиками по признаку минимальных потерь на передачу электрической энергии с минимальной металлоемкостью. Разработанный метод универсален и может быть использован при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий. В дальнейших публикациях будет подробнее рассмотрено определение координат узлов ненаправленного графа ЦЭС, а также применение метода распределенных удельных мощностей для определения оптимальных мест установки компенсаторов реактивной мощности. Установка последних даст дополнительное снижение потерь в сети, а также повысит качество напряжения, подводимого к ЭП.

Список литературы

1. Каменева, В. В. Область рассеяния центра электрических нагрузок / В. В. Каменева. – М. : МЭИ, 1971.
2. Каменева, В. В. К вопросу определения местоположения главных понизительных или распределительных подстанций промышленных предприятий / В. В. Каменева, Э. А. Киреева // Электричество. – 1972. – 73 с.
3. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 466 с.
5. Горячев, В. Я. Математические методы определения центра распределенных по поверхности нагрузок / В. Я. Горячев, С. А. Михайлов, Ю. А. Шатова // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 166–169.

6. Основные характеристики электромагнитной системы двухкоординатного датчика / В. Я. Горячев, М. В. Комаров, Ю. К. Чапчиков, Ю. А. Шатова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 82–97.
7. Исследование программных пакетов моделирования влияния электромагнитных воздействий на изделия радиоэлектронных средств / С. А. Бростилов, Т. Ю. Бростилова, Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, А. О. Бекбаулиев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 206–209.
8. Юрков, Н. К. Системный подход к организации жизненного цикла сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 27–34.
9. Исследование архиваторов с функцией анализа эффективности сжатия данных / Д. Л. Петрянин, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков, А. Г. Дмитриенко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 136–138.

Михайлов Сергей Алексеевич

главный специалист,
Самарский филиал
ОАО «Московский узел связи энергетики»,
(443080, Россия, г. Самара, ул. Революционная, 70,
офис 404)
E-mail: mihailov@gmail.com

Горячев Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gorvlad1@yandex.ru

Бростилова Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tat-krupkina@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются пути оптимизации системы электроснабжения цеха машиностроительного завода на основе разработанного авторами метода распределенных удельных мощностей. В качестве критериев оптимизации использована величина потерь на передачу электрической энергии и металлоемкость системы.

Ключевые слова: электроснабжение цеха, подстанция, оптимизация, потребитель электрической энергии, потери электроэнергии, металлоемкость.

Mikhaylov Sergey Alekseevich

chief specialist,
Samara branch of OJSC «Moscow unit of energy»
(443080, office 404, 70 Revolyutsionnaya street,
Samara, Russia)

Goryachev Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of electricity and electronics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Brostilova Tat'yana Yur'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of electricity and electronics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. In the article considered the ability to install two substation in the workshop. Is offered to use the method of distribution specific power for determine the optimum installation location of substation. The power losses value and metal consumption is compared for options of one or two substations.

Key words: electricity, substation, optimization, consumer of electricity, electrical energy losses, metal consumption.

УДК 621.311

Михайлов, С. А.

Использование метода распределенных удельных мощностей для определения мест установки источников питания в цехе машиностроительного предприятия / С. А. Михайлов, В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 85–90.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 624.382.049.77:621.396.6.049.75

НАДЕЖНОСТЬ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ

С. В. Ванцов, А. М. Медведев

Введение

«Голубой» мечтой каждого производителя является бездефектное производство. Ключевыми моментами достижения этой мечты являются технологическая дисциплина на производстве и контроль в процессе производства.

Выбор стратегии контроля традиционно определялся соотношением $C_1N \leq C_2n_{бр}$, где C_1 – стоимость контроля одного изделия; N – величина партии изделий; C_2 – стоимость ремонта одного бракованного изделия; $n_{бр}$ – количество бракованных изделий в партии.

При выполнении этого соотношения используется стратегия 100 %-го контроля, в противном случае принимается стратегия выборочного контроля.

К сожалению, в настоящее время не удастся воспользоваться этим соотношением, поскольку практика показала экономическую нецелесообразность ремонтных операций.

Воспользуемся модифицированным соотношением, а именно: $C_1N \leq C_3n_{бр}$, где C_3 – стоимость готового изделия.

В случае выполнения указанного соотношения, когда потери от брака превышают стоимость 100 %-го контроля партии, выбирается стратегия сплошного контроля.

При выборе стратегии выборочного контроля определяющим является уровень дефектности партии изделий $q = n_{бр}/N$.

Уровень дефектности традиционно определялся предыдущим производственным опытом и договоренностью между поставщиком и заказчиком изделий.

Предельный (экономически обоснованный) для конкретного производства уровень дефектности можно представить так: $q_{пр} = C_1/C_3$.

Таким образом, уменьшение уровня дефектности изделия по сравнению с $q_{пр}$, т.е. стремление к бездефектному производству, однозначно приводит к стратегии сплошного контроля, что, естественно, увеличивает стоимость готового изделия. Актуальным является поиск разумного компромисса между финансовыми потерями от бракованных изделия и затратами при стремлении к «голубой» мечте о бездефектном производстве.

Одним из основных этапов проведения производственного контроля является входной контроль комплектующих.

Казалось бы, интересным и полезным показать технико-экономическую эффективность различных стратегий входного контроля в условиях, когда затраты на организацию полноценного

тестирования электронных компонентов и материалов настолько велики, что приходится задумываться о целесообразности сплошного или выборочного входного контроля или выборе добросовестного поставщика.

Актуальность выбора стратегии входного контроля состоит в том, что производители электронной аппаратуры терпят значительные издержки от дефектных материалов или комплектующих, поступающих в производство. Как правило, эти дефекты непредсказуемо проявляют себя в готовой продукции, что сказывается на ее надежности и выходе годной продукции [1]. Система аттестации по стандартам ИСО 9000 позволяет надеяться на поставки качественных материалов и комплектующих. Производители электронной аппаратуры вынуждены доверять поставщикам, так как капитальные затраты на оснащение входного контроля полноценной тестирующей аппаратурой слишком велики. Производителю легче выбрать добросовестного поставщика компонентов и материалов, чем организовывать их входной контроль. Тем более что наличие в производственной линии внутрисхемного и периферийного контроля компенсирует отсутствие входного контроля за счет выявления дефектных компонентов на стадии производства. Тем не менее у производителя аппаратуры ответственного назначения возникает желание оценить стратегию входного контроля с позиций надежности и экономики производства [2].

Более того, входной анализ качества комплектующих и материалов позволяет производителям аппаратуры выявить недостатки, свойственные компонентам того или иного поставщика, заранее принять необходимые меры для повышения надежности компонентов еще до возможного отказа аппаратуры. Несмотря на наличие выходного контроля продукции на заводах-поставщиках, в аппаратуру могут попасть дефектные компоненты.

Назначение и сущность входного контроля

Входной контроль является дополнительной проверкой компонентов и материалов перед использованием их в производстве по параметрам, определяющим их работоспособность и надежность [3]. Это вызвано тем, что отдельные детали могут иметь пониженное качество из-за недобросовестного контроля на выходе у поставщика, а также возможным продолжительным хранением готовых изделий на складе, сопровождающимся ухудшением качественных показателей. Кроме того, не исключена возможность повреждения компонентов и материалов в процессе транспортировки и т.д.

При входном контроле компоненты подвергаются, по крайней мере, визуальной проверке. При наличии у производителя соответствующей тестирующей аппаратуры и программного обеспечения компоненты подвергаются электрической проверке в сочетании с термотренировкой [3].

При визуальной проверке обращают внимание на наличие на компоненте или упаковке материала отчетливо видимой надписи типа, номинала, допуска, технических условий или сертификата, отсутствие на изделии царапин, сколов, трещин, вмятин, коррозии.

При электрической проверке проверяют соответствие электрических параметров компонентов данным, указанным в пунктах требований и методик технических условий или сертификатов.

Компоненты, прошедшие входной контроль, дополнительно маркируются отличительным знаком.

Входной контроль компонентов или материалов может быть 100 %-ым или выборочным.

Из практического производственного опыта принято определять объем выборки в размере 5–10 % от объема партии проверяемых изделий, но не менее 100 штук. Строгие статистические методы определения объема выборки излишне сложны и использование их для повышения точности определения объема выборки, как правило, не оправдывают вычислительных затрат.

Обычно устанавливается следующее правило: если при выборочной проверке компонентов окажутся бракованные изделия, проверке подлежит удвоенное количество изделий из этой партии. В случае выявления при проверке удвоенного количества изделий хотя бы одного бракованного компонента, проверке подвергаются 100 % изделий полученной партии [4].

Надежность входного контроля

Для определения уровня надежности электронной аппаратуры на этапе производства, существенную долю в который вносит входной контроль комплектующих, воспользуемся понятием отказа технологической операции или этапа производственного процесса.

Под отказом (сбоем) технологической операции понимаем событие, заключающееся в нарушении ее нормального хода, т.е. выхода результатов производственных, технологических или контрольных действий за пределы, определенные нормативными документами.

Исходя из этого надежность производственного процесса в целом можно определить как вероятность его безотказного существования, а именно: $P_{\text{пр}} = P_1 P_2 P_3$, где $P_{\text{пр}}$ – вероятность безотказного осуществления производства; P_1 – вероятность безотказного осуществления входного контроля; P_2 – вероятность безотказного осуществления технологического процесса изготовления аппаратуры; P_3 – вероятность безотказного осуществления выходного контроля.

Следует отметить, что вероятность P_1 относится только к самому процессу контроля и не отражает наличие или отсутствия брака в совокупности проверяемых комплектующих, поскольку отказ (сбой) процесса контроля может заключаться как в том, что будет признан годным бракованный компонент, так и в том, что годный компонент будет отвергнут.

Входной контроль может быть ручным или автоматическим, 100 %-ым или выборочным. Надежность входного контроля будет различной в зависимости от метода и характера контроля. В общем случае вероятность сбоя процесса контроля определяется рядом факторов: методом контроля, скоростью проведения контроля, сроком службы тестирующей аппаратуры, продолжительностью непрерывной работы оператора.

Вероятность отказа процесса контроля можно представить следующей зависимостью

$$Q_1 = \int_0^n F(v, T) dn, \text{ где } v = n/t - \text{ скорость испытаний; } n - \text{ количество испытываемых изделий;}$$

t – время, потребное на контроль этих изделий; T – возраст тестирующего оборудования; F – плотность соответствующего закона распределения отказов.

Удобным инструментом для оценки количества отказов является интенсивность отказов или лямбда-характеристика $\lambda = q/m\Delta t$, где m – количество контрольных операций, осуществленных без сбоев к началу интервала времени Δt ; q – количество сбоев, произошедших на интервале Δt .

На рис. 1 представлена зависимость изменения лямбда-характеристики (λ -характеристики) автоматического контроля от времени эксплуатации тестирующего оборудования.

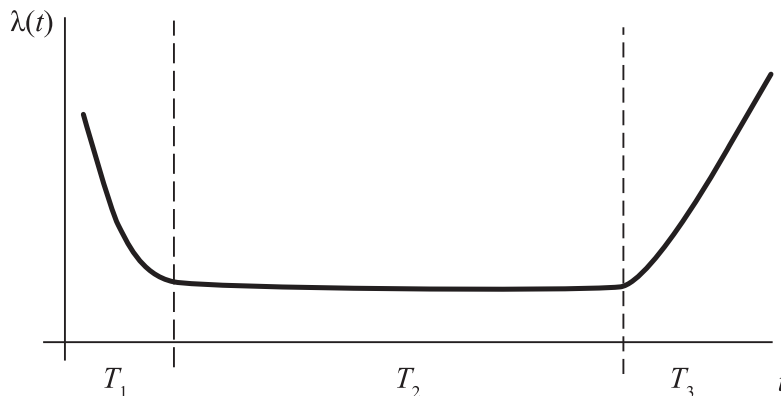


Рис. 1. Классическая λ -характеристика автоматического контроля

Начальный период T_1 характеризуется большой вероятностью сбоя, которая объясняется пусковым периодом для автоматического метода контроля, и постепенным уменьшением вероятности отказа процесса.

Основной период автоматического T_2 характеризуется постоянной вероятностью отказа, что соответствует прямолинейному участку кривой.

Последний период T_3 характеризуется резким возрастанием вероятности отказа из-за выработки срока службы тестирующей аппаратуры.

Наличие на кривой λ -характеристики прямолинейного участка позволяет воспользоваться экспоненциальным законом оценки вероятности безотказной работы. Тогда зависимость вероятности отказа процесса автоматического контроля в основной период его осуществления T_2 от ко-

личества проведенных контрольных операций или, соответственно, от величины партии проведенных компонентов имеет вид

$$Q_1 = 1 - \exp(-\lambda t) = 1 - \exp(-\lambda n/v). \quad (1)$$

На рис. 2 представлена зависимость изменения λ -характеристики ручного контроля в течение рабочей смены.

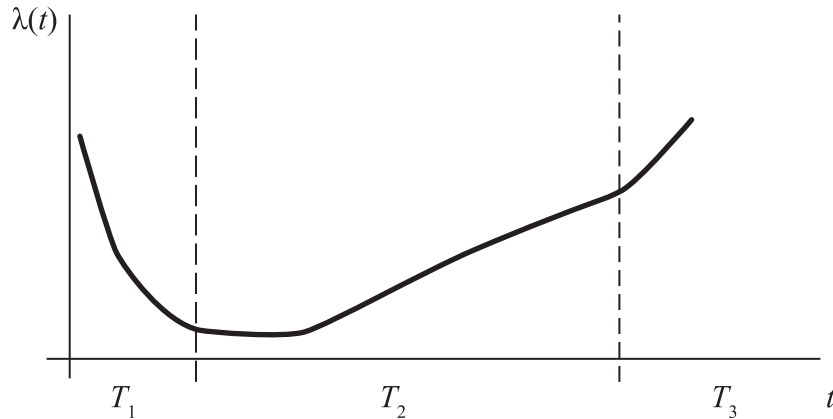


Рис. 2. λ -характеристика ручного контроля

Начало смены T_{1c} характеризуется большой вероятностью сбоя, которая объясняется освоением процесса контроля оператором для ручного метода.

Для основного времени рабочей смены T_{2c} характерно возрастание вероятности сбоя по мере утомления оператора.

Конец рабочей смены T_{3c} характеризуется резким возрастанием вероятности сбоя из-за утомляемости оператора.

При сплошном контроле надежность процесса определяется соотношением

$$P_1 = 1 - Q_1 = 1 - \int_0^N F(v, T) dn, \quad (2)$$

где N – количество изделий в контролируемой партии.

В случае выборочного входного контроля надежность процесса определяется соотношением

$$P_{1в} = (1 - Q_n)(1 - Q_v), \quad (3)$$

где Q_n – вероятность брака в выборке; Q_v – доверительная вероятность пропустить бракованное изделие при данной методике контроля.

Q_v представляет собой традиционный риск заказчика β в операционной характеристике выборочного контроля по альтернативному признаку.

Исходя из условия $Q_n \ll 1$; $Q_v \ll 1$, для уравнения (3) получим

$$P_{1в} \approx 1 - Q_n - Q_v.$$

Учитывая, что вероятность брака в выборке Q_n зависит от величины выборки n , получим выражение для определения надежности выборочного контроля

$$P_{1в} = 1 - Q_n(n) - \int_0^n F(v, T) dn. \quad (4)$$

Определим значение $P_{1в}$ двух крайних частных случаев:

а) пусть $F(v, T) = \text{const} = F_0$, т.е. соответствует равномерному закону распределения отказов. Это крайний случай автоматического контроля на горизонтальном участке T_2 кривой (см. рис. 1);

б) этот случай соответствует ручному контролю или же малонадежной работе тестирующих устройств. В этом случае λ -характеристика имеет переменное, зависящее от конкретных условий

значение (см. рис. 2). Тогда надежность контроля можно определить, например, по следующему соотношению, что соответствует экспоненциальному закону распределения отказов:

$$1 - \int_0^n F(v, T) dn = 1 - \exp(-\lambda T),$$

где T – время проведения контроля.

Вероятность брака для выбранной методики контроля Q_v , как упоминалось, равна риску заказчика β и составляет в зависимости от договоренности между поставщиком и заказчиком значение 0,005–0,1.

Для этого случая $Q_n(n) = a/n$ и $Q_v = \lambda n$, где $a = 0,25 \dots 1$ – в зависимости от выбранной надежности испытаний.

Для выборочного автоматического контроля получим следующее выражение надежности [2]:

$$P_{lv} = 1 - \frac{a}{n_1} - F_0 n_1. \quad (5)$$

Оптимальное значение надежности автоматического входного контроля получим из условий

$$\frac{\partial P_{lv}}{\partial n_1} = 0; \quad n_1 = \sqrt{\frac{a}{F_0}}; \quad P_{lv \max} = 1 - 2\sqrt{aF_0}.$$

Для выборочного ручного контроля или же малонадежной конструкции контрольно-измерительных средств выражение надежности контроля принимает вид

$$P_{lv} = 1 - \frac{a}{n_1} - \frac{\lambda n_1^2}{2}. \quad (6)$$

Оптимальное значение надежности ручного входного контроля определяется из условий:

$$\frac{\partial P_{lv}(n)}{\partial n_1} = 0; \quad n_1 = \sqrt[3]{\frac{a}{b}}; \quad P_{lv \max} = 1 - \frac{3}{2} b^{\frac{1}{3}} a^{\frac{2}{3}}.$$

При стопроцентном контроле выражение надежности имеет вид:

– для автоматического контроля $P_n = 1 - F_0 N$;

– для ручного контроля $P_n = 1 - \lambda N^2/2$.

На рис. 3 показаны зоны надежности выборочного и стопроцентного контроля, справедливые как для автоматического, так и для ручного методов контроля. Имеется характерная первая зона, где большей надежностью обладает стопроцентный контроль, и характерная вторая зона, где большей надежностью обладает выборочный контроль.

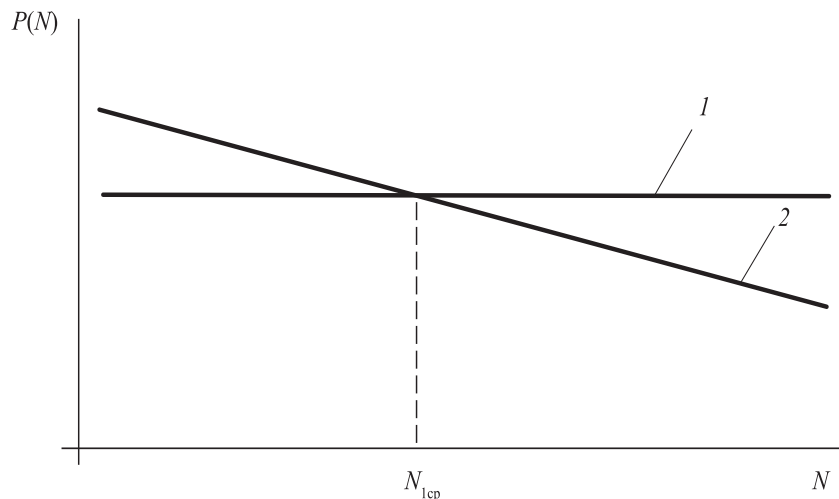


Рис. 3. Зоны надежности сплошного (1) и выборочного (2) тестирования

Для определения количества изделий $N_{кр}$, меньше которого надежность выше стопроцентного контроля и больше которого надежность выше выборочного контроля, воспользуемся условием

$$P_{1в\max} = P_n.$$

Тогда получим для автоматического метода контроля

$$N_{кр} = 2 \frac{\sqrt{aF_{a0}}}{F_0}.$$

Для ручного способа контроля

$$N_{кр} = 3 \sqrt{\frac{a}{b}}.$$

Стоимость входного контроля

Поскольку, как показывает практика, проведение ремонтных работ бракованных изделий экономически нецелесообразно, то экономическая оценка входного контроля дает возможность получить соотношения между стоимостью контроля поступающих в производство компонентов и убытками, которые терпит предприятие из-за попадания в производство бракованных элементов и материалов [5]. Тем самым решается вопрос о целесообразности применения того или иного вида входного контроля.

Введем понятие полной стоимости, под которой будем понимать сумму затрат на входной контроль и экономические потери от попадания бракованных элементов на этап сборки аппаратуры. Будем рассматривать полную стоимость, приведенную к единице выпускаемых изделий.

Определение полной стоимости дадим для трех возможных практических случаев.

Отсутствие входного контроля

Полная стоимость в данном случае совпадает с суммой убытков, которые терпят предприятия из-за производства конечных изделий, которые на этапе приемо-сдаточных испытаний будут признаны бракованными вследствие попадания на этап сборки дефектных комплектующих:

$$C'_0 = QNC_R, \quad (7)$$

где Q – доля или вероятность брака среди поступающих деталей; C_R – затраты на изготовление изделия; N – общее число деталей.

Стопроцентный контроль

Полная стоимость равна сумме затрат на контроль и отбраковку деталей. Число пропущенных дефектных деталей определяется квалификацией контролера и качеством контрольно-измерительной аппаратуры. Полная стоимость в этом случае определяется уравнением

$$C''_0 = NC_T + K_1 QNC_R, \quad (8)$$

где C_T – стоимость контроля одной детали; K_1 – доля брака, пропущенного при стопроцентном контроле.

Выборочный контроль

Полная стоимость в случае выборочного контроля состоит из двух частей:

1. Стоимость приемки партии деталей на основе выборки, которая может быть представлена на следующим выражением:

$$C = P_A [nC_T + (N - n)PC_R + nK_2PC_R],$$

где nC_T – стоимость контроля выборки, состоящей из n деталей; $(N - n)PC_R$ – потери из-за бракованных деталей из непроверяемой части партии; nK_2PC_R – потери из-за бракованных деталей

из проверяемой части партии (выборке), пропущенных контролером; P_A – вероятность приемки партии.

2. Стоимость отбракованной партии равняется стоимости контроля отобранных деталей, умноженной на вероятность отбраковки $1 - P_A$.

Выражение для ожидаемой полной стоимости отбракованных партий будет иметь вид $nC_T(1 - P_A)$.

Полная стоимость для случая выборочного контроля определяется выражением

$$C_0''' = P_A[nC_T + (N - n)QC_R + nK_2QC_R] + nC_T(1 - P_A). \quad (9)$$

Графическое выражение стоимости контроля

Пользуясь выведенными уравнениями, можно построить графики полной стоимости контроля в зависимости от качества данной партии, характеризуемой величиной Q , т.е. долей брака.

Графики полной стоимости контроля показаны на рис. 4.

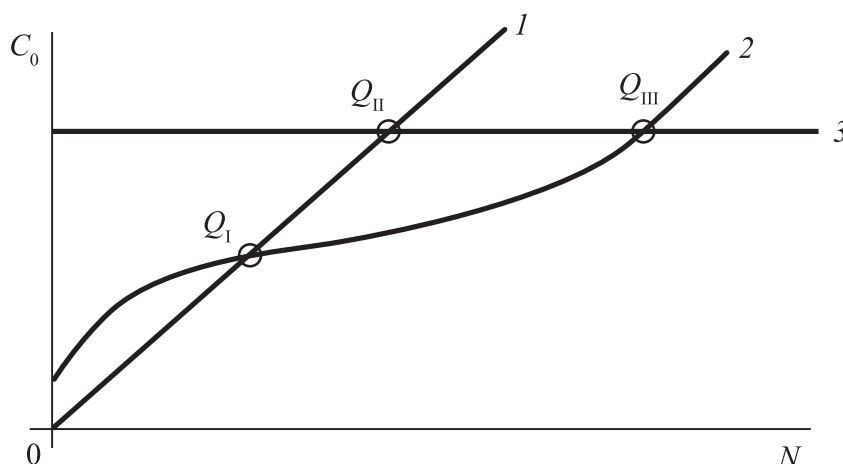


Рис. 4. Графики полной стоимости различных методов контроля:
1 – отсутствие входного контроля; 2 – выборочный контроль; 3 – 100 %-й контроль

По графикам полной стоимости можно найти оптимальный по стоимости вариант входного контроля комплектующих и материалов.

Способ контроля комплектующих деталей будет определяться размером партии N и долей брака Q , содержащейся в этой партии, а также рядом других параметров, которые могут быть либо заданными, например C и C_R , либо представляют собой функцию от N или Q , например n или P_A .

Доля брака Q обычно бывает неизвестной до проверки партии и поэтому следует при оценке этой величины ориентироваться на статистические данные, полученные ранее [6].

Оптимальная оценка контроля может быть получена также аналитическим способом, без графических построений. Для этого должны быть определены критические точки, где полные стоимости для различных процедур контроля оказываются равными, т.е. такие точки, в которых одна схема контроля становится дешевле другой. Обозначим эти критические точки через Q_I , Q_{II} и Q_{III} .

Отсутствие входного контроля и стопроцентный контроль

Критическая точка Q_{II} пересечения кривых полной стоимости при отсутствии контроля и стопроцентного контроля определяется из уравнений (13) и (14):

$$QNC_R = NC_T + K_1QNC_R.$$

Тогда

$$Q_{II} = \frac{C_T}{C_R(1 - K_1)}.$$

Стопроцентный контроль будет экономичнее, когда уровень качества поступающих деталей больше значения Q_{II} , и в противном случае экономичнее отсутствие входного контроля.

Отсутствие входного контроля и выборочный контроль

Критическая точка Q_I пересечения кривых полной стоимости при отсутствии контроля и выборочного контроля определяется из уравнений (8) и (10):

$$QNC_R = P_A [nC_T + (N - n)QC_R + nK_2QC_R] + nC_T(1 - P_A).$$

Тогда

$$Q_I = \frac{nC_T}{C_R [N - P_A(N - n + nK_2)]}. \quad (10)$$

Очевидно, что Q_I необходимо вычислять соответственно рассматриваемому конкретному плану выборки в виду того, что для каждого плана выборки значения P_A будут различными. Порядок определения Q_I следующий:

1) определяют оперативную характеристику выборочного контроля, чаще всего базирующуюся на законе распределения Пуассона. Устанавливают величину выборки n и приемочное число C – минимальное допустимое количество бракованных деталей в выборке. Значение P_A , соответствующее любому значению C , может быть получено из таблиц распределения Пуассона с учетом предполагаемого значения Q ;

2) определяют Q_I с учетом найденного значения P_A ;

3) отсутствие входного контроля будет экономически более выгодным при предполагаемом значении Q , меньшем Q_I . В противном случае экономичнее оказывается способ выборочного контроля.

Стопроцентный контроль и выборочный контроль

Критическая точка Q_{III} пересечения кривых полной стоимости при стопроцентном и выборочном контроле определяется из уравнений (7) и (8)

$$NC_T + K_1QNC_R = P_A [nC_T + (N - n)QC_R + nK_2QC_R] + nC_T(1 - P_A).$$

Тогда

$$Q_{III} = \frac{C_T [N - P_A n + n] - nC_r}{P_A C_R [(N - n) + K_2 n] - C_R K_1 N}. \quad (11)$$

Значение Q_{III} получают таким же образом, как и в предыдущем случае. Когда значение Q меньше предполагаемого значения Q_{III} , то выгоднее метод выборочного контроля. В противном случае более экономически оправданным будет метод стопроцентного контроля.

Оптимальная стратегия входного контроля

В настоящее время вопросы качества и надежности электронной аппаратуры приобретают исключительно острый характер, как для изготовителей компонентов, так и для их потребителей. Наибольшее количество споров возникает в связи с тем, что производитель аппаратуры вынужден проводить значительный объем дорогих и длительных испытаний, поступающих в производство компонентов в рамках мероприятий по входному контролю [6]. Эти испытания повторяют процедуры уже проведенных испытаний на предприятии-поставщике, которое израсходовало на это весьма значительные средства. Однако степень такого дублирования постоянно должна уменьшаться. Это обусловлено процессом непрерывного повышения качества компонентов, благодаря чему появляется возможность для более тесного сотрудничества между поставщиком и потребителем в решении проблемы исключительной важности, а именно: сначала резкого сокращения объема операций по входному контролю компонентов и материалов, а затем полного отказа от него.

Для того, чтобы уменьшить затраты на испытания и свести объем выборки к минимуму, критерии приемки целесообразно свести к тому, чтобы единичный отказ вызывал забракование всей партии [7–10]. В тех случаях, когда уровень отказов компонентов на входном контроле оказывается меньше 100 на миллион, т.е. 0,01 %, входной контроль обычно оказывается экономически нецелесообразным. Экономичнее для подавляющей части производств отбраковывать столь редкие случаи отказов компонентов на этапах испытаний узлов, блоков или даже аппаратуры [6].

Заключение

Расчеты показывают неочевидные результаты в оценке целесообразности сплошного, выборочного и отсутствия контроля. Конечно, в реальных быстро меняющихся условиях производства затруднительно прибегать к вышеприведенным расчетам. Но выводы, которые можно сделать на основе этих расчетов, позволяют осознанно строить стратегию и тактику контроля в условиях неопределенности качества компонентов и материалов, поступающих в производство.

Список литературы

1. Медведев, А. М. Диагностический контроль электрических соединений в электронных системах / А. М. Медведев, Ф. В. Васильев, М. Л. Сокольский // Практическая силовая электроника. – 2013. – № 1 (49). – С. 42–44.
2. Медведев, А. М. Концепция входного контроля материалов и комплектующих, поступающих в производство / А. М. Медведев, Г. В. Мылов // Надежность. – 2013. – № 1 (44). – С. 115–125.
3. Медведев, А. М. Печатные платы. Физическая надежность межсоединений / А. М. Медведев // Надежность. – 2014. – № 2 (49). – С. 15–23.
4. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – М. : Лань, 2014. – 480 с.
5. Юрков, Н. К. Технология радиоэлектронных средств / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 640 с.
6. Технические измерения в технологии и производстве РЭА и измерительных систем : учеб. пособие / С. Ю. Байдаров, П. Г. Михайлов, В. И. Лапшин, Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 150 с.
7. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
8. Стюхин, В. В. САПР в расчете и оценке показателей надежности радиотехнических систем / В. В. Стюхин, И. И. Кочегаров, В. А. Трусов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 287–289.
9. Лысенко, А. В. Способ снижения величины вибрационных нагрузок в несущих конструкциях ЭС и методика его реализующая / А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 41–44.
10. Лабораторный комплекс в архитектуре ИКОС как основа формирования умений / И. Д. Граб, А. В. Затылкин, Н. В. Горячев, В. Б. Алмаметов, Н. К. Юрков, В. Я. Баннов, И. И. Кочегаров // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2008. – Т. 1. – С. 213–215.

Ванцов Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технологии приборостроения,
Московский авиационный институт
(125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: vancov@medpraktika.ru

Медведев Аркадий Максимович

доктор технических наук, профессор,
кафедра технологии приборостроения,
Президент Гильдии профессиональных
технологов приборостроения,
Московский авиационный институт
(125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: medvedevam@bk.ru

Vantsov Sergey Vasil'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of avionic technology,
Moscow Aviation Institute
(125993, 4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Medvedev Arkadiy Maksimovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of avionic technology,
President of Guild of Professional Electronics Technologist,
Moscow Aviation Institute
(125993, 4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Аннотация. В производстве электронной аппаратуры ответственного назначения, такой как авионика, вооружение, электронная аппаратура морского базирования, очень важно обеспечить надежность уже на первом этапе производства – входном контроле комплектующих и материалов. Предложена стратегия входного контроля в зависимости от уровня дефектности поступающих партий с учетом неизбежного наличия функционального контроля и наладки готовых изделий на последних этапах производства. Кроме того, применительно к массовому производству электроники рассматриваются стоимостные характеристики сплошного, выборочного и бесконтрольного входного контроля материалов и комплектующих, поступающих в производство, в сопоставлении с затратами на устранение последствий попадания дефектных компонентов и материалов в готовую продукцию.

Ключевые слова: авионика, надежность, электронные компоненты, производство электроники, входной контроль.

Abstract. In the manufacture of electronic equipment responsible assignments, such as avionics, weapons, naval electronics is very important to ensure reliability in the first stage of production-control input parts and materials. Proposed strategy for control input depending on the level of the defect of the incoming shipments given the imminent availability of functional control and adjustment of finished products in the final stages of production. In addition, with regard to the mass production of electronics examines the cost characteristics of a continuous, selective and uncontrolled input control of materials and accessories coming into production in relation to the costs of eliminating the consequences of hitting defective components and materials into a finished product.

Key words: avionics, reliability, electronic components, electronics manufacturing, incoming inspection.

УДК 624.382.049.77:621.396.6.049.75

Ванцов, С. В.

Надежность входного контроля / С. В. Ванцов, А. М. Медведев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 91–100.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ РЕАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИХ БЕЗРАЗМЕРНЫХ КОНТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ

С. С. Садыков, Я. Ю. Кульков

Введение

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по распознаванию отдельных реальных плоских объектов (ОРПО) с использованием безразмерных признаков, полученных из характеристик контуров бинарных изображений этих объектов, разработанных в [1].

Распознавание объектов по их изображениям – традиционная область цифровой обработки изображений. Распознавание имеет своей целью отнесение объекта к одному из заранее predetermined типов. Для решения данной задачи необходимо получение определенных признаков объекта по его изображению, которые позволят идентифицировать его с минимальной ошибкой. Для установления связи между значениями признаков объекта и решения о принадлежности его к определенному классу необходимо использование обучающей совокупности известных объектов [2–18].

Алгоритм формирования безразмерных признаков

На рис. 1 приведена общая блок-схема технологии проведения экспериментов расчета безразмерных признаков по контурам бинарных изображений отдельных тестовых плоских объектов и их распознавания.

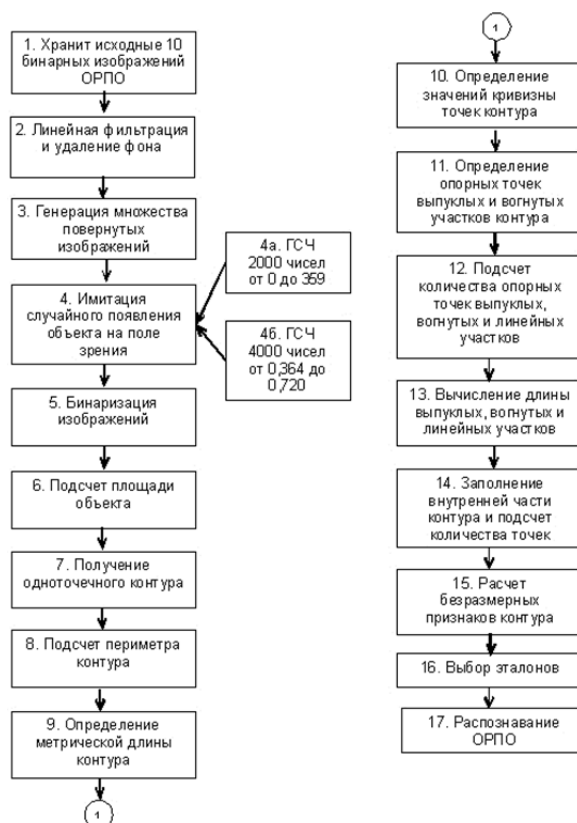


Рис. 1. Общая блок-схема технологии проведения экспериментов расчета безразмерных признаков по контурам бинарных изображений отдельных тестовых плоских объектов и их распознавания

Блок 1 хранит 10 исходных изображений ОРПО. Примеры этих изображений объектов приведены на рис. 2.

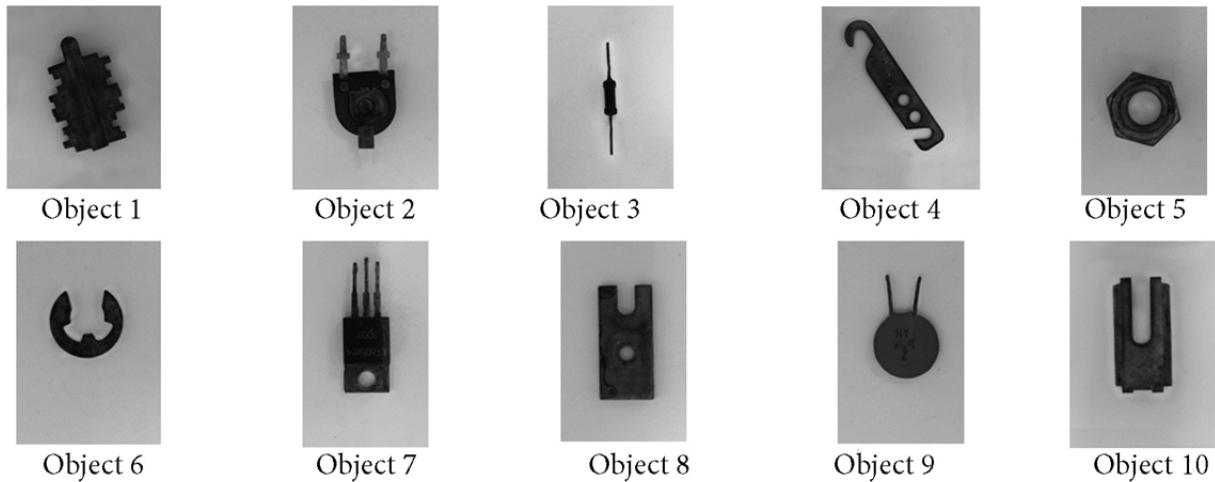


Рис. 2. Тестовые изображения

Эксперимент проводится на презентабельной выборке изображений каждого из 10 ОРПО. Для этого в блоке 3 проводится генерация множества повернутых изображений.

В блоке 2 выполняется линейная фильтрация входного изображения и удаление фона. Выходом блока является изображение реального объекта на белом фоне.

Для каждого из изображений в блоке 3 вычисляются центры тяжести по формулам (1):

$$x_{ц.ф.} = \frac{\sum_{x=1}^n \left(\sum_{y=1}^m f(x, y) \right) x}{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m f(x, y)}; \quad y_{ц.ф.} = \frac{\sum_{y=1}^m \left(\sum_{x=1}^n f(x, y) \right) y}{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m f(x, y)}, \quad (1)$$

где x, y – дискретные координаты точек полутонового изображения; $f(x, y)$ – значение яркости точки изображения с координатами x, y ($0 \leq f(x, y) \leq 255$); n, m – число точек объекта по горизонтали и вертикали.

Для вращения изображения на угол α используется алгоритм, приведенный в [8].

Формируется массив повернутых изображений каждого из 10 ОРПО с шагом в 1 градус. Всего 3600 изображений.

Блок 4 реализует имитацию случайного появления объекта в поле зрения распознающей системы. С помощью генераторов случайных чисел (ГСЧ) с нормальным распределением (блок 4а) из повернутых 360 изображений каждого из 10 ОРПО формируется 10 массивов по 2000 изображений.

С помощью второго ГСЧ в блоке 4б получаем числа в диапазоне 0,364 до 0,720. Такое ограничение необходимо для того, чтобы свести к минимуму расположения изображений вне рабочего поля. Для 2000 реализаций каждого объекта генерируются 4000 чисел. Первое число от ГСЧ будем считать координатой центра тяжести по оси икс $X_{ц}$ объекта, второе число – $Y_{ц}$. Таким образом определяются координаты центра тяжести каждой из 2000 реализации каждого из 10 ОРПО. Согласно этим координатам 2000 реализации каждого из 10 ОРПО размещаются на рабочем поле.

Блок 5 реализует бинаризацию полутоновых изображений с использованием алгоритма сегментации Отсу.

Блок 6 рассчитывает количество точек в каждом из 2000 реализаций каждого из 10 ОРПО, т.е. вычисляет площадь объекта S_0 . Пример результата вычислений 2000 реализаций 1-го ОРПО приведен в табл. 1.

Таблица 1

№ реализации	1	2	3	....	...	856	.....	.....	1999	2000
Параметр S_0	80 220	80 145	80 192	.....	.....	80 223	.....	.....	80 218	80 197

Блок 7 формирует одноточечные контуры бинарных изображений объектов по алгоритму в [4]. Примеры полученных контуров изображений реализаций 1-го ОРПО приведены на рис. 3.

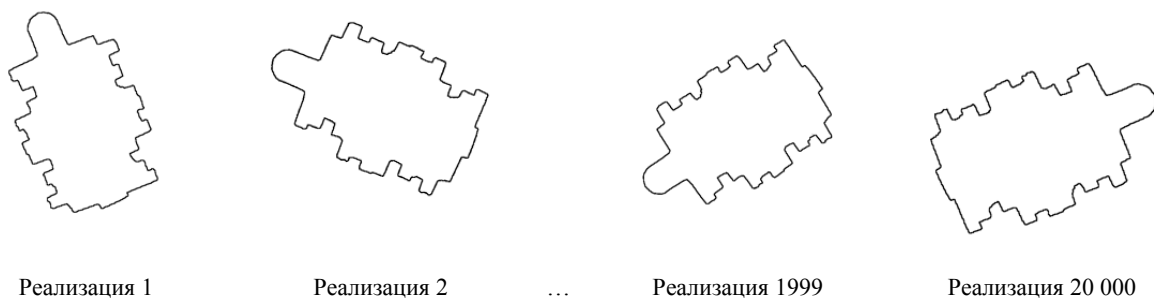


Рис. 3. Примеры полученных контуров изображений реализаций 1-го ОРПО

Блок 8 рассчитывает количество точек, образующих контур каждой из 2000 реализаций каждого из 10 ОРПО. Пример такого расчета приведен для реализаций 1-го ОРПО на табл. 2.

Таблица 2

№ реализации	1	2	3	.....	947	.....	1346	....	1999	2000
Параметр P_0	1493	1384	1507	.....	1585	.....	1575	.....	1468	1579

Блок 9 определяет метрическую длину контура каждого из 2000 реализаций каждого из 10 ОРПО. Пример такого расчета приведен для реализаций 1-го ОРПО на табл. 3.

Таблица 3

№ реализации	1	2	3	.....	.....	1875	.....	.....	1999	2000
Параметр $L_{\text{конт}}$	1841.61	1767.27		.....	.....	1813.74	.....	.....	1766.27	1819.89

В блоке 10 определяется значение кривизны в точках каждого контура каждого из 2000 реализаций каждого из 10 ОРПО по алгоритму в [2].

Блок 11 определяет опорные точки выпуклых и вогнутых участков контура.

Пример маркировки опорных точек с отмеченными выпуклыми (+ 90, + 135), вогнутыми (-90, -135) и линейными (отмечены 1) участками приведен на рис. 4.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	+135	1	1	1	0	+135	1	+135	0	0	0	0
0	0	+135	0	0	0	0	-90	0	0	0	1	0	0	0
0	0	+135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+135	0	0
0	0	0	-90	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	+90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-135	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+90	0
0	0	0	0	-90	0	0	0	0	0	0	0	-135	0	0
0	0	+135	-135	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	+135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-135	0	0
0	+135	0	-90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+135	0
0	0	+90	0	-135	0	0	0	0	0	0	0	0	+135	0
0	0	0	0	+135	0	0	-135	1	-135	0	-135	+135	0	0
0	0	0	0	0	+135	+135	0	0	0	+90	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 4. Пример результата работы блока 9

Блок 12 вычисляет количество опорных точек выпуклых, вогнутых и линейных участков контуров.

Пример расчета опорных точек реализаций 1-го ОРПО дан в табл. 4.

Таблица 4

Параметр	Номер реализации									
	1	2	3	.....	.....	956	957	....	....	2000
M_1	67	20	4	.....	.....	15	10	.....	.....	10
M_2	65	19	5	.....	.....	16	13	.....	.....	13
M_3	396	360	456	.....	.....	456	463	.....	.....	463
M_4	394	357	446	.....	.....	446	449	.....	.....	449
K	164	133	467	.....	.....	515	524	.....	.....	524
T	366	510	135	.....	.....	87	80	.....	.....	80

В табл. 4: M_1 – количество точек контура с значением + 90; M_2 – количество точек контура с значением –90; M_3 – количество точек контура с значением + 135; M_4 – количество точек контура с значением –135; K – количество четырех связанных точек контура; T – количество D связанных точек контура.

Блок 14 по формулам (2), (3) и (4) вычисляет общую длину выпуклых, вогнутых и линейных участков всего контура каждого объекта:

$$L_{\text{общ. вып.}} = 1/2[M_1 2b + M_3(a + b)]; \quad (2)$$

$$L_{\text{общ. вог.}} = 1/2 [M_2 2b + M_4(a + b)]; \quad (3)$$

$$L_{\text{общ. лин.}} = 1/2(K 2a + T 2b), \quad (4)$$

где a – расстояние между четырьмя связными точками; b – расстояние между D связными точками.

Пример результата работы блока по расчету параметров на основе формул (2), (3) и (4) приведен в табл. 5

Таблица 5

Параметр	Номер реализации									
	1	2	.....	573	.....	1233	.....	.....	.....	2000
$L_{\text{общ. вып.}}$	561.92	561.13	.....	647.93	.....	393.9	.....	.....	.....	573.03
$L_{\text{общ. вог.}}$	551.26	552.47	.....	667.06	.....	386.45	.....	.....	.....	560.37
$L_{\text{общ. лин.}}$	637.79	636.01	.....	581.21	.....	996.92	.....	.....	.....	637.13

Блок 14 формирует изображения ОРПО с отмеченными внутренними точками и подсчитывает их (табл. 6).

Пример подсчета внутренних точек для реализаций 1-го ОРПО дан в табл. 6.

Таблица 6

№ реализации	1	2	.....	753	.....	1387	.....	1786	....	2000
Параметр В	78 698	78 705	.....	78 701	.....	78 694	.....	78 703	.....	78 681

Блок 15 осуществляет расчет векторов безразмерных признаков каждой из 2000 реализаций всех 10 ОРПО.

$$K_1 = P_0 / S_0, \quad (5)$$

$$K_2 = M_1 / S_0, \quad (6)$$

$$K_3 = M_2 / S_0, \quad (7)$$

$$K_4 = M_3 / S_0, \quad (8)$$

$$K_5 = M_4 / S_0, \quad (9)$$

$$K_6 = K / S_0, \quad (10)$$

$$K_7 = T / S_0, \quad (11)$$

$$K_8 = M1 / Po, \quad (12)$$

$$K_9 = M2 / Po, \quad (13)$$

$$K_{10} = M3 / Po, \quad (14)$$

$$K_{11} = M4 / Po, \quad (15)$$

$$K_{12} = K / Po, \quad (16)$$

$$K_{13} = S / Po, \quad (17)$$

$$K_{14} = L_{\text{общ.лин.}} / L_{\text{конт.}}, \quad (18)$$

$$K_{15} = L_{\text{общ.вог.}} / L_{\text{конт.}}, \quad (19)$$

$$K_{16} = L_{\text{общ.Вып.}} / L_{\text{конт.}}, \quad (20)$$

Пример полученных признаков для 2000 реализаций 1-го ОРПО дан в табл. 7.

Таблица 7

Коэффициенты	Номер реализации			
	1	2	...	2000
K_1	0,01897	0,01887		0,01916
K_2	3,739e-5	6,232e-5		0,00012
K_3	4,986e-5	4,986e-5		0,00016
K_4	0,00575	0,00572		0,00577
K_5	0,00563	0,00564		0,00559
K_6	0,00646	0,00618		0,00653
K_7	0,00104	0,00123		0,00099
K_8	0,00197	0,00330		0,0065
K_9	0,00262	0,00264		0,00845
K_{10}	0,30354	0,30317		0,30123
K_{11}	0,29697	0,29920		0,29212
K_{12}	0,34099	0,32760		0,34092
K_{13}	0,05519	0,06538		0,05204
K_{14}	0,36475	0,36401		0,36034
K_{15}	0,31526	0,31620		0,31693
K_{16}	0,32136	0,32116		0,32408

Обучение системы

С помощью блока 16 в диалоговом режиме осуществляется выбор эталонов для распознавания каждой из 2000 реализаций каждого из 10 ОРПО. По гистограмме, полученной в блоке 3, выбирается вектор признаков самой часто использованной из 360 повернутых вариантов, например, 1-го ОРПО, при формировании 2000 реализаций. Для данного вектора коэффициентов по методу среднеквадратичного отклонения (21) вычисляется Z_i с каждой из 2000 реализаций:

$$Z_i = \frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^n (K_{ej} - K_{lj})^2, \quad (21)$$

где n – число признаков; l – номер распознаваемого объекта ($l = 1, 2, \dots, 2000$); K_{ej} – значение j -го признака вектора коэффициентов K выбранного эталона; K_{lj} – значение j -го признака вектора коэффициентов K выбранной реализации.

Вычисляются 2000 СКО Z_i . Среди них ищутся $Z_{\min}$

$$Z_{\min} = \min \{Z_i\}. \quad (22)$$

Найденные значения $Z_{\min}$ указывают номера реализаций среди 2000 изображений, вектора-признаки которых совпадают с вектором-признаком выбранной как эталон реализации. Очевидно, что с одним эталоном распознать все 2000 реализации 1-го ОРПО невозможно.

На втором шаге на основе гистограммы выбирается как эталон вектор-признак следующей часто использованной из 360 повернутых вариантов, например, 1-го ОРПО, при формировании 2000 реализаций. Вычисляются 2000 СКО Z_i . Среди них ищутся $Z_{\min}$ по формуле (22).

Найденные значения $Z_{\min}$ указывают номера реализаций среди 2000 изображений, вектора-признаки которых совпадают с вектором-признаком выбранной как эталон реализации и т.д. Выбор эталонов для реализаций 1-го ОРПО проводится до тех пор, пока не будут распознаны все 2000 реализации.

Выбор эталонов проводится аналогично для всех реализаций всех остальных 9 ОРПО.

Результаты выбора эталонов для 2000 реализаций каждого из 10 ОРПО приведены в табл. 8.

Таблица 8

Номер ОРПО	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кол-во эталонов	33	34	48	19	20	27	35	28	33	27

На этом обучение системы распознавания завершается.

Экзамен обученной системы и анализ результатов исследований

Блок 17 осуществляет экзамен обученной системы на 20 000 реализациях всех 10 ОРПО на основе формул (21) и (22).

Экзамен заключается в сравнении векторов признаков всех 20 000 реализаций всех 10 с выбранными ОРПО эталонами.

Производится выбор некоторого случайного объекта. Для него выполняются все описанные процедуры получения безразмерных признаков контура. Полученный вектор признаков неизвестного ОРПО сравнивается со всеми эталонными векторами-признаками в табл. 8. Определяется тип ОРПО в соответствии с $\min\{Z_{\min}\}$.

Процедура экзамена повторяется для 2-го неизвестного объекта, и так далее для всех 20 000 реализаций всех 10 ОРПО.

Строится таблица и графики (рис. 5, 6) правильного распознавания (табл. 9).

Таблица 9

Номер объекта	Количество испытаний	Количество эталонов											
		15		20		25		30		40		48	
		кол-во	проц. расп.	кол-во	проц. расп.	кол-во	проц. расп.	кол-во	проц. расп.	кол-во	проц. расп.	кол-во	проц. расп.
1	2000	1160	58	1480	74	1721	86.05	1941	97.05	2000	100	2000	100
2	2000	1191	59.6	1490	74.5	1764	88.2	1917	95.85		100	2000	100
3	2000	937	46.9	1172	58.6	1375	68.75	1565	78.25	1833	91.65	2000	100
4	2000	1797	89.9	2000	100	2000	100	2000	100	2000	100	2000	100
5	2000	1838	91.9	2000	100	2000	100	2000	100	2000	100	2000	100
6	2000	1389	69.5	1740	87	1963	98.15	2000	100	2000	100	2000	100
7	2000	1189	59.5	1431	71.55	1658	82.9	1299	64.95	2000	100	2000	100
8	2000	1417	70.9	1706	85.3	1957	97.85	2000	100	2000	100	2000	100
9	2000	1169	58.5	1568	78.4	1845	92.25	1963	98.15	2000	100	2000	100
10	2000	1462	73.1	1698	84.9	1923	96.15	2000	100	2000	100	2000	100

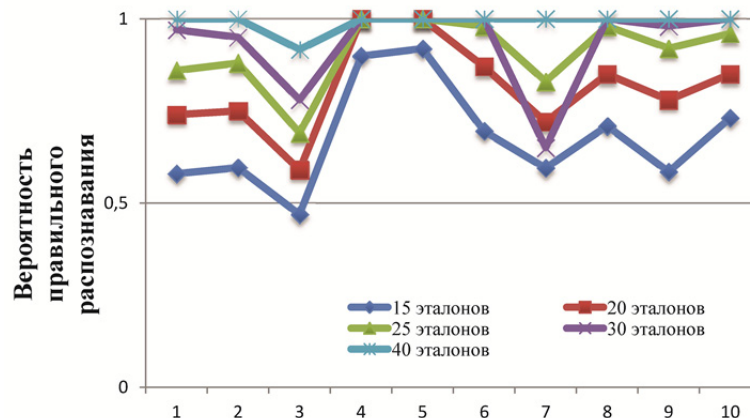


Рис. 5. График изменения вероятности правильного распознавания отдельных тестовых объектов при разном количестве эталонов

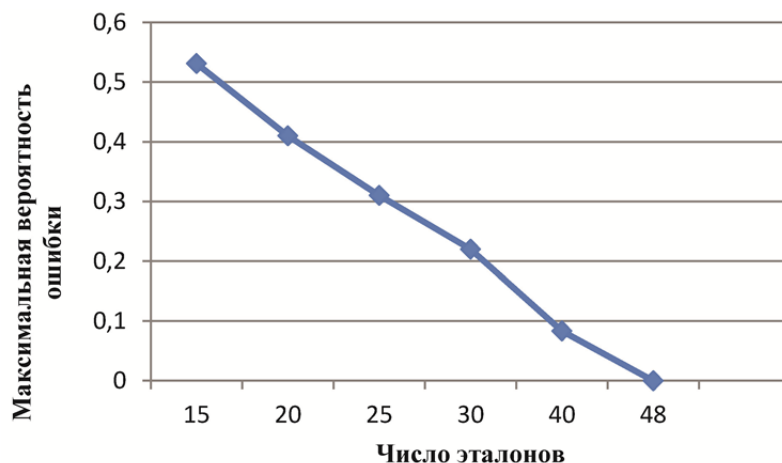


Рис. 6. График зависимости максимальной вероятности ошибки от числа эталонов для 5-го объекта

График изменения времени на распознавание при увеличении количества эталонов представлен на рис. 7.

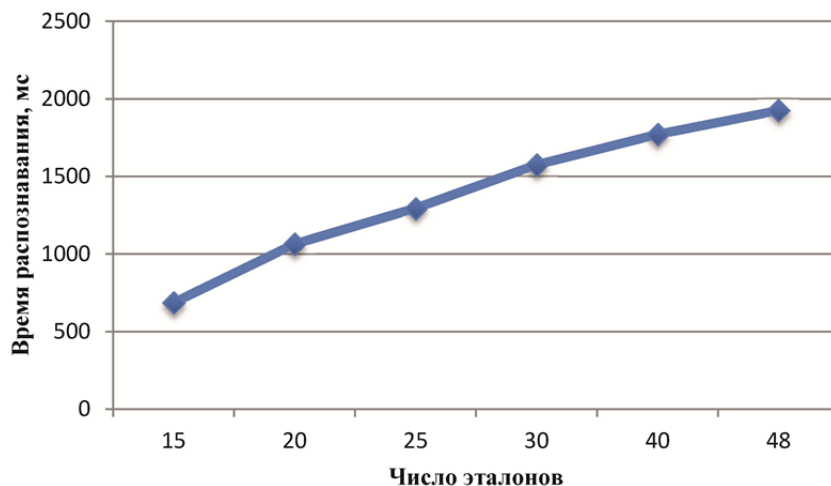


Рис. 7. График зависимости времени распознавания от числа эталонов на объект

Анализ приведенных графиков позволил сделать вывод о справедливости предложенного подхода.

Заключение

Таким образом, объект под номером 3 имеет простой контур. Но вследствие дискретного характера значения координат точек, составляющих изображение, при вращении меняется структура контура. При некоторых углах имеет место больше количество линейных участков контура изображения данного объекта. При этом при других углах линейный характер контура изменяется, и получаем большое количество выпуклых участков с углом 135. Вследствие этого первичные коэффициенты различных повернутых экземпляров данного объекта существенно отличаются. А значит, и полученные векторы признаков будут иметь отличия. На этапе обучения одним эталоном удастся распознать меньшее количество изображений. Это привело к необходимости использовать 48 эталонов для достижения 100 %-го распознавания [22, 23].

Те же рассуждения справедливы и для объекта 5. При вращении полутонного изображения получаем различное соотношение линейных, выпуклых и вогнутых участков контура.

При обучении системы для распознавания объекта под номером 4 получено 19 эталонов. При всей сложности изображения исходного объекта его бинаризованное представление дало небольшое различие в векторах признаков.

Обученная система была протестирована на 20 000 сгенерированных изображений. Полученный набор эталонов позволил получить 100 % распознавания, что показывает высокую эффективность предложенных признаков [19–21].

В ходе проведения экспериментов получено время, требуемое для распознавания объекта, поступающего на вход тестовой системы изображения. Используемая для написания программа не подвергалась оптимизации, в результате чего полученное время является достаточно большим для применения в системах технического зрения. Основное время занимают алгоритмы выделения одноточечного контура и маркировки опорных точек. При практическом использовании данного алгоритма идентификации объектов необходимо провести оптимизацию данных функций в программе. Также в программе используются линейная фильтрация и алгоритм бинаризации методом Отсу. Данные алгоритмы широко применяются в различных задачах цифровой обработки изображений и при этом возможно использование готовых функций, оптимизированных для применения в системах реального времени.

Список литературы

1. Садыков, С. С. Формирование безразмерных коэффициентов формы замкнутого дискретного контура / С. С. Садыков // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2014. – № 4 (29). – С. 91–98.
2. Садыков, С. С. Идентификация реальных плоских объектов на основе единственного признака точек их внешних контуров / С. С. Садыков, С. В. Савичева // Информационные технологии. – 2011. – № 8. – С. 13–16.
3. Садыков, С. С. Технология выделения области кисты на маммограмме / С. С. Садыков, Е. А. Захарова, Ю. А. Буланова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – № 1 (43). – С. 7–12.
4. Исследование маркерного водораздела для выделения области рака молочной железы / С. С. Садыков, Ю. А. Буланова, Е. А. Захарова, В. С. Яшков // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2013. – № 1 (23). – С. 56–64.
5. Андрианов, Д. Е. Разработка муниципальных геоинформационных систем / Д. Е. Андрианов, С. С. Садыков, Р. А. Симаков. – М.: Мир, 2006. – 109 с.
6. Жизняков А. Л. Теоретические основы обработки многомасштабных последовательностей цифровых изображений : моногр. / А. Л. Жизняков, С. С. Садыков. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2008. – 121 с.
7. Критерии выделения групп риска из лиц трудоспособного возраста при медицинских исследованиях на системе АСПО / О. И. Евстигнеева, С. С. Садыков, Е. Е. Суслова, А. С. Белякова // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2012. – № 19. – С. 33–39.
8. Садыков, С. С. Диалоговая система анализа маммографических снимков / С. С. Садыков, Ю. А. Буланова, Е. А. Захарова // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2012. – № 19. – С. 155–167.
9. Садыков, С. С. Исследование наложенности плоских объектов в поле зрения системы технического зрения / С. С. Садыков, С. В. Савичева // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 2. – С. 14–18.
10. Садыков, С. С. Алгоритм текстурной сегментации для выявления областей кисты на маммограммах / С. С. Садыков, Ю. А. Буланова, А. Г. Романов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2013. – № 1 (23). – С. 50–55.
11. Садыков, С. С. Автоматическая объективная оценка и выбор наиболее значимых параметров для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний / С. С. Садыков, И. А. Сафиулова, А. С. Белякова // Автоматизация и современные технологии. – 2012. – № 3. – С. 27–33.
12. Садыков, С. С. Система формирования данных об информационных ресурсах краеведческого музея и управления ими: опыт разработки и использования / С. С. Садыков, Е. Е. Канунова // Информационные технологии. – 2007. – № 10. – С. 59–65.
13. Садыков, С. С. Математические модели некоторых сердечно-сосудистых заболеваний / С. С. Садыков, А. С. Белякова // Информационные технологии. – 2011. – № 12. – С. 59–63.
14. Садыков, С. С. Распознавание плоских объектов при их наложении / С. С. Садыков, С. В. Савичева // Информационные технологии. – 2013. – № 2. – С. 43–46.
15. Садыков, С. С. Компьютерная диагностика новообразований на маммографических снимках / С. С. Садыков, Ю. А. Буланова, Е. А. Захарова // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 131–138.
16. Садыков, С. С. Математическая модель диагностики инфекционного эндокардита / С. С. Садыков, А. С. Белякова, Е. А. Пугин // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2012. – № 19. – С. 150–154.
17. Садыков, С. С. Сравнение алгоритмов распознавания наложенных объектов на основе α -функции и на основе особых участков / С. С. Садыков, С. В. Савичева, В. А. Комков // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2012. – № 19. – С. 197–202.

18. Садыков, С. С. Экспериментальное исследование системы автоматического распознавания на парах изображений проекций реальных трехмерных объектов / С. С. Садыков, А. В. Терехин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 273–276.
19. Садыков, С. С. Технология формирования эталонов трехмерных объектов для их распознавания / С. С. Садыков, А. В. Терехин, А. О. Кравченко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 373–376.
20. Терехин, А. В. Распознавание объектов методом вычисления оценок с использованием диагональных признаков формы / А. В. Терехин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 17–25.
21. Садыков, С. С. Определение диапазонов значений признаков формы плоских геометрических фигур при их произвольном расположении в области сцены / С. С. Садыков, А. В. Терехин, К. С. Захаров // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 343–345.

Садыков Султан Садыкович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационных систем,
Муромский институт (филиал)
Владимирского государственного
университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых
(600254, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23)
E-mail: sadykovss@yandex.ru

Кульков Ярослав Юрьевич

старший преподаватель,
кафедра систем автоматизированного проектирования,
Муромский институт (филиал)
Владимирского государственного
университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых
(600254, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23)
E-mail: y_mail@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена экспериментальному исследованию возможности применения безразмерных признаков контура бинарного изображения реального объекта для его распознавания. Приведены результаты экспериментов по идентификации реальных объектов на основе значений среднеквадратичных отклонений между эталонами и неизвестным входным объектом. Полученные результаты позволяют говорить о возможности применения данного метода для идентификации плоских объектов в системах технического зрения. Точность идентификации не зависит от положения исходного объекта относительно камеры.

Ключевые слова: распознавание изображений, идентификация объектов, плоские объекты, эталон, система технического зрения.

Sadykov Sultan Sadykovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information systems,
Murom Institute (branch) of
Vladimir State University
named after A. G. and N. G. Stoletovych
(600254, 23 Orlovskaya street, Murom, Russia)

Kul'kov Yaroslav Yur'evich

senior lecturer,
sub-department of computer-aided design,
Murom Institute (branch) of
Vladimir State University
named after A. G. and N. G. Stoletovych
(600254, 23 Orlovskaya street, Murom, Russia)

Abstract. The article is devoted to experimental study the possibility of using dimensionless marks of binary contour image of a real object for recognition. Results of experiments of identification of real objects based on the values of the standard deviation between the etalons and the unknown input object. The received results allow to speak about possibility of this method application for identification of flat objects in vision systems. The identification accuracy does not depend on the initial position of the object relative to the camera.

Key words: image recognition, object identification, flat objects, standard, the system of technical sight.

УДК 004.93

Садыков, С. С.

Оценка возможности распознавания отдельных реальных плоских объектов на основе их безразмерных контурных признаков / С. С. Садыков, Я. Ю. Кульков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 101–109.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ПРЕСЕЛЕКТОРА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ЗАЩИТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

А. С. Свиридов, И. Ю. Лисицын, А. А. Колганов

В эпоху цифровых электронных систем в современной авиации неуклонно растет количество бортового оборудования отличающегося высокой чувствительностью к воздействию электромагнитных полей различной природы и интенсивности. Кроме того, эти бортовые системы предъявляют высокие требования к качеству электропитания, что делает бортовые системы питания более сложными и восприимчивыми к воздействию электромагнитных полей.

Проектирование малошумящего усилителя преселектора сигнала спутниковых навигационных систем с учетом защиты системы электропитания от воздействия электромагнитных полей высокой интенсивности является сложной и трудоемкой задачей. Использование матриц рассеяния, состоящих из набора S -параметров, совместно с программами автоматизации разработки электронных устройств, высокочастотного моделирования и оптимизации, и их интеграция с измерительными приборами, позволяют решать сложные задачи по проверке моделей устройств и создавать конечные решения, гарантирующие успешную разработку изделия с первой итерации.

Система питания (рис. 1) одна из самых сложных систем на борту, она состоит из: источников электрической энергии, системы передачи и распределения электрической энергии, преобразователей электрической энергии. Наиболее интересными в рамках данной статьи для нас являются преобразователи электрической энергии, установленные в конечных потребителях, и преобразующие параметры питающего напряжения под необходимые параметры [1].



Рис. 1. Структурная схема бортовой системы питания

Из всего многообразия внешних воздействующих факторов электромагнитной природы можно выделить некоторые, наиболее воздействующие на преобразователи электрической энергии: внутрисистемная и межсистемная электромагнитная совместимость (EMC), электромагнитный импульс (ЕМР) и электромагнитные поля высокой интенсивности (HIFR). Электромагнитные поля высокой интенсивности относятся к классу межсистемной электромагнитной совместимости, целью которой является обеспечение совместного функционирования различных систем при всех возможных воздействующих внешних радиочастотных полях. К электромагнитным полям высокой интенсивности относятся исключительно излучения от антропогенных источников, при этом это передатчики, преднамеренно излучающие электромагнитную энергию, например, радиопередатчики, радары наземных средств управления воздушным движением, средства радиоэлектронной борьбы и противодействия.

При попадании летательного аппарата в электромагнитное поле возникают влияния двух типов: наведенные токи и электромагнитное облучение [2]. Современный комплексный подход к защите системы питания бортовых радиоэлектронных средств при воздействии электромагнитных полей высокой интенсивности достигается путем многоуровневой защиты:

- размещение элементов систем в наименее опасных зонах самолета;
- экранирование элементов и блоков системы;
- заземление элементов и блоков системы;
- фильтрация помех, поступающих в блоки через внешние линии связи.

Высокие частоты электромагнитного поля полностью пронизывают корпус и внутреннюю аппаратуру летательного аппарата, взаимодействуют с электронными компонентами. Экранирование и фильтрация помех по линиям связи являются основными способами защиты. Экранирование снижает уровень помех, проникающих в блоки. При попадании под облучение экран становится токопроводящим элементом, по которому протекают токи, наводимые электромагнитными полями высокой интенсивности. Фильтрация помех – важнейшее схемное решение защиты, которое представляет собой установку фильтров на входных цепях с целью ослабления наводимых токов до некротических значений [3].

Проектирование и оптимизацию разрабатываемого МШУ с учетом комплексного подхода к защите системы электропитания от воздействия электромагнитных полей высокой интенсивности предлагается выполнять в четыре этапа.

На первом этапе проектирования МШУ необходимо определить основные тактико-технические характеристики (ТТХ) проектируемого МШУ.

К основным ТТХ МШУ можно отнести: диапазон рабочих частот, коэффициент усиления, неравномерность АЧХ, коэффициент шума, коэффициент стоячей волны по входу, коэффициент стоячей волны по выходу, входной импеданс, выходной импеданс, напряжение питания, потребляемый ток, рабочий диапазон температур, предельный диапазон рабочих температур, интермодуляционные составляющие 3-го порядка, точка одностенной компрессии.

Опираясь на назначение и условия эксплуатации МШУ, из всего перечня ТТХ необходимо выбрать приоритетные параметры, по которым необходимо получить наилучший результат.

МШУ может быть реализован на СВЧ-транзисторе или на интегральной микросхеме (ИМС). По сравнению с ИМС СВЧ-транзистор обладает меньшим коэффициентом шума, но подбор питающего напряжения, рабочей точки смещения, а также согласование входа и выхода, отнимает много времени и в большинстве случаев может привести к ухудшению ожидаемого результата и такого важного для МШУ параметра, как коэффициента шума. Многие ИМС МШУ сигналов навигационных систем имеют внутри цепи согласования на линию с импедансом 50 Ом, но, несмотря на это, для полного согласования и задания рабочей точки им все же нужны некоторые внешние пассивные электронные компоненты. Коэффициент шума такой ИМС может быть не больше 1 дБ.

Для большинства конечных решений использование микросхем МШУ предпочтительней, чем СВЧ-транзистора. Пассивные электронные компоненты – конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности, могут быть производства любых фирм, но рассчитанные на работу в принимаемом диапазоне частот и конструктивно удовлетворяющие требованиям конечного изделия [4–6].

Второй этап – этап проектирования и оптимизации МШУ, является самым сложным и продолжительным. Сначала надо разработать схему электрическую принципиальную, выбрать стек

слоев и материал печатной платы, подготовить топологию малошумящего усилителя, изготовить оснастку для калибровки анализатора цепей, выполнить калибровку анализатора цепей, измерить S-параметры схемы МШУ.

Топологию следует делать как можно компактней, так как маленькие размеры сделают МШУ более привлекательным для использования в новых проектах конечных изделий.

При разработке схемы электрической принципиальной необходимо на входе и выходе МШУ предусмотреть посадочные места для электронных компонентов, которые в процессе моделирования и оптимизации позволят установить одну из Г-образных согласующих цепей. Г-образная цепь позволяет согласовать любой комплексный импеданс с любым другим комплексным импедансом с помощью всего двух реактивных элементов: конденсатора и индуктивности.

МШУ является изделием высокочастотным, поэтому для решения потенциальных проблем наводок, а также упрощения процесса согласования линий передач и разводки топологии актуально использовать только многослойные печатные платы с количеством слоев не менее четырех. Четыре слоя проводящего рисунка необходимы для создания стека слоев печатной платы с отдельными слоями заземления и питания. Для проектирования МШУ сигналов спутниковых систем определения координат достаточным является использование материала FR4 High Tg или FR5.

При разработке печатной платы необходимо придерживаться золотого правила разработчика: если есть возможность, нужно обеспечить запас по технологическим нормам и стараться избегать узких мест с предельными значениями технологических параметров печатной платы [6].

При разработке печатной платы рекомендован следующий подход [7]:

1. Предварительно выбрать класс точности проектируемой платы, проанализировав элементную базу, электрические и сигнальные параметры схемы, типогабаритные показатели платы, допуски на контур, отверстия, технологические пазы и пр.
2. Убедиться, что предполагаемое производство может изготовить печатную плату данного класса точности (как образцы, так и промышленную серию).
3. Ознакомиться с технологическими нормами (ограничениями) данного производителя.
4. В случае возникновения вопросов обязательно связаться с техническим отделом производителя и заранее детально обсудить их.
5. Задать в используемом для трассировки пакете прикладных программ (PCAD, OrCAD, Altium и др.) правила проектирования (Desing Rules).
6. Выполнить трассировку печатной платы, соблюдая правила проектирования.

Используя исходные данные, полученные на предыдущих этапах проектирования, была разработана отладочная плата МШУ (рис. 2).

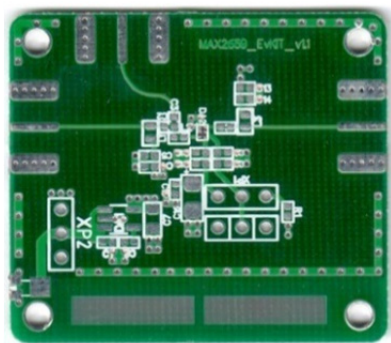


Рис. 2. Топология печатной платы МШУ

Для достоверного измерения электротехнических параметров схемы МШУ, смонтированной на представленной топологии, необходимо изготовить набор калибровочных мер векторного анализатора электрических цепей с аналогичным стеком слоев как у отладочной платы МШУ.

Набор калибровочных мер должен содержать следующий комплект нагрузок: нагрузка согласованная (LOAD); нагрузка короткозамкнутая (SHORT); нагрузка холостого хода (OPEN); перемычка (THRU).

Схема электрическая принципиальная нагрузок представлена на рис. 3, практическая реализация топологии печатной платы показана на рис. 4.

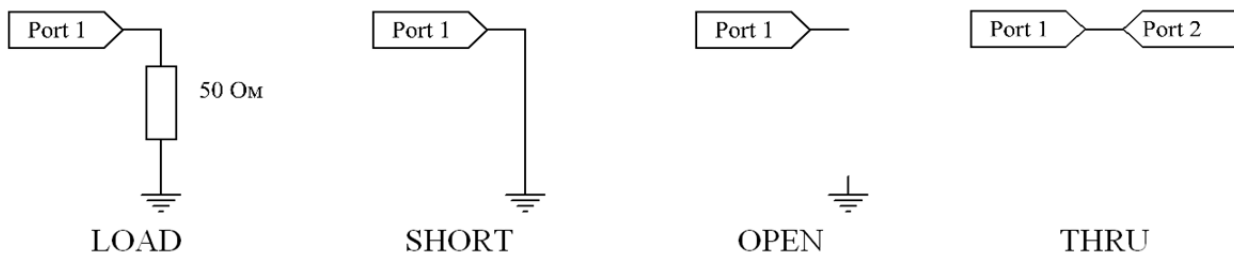


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная набора калибровочных мер

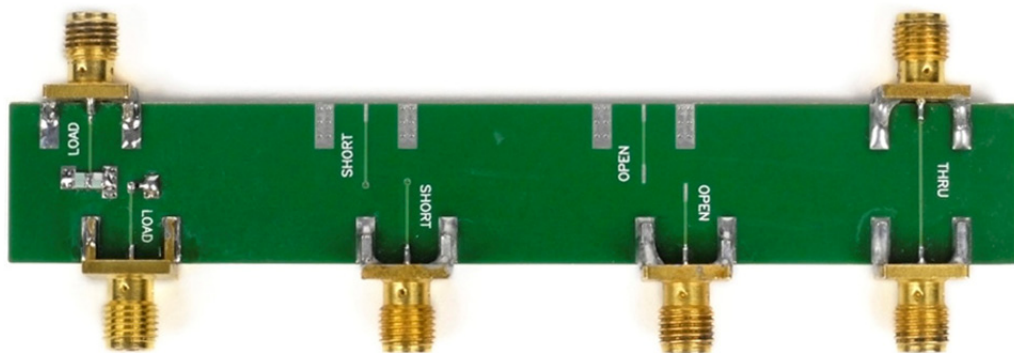


Рис. 4. Набор калибровочный мер

До начала проведения калибровки рекомендуется определить конфигурацию векторного анализатора цепей: выбрать требуемые кабели и переходы для последовательного подключения калибровочных мер. После калибровки любое изменение конфигурации приводит к расширению пределов погрешности измерений.

Калибровка выполняется за несколько шагов. На каждом шаге к измерительным портам векторного анализатора цепей подключаются некоторые меры (рис. 5).

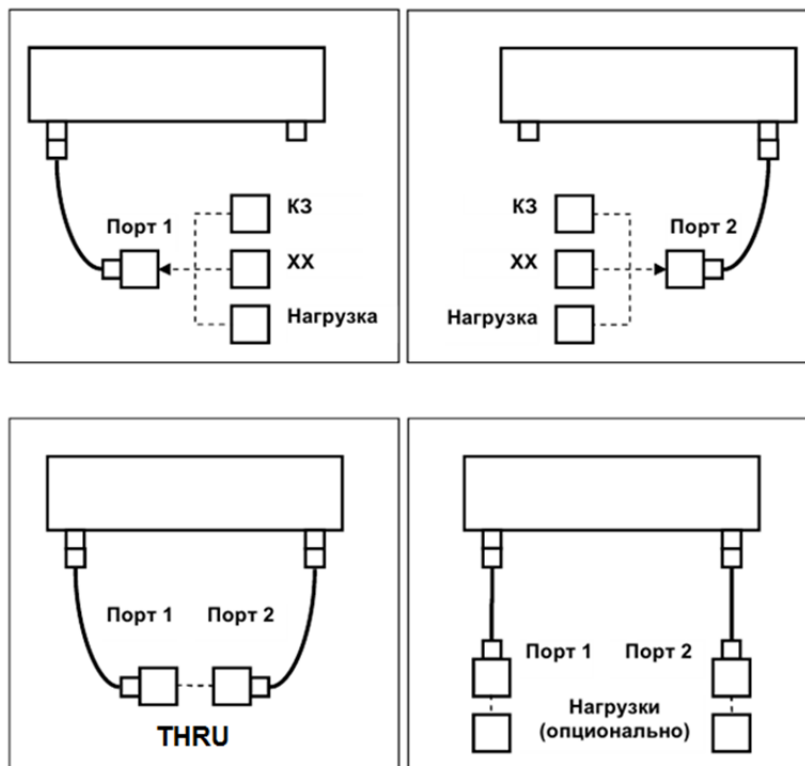


Рис. 5. Подсоединение мер при калибровке

По завершении процесса двухпортовой калибровки программное обеспечение векторного анализатора цепей рассчитает и запомнит в памяти калибровочные коэффициенты.

Измерение S-параметров топологического решения МШУ проводится без установленных элементов согласующих цепей, это позволит узнать входной и выходной импеданс схемы, зная который можно выбрать один из типов согласующей схемы. Значение элементов этих Г-образных цепей могут быть найдены графическими методами расчета по книге [8] или с использованием электронной диаграммы Смита [9], которые использует множество программ, например, Smith Chart [10].

Рассчитав номиналы электронных компонентов согласующей цепи, выбираем из стандартных рядов номиналов радиодеталей: Е3, Е6, Е12, Е24 и т.п. номинал элемента, максимально близкий к расчетному значению, и устанавливаем на заранее предусмотренное топологией печатной платы место. После утверждения номиналов элементов корректирующей цепи проводится измерение технических параметров МШУ и сравнение с выдвинутыми требованиями.

В случае отрицательного результата необходимо выполнить коррекцию схемы, например, настроить смещение по постоянному току, топологии МШУ, изменить стек слоев или выбрать другой материал. Необходимо отметить, что внесение изменений в топологию печатной платы МШУ может потребовать новой топологии набора калибровочных мер.

На третьем этапе по результатам, полученным на втором, необходимо выбрать топологические решения проектирования МШУ, которые удовлетворяют требованиям. Сравнить выбранные топологии между собой и выбрать несколько лучших вариантов. Из лучших вариантов выбрать один, который будет использован в разработке конечного решения.

Четвертый этап – этап принятия компромиссных решений. Компромисс присутствует на протяжении всего процесса разработки, моделирования и оптимизации. Из-за различных физических и производственных ограничений сделать идеальный МШУ не представляется возможным. При увеличении приоритета одного параметра, неукоснительно будет ухудшен другой. Поэтому расстановка приоритетов является важным этапом в проектировании конечного устройства.

Для принятия решения, какому параметру отдать предпочтение, может помочь информация о целевом назначении проектируемого МШУ. В частности, если это портативное гражданское устройство, предпочтение отдается потребляемой мощности и коэффициенту шума. А если конечное устройство военное или специального назначения, то важными параметрами будет линейность и коэффициент шума.

Таким образом, предложенный метод проектирования МШУ позволяет разработать функционально законченный модуль преселектора сигналов с заданными характеристиками, учитывая рекомендации по защите системы питания от электромагнитных полей высокой интенсивности, принимая во внимание частотную широкополосность и мощность воздействия. Были рассмотрены особенности разработки печатной платы для модуля и способы расчета согласующих цепей, а также необходимое для этого измерительное оборудование.

Список литературы

1. Увайсов, С. У. Защита бортовой спутниковой навигационной системы от кратковременного пропадания электропитания и электромагнитных помех / С. У. Увайсов, Д. А. Аминев, И. Ю. Лисицын // Технологии электромагнитной совместимости. – 2013. – № 3 (46). – С. 45–49.
2. Акбашев, Б. Б. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий / Б. Б. Акбашев, Н. В. Балюк, Л. Н. Кечиев. – М. : Грифон, 2013. – 246 с.
3. Кечиев, Л. Н. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Л. Н. Кечиев, Н. В. Балюк, П. В. Степанов. – М. : ООО «Группа ИДТ», 2007. – 147 с.
4. Аминев, Д. А. Варианты реализации входного тракта спутникового навигационного приемника / Д. А. Аминев, А. С. Свиридов, С. У. Увайсов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3 – С. 76–82.
5. Свиридов, А. С. Мультисистемный двухдиапазонный бортовой приемник сигналов спутниковых радионавигационных систем для космических аппаратов / А. С. Свиридов, А. А. Колганов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 339–341.
6. Свиридов, А. С. Преселектор сигнала спутниковых навигационных систем: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в навигационных радиоприемниках ответственного назначения /

- А. С. Свиридов, А. А. Колганов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 341–347.
7. Памятка разработчику печатных плат – Выпуск 1. – Минск : ООО «Нанотех», 2004. – 24 с.
8. Смит, Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике. (Линии передачи и устройства СВЧ) / Ф. Смит ; пер. с англ. М. Н. Бергера и Б. Ю. Капилевича. – М. : Связь, 1976. – 144 с.
9. Курушин, А. А. Проектирование СВЧ устройств с использованием электронной диаграммы Смита / А. А. Курушин ; под ред. д.т.н., проф. Б. Л. Когана. – М : Изд -во МЭИ, 2008. – 120 с.
10. Smith Chart. – URL: <http://fritz.dellsperger.net/smith.html> (дата обращения: 11.01.2016).

Свиридов Александр Сергеевич

аспирант,
Московский институт электроники и математики,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)
E-mail: asviridov@hse.ru

Лисицын Иван Юрьевич

аспирант,
Московский институт электроники и математики,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)
E-mail: lisitsyn@hse.ru

Колганов Андрей Андреевич

аспирант,
Московский институт электроники и математики,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)
E-mail: akolganov@hse.ru

Аннотация. Описывается метод проектирования маломощного усилителя (МШУ) преселектора сигналов спутниковых навигационных систем с учетом защиты системы электропитания. Приведена общая структурная схема бортовой системы электропитания и виды электромагнитных воздействий на нее. Основная концепция метода – это интеграция программы моделирования и измерительного оборудования, так называемое «взаимосвязанное решение» и применение средств защиты электропитания.

Ключевые слова: ЭМИ, экранирование, фильтрация, электромагнитные поля высокой интенсивности, система питания бортовых радиоэлектронных средств, маломощный усилитель (МШУ), проектирование, коэффициент шума.

Sviridov Aleksandr Sergeevich

postgraduate student,
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics
National Research University
«Higher School of Economics»
(101000, 20 Mjasnickaja street, Moscow, Russia),

Lisitsyn Ivan Yur'evich

postgraduate student,
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics
National Research University
«Higher School of Economics»
(101000, 20 Mjasnickaja street, Moscow, Russia),

Kolganov Andrey Andreevich

postgraduate student,
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics
National Research University
«Higher School of Economics»
(101000, 20 Mjasnickaja street, Moscow, Russia),

Abstract. Describes a method of designing a low noise amplifier (LNA), preselection of signals of satellite navigation systems, taking into account the protection of the power supply system. Shows the general block diagram of an onboard power supply system and the types of electromagnetic impacts. The basic concept of the method – is the integration of simulation software and measurement equipment, so-called «integrated solution» and the use of means of power protection.

Key words: EMI, shielding, filtration, high intensity electromagnetic fields (HIFR), power system avionics, Low Noise Amplifier (LNA), design, Noise Figure (NF).

УДК 629.7.05, 629.7.054.07

Свиридов, А. С.

Проектирование маломощного усилителя преселектора сигналов спутниковых навигационных систем для бортовых радиоэлектронных средств с учетом защиты системы электропитания от воздействия электромагнитных полей высокой интенсивности / А. С. Свиридов, И. Ю. Лисицын, А. А. Колганов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 110–115.

О ПРИМЕНЕНИИ ИСПЫТАНИЙ РЭС НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ ЭТАПАХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ

О. Н. Герасимов, А. В. Пивкин, Н. К. Юрков

Введение

Вследствие высокой сложности технологических процессов производства радиоэлектронных систем (РЭС) и наличия большого числа факторов, влияющих на их качество, в партии изделий, считающихся годными на момент проверки, всегда содержатся изделия со скрытыми дефектами (потенциально ненадежные). Такие РЭС во время эксплуатации выходят из строя в первую очередь. Основным путем исключения потерь из-за брака и низкого качества продукции является введение производственного контроля [1, 2]. К показателям процесса контроля относятся: точность, достоверность, трудоемкость, стоимость контроля и др. Предпочтение отдается тем методам контроля, которые дают достаточную достоверность при минимальных затратах [3, 4].

Анализ методов выявления скрытых (латентных) дефектов РЭС

Типовой график интенсивности отказов РЭС во времени приведен на рис. 1, который показывает высокий уровень интенсивности отказов на этапе приработки, низкий уровень в период нормальной эксплуатации и повышение интенсивности отказов в период старения, когда появляются так называемые «деградационные» отказы [4].

Ранние отказы возникают, как правило, в результате несовершенства конструкции изделия или неотлаженного технологического процесса. По мере устранения конструктивных недостатков и освоения технологии производства интенсивность отказов снижается. В настоящее время существует два способа снижения количества ранних отказов РЭС. Один из них заключается в том, чтобы ввести усиленный контроль и выбирать все дефектные изделия из партии по принципу «годен/негоден» (пунктирная кривая на рис. 1). Второй подразумевает наличие обратной связи в виде проведения серии испытаний (отбраковочных, предъявительских, приемо-сдаточных и др.) при воздействии дестабилизирующих факторов (сплошная кривая на рис. 1).

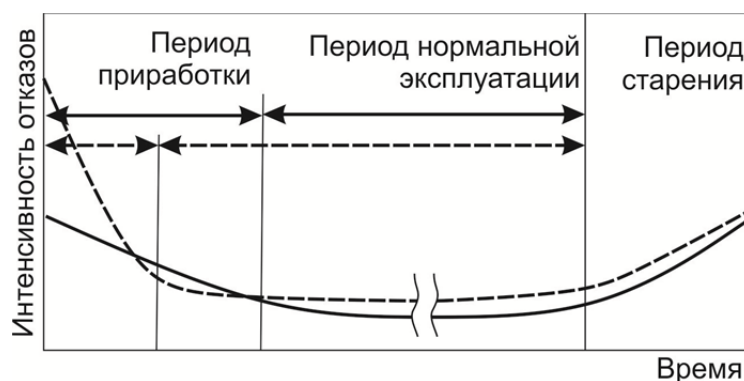


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов РЭС от времени

Влияние дестабилизирующих факторов имитирует условия эксплуатации и ускоряет (провоцирует) выявление скрытых дефектов. В табл. 1, взятой в источнике [5], показана примерная взаимосвязь воздействующих факторов и действующих механизмов отказов во время отбраковочных испытаний.

Таблица 1

Соответствие воздействующих факторов и механизмов отказов

Отбраковочные испытания	Механизмы отказов									
	Дефекты монтажа кристалла	Дефекты в кристалле кремния	Дефекты металлизации кремния	Дефекты в сварных внутренних соединениях	Загрязнения поверхности	Дефекты герметичности	Дефекты корпуса	Дефекты внешних выводов	Несогласованность тепловых коэффициентов расширения	Электрическая нестабильность
Внешний осмотр										
Повышенная температура										
Вибрация										
Одиночные удары										
Многочисленные удары										
Центрифуга										
Термоциклы										
Испытания на герметичность										
Рентгенокопия										
Термоэлектротренировка										
Энергоциклы										
Электрические испытания										
Повышенная влажность										

В частности, воздействие на РЭС повышенной температуры и термоциклов ускоряет многие механизмы отказов. Повышенные температуры вызывают ускорение химических реакций, обуславливающих коррозию алюминия на кристалле, старение, ухудшение изоляции, увеличение токов утечки и т.д.

Термоциклы (попеременный нагрев и охлаждение) также являются ускоряющим воздействием и хорошо выявляют малую негерметичность корпуса. Влага при термоциклах проникает в негерметичные объемы и вызывает увеличение токов утечки и коррозию металлизации. Напряженные места конструкции, склонные к образованию трещин, также выявляются при термоциклах. В большинстве случаев термоциклы являются нормальным режимом работы РЭС, так как они связаны с внешней температурой и разогревом аппаратуры.

Помимо тепловых и термоциклических используются механические испытания с постоянной или изменяющейся нагрузкой. На заключительных этапах производственного контроля РЭС их проводят для выявления дефектов монтажа электрорадиоэлементов, внутренних сварных соединений, корпуса и внешних выводов [6]. Критерием отсутствия указанных дефектов является совпадение спектра резонансных частот испытываемого изделия со спектром резонансных частот эталона. Спектр снимается в контрольной точке (или точках) изделия.

Неверный выбор контрольной точки может привести к ее попаданию в область узлов виброперемещений конструкции и, как следствие, снижению информативности полученной информации (пропуск резонансных частот). При этом следует сказать, что выбор контрольной точки не регламентируется существующими ГОСТами. Поэтому далее предложен способ измерения спектра резонансных частот конструкции РЭС, свободный от указанного недостатка.

Способ измерения спектра резонансных частот РЭС по ИЧХ

Поведение конструкции в режиме резонанса отличается увеличением амплитуды вибрации в испытываемом изделии и изменением полного сопротивления вибровозбудителя в испытательном оборудовании [7].

На резонансных частотах в конструкции изделия возникают определенные формы колебаний (моды). Эти частоты характеризуются минимальным значением на кривых импедансно-

частотной характеристике вибровозбудителя и максимальным – на кривых виброперемещений конструкции РЭС.

Поэтому предлагаемый способ определения спектра резонансных частот основан на измерении ИЧХ вибровозбудителя. На рис. 2 представлена структура способа измерения ИЧХ. Испытательный сигнал подается на усилитель мощности, к которому с возбуждающей обмотки вибровозбудителя подключен резистивный датчик тока.

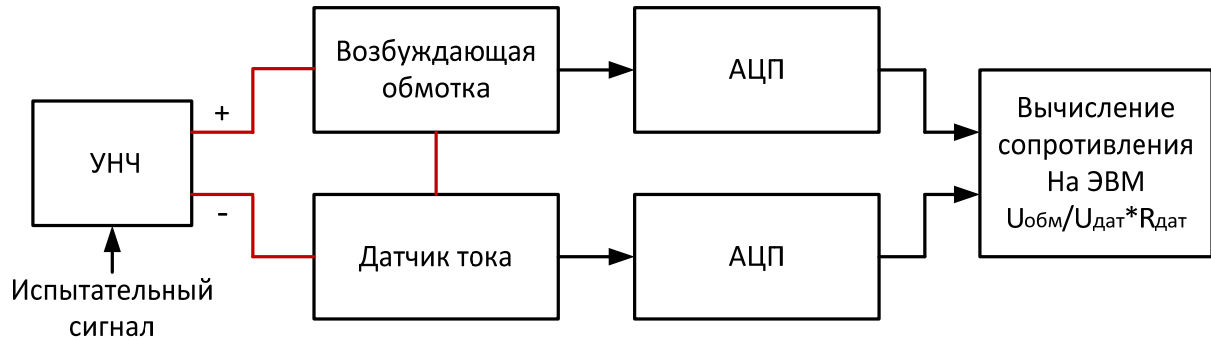


Рис. 2. Структурная схема процесса определения ИЧХ

Напряжение следует измерять как на возбуждающей обмотке, так и на датчике тока. Полное электрическое сопротивление вибровозбудителя вычисляется отношением измеренных напряжений на ЭВМ. Затем осуществляется построение ИЧХ и ее визуализация в виде графика в частотной области.

Проведение экспериментальных исследований

Измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ) конструкции РЭС в рамках исследования бесконтактной индикации резонансов по ИЧХ проводилось с помощью прикрепленного к объекту исследования (ОИ) цифрового акселерометра LIS2DM. ОИ в данном случае – пульт управления питанием. Структурная схема измерения АЧХ и ФЧХ показана на рис. 3.

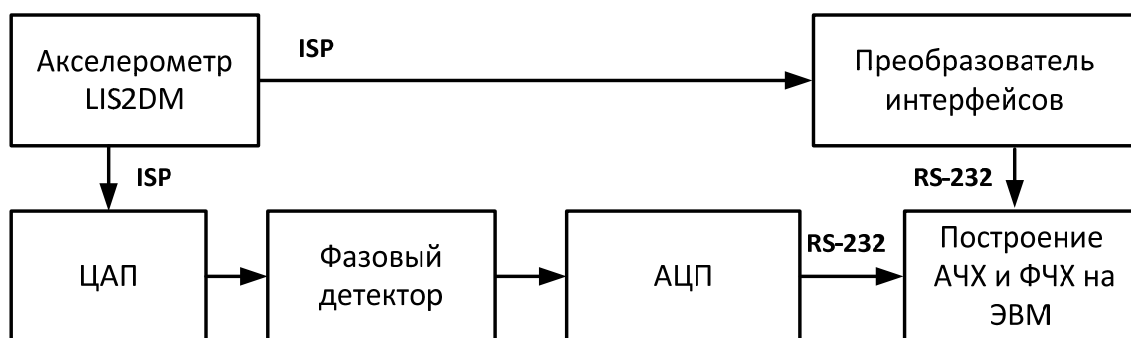


Рис. 3. Структурная схема процесса определения АЧХ и ФЧХ

LIS2DM представляет собой сверхэкономичный, высокопроизводительный, трехосевой акселерометр со стандартным последовательным цифровым интерфейсом для передачи выходных данных [8]. Акселерометр выдает значение ускорения в цифровом виде по интерфейсу SPI. Для определения фазового сдвига цифровой сигнал преобразуется в аналоговый и подается на фазовый детектор.

Цифровые акселерометры подобного класса, выполненные по MEMS технологии, имеют точность порядка 0,5 %. Этой точности вполне достаточно для подтверждения достоверности определенных по ИЧХ резонансных частот [9].

Отличительной особенностью ИЧХ является полное отсутствие влияния средств измерения на объект исследования [10]. Используемые акселерометры являются частью ОИ, так как прикле-

ены к корпусу ОИ и являются типичными радиоэлементами поверхностного монтажа. На рисунке показаны частотные характеристики ОИ при синфазном возбуждении точек крепления. Достоверность определенных по ИЧХ резонансных частот подтверждается полученными экспериментально графиками частотных характеристик, представленных на рис. 4. Сплошная и штрих-пунктирная кривые – это АЧХ и ФЧХ ОИ соответственно, пунктирная кривая – ИЧХ.

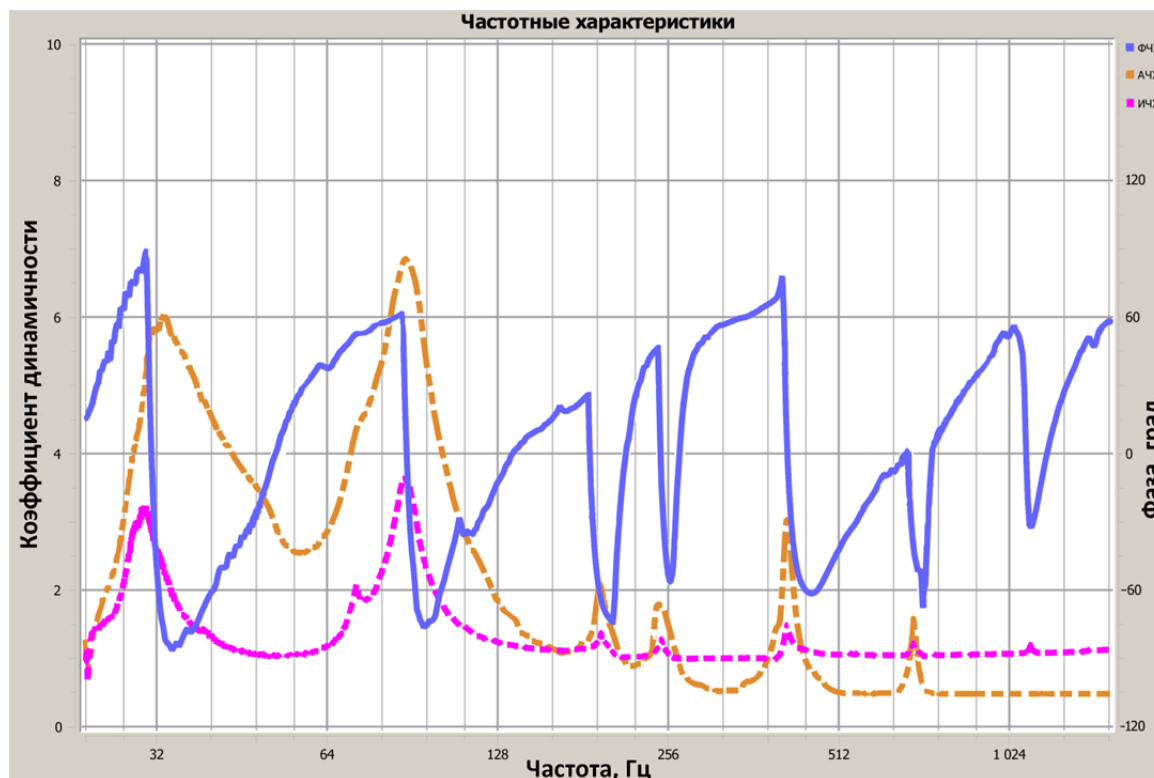


Рис. 4. Частотные характеристики ОИ (амплитудно-частотная, фазочастотная и импедансно-частотная)

Анализ графиков, представленных на рис. 4, показывает, что индикация резонансов по ИЧХ точна и показательна, но имеет серьезный недостаток – ни величину виброперемещения, ни виброскорости по ИЧХ достоверно определить невозможно.

Выводы

Однако точные значения резонансных частот – важные характеристики конструкции РЭС, знание которых позволит проводить выявление латентных технологических дефектов (монтажа электрорадиоэлементов, внутренних сварных соединений, корпуса, внешних выводов и т.д.) на заключительных этапах производственного контроля РЭС.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Федоров, В. К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. К. Федоров, Н. К. Сергеев, А. А. Кондрашкин. – М. : Техносфера, 2005. – 504 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев [и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М., 2003. – С. 123.
3. Юрков, Н. К. Технология радиоэлектронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 640 с.

4. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – М. : Лань, 2014. – 480 с.
5. Основы теории надежности электронных средств : учеб. пособие / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 100 с.
6. ЭЛТЕХ. Отбраковочные испытания как средство повышения надежности партий ИС. – URL: http://tech-e.ru/2006_1_70.php.
7. Черногоров, Е. П. Теоритическая механика. Малые колебания механических систем : курс лекций / Е. П. Черногоров. – Челябинск, 2011. – 31 с.
8. Котюк, А. Ф. Датчики в современных измерениях / А. Ф. Котюк. – М. : Радио и связь, 2006. – 95 с.
9. ГОСТ 30630.1.2-99 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации.
10. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под ред. А. И. Коробова. – М. : Радио и связь, 2002. – 272 с.

Герасимов Олег Николаевич

начальник военного представительства
Министерства обороны РФ,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8)
E-mail: gera0502@mail.ru

Пивкин Антон Викторович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: antonyxy@gmail.com

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. Показано, что влияние дестабилизирующих факторов, имитирующих условия эксплуатации, ускоряет развитие скрытых технологических дефектов радиоэлектронных систем. Рассмотрены механизмы влияния дестабилизирующих факторов на развитие скрытых технологических дефектов. Сделан вывод, что на заключительных этапах производственного контроля важную роль играют механические испытания, проводимые для выявления дефектов монтажа электрорадиоэлементов, внутренних сварных соединений, корпуса внешних выводов радиоэлектронных систем и т.д. Существующие способы контроля радиоэлектронных систем при механических испытаниях не позволяют определить спектр собственных частот конструкции (по амплитудно-частотной характеристике) с требуемой точностью, поэтому в работе предложен новый способ, отличие которого заключается в определении спектра собственных частот конструкции на основе анализа импедансно-частотной характеристики. Проведение экспериментальных исследований подтвердило правильность предложенного подхода.

Ключевые слова: испытания, контроль, внешние факторы, дефекты, отказы.

Gerasimov Oleg Nikolaevich

head of the military mission
of The Ministry of defense of RF,
Scientific-Research Institute of Physical Measurements
(440026, 8 Volodarsky street, Penza, Russia)

Pivkin Anton Viktorovich

candidate of technical sciences,
senior stuff scientist,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

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

Abstract. It is shown that the influence of destabilizing factors, simulating operation conditions, accelerates the development of latent technological defects of radio-electronic systems. The mechanism of influence of destabilizing factors on the development of latent technological defects. It is concluded that in the final stages of production control an important role is played by mechanical tests carried out to identify defects in the mounting of components, internal welded joints, outer body conclusions electronic systems, etc. Existing methods of electronic control systems in mechanical tests do not allow to determine the spectrum of eigen-frequencies of the structure (the amplitude-frequency characteristic) with the required accuracy, therefore, in this paper we propose a new method, the difference of which is to determine the spectrum of the natural frequencies of the structure based on the analysis impedance-frequency characteristics. Experimental research confirmed the accuracy of the proposed approach.

Key words: testing, control, external factors, defects, failures.

УДК 620; 629.01

Герасимов, О. Н.

О применении испытаний РЭС на воздействие внешних дестабилизирующих факторов на заключительных этапах производственного контроля / О. Н. Герасимов, А. В. Пивкин, Н. К. Юрков //
Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 116–121.

Отрасли науки:
05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника;
05.22.00 Транспорт;
05.26.00 Безопасность деятельности человека;
05.27.00 Электроника.

КОДЫ ГРНТИ

20.01 Общие вопросы информатики

27.35 Математические модели естественных наук и технических наук. Уравнения математической физики

29.35 Радиофизика. Физические основы электроники

30.17 Механика жидкости и газа

30.51 Комплексные и специальные разделы механики

47.03 Теоретические основы электронной техники

47.09 Материалы для электроники и радиотехники

47.13 Технология и оборудование для электронного и радиотехнического производства

47.14 Проектирование и конструирование электронных приборов и радиоэлектронной аппаратуры

47.33 Твердотельные приборы

47.49 Радиотехнические системы зондирования, локации и навигации

55.42 Двигателестроение

55.47 Авиастроение

55.49 Космическая техника и ракетостроение

78.21 Военно-прикладные науки

72.23 Внешнеторговые перевозки

73.31 Автомобильный транспорт

73.37 Воздушный транспорт

73.41 Промышленный транспорт

78.25 Вооружение и военная техника

89.25 Космическая техника и технология

89.17 Планирование и осуществление запусков космических аппаратов и искусственных небесных тел

89.23 Управление движением космических аппаратов и искусственных небесных тел

89.27 Безопасность и медико-биологические проблемы космических полетов

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (kipra@pnzgu.ru, дискета 3,5», CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи – 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt, через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья **обязательно** должна сопровождаться индексом УДК, аннотацией, содержащей 150–200 слов; 7–10 ключевыми словами, а также сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы и должность, ученая степень, ученое звание, адрес, контактные телефоны, e-mail) **на русском и английском языках.**

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версии 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Редколлегия

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала «Надежность и качество сложных систем» рекомендуем вам оформить подписку.

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Подписку можно оформить по объединенному каталогу «Пресса России» «Газеты. Журналы», тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия ВУЗов», «Энергетика. Электротехника». Подписной индекс – 43305.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Почта России» ФСП-1											
Бланк заказа периодических изданий											
АБОНЕМЕНТ								На газету журнал		43305	
Надежность и качество								(индекс издания)			
сложных систем								Количество комплектов			
(наименование издания)											
На 20 _____ год по месяцам											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда											
				(почтовый индекс)				(адрес)			
Кому _____											
----- Линия отреза -----											
						ДОСТАВОЧНАЯ			43305		
ПВ			место			литер			КАРТОЧКА		
									(индекс издания)		
На газету			журнал			Надежность и качество сложных систем					
						(наименование издания)					
Стои- мость	подписки						руб.			Количество комплектов	
	каталожная						руб.				
	переадресовки						руб.				
На 20 _____ год по месяцам											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
почтовый индекс		Город									
		село									
		область									
		Район									
код улицы		улица									
дом	корпус	квартира	Фамилия И.О.								