

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Белозерцев А. И., Эль-Салим С. З. ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ «ГАЗОВАЯ ФАЗА – ПОЛУПРОВОДНИК».....	3
Белозерцев А. И., Эль-Салим С. З. ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ.....	10
Артамонов Д. В., Литвинов А. Н., Юрков Н. К. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	18
Смогунов В. В., Кузнецов Н. С., Юрков Н. К. МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ	25

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Доросинский А. Ю., Герасимов О. Н., Артамонов Д. В. ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРОВОЛОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ.....	33
Герасимов О. Н., Доросинский А. Ю., Березин М. Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ.....	37
Володин П. Н. РАЗРАБОТКА МАКРОМОДЕЛИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ.....	43
Зырянов Ю. Т., Лебедев В. В., Ледовских Д. Н., Рязанов И. Г. ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ФОРМИРОВАНИЮ СМЕШАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ.....	49
Боков А. С., Важенин В. Г., Гусев А. В., Нагапибаев Д. Ж., Иофин А. А. УЧЕТ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ИМИТАТОРЕ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ РАДИОВЫСОТОМЕРОВ.....	60
Калмыков Н. Н., Мельников С. А., Седов Д. П., Васильева А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СКОРОСТНОГО КАНАЛА КОМБИНИРОВАННОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛА, ЗАПИСАННОГО ПРИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ	68
Хомутов К. И., Шегал А. А., Иофин А. А., Иванов В. Э. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ В ДИНАМИЧЕСКИХ МИКРОСХЕМАХ ПАМЯТИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK	73

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Дедков В. К.

«РЕЗОНАНС ТОКОВ» И «ВЗРЫВЫ» КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПОЛЯ..... 80

Адамов А. П., Адамова А. А., Герасимов Н. В.

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ МУЛЬТИКОПТЕРОВ

С ПОЗИЦИИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ 86

Адамов А. П., Адамова А. А.

СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ МИКРО-
И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ..... 94

Андреев К. П.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОРОДСКОЙ МАРШРУТНОЙ СЕТИ 102

Моисеев Д. А.

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРОЦЕСС РУЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ..... 107

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 543.5;543.26

DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-1

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ «ГАЗОВАЯ ФАЗА – ПОЛУПРОВОДНИК»

А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим

Одной из важных задач теории надежности является активизация исследований по разработке не столько математических, сколько физических моделей отказов и причин, вызывающих их возникновение.

Следовательно, необходимо разработать такие физические или математические модели и требования, которые позволяют достаточно полно характеризовать надежность системы независимо от ее природы. При этом необходимо знать причину, а не следствие отказа. Следовательно, необходим инженерный анализ и расчет надежности будущего изделия, а также алгоритма его работы.

Существующие модели, основанные на вероятностном подходе, не удовлетворяют условиям контроля готовой продукции, поскольку далеки от практики производства. Многочисленные исследования говорят о том, что в основе обеспечения надежности лежат физико-химические процессы, протекающие в используемых материалах на стадии изготовления и последующей их эксплуатации [1, 2].

Поскольку физические явления описываются физическими теориями, на базе которых строятся математические модели, то и надежность как процесс потери или сохранения работоспособности объекта за счет изменения внутреннего состояния описывается физической теорией, а затем уже возможно создание математической теории.

Вероятностно-статистический подход, основанный на теории вероятностей и математической статистике, несовершенен, так как для установления закономерностей возникновения отказов необходимо проводить опыты, приводящие к изменению свойств и разрушению деталей. Кроме того, он не дает точного анализа поведения объекта при дальнейшей эксплуатации. В соответствии с этим подходом возможно с определенной степенью достоверности предсказать момент наступления отказа, а не предупредить его и обеспечить надежность работы объекта.

Детерминированный (причинно-следственный) подход позволяет оценить надежность как отдельного элемента системы, так и всей системы в целом при одновременном воздействии на объект внешних и внутренних факторов. Поэтому такой подход к изучению надежности является более приемлемым [3]. Детерминированная модель повышения надежности аналитических систем на основе причинно-следственных связей прежде всего выстраивается на анализе процессов, эту связь формирующих [4].

Существование «чистых» паров или газов в воздухе практически недостижимо в силу природного молекулярного многообразия. Молекулярный состав окружающего воздуха формируется молекулами (веществами), которые в свою очередь претерпевают физические и химические трансформации. Молекулы целевого (исследуемого) вещества могут сохранить структуру или трансформироваться, сохраняя основные свойства. Также целевые вещества могут вступать во взаимодействие с другими компонентами, содержащимися в воздухе. При этом исходная концен-

трация целевого вещества может изменяться в ту или иную сторону, т.е. состав окружающего воздуха можно считать динамически переменным. Также необходимо учитывать аэродинамическое перемешивание и способ (метод) отбора проб [5].

В основе адсорбционно-кинетического анализа [полупроводники-сенсоры] лежит измерение изменения электропроводности вследствие хемосорбции вещества из газовой фазы за определенное время. Очевидно, что даже при низких концентрациях число молекул велико. Так, количество молекул водорода в одном кубическом метре при нормальных условиях для концентрации

$$10^{-3} \text{ г/м}^3 \text{ равно } N = \frac{m}{\mu} N_{Av} \approx 3 \cdot 10^{20}, \text{ где } N_{Av} - \text{число Авогадро.}$$

Практика изучения случайных процессов показывает, что хотя результаты отдельных наблюдений, проведенных в одинаковых условиях, могут сильно отличаться, в то же время средние результаты для достаточно большого числа наблюдений устойчивы и слабо зависят от результатов отдельных наблюдений.

Для построения феноменологической модели формирования аналитического сигнала необходимо построить цепь причинно-следственных связей и определить уравнения изменения состояния в соответствии со временем течения всего процесса измерения [6]. На рис. 1 приведена общая схема событий в зависимости от их наступления.

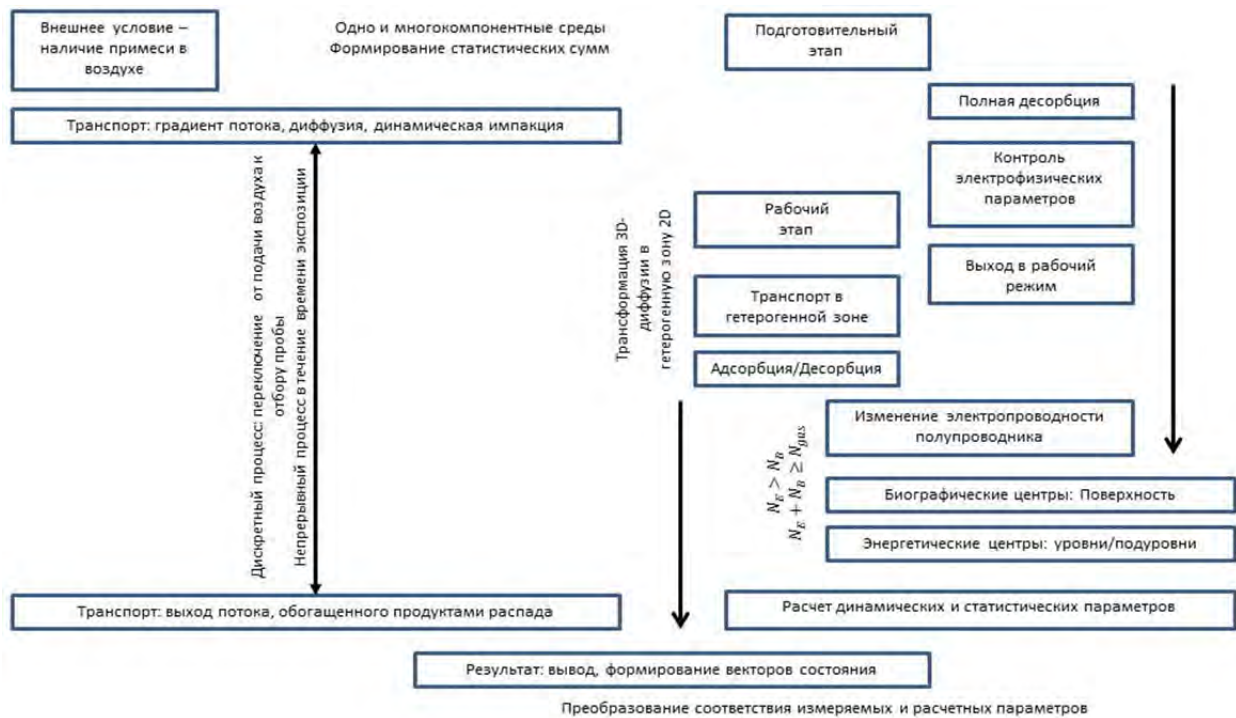


Рис. 1. Причинно-следственная цепь событий формирования аналитического сигнала

Причинно-следственная модель состоит из двух практически независимых физически, но связанных идеологически блоков. К физическим блокам следует отнести:

- процессы, происходящие в объеме полупроводника при его нагреве;
- процессы, протекающие в гетерогенной зоне;
- конкурирующие процессы адсорбции и десорбции при контакте молекул газовой фазы с поверхностью.

По времени процессы располагаются по приоритету причинности:

- 1) отбор и доставка вещества в гетерогенную зону газочувствительного слоя;
- 2) взаимодействие молекул газовой фазы с поверхностью полупроводника;
- 3) транспорт электронов адсорбата с учетом знака направления перехода;
- 4) поверхностные процессы, формирующие значения изменения электропроводности.

Для повышения достоверности качественных и количественных измерений, проводимых с помощью полупроводниковых сенсоров, имеющих развитую структуру поверхности (рис. 2),

крайне важно определить момент начала взаимодействия вещества газовой фазы с поверхностным слоем газочувствительного элемента [5].

Так как данный метод анализа является косвенным, то перед формированием аналитического сигнала проводится первичная обработка, которая включает процедуру сглаживания, расчета текущего среднего значения и расчета нормированной дисперсии $Z(t) = [\tilde{U}(t) - U(t)]^2$.



Рис. 2. Растровое изображение чувствительного слоя полупроводникового сенсора с увеличением $\times 50000$

Для точного определения момента начала взаимодействия сенсора с газом необходимо установить параметр, который однозначно откликается на факт взаимодействия вещества газовой фазы с поверхностью. Так как для изменения электропроводности при формировании аналитического сигнала необходима активация, в данном случае – подведение энергии для нагрева до определенной температуры, то целесообразно по измеренным и преобразованным параметрам рассчитать степень упорядоченности гетерогенной зоны.

Так как в процессе изменения электропроводности (сопротивления) участвует большое количество частиц, сигнал $U(t)$ распределен нормально. В этом случае интегральная функция и функция плотности вероятности имеют вид

$$F_U(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(u-\mu)^2}{\sigma^2}\right) dt \text{ и } f_U(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(u-\mu)^2}{\sigma^2}\right),$$

где μ – математическое ожидание; σ – стандартное отклонение величины $U(t)$ на интервале $[t_1, t_2]$.

Очевидно, что приращения сигнала $\Delta U(t) = U(t_2) - U(t_1), t_2 > t_1$ также нормально распределены с $\mu \rightarrow 0$, и интегральное распределение определится как

$$P(\Delta U < U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma\Delta t}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(u)^2}{\Delta t \sigma^2}\right) d\Delta t.$$

В этом случае полная дисперсия сигнала $U(t)$ на интервале $[t_1, t_2]$ рассчитывается как $D[U(t_2) - U(t_1)] = \sigma^2 |t_2 - t_1|$ для любых значений внутри интервала. Видно, что рассчитанная дисперсия зависит только от разности Δt и не зависит от самих значений сигнала $U(t)$.

Для дисперсии и стандартного отклонения приращений справедливо равенство $\lim_{\Delta t \rightarrow 1} \frac{D(U(t_2) - U(t_1))}{\Delta t} = \sigma^2$, т.е. при $\Delta t = 1$, $D = \sigma^2$. При изменении приращения стандартное отклонение флуктуирует относительно D , но с бесконечно малым порядком малости: $|D - \sigma^2| < \varepsilon \rightarrow 0$. В этом случае справедливо уравнение для математического ожидания $E[U(t_2) - U(t_1)] = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \sqrt{|t_2 - t_1|}$, т.е. приращение сигнала, соответствующего модели броуновского движения, обладает свойством статистического самоподобия:

$$U(t + \Delta t) - U(t) \triangleq \frac{1}{\sqrt{\gamma}} (U(t + \gamma \Delta t) - U(t)), \gamma \in \mathbb{R}^+.$$

Самоподобие сигнала $U(t)$ и его эквивалентность модели броуновского движения позволяют рассчитать размерность результатов измерений на интервале $[t_1, t_2]$.

Стандартная процедура расчета фрактальной размерности определяется следующим образом: количество элементарных зон N , полностью «покрывающих» зависимость $U(t)$, пропорционально $N(\Delta t) \propto \Delta t^{-\frac{\omega}{2}}$ или $\dim U = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\ln(N\Delta t)}{\ln \Delta t} = \frac{\omega}{2\gamma}$. В зависимости от частоты и $\gamma = \frac{\omega}{2 + \delta}$ фрактальная размерность сигнала $U(t)$ изменяется как $\frac{2 + \delta}{2}$, при этом δ определяется характером взаимодействия вещества из газовой фазы с газочувствительным слоем. При этом большую роль играет состав материала, тип проводимости и мощность нагрева [2, 6, 7].

Таким образом, процесс изменения электропроводности вследствие хемосорбции, т.е. обмен электронами между зоной проводимости и газовой фазой в гетерогенной зоне, является самоподобным по отношению к измеряемому падению напряжения в цепи газочувствительного слоя на интервале $[t_1, t_2]$.

Флуктуации падения напряжения в результате хемосорбции, соответствующие модели броуновского движения с точностью δ , предполагают некоторые дополнительные преобразования сигнала $U(t)$ для повышения стабильности (однозначности) обработки результатов измерения для более точного определения аналитических параметров. Для аналитического применения полупроводниковых сенсоров необходимо разработать модель, а на ее основе – алгоритм обработки сигнала $U(t)$, позволяющий реализовать прямую аналитическую задачу – идентификацию вещества и определение его концентрации по измеренным значениям измеряемого напряжения.

Энтропия по разбросу значений состояния определяется как $S = Z \ln Z$, полагая, что Z соответствует сумме предыдущих значений. В этом случае изменение энтропии по времени равно $\frac{dS}{dt} = \ln Z \cdot \frac{dZ}{Z}$, и, следовательно, производство энтропии

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = \frac{dZ}{Z} \frac{1}{Z^2} (1 - Z \ln Z).$$

Анализ производства энтропии в соответствии с теоремой Пригожина показывает: если $Z < 1 \rightarrow 1 - Z \ln Z > 0$, и, следовательно, система находится в хаотичном состоянии, обмен электронами со средой (с газовой фазой) минимален. В этом случае потенциал, вызванный хемосорбцией, определяется только молекулами кислорода. Если же $Z > 1 \rightarrow 1 - Z \ln Z < 0$, то обмен электронами со средой упорядочен, имеет градиент потока и обусловлен хемосорбцией молекул примесей, которые содержатся в газовой фазе [5].

Действительно, расчеты средних значений и дисперсий позволяют рассчитать энтропию динамического состояния и функцию динамического изменения энтропии $\frac{dZ}{Z}$, являющуюся определяющей как для скорости изменения порядка, так и для определения производства энтропии (табл. 1).

Таблица 1

Первичные преобразования и динамика энтропии взаимодействия

Измерение напряжения при хемосорбции НДМГ и АТ Концентрация НДМГ: 1 и 3,3 мг/м³, АТ: 3 мг/м³	
Накопление средних значений за время экспозиции	
Динамика дисперсии за время экспозиции	
Динамика энтропии	
Функция динамического изменения энтропии	

Измерения, приведенные в табл. 1, показывают, что при расхождении измеряемого сигнала (наличие мешающих примесей, наличие флуктуаций на поверхности чувствительного слоя) расчет текущих средних значений, а затем мгновенной дисперсии переводит процесс изменения электропроводности вследствие хемосорбции окислителя и восстановителя (А и НДМГ соответственно) из случайного в детерминированный. Расчет динамики и динамического изменения энтропии определяет момент начала реакции – истинной экспозиции. При подаче пробы в измерительный тракт инертность аналитической системы определяется длиной газоотборной трубки, пульсациями побудителя расхода, температурой, влажностью, плотностью и давлением окружающего воздуха, поэтому аппаратно установленная экспозиция вносит погрешность в расчет концентраций. Расчет динамики энтропии $\ln Z$ и динамического изменения $\frac{dZ}{Z}$ позволяет достаточно точно определить момент начала взаимодействия, соответственно, время экспозиции уточняется и повышается точность расчета концентраций.

Таким образом, самоподобные преобразования позволяют повысить стабильность исходных измерений, уточнить время аппаратно установленной экспозиции, тем самым повысить точность количественного определения по величине дисперсии потенциала, обусловленного хемосорбцией вещества-аналита.

В основе детерминированного моделирования лежит возможность построения тождественного преобразования для исходных данных по теоретически предполагаемым прямым связям с

факторами. Детерминированное моделирование факторных систем – это простое и эффективное средство для количественной оценки роли отдельных факторов в динамике изменения обобщающего показателя (рис. 3).

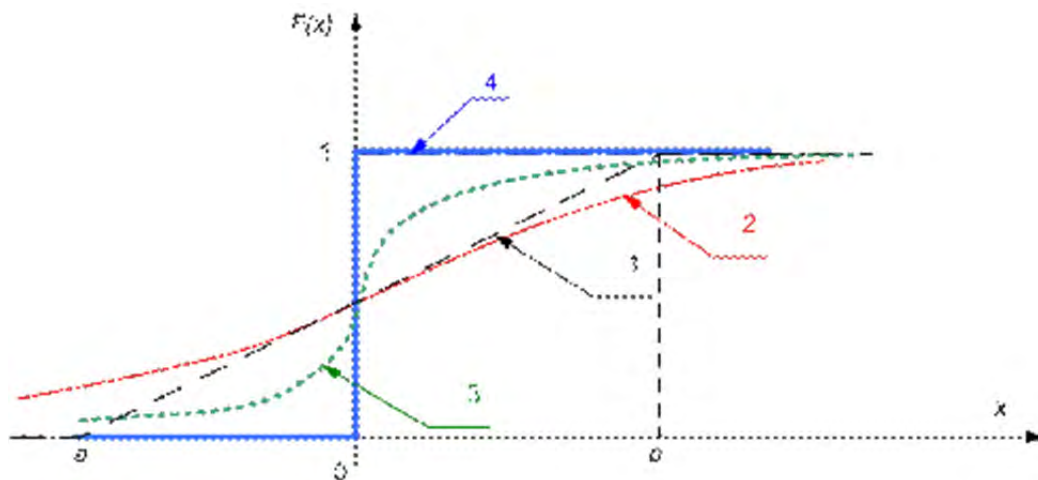


Рис. 3. Переход от вероятностных моделей: равномерного распределения (1) и нормального распределения (2, 3) к детерминированной модели (4)

При детерминированном анализе модель изучаемого явления не изменяется по изучаемым объектам и периодам. При необходимости сравнения результатов измерений в отдельные периоды возникает лишь вопрос о сопоставимости выявленных на основе модели количественных аналитических результатов.

Детерминированный анализ представляет собой методику исследования влияния факторов, связь которых с результативным показателем носит функциональный характер, т.е. может быть выражен математической зависимостью.

Следовательно, предположение о детерминированном характере физической системы и описание ее детерминированной математической моделью является идеализацией реальной системы. Детерминированная математическая модель отображает реальные физические процессы в усредненном смысле.

В тех задачах, где не требуется высокая точность результатов моделирования, предпочтение отдается детерминированной модели. Это объясняется тем, что реализация и анализ детерминированной математической модели много проще, чем стохастической.

Детерминированная модель недопустима в ситуациях, когда случайные процессы $\omega(t)$ соизмеримы с детерминированными $x(t)$. Результаты, полученные с помощью детерминированной математической модели, будут неадекватными реальным процессам.

Библиографический список

1. Миллер, Б. М. Случайные процессы в примерах и задачах / Б. М. Миллер, А. Р. Панков. – М. : Изд-во МАИ, 2001. – 313 с. ISBN 5-7035-2321-4.
2. Вентцель, А. Д. Курс теории случайных процессов / А. Д. Вентцель. – М. : Наука, 1975. – 320 с.
3. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 2000. – 383 с. ISBN 5-06-003831-9.
4. Обухова, Л. В. Теория вероятностей, математическая статистика и случайные процессы в примерах и задачах / Л. В. Обухова, З. Я. Молдовская, В. Ф. Князева. – Киев : УМКВО, 1991. – 318 с.
5. Громов, В. Ф. Механизмы сенсорного эффекта в кондуктометрических датчиках на основе диоксида олова для детектирования газов-восстановителей / В. Ф. Громов, Г. Н. Герасимов, Т. В. Бельшева, Л. И. Трахтенберг // Журнал Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева. – 2008. – Вып. 5. – С. 80–87.
6. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
7. Тюрин, Ю. Н. Стохастический анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров. – М. : ИНФРА-М, 1997. – 528 с.
8. Ван-Желен, В. Физическая теория надежности / В. Ван-Желен. – Симферополь : Крым, 1998. – 318 с.

Белозерцев Александр Иванович

первый заместитель генерального директора,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Эль-Салим Суад Зухер

доктор физико-математических наук, профессор,
генеральный директор
ООО «Омега»
(199048, Россия, г. Санкт-Петербург,
наб. реки Смоленки, 19-21, лит. В)
E-mail: suad-olka@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена модель повышения достоверности, а следовательно, надежности аналитических измерений паров и газов. Исследованы факторы, связанные с результативным показателем, выраженным математической зависимостью. Для задач, которые решаются в масштабе реального времени и не требуют высокой точности результатов моделирования, построена детерминированная модель, позволяющая уточнить длительность реальной экспозиции для повышения точности количественных расчетов.

Ключевые слова: модель, энтропия, детерминированные процессы, причина, следствие.

Belozertsev Aleksandr Ivanovich

first deputy general director,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Al-Salim Suad Zuher

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
director general,
Ltd "Omega"
(199048, lit. In, 19-21 embankment
of the Smolenka river, Saint-Petersburg, Russia)

Abstract. The model of increase in reliability and consequently, and reliabilities of analytical measurements of vapors and gases is considered. Factors, the bound to the productive indicator expressed by mathematical dependence are investigated. For problems which are solved on the scale of real time and do not demand a high precision of results of model operation, the determined model allowing to specify duration of an actual exposition for increase in accuracy of the quantitative calculations is constructed.

Key words: model, an entropy, the determined processes, the reason, a corollary.

УДК 543.5;543.26

Белозерцев, А. И.

Причинно-следственный подход к моделированию надежности системы «газовая фаза – полупроводник» / А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 3–9. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-1.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим

Надежность измерений, проводимых с помощью газоаналитических систем, определяется факторами, зависимыми от ряда технических и математических параметров:

- технологии изготовления первичного преобразователя;
- совместимостью схмотехнического решения и первичного преобразователя;
- алгоритма управления и обработки результатов измерения;
- стабильностью аналитических характеристик [1].

В современном газовом анализе приведенные факторы составляют задачу 3S: чувствительность, стабильность и селективность [2].

Цель настоящей работы – разработка программно-алгоритмического аппарата, позволяющего повысить качество работы газоаналитической системы. Результатом исследований, проводимых в рамках работы, является алгоритм управления и обработки результатов прямых измерений, позволяющий с высокой достоверностью идентифицировать вещества-аналиты и поднять точность количественного анализа реальных многокомпонентных паровоздушных смесей.

Полупроводниковые сенсоры, изготовленные на основе диоксида олова (SnO_2), легированного электроуправляющими и каталитическими примесями, наиболее полно удовлетворяют требованиям современного газового анализа [1, 2].

Действительно, стабильность электрофизических и аналитических характеристик достигается разработанной групповой технологией их изготовления, в которую входит методика синтеза дисперсных полупроводников и метод внесения добавок, снижающих температуру спекания газочувствительного материала.

Введение каталитических примесей, нагрев до заданных температур в полной мере не снимают основной вопрос селективной идентификации веществ в многокомпонентных смесях. Для повышения селективности предложен метод формирования мультисенсорных систем, составленных из сенсоров различного химического состава – сенсоров, основу которых составляет диоксид олова и различные каталитические примеси [3].

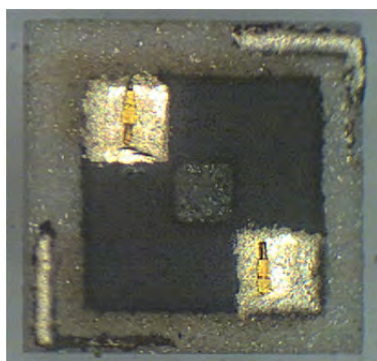
Разработанные схмотехнические устройства позволяют включать одновременно две 4-канальных микросборки с последующим попарным клонированием. Таким образом, при необходимости можно одновременно подключить до 4л сенсоров, имеющих различный химический состав и возможность работы при разных температурах. Такой подход позволяет достичь высокой степени селективности. На рис. 1 приведены изображения сенсоров, эскизов микросборок и варианты размещения микросборок в аналитических камерах различного типа.

На рис. 2 приведены схмотехнические решения для подключения двух 4-канальных микросборок с различными интерфейсами.

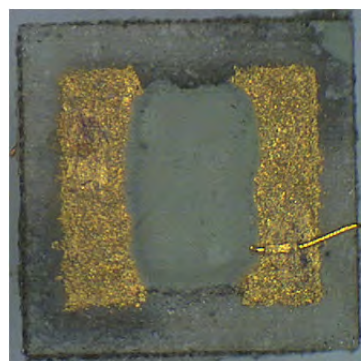
Обнаружение примесей паров и газов в воздухе, проводимое с применением полупроводниковых адсорбционных датчиков резистивного типа, основано на измерении падения напряжения на газочувствительном элементе при его нагреве до температуры, определяемой подводимой к нагревательному элементу мощностью, регулируемой в диапазоне от 50 до 1000 мВт. Изменение падения напряжения зависит от изменения сопротивления газочувствительного слоя в результате адсорбции молекул примеси исследуемого вещества при прокачке потока воздуха с расходом в диапазоне от 0,7 до 5 л/мин. Объем газовой камеры фиксирован и позволяет проводить обнаружение примесей паров и газов в воздухе в режиме полного перемешивания [3].

Применение вейвлет-преобразования обусловлено частотно-временной локализацией как аналогового, так и цифрового массива полученной при измерении информации. Разложение спектра по базису вейвлет-образующих функций позволяет раскрыть тонкую структуру спектра в реальном масштабе времени и устранить неопределенность, характерную для Фурье-преобразования. Неопределенность Фурье образа обусловлена принципом Гейзенберга, который не позволяет локализовать высокочастотные составляющие спектра (рис. 3). Вейвлет-преобразование свободно от

неопределенности в частотно-временной области в силу возможности деформации и сдвига вейвлет-базиса на любую величину, принадлежащую $\mathbb{R}^2$ [4].



Нагревательный элемент сенсора



Газочувствительный элемент сенсора

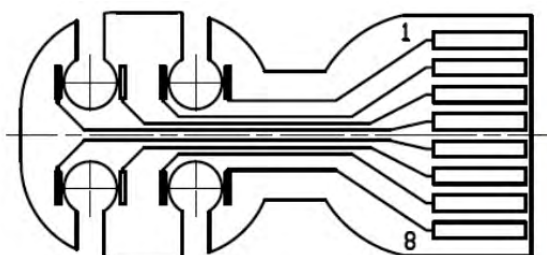
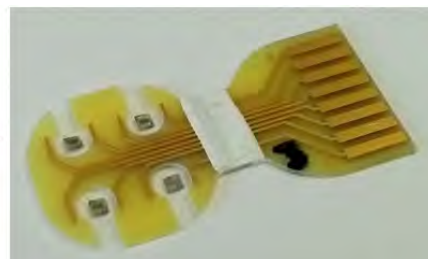


Схема микросборки и собранная 4-канальная плата-носитель



Варианты размещения микросборок в аналитических камерах

Рис. 1. Сенсоры и 4-канальные микросборки

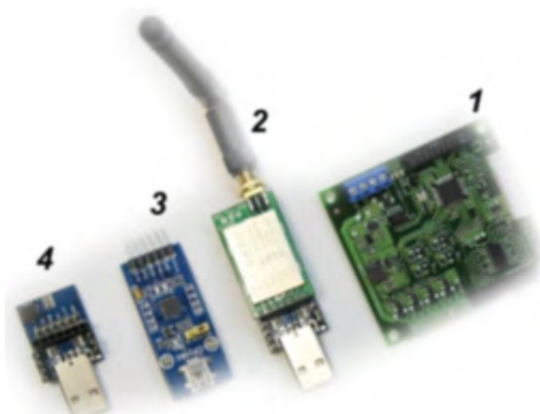


Рис. 2. Схмотехническое решение управления 8-канальной аналитической системой:
1 – модуль управления 8-канальной аналитической системой, интерфейсы коммутации с сервером;
2 – радиоканал; 3 – RS 485; 4 – UART/USB 2.0

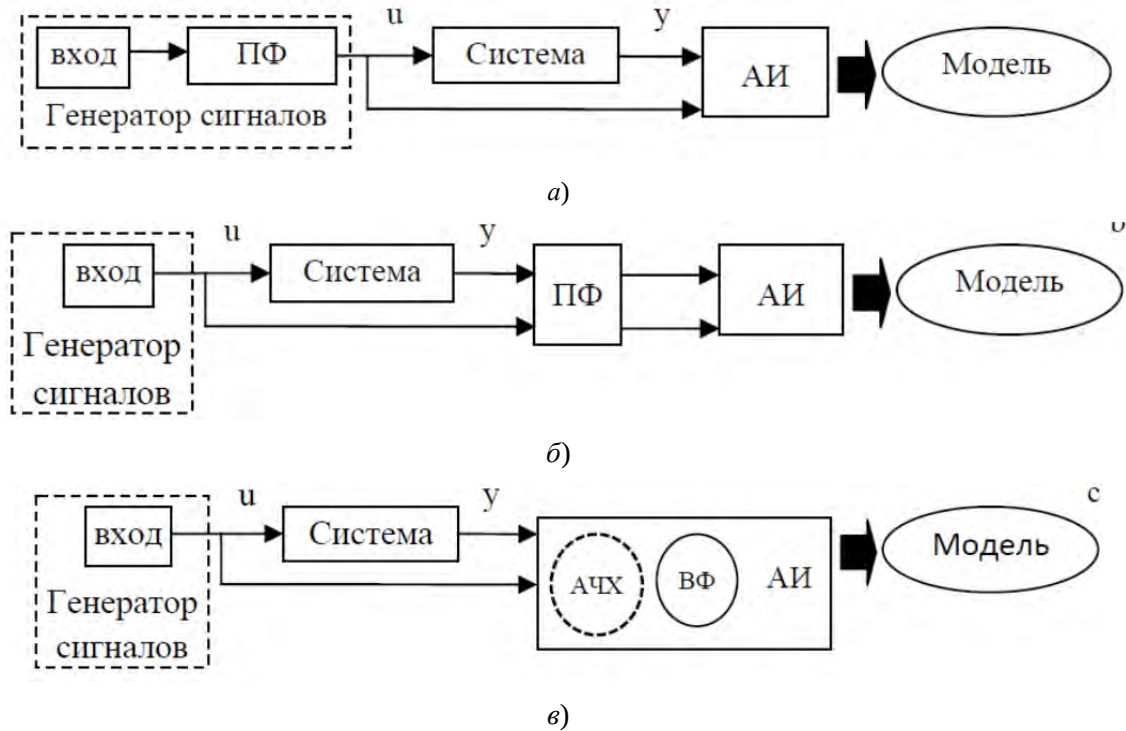


Рис. 3. Основные принципы алгоритмов:

а, б – классические методы идентификации в частотной области;

в – модификация идентификации; ПФ – преобразование Фурье;

АИ – алгоритм идентификации; АЧХ – анализ частотных характеристик; ВФ – вейвлет-фильтр

Напряжение измеряется каждый момент времени и может быть сглажено с увеличением интервала измерений. Представим измеряемое напряжение в виде

$$U(t) = U_i, \text{ где } t \in [i, i+1], i \in Z. \quad (1)$$

Сглаживание $U(t)$ непрерывно и соответствует дискретным наборам U_i , измеренным с интервалом $1/\omega c$, в этом случае вейвлет-образ $U(t)$ имеет вид

$$W_U(a, b) = U(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

или, переходя к интегрируемым в пространстве $\mathbb{R}$ функциям:

$$W_U(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_0^t U(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (3)$$

Коэффициенты a и b в (2) и (3) определяют масштабирование по времени и деформацию вейвлет-производящей функции ψ . Учитывая (1), уравнение (3) примет вид

$$W_U(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \sum_{i=0}^{N-1} U_i \int_0^t \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (4)$$

При этом a изменяется от 1 до N , b от 0 до $N-1$. Таким образом, сигналу U_i с количеством отсчетов N ставится в соответствие матрица размерностью $N \times N$ [6].

Массив вейвлет-преобразования $W_U(a, b)$ вычисляется при вариации коэффициентов a и b по измеренным значениям $U(t)$ при условии $a \neq 0$. Для сигналов конечной длины выражение (4) представляет собой конечную сумму, вычисляемую в масштабе реального времени процесса измерения.

Наиболее подходящими базовыми вейвлет-функциями являются начальные производные функции Гаусса. Применение гауссовой функции для спектрального преобразования позволяет построить вейвлет-базис следующего аналитического вида:

$$\psi_n(t) = (-1)^{n+1} \partial_t^n e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (5)$$

Первые четыре функции, образующие базис, определяются операцией дифференцирования уравнения (5):

- исходная функция: $\psi_0(t) = e^{-t^2}$;
- первая производная: $\psi_1(t) = -te^{-t^2}$;
- вторая производная: $\psi_2(t) = (1-t^2)e^{-t^2}$;
- третья производная: $\psi_3(t) = (t-t^3)e^{-t^2}$;
- четвертая производная: $\psi_4(t) = (1+t^2-t^4)e^{-t^2}$.

То есть производные вейвлет-образующей функции гауссовой формы можно представить как произведение полиномов Лежандра и экспоненты квадрата зависимой переменной в квадрате, взятой со знаком минус:

$$\psi_n(t) = (-1)^n L_n(t) e^{-t^2}. \quad (6)$$

На рис. 4 приведены графики вейвлет-образующей функции и первых ее производных, образующих вейвлет-базис.

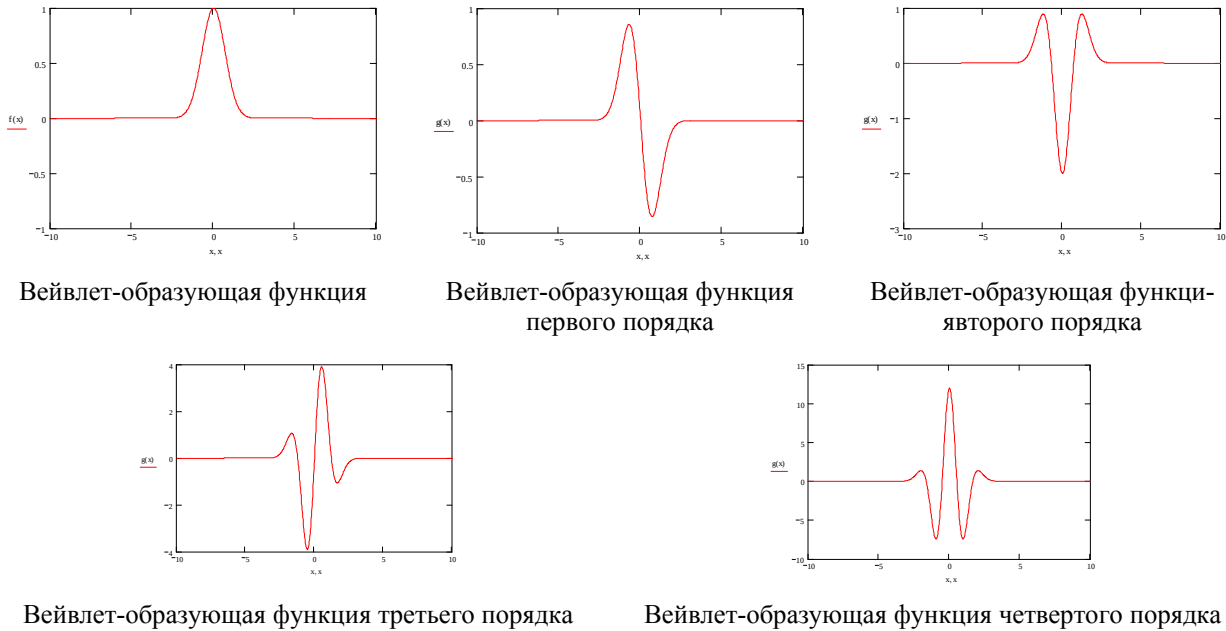


Рис. 4. Функции, образующие базис и соответствующие основным свойствам вейвлетов

Для данных вейвлетов характерно свойство, имеющее практическое значение: при построении вейвлет-преобразования, проведенного по результатам эксперимента, можно использовать один и тот же коэффициент сжатия/растяжения для всех вейвлетов порядка n .

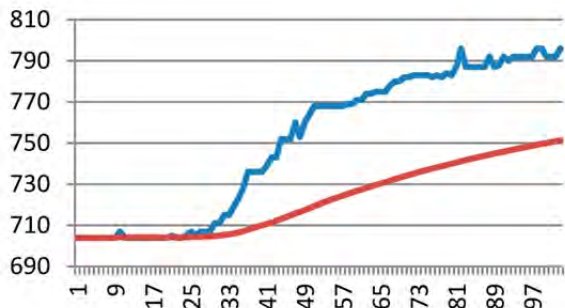
Следует отметить, что дифференцирование вейвлета часто оказывается более простой операцией, чем дифференцирование самой анализируемой функции, которая может иметь разрывы и искажаться случайными внешними воздействиями. В этом случае вейвлет-преобразование от производной исходной функции можно представить как

$$W_{\psi n} \varphi = W_{\psi n} D_k f = W_{n+k} f. \quad (7)$$

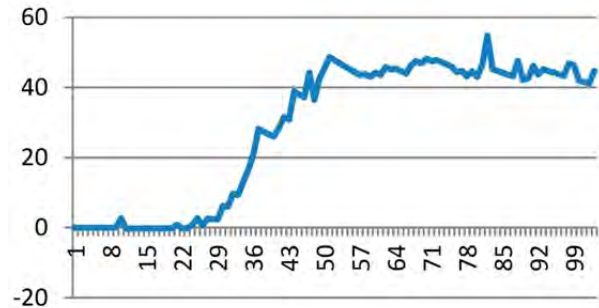
На примере обнаружения паров несимметричного диметилгидразина, являющегося активным восстановителем, рассмотрим алгоритм проведения вейвлет-преобразования для повышения достоверности идентификации вещества [5].

Перед преобразованием проведены предварительные операция сглаживания и нормировки исходного сигнала.

На рис. 5 показаны исходный, сглаженный и нормированный сигналы.



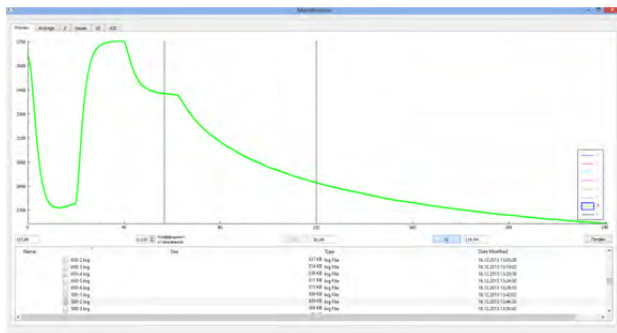
Исходный и сглаженный сигнал $U(t)$



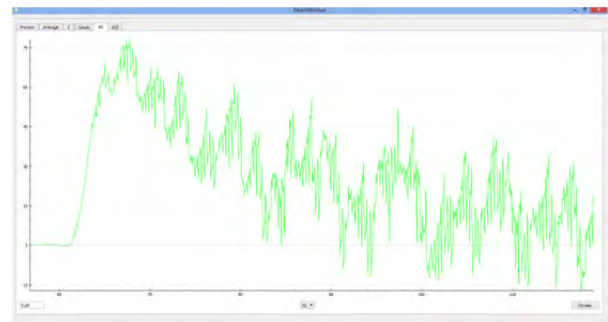
Сглаженный и нормированный сигнал $U(t)$

Рис. 5. Первичная обработка сигнала: сглаживание и нормировка

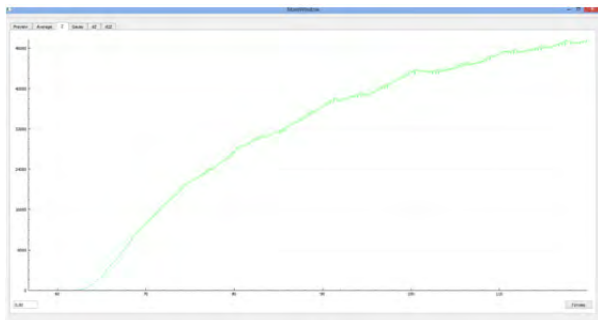
Приведем пример вычисления WWT-преобразования паров НДМГ. Исходный сигнал сглаживается по экспоненте (рис. 6).



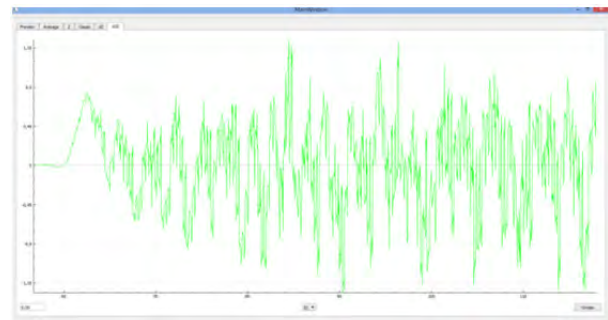
Исходный сигнал



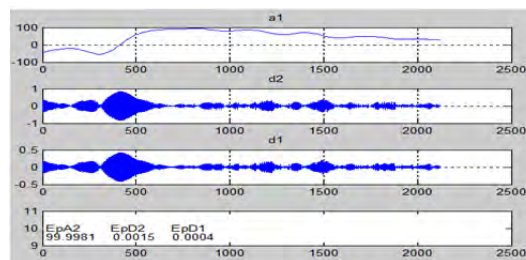
dZ/dt



Z-образ



$d2Z/dt$



WWT-преобразование

Рис. 6. Этапы проведения WWT для паров НДМГ

Затем рассчитывается Z-образ как мгновенная дисперсия. Следующий шаг – расчет производной первого и второго порядка. После проведения самоподобных преобразований, проводится операция WWT. Отметим, что все операции осуществляются в режиме реального времени [4, 6].

Вейвлет-базисы локализованы как по частоте, так и по времени. При выделении в исходных сигналах локализованных разномасштабных процессов можно выделить только те масштабные уровни разложения, которые соответствуют веществу-аналиту. Сечение WWT-образа, определенного временем процесса, частотой и амплитудой, приведено на рис. 7.

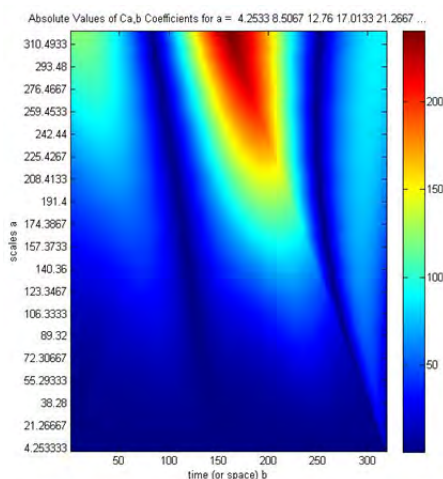


Рис. 7. Пространственно-частотная локализация в вейвлет-базисе для НДМГ

Выбор конкретного вида и типа вейвлетов во многом зависит от анализируемых сигналов и задач анализа. Для получения оптимальных алгоритмов преобразования разработаны определенные критерии, но их еще нельзя считать окончательными, так как они являются внутренними по отношению к самим алгоритмам преобразования и, как правило, не учитывают внешних критериев, связанных с сигналами и целями их преобразований.

Отсюда следует, что при практическом использовании вейвлет-функций необходимо уделять достаточное внимание проверке их работоспособности и эффективности для поставленных целей по сравнению с известными методами обработки и анализа [6].

С помощью вейвлет-базиса получены вейвлет-разложения для паров НДМГ и АТ, измеренных газочувствительными сенсорами в сложной паровоздушной смеси. На рис. 8 показан WWT-образ для НДМГ, на рис. 9 – для АТ. Концентрации примеси гептила и амила составляют 0,5 и 2,5 мг/м³ соответственно [6].

На рисунках видно, WWT-образ, полученный в режиме реального времени, позволяет однозначно идентифицировать вещества-аналиты – НДМГ и АТ. Следует отметить, что с учетом реакции топлива и окислителя, компоненты идентифицируются с высокой достоверностью. Видно, что для повышения селективности при обнаружении пары НДМГ-АТ достаточно применения базиса, состоящего из первой и второй производной Z-функции (дисперсии), рассчитанной по измеренному потенциалу – напряжению в каждом канале аналитической системы, состоящей из четырех сенсоров.

Модель обработки результатов измерений, построенная на основе вейвлет-преобразований, позволяет, не повышая времени принятия решения, идентифицировать многокомпонентные парогазовые смеси, рассчитывать концентрации компонент как интегральные суммы WWT-разложения по первой и второй производной [7]. Так как модель является эмпирической в силу формирования базиса по измерениям «чистых» веществ, то массив проб, необходимых для градуировки, снижается, что значительно повышает ценность применения эмпирического моделирования.

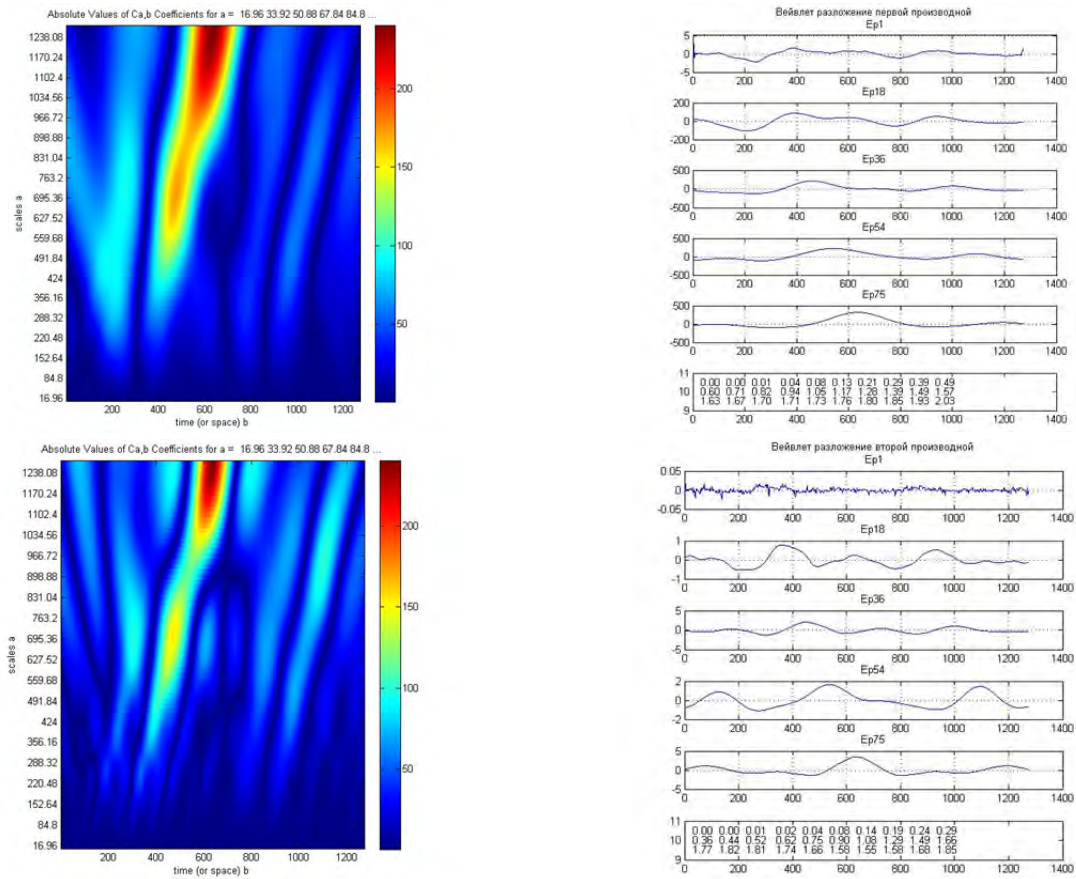


Рис. 8. WWT-преобразование по первой и второй производной паров НДМГ

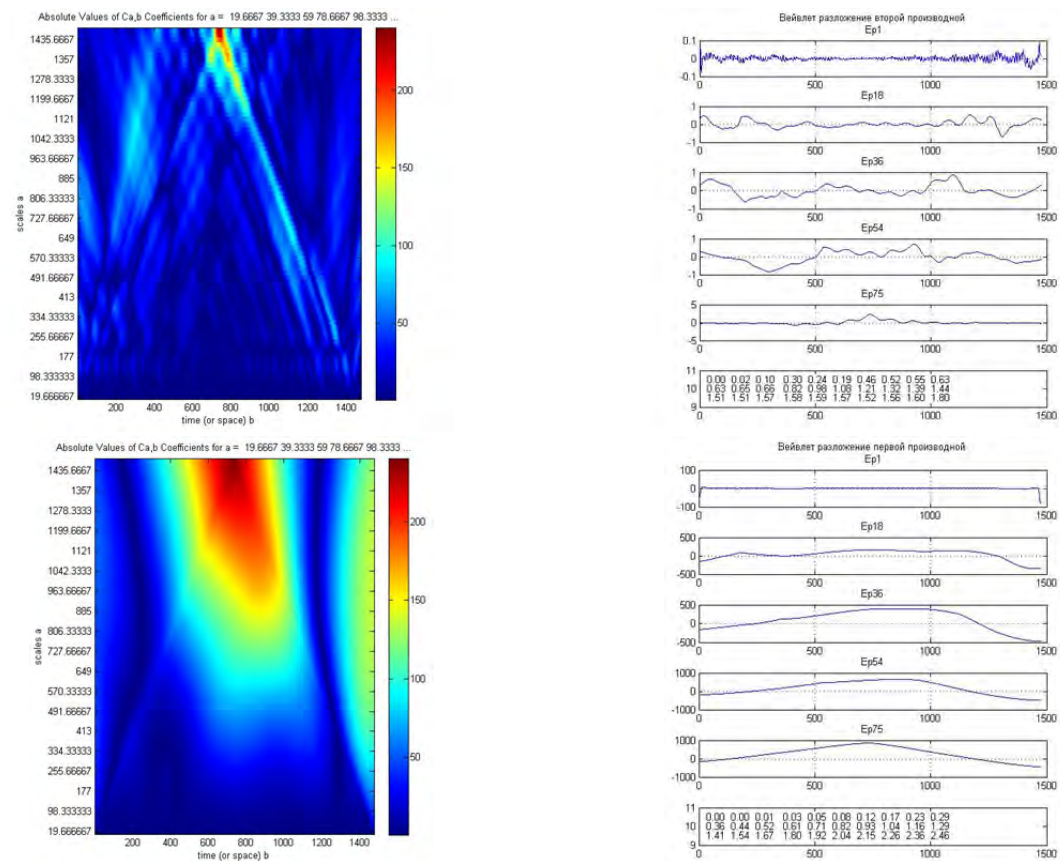


Рис. 9. WWT-преобразование по первой и второй производной паров АТ

Библиографический список

1. Налимова, С. В. Анализ газочувствительных наноструктур с варьируемым типом и концентрацией адсорбционных центров : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Налимова С. В. ; Санкт-Петербургский государственный электротехнический ун-т. – СПб., 2013. – 22 с.
2. Odor identification using SnCVbased sensor array / T. Maekawa, K. Suzuki, T. Takada, T. Kabayushi, M. Egashira // Sensors and Actuators. – 2001. – Vol. 80. – P. 51–58.
3. Мясников, И. А. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях / И. А. Мясников, В. Я. Сухарев, Л. Ю. Куприянов. – М. : Наука, 1991. – 327 с.
4. Методы определения компонентов ракетных топлив и их производных в объектах производственной и окружающей среды : метод. пособие / под ред. Л. М. Разбитной. – М. : Ин-т Биофизики, 1988. – С. 68–70.
5. Тулупов, П. Е. Кинетика превращения несимметричного диметилгидразина в гелево-кислородной газовой фазе / П. Е. Тулупов, С. В. Колесников // Труды IV Всесоюз. совещания Загрязнение атмосферы и почвы : сб. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – С. 102–108.
6. Мисийчук Ю. И., Терещенко Г. Ф., Лебедев Г. П. и др. // Экологические аспекты применения диметилгидразина // Экологическая химия. – 1998. – № 7 (1). – С. 42–47.
7. Вейвлет-преобразования в пакете Матлаб. – URL: <https://www.exponenta.ru>

Белозерцев Александр Иванович

первый заместитель генерального директора,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Эль-Салим Суад Зухер

доктор физико-математических наук, профессор,
генеральный директор
ООО «Омега»
(199048, Россия, г. Санкт-Петербург,
наб. реки Смоленки, 19-21, лит. В)
E-mail: suad-olka@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается эмпирическая модель идентификации вещества при анализе многокомпонентных парогазовых смесей. Приводится анализ измеримых множеств и самоподобные преобразования первичных массивов данных. Показана возможность проведения вейвлет-преобразований в базисе, построенном на основе первичных и преобразованных функций, полученных при измерениях «чистых» веществ.

Ключевые слова: вейвлет, дисперсия, газочувствительный слой, мультисенсорная система, вейвлет-преобразования, селективность.

Belozertsev Aleksandr Ivanovich

first deputy general director,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Al-Salim Suad Zuher

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
director general,
Ltd "Omega"
(199048, lit. In, 19-21 embankment
of the Smolenka river, Saint-Petersburg, Russia)

Abstract. In work the empirical model of identification of substances is considered in the analysis of multicomponent steam-gas mixes. The analysis of measurable sets and self-similar transformations of the processed data arrays is provided. The possibility of carrying out wavelet-transformations in basis, constructed on the basis of primary and transformed functions received at measurements of «pure» substances is shown.

Key words: wavelet, dispersion, a gas-sensitive layer, multitouch system, wavelet-transformations, selectivity.

УДК 543.5;543.26

Белозерцев, А. И.

Эмпирическая модель идентификации вещества многокомпонентных парогазовых смесей / А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 10–17. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-2.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Д. В. Артамонов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков

Введение

Большинство блоков радиоэлектронных средств (РЭС) представляет собой гетерогенные структуры, подверженные действию динамических нагрузок в эксплуатационных режимах их использования. Анализ работоспособности блоков РЭС показывает, что до 50 % их отказов в эксплуатации связано с действием вибрационных и ударных нагрузок.

Наиболее подвержены механическим ударам полупроводниковые приборы. Ударное ускорение возбуждает упругие колебания, которые могут приводить к обрыву контактов, к механическому и тепловому разрушению полупроводниковой структуры приборов. Упругие механические колебания изменяют электрические параметры полупроводниковой структуры, а это может привести к паразитной параметрической генерации, которая оказывает негативное воздействие на полупроводниковые приборы вплоть до выхода их из строя. Для защиты приборов и их блоков от действия динамических нагрузок часто применяют их заливку компаундами, что существенно усложняет их производство и делает эти блоки неремонтопригодными.

В связи с этим весьма актуальным является разработка моделей и методик, позволяющих проводить математическое моделирование динамического состояния блоков РЭС, представляющих собой гетерогенную структуру, и на ранних стадиях проектирования принимать конструкторско-технологические решения по созданию вибро- и удароустойчивых конструкций.

Математическая модель исследования динамического процесса

Рассмотрим электронный блок, показанный на рис. 1. Блок установлен в жесткий металлический корпус и подвергается воздействию удара по продольной оси x .

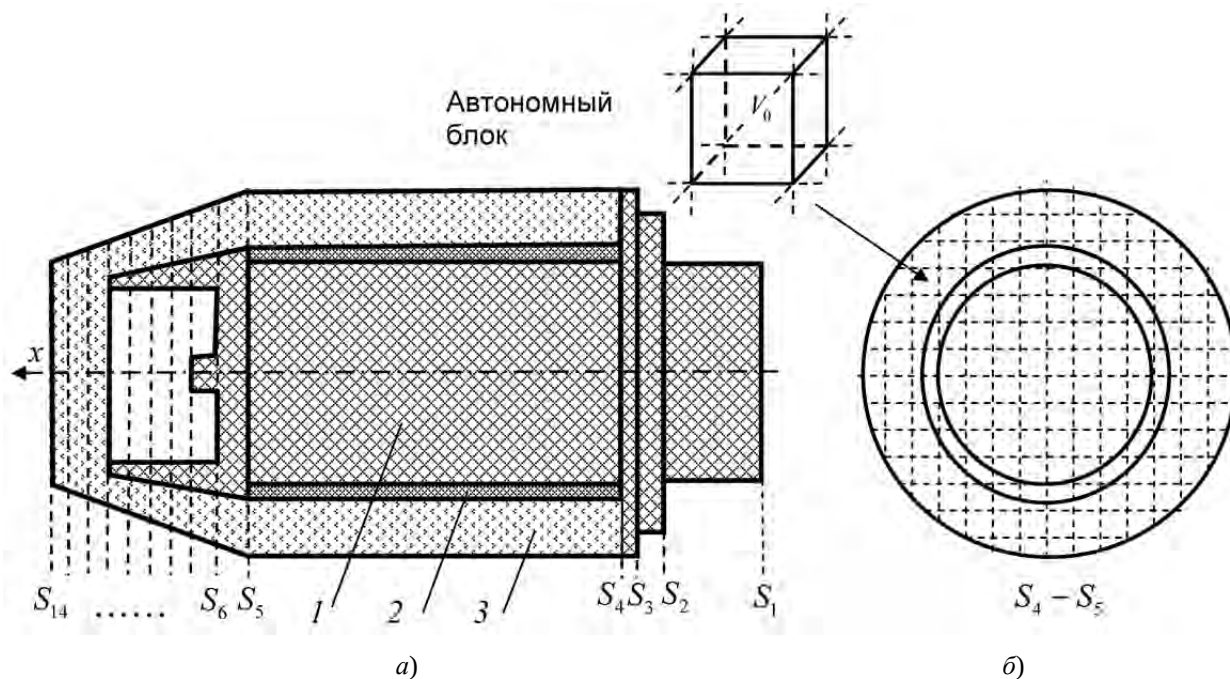


Рис. 1. Декомпозиция электронного блока:
а – разбиение на цилиндрические области; б – разбиение на автономные блоки;
1 – термопласт; 2 – стеклотекстолитовая плата; 3 – заливка

Математическое моделирование динамического процесса, происходящего в электронном блоке при ударном воздействии, выполняется методом автономных блоков, который является декомпозиционным [1, 2]. Область электронного блока расчленяем условными границами на подобласти в виде прямоугольных параллелепипедов, которые рассматриваем как автономные блоки – волноводные трансформаторы с каналами Флоке [3]. Из решения краевой задачи для уравнения динамики деформированного тела [4] определяем математические описания (дескрипторы) для автономного блока в виде матрицы импеданса.

Декомпозиция области электронного блока на автономные блоки в виде прямоугольных параллелепипедов с последующей рекомпозицией является двухуровневой. На первом этапе область электронного блока по длине разбивается условными сечениями $S_1, S_2, \dots$ (рис. 1,а) на цилиндрические области, на втором этапе цилиндрические области разбиваются на автономные блоки в виде прямоугольных параллелепипедов (рис. 1,б). При рекомпозиции на первом этапе объединяются дескрипторы автономных блоков цилиндрических областей, на втором этапе дескрипторы цилиндрических областей.

Дескриптор автономного блока в виде матрицы импеданса получен следующим образом. В объеме автономного блока V_0 (см. рис. 1,б) волновой процесс удовлетворяет уравнению динамики деформированного тела в линейном приближении для гармонических колебаний [4]:

$$c_l^2 \Delta \vec{u} + \omega^2 \vec{u} + (c_l^2 - c_\tau^2) \text{grad div} \vec{u} = 0, \quad (1)$$

где ω – частота; $\vec{u}$ – вектор перемещения частиц; c_l, c_τ – фазовые скорости распространения продольной и поперечной волн. На поверхностях граней волновой процесс удовлетворяет условиям неасимптотического излучения, а поле на гранях представляется рядами Фурье [3].

Скорости распространения продольных и поперечных упругих волн определяются как $c_l = \sqrt{E/\rho}, c_\tau = \sqrt{E/\rho}$. Здесь G – модуль сдвига, E – модуль Юнга для материала автономного блока. Затухание упругих волн учитывается путем введения комплексного модуля Юнга (для продольных волн) и комплексного модуля сдвига (для поперечных волн):

$$\dot{E} = E \left(1 + i \frac{2\alpha_l c_l}{\omega} \right), \quad \dot{G} = G \left(1 + i \frac{2\alpha_\tau c_\tau}{\omega} \right), \quad (2)$$

где α_l, α_τ – коэффициенты поглощения продольных и сдвиговых упругих волн, $\omega = 2\pi f$, частота f в Гц.

Используя формулы векторного анализа, преобразуем (1) к виду, удобному для решения краевой задачи проекционным методом:

$$\begin{cases} \text{div} \vec{v} = -\frac{i\omega p}{c_l^2 \rho_0}, \quad \text{grad } p = \vec{H}; \\ \text{rot } \vec{E} = \frac{i\omega \rho_0}{c_\tau^2} \vec{v} + \frac{1}{c_\tau^2} \vec{H}, \quad \text{rot} \vec{v} = -\frac{i\omega}{\rho_0} \vec{E}, \end{cases} \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность среды; p – давление; $\vec{v}$ – скорость частиц среды; $\vec{E}, \vec{H}$ – введенные векторные функции [3].

Используя две вспомогательные задачи на собственные значения для определения вихревой и потенциальной подсистем и формулу Остроградского – Гаусса, получаем интегральную потенциальную форму

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^6 \int_{S_\beta} p_k^* \vec{v}_\beta^z d\vec{S}_\beta + \int_{S_v} p_k^* \vec{v}_v^z d\vec{S}_v = -i\omega \frac{1}{c_l^2 \rho_0} \int_{V_0} p p_k^* dV - i \frac{\omega_k}{c_l} \int_{V_0} \vec{v} \vec{v}_k^* dV; \\ \sum_{\beta=1}^6 \int_{S_\beta} p_\beta \vec{v}_k^* d\vec{S}_\beta = -i \frac{\omega_k}{c_l} \int_{V_0} p p_k^* dV + \int_{V_0} \vec{H} \vec{v}_k^* dV; \\ \sum_{\beta=1}^6 \int_{S_\beta} (\vec{E}_\beta^\tau \times \vec{v}_l^*) d\vec{S}_\beta = i\omega \frac{\rho_0}{c_\tau^2} \int_{V_0} \vec{v} \vec{v}_l^* dV + \frac{1}{c_\tau^2} \int_{V_0} \vec{H} \vec{v}_l^* dV - i\omega_l \int_{V_0} \vec{E} \vec{E}_l^* dV; \\ \sum_{\beta=1}^6 \int_{S_\beta} (\vec{v}_\beta^\tau \times \vec{E}_l^*) d\vec{S}_\beta = - \int_{V_0} \vec{E} \vec{E}_l^* dV - i \frac{\omega_l}{c_\tau^2} \int_{V_0} \vec{v} \vec{v}_l^* dV, \end{cases} \quad (4)$$

где p_β – давление на поверхностях граней параллелепипеда $S_\beta (\beta=1,2,...,6)$; $\vec{v}_\beta^z$ – нормальные составляющие вектора скорости $\vec{v}$ на поверхностях граней параллелепипеда S_β ; $\vec{v}_\beta^\tau, \vec{E}_\beta^\tau$ – касательные составляющие векторов $\vec{v}, \vec{E}$ на поверхностях граней параллелепипеда S_β ; $\{p_k\}, \{\vec{v}_k\}$ – потенциальная подсистема функций; $\{\vec{E}_l\}, \{\vec{v}_l\}$ – вихревая подсистема функций.

Из проекционной интегральной формы (4) методом Галеркина получена система линейных алгебраических уравнений вида

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R}^{11} & \mathbf{0} & \mathbf{R}^{13} & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}^{21} & \mathbf{R}^{22} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}^{32} & \mathbf{R}^{33} & \mathbf{R}^{34} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}^{43} & \mathbf{R}^{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{c}^p \\ \mathbf{c}^H \\ \mathbf{d}^v \\ \mathbf{d}^E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}^{11} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}^{22} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{W}^{33} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{W}^{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{a}^z \\ \mathbf{a}^\tau \\ \mathbf{b}^z \\ \mathbf{b}^\tau \end{pmatrix} \quad (5)$$

В системе алгебраических уравнений (4) $\mathbf{R}^{11}, \mathbf{R}^{13}, \mathbf{R}^{21}, \mathbf{R}^{22}, \mathbf{R}^{32}, \mathbf{R}^{33}, \mathbf{R}^{34}, \mathbf{R}^{43}, \mathbf{R}^{44}, \mathbf{W}^{11}, \mathbf{W}^{22}, \mathbf{W}^{33}, \mathbf{W}^{44}$ являются матрицами с элементами:

$$R_{kn}^{11} = -\frac{i\omega}{c_l^2 \rho_0} \int_{V_0} p_n p_k^* dV; R_{kn}^{13} = -\frac{i\omega_k}{c_l} \int_{V_0} \vec{v}_n \cdot \vec{v}_k^* dV; R_{kn}^{21} = -\frac{i\omega_k}{c_l} \int_{V_0} p_n p_k^* dV;$$

$$R_{kn}^{22} = \int_{V_0} \vec{v}_n \cdot \vec{v}_k^* dV; R_{ln}^{32} = \frac{1}{c_\tau^2} \int_{V_0} \vec{v}_n \cdot \vec{v}_l^* dV; R_{ln}^{33} = \frac{i\omega \rho_0}{c_\tau^2} \int_{V_0} \vec{v}_n \cdot \vec{v}_l^* dV;$$

$$R_{ln}^{34} = -i\omega_l \int_{V_0} \vec{E}_n \cdot \vec{E}_l^* dV; R_{ln}^{43} = -\frac{i\omega_l}{c_\tau^2} \int_{V_0} \vec{v}_n \cdot \vec{v}_l^* dV; R_{ln}^{44} = -\int_{V_0} \vec{E}_n \cdot \vec{E}_l^* dV;$$

$$W_{kn(\beta)}^{11} = \int_{S_\beta} e_{n(\beta)}^z p_k^* dS_\beta; W_{ln(\beta)}^{22} = \int_{S_\beta} (\vec{e}_{n(\beta)}^\tau \times \vec{E}_l^*) \cdot d\vec{S}_\beta; W_{kn(\beta)}^{33} = \int_{S_\beta} h_{n(\beta)}^z \vec{v}_k^* \cdot d\vec{S}_\beta; W_{ln(\beta)}^{44} = \int_{S_\beta} (\vec{h}_{n(\beta)}^\tau \times \vec{v}_l^*) \cdot d\vec{S}_\beta.$$

Из системы уравнений (5) исключаем векторы $\mathbf{c}^p, \mathbf{c}^H, \mathbf{d}^v, \mathbf{d}^E$ и преобразуем к ее виду:

$$\mathbf{b} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a}, \text{ где } \mathbf{a} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}^z \\ \mathbf{a}^\tau \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}^z \\ \mathbf{b}^\tau \end{pmatrix}, \mathbf{Z} - \text{матрица импеданса, связывающая представление в виде ко-}$$

эффициентов Фурье скорости частиц с давлением. Реконпозиция дескрипторов автономных блоков в виде матриц импеданса сводится к линейным операциям с матрицами.

Собственные упругие колебания электронного блока определяются методом автономных блоков следующим образом. На внешнюю поверхность блока накладываются краевые условия $\vec{v}_\tau = \vec{v}_l = 0$ (касательная и нормальная составляющие частиц скорости на поверхности автодина равны нулю), так как на электронный блок установлен жесткий стальной корпус, модуль упругости которого на три порядка выше модуля упругости для материала компаунда заливки блока.

Реконпозиция дескрипторов автономных блоков сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Определение собственных частот продольных колебаний гетерогенной структуры электронного блока сводится к решению характеристического уравнения, которое следует из условия существования нетривиального решения полученной системы однородных уравнений.

1. Численное моделирование динамического состояния электронного блока

При численном моделировании динамического состояния электронного блока при продольном ударе рассматривались материалы, физико-механические характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материалов

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Модуль Юнга, E , МПа
Термопласт	957 кг/м ³	1170 МПа
Стеклотекстолит	1700 кг/м ³	350 МПа
Полиуретан	1260 кг/м ³	40 МПа

В математической модели электронного блока используем автономные блоки в виде прямоугольных параллелепипедов. Модель является ступенчатой. При увеличении количества автономных блоков ступенчатая модель стремится к плавному аналогу. Оптимальное количество автономных блоков при аппроксимации цилиндрических поверхностей определялось из численного эксперимента определения основной (нижней) собственной частоты f_0 продольных колебаний. Зависимость погрешности δ вычисления f_0 от числа автономных блоков N показана на рис. 2. По результатам исследования при электронном блоке количество автономных блоков принято равным 25×25 , что соответствует погрешности вычислений не более 0,13 % (см. рис. 2).

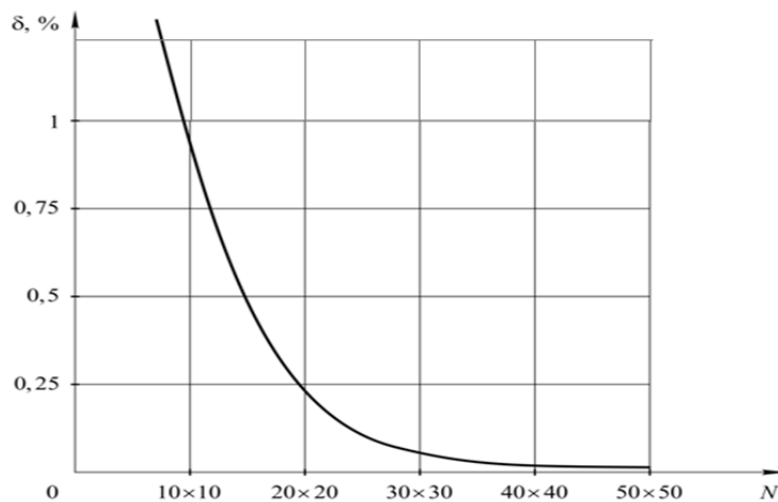


Рис. 2. Зависимость погрешности от числа автономных блоков

На рис. 3 приведены формы действующих ударных ускорений различной длительности Δt при амплитуде ускорения $a = 1,5 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

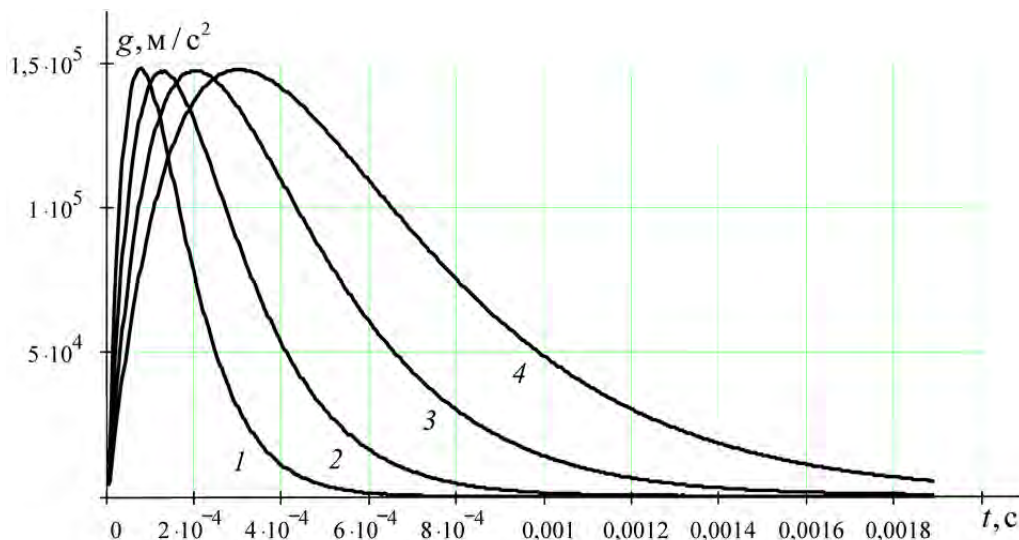


Рис. 3. Ударное ускорение: кривая 1 – $\Delta t = 0,2 \text{ мс}$; 2 – $\Delta t = 0,3 \text{ мс}$; 3 – $\Delta t = 0,5 \text{ мс}$; 4 – $\Delta t = 0,8 \text{ мс}$

На рис. 4 приведены кривые спектральной плотности зависимостей ударного ускорения от времени в логарифмическом масштабе и дискретный спектр собственных частот продольных колебаний электронного блока. Наименьшая собственная частота (основной тон) равна $f_0 = 6997$ Гц. Здесь $S(f)$ – спектральная плотность ускорения на частоте f ; $S(0)$ – спектральная плотность в момент времени $\tau = 0$. Расчет выполнен для материалов, приведенных в табл. 1.

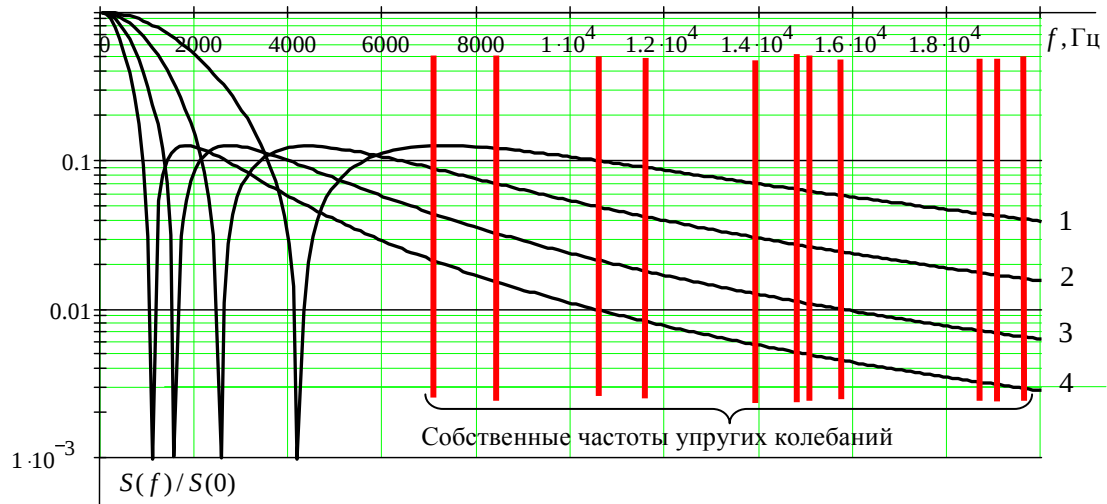


Рис. 4. Спектральная плотность ударного ускорения и спектр собственных частот: 1 – $\Delta\tau = 0,2$ мс; 2 – $\Delta\tau = 0,3$ мс; 3 – $\Delta\tau = 0,5$ мс; 4 – $\Delta\tau = 0,8$ мс; заливка-полиуретан

Амплитуды вынужденных колебаний зависят от спектральной плотности кривых ударного возбуждения. С уменьшением спектральной плотности амплитуды вынужденных колебаний уменьшаются. Наибольшую амплитуду имеет колебание, которое соответствует основной собственной частоте $f_0 = 6967$ Гц. Амплитуда вынужденного колебания для основного тона зависит от длительности ударного ускорения $\Delta\tau$. Для коротких импульсов амплитуда колебаний наибольшая, для длинных импульсов – наименьшая.

На рис. 5 представлены результаты динамических расчетов при использовании для заливки мягкого материала «Виксинт» с модулем упругости $E = 13$ МПа. На рис. 6 представлены результаты численного анализа значений для основных собственных частот f_0 продольных колебаний при применении для заливки материалов различной жесткости с модулями E .

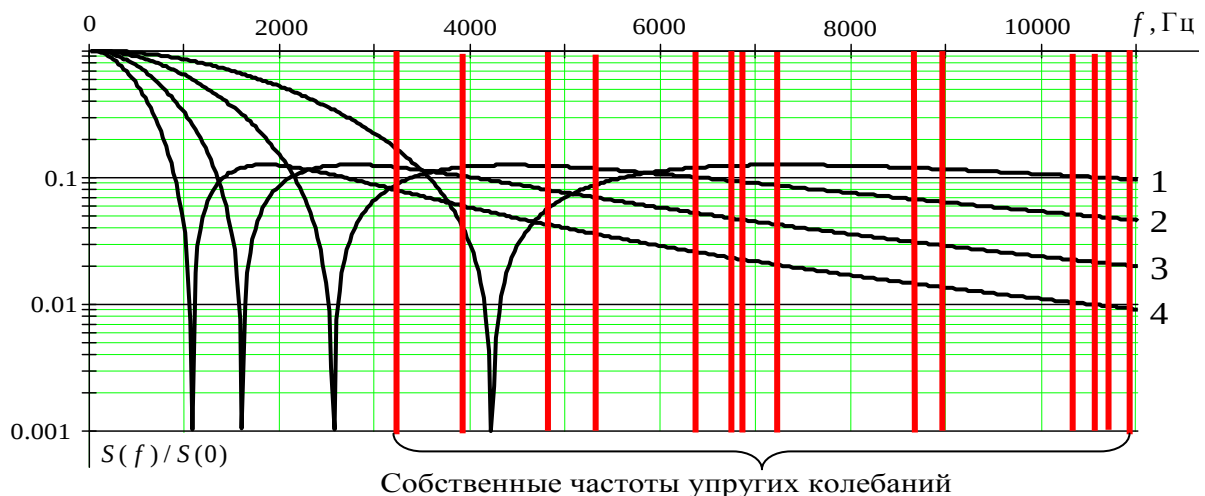


Рис. 5. Спектральная плотность кривых ударного ускорения и спектр собственных частот: 1 – $\Delta\tau = 0,2$ мс; 2 – $\Delta\tau = 0,3$ мс; 3 – $\Delta\tau = 0,5$ мс; 4 – $\Delta\tau = 0,8$ мс; заливка – «Виксинт»

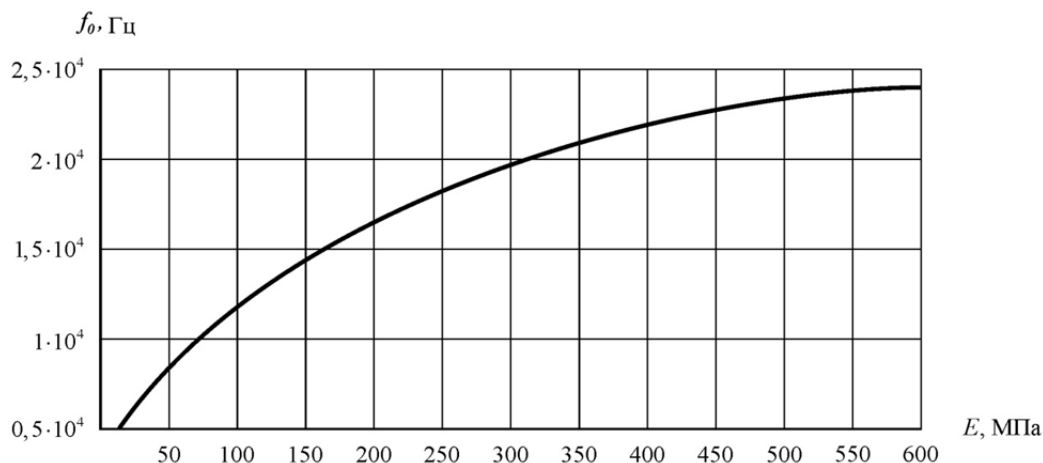


Рис. 6. Зависимость собственной частоты основного тона от модуля E материала заливки

Собственные частоты продольных колебаний зависят от упругих свойств материалов, которые используются в конструкции электронного блока. С увеличением модуля Юнга материала заливки собственная частота увеличивается, следовательно, будет уменьшаться амплитуда вынужденного колебания, так как спектральная плотность ударного ускорения с увеличением частоты уменьшается. Это можно использовать для повышения безотказности электронного блока при условии, что коэффициент поглощения заливки уменьшается незначительно с увеличением модуля Юнга. При малых значениях модуля Юнга и большом коэффициенте поглощения амплитуда колебаний значительная, но колебания быстро затухают. При больших значениях модуля Юнга и малом коэффициенте поглощения амплитуда колебаний небольшая, но колебания в течение более длительного времени воздействуют на ЭРИ, установленные на плате электронного блока.

Выводы

Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что при увеличении жесткости заливочного материала электронного блока количество собственных частот продольных колебаний в заданном частотном диапазоне внешних возмущений уменьшается. Вывод собственных частот из эксплуатационного частотного диапазона способствует повышению вибро- и ударостойкости электронного блока и, как следствие, надежности изделия в целом. Здесь следует иметь в виду, что применение более жестких компаундов для заливки приводит к росту внутренних технологических и остаточных напряжений при полимеризации компаунда в процессе заливки блока. Это в свою очередь может повлиять на надежность ЭРИ, расположенных в электронном блоке [5–7].

Разработанная математическая модель и программный комплекс позволяют на этапе проектирования моделировать динамическое состояние гетерогенной структуры электронного блока при заданном эксплуатационном воздействии и выбирать оптимальный вариант заливочного компаунда.

Библиографический список

1. Артамонов, Д. В. Модели волновой динамики многослойных гетерогенных структур / Д. В. Артамонов, О. А. Голованов, В. В. Смогунов, А. А. Туманов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3. – С. 126–133.
2. Волчихин, В. И. Построение математических моделей гетерогенных структур с использованием декомпозиционного подхода / В. И. Волчихин, Д. В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 61–68.
3. Голованов, О. А. Автономные блоки с виртуальными каналами Флоке и их применение для решения прикладных задач электродинамики / О. А. Голованов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 12. – С. 1423–1430.
4. Ландау, Л. Д. Механика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Гос. изд. физ.-мат. литер., 1954. – 417 с.
5. Литвинов, А. Н. Датчик для измерения внутренних напряжений в залитых блоках приборов / А. Н. Литвинов // Новые промышленные технологии. – 2009. – № 6. – С. 18–20.

6. Хади, О. Ш. Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 41–48.
7. Кочегаров, И. И. Особенности исследования динамических характеристик печатных узлов в двухмерных задачах / И. И. Кочегаров, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (14). – С. 13–23.

Артамонов Дмитрий Владимирович

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: politech@pnzgu.ru

Литвинов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной механики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: aleksletvinov@mail.24

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 актуальным является математическое моделирование динамического состояния блоков радиоэлектронных средств (РЭС), представляющих собой гетерогенную структуру, и на ранних стадиях проектирования для обоснованного принятия конструкторско-технологических решений по созданию вибро- и удароустойчивых конструкций. Рассмотрена методика применения автономных блоков для исследования динамических процессов в гетерогенных структурах изделий при ударном воздействии. Создана математическая модель исследования динамического процесса и на ее основе осуществлено численное моделирование динамического состояния электронного блока, проведен анализ спектральной плотности ударного ускорения и спектра собственных частот для различных материалов заливки. В результате этого доказано, что при увеличении жесткости заливочного материала электронного блока количества собственных частот продольных колебаний в заданном частотном диапазоне внешних возмущений уменьшается. Вывод собственных частот из эксплуатационного частотного диапазона способствует повышению вибро- и удароустойчивости электронного блока и, как следствие, надежности изделия в целом.

Ключевые слова: гетерогенная структура, заливка, блок, удар, математическое моделирование, собственные частоты, ускорение.

УДК 531.3:681.2.08

Артамонов, Д. В.

Математическое моделирование динамики гетерогенной структуры электронного блока при ударном воздействии / Д. В. Артамонов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 18–24. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-3.

Artamonov Dmitriy Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
director of Polytechnic Institute,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Litvinov Aleksandr Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of theoretical and applied mechanics,
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 is an actual mathematical modeling of dynamic state blocks of radio electronic facilities (REFS), represent a heterogeneous structure, and in the early stages of design for informed decision design \ u2012 technological solutions for creating vibration-and udaroustojchivyh designs. The method of application of autonomous units for the investigation of dynamic processes in heterogeneous structures with percussive effects. Created a mathematical model of dynamic process of study and numerical simulation of dynamic State implemented the electronic unit, a shock acceleration spectral density analysis and spectrum of natural frequencies for different materials fill. As a result, it has been proven that if you increase the rigidity of the material quantity electronic unit wash of natural frequencies of longitudinal vibrations in a given frequency range external perturbations decreases. Finding your own frequently.

Key words: heterogeneous structure, fill, block, kick, mathematical modeling, natural frequencies, acceleration.

МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

В. В. Смогунов, Н. С. Кузнецов, Н. К. Юрков

Введение

Электроэнергетика – важнейшая часть энергетики, включающая комплекс процессов электрической и тепловой энергии, передачи электроэнергии, управления в электроэнергетике, сбора и потребления электроэнергии, а также экономических отношений объектов собственности.

Электроэнергетика – основа функционирования экономики и жизнеобеспечения земной цивилизации.

Мировое производство электроэнергии в млрд кВт·ч: в 1900 г. – 15, 1950 г. – 950, 2000 г. – 14500, 2015 г. – 25 129. Мировое потребление электроэнергии в 2015 г. составило 19,5 трлн кВт·ч.

Основными потребителями электроэнергии являются: промышленность – 40 %, топливно-энергетический комплекс – 20 %, жилой сектор – 15 %, железнодорожный транспорт – 15 %, потери в сетях – 10 %. По разным территориям эта структура существенно различна.

В глобальном энергетическом балансе нефть – 32 %, уголь – 27,5 %, газ – 23 %, дрова и кизяки – 9 %, ядерная энергия – 7 %, гидро – 2,5 %, жидкое биотопливо – 0,5 %, солнце с ветром – 0,5 %. Топливо для транспорта – 95 %.

Гетероструктура мирового производства электроэнергии: ТЭС на угле – 40 %, ТЭС на мазуте – 7 %, ТЭС на газе – 20 %, ГЭС – 16 %, АЭС – 16 %, прочие – 1 %.

Фундаментальным фактором при этом выборе является гетерогенность социотехнических структур управления, оборудования, используемых материалов, персонала, особенностей территорий и пр.

Следует отметить также важнейшие факторы, определяющие надежность мехатронных гетероструктур энергетики – оборудования, линий передачи энергии, трансформаторов и пр. Это нанонесплошности в гетероструктурах типа субмикротрещин, расслоений и пористости [1–5].

Под мехатронными структурами энергетики имеются в виду составляющие энергетических систем – механические, электротехнические, электронные и гибридного интеллекта. Гибридный интеллект в современном понимании – алгоритмы, программы, компьютеры вкупе с интеллектом человека [1].

Интегральным критерием оценки конкретной технологии производства энергии считается количество полученной энергии в расчете на единицу энергии, затраченной на ее получение. По сравнительной оценке разных технологий наиболее эффективной признается атомная энергетика замкнутого ядерного топливного цикла по значимым тяжелым нуклидам [2]. Однако существуют и другие оценки, например Ж. И. Алферов считает, что существенно более эффективными являются солнечные технологии, получающие все большее распространение в мировой энергетике [3].

Весьма продуктивными признаются технологии эволюционного развития широко применяемых методов и средств энергетики и электроэнергетики в рамках современных тенденций циклической экономики.

В этой связи представляется актуальной для России проблема выработки конкретных управленческих решений для обеспечения выполнения программ модернизации Единой энергетической системы РФ в условиях ускорения исследований, разработок, открытий в социотехносфере.

Как правило, решение подобных мегапроблем строится на основе анализа информации по проблеме, проектированию новых программ и алгоритмов по частным решениям проблемы и синтезу более эффективных гетероструктур [4].

1. Системный анализ информации по динамике гетероструктур электроэнергетики

Динамика гетероструктур в современном понимании – фундаментальная общенаучная дисциплина, являющаяся базой для исследований во всех сферах человеческой деятельности по изучению окружающей действительности и созданию комфортной среды жизнедеятельности [5].

Динамика – учение о ресурсах и производимых ими эволюционных изменениях, включая обобщенную эволюцию в многомерном пространстве состояний от зарождения до гибели структур. Под эволюцией понимается закономерное изменение материальных и иных ресурсов.

Гетерогенный – принадлежащий другому виду, неоднородный, составленный из разных элементов.

Структура – совокупность устойчивых связей и отношений объекта, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе.

Гетероструктуры электроэнергетики – совокупность производств электроэнергии, линий передач, методов и средств управления и пр.

Совокупность производств электроэнергии представляет собой некоторое множество объектов – электростанций – разное для разных стран.

Ведущую роль в электроэнергетике России играют **тепловые электростанции (ТЭС)**. Они вырабатывают сейчас около 2/3 всей электроэнергии в стране. Наибольшее распространение получили ТЭС с паровыми, газотурбинными и парогазовыми установками.

Тепловые электростанции требуют огромного количества органического топлива (до 5 млрд в год), запасы же его сокращаются, а стоимость постоянно возрастает из-за усложняющихся условий добычи и дальности перевозок. Так, для ТЭЦ, расположенных на европейской части, привозится около 2/3 потребляемого топлива, а транспортировка топлива обходится значительно дороже передачи электроэнергии.

ТЭС строятся с относительно небольшими затратами и быстро как возле месторождения топливных ресурсов, так и возле крупных центров потребления энергии. Но они требуют для своего обслуживания значительного количества персонала, довольно плохо регулируются, в больших масштабах сжигают исчерпаемые и невозобновимые виды минерального топлива – уголь, газ, мазут, торф, сланцы. Коэффициент использования топлива в них довольно низок (не более 40 %), а объемы отходов, загрязняющих окружающую среду, велики. Максимальный экологический вред наносят ТЭС, работающие на высокосольном буром угле, наименьший – работающие на газе.

Различаются ТЭС – конденсационные станции, в них сжигается минеральное топливо, за счет чего в котлах нагревается вода, превращающаяся в пар. Пар проходит через турбины, вырабатывая электроэнергию, а затем он конденсируется и вновь поступает в котел. Самые мощные конденсационные станции называются ГРЭС – государственные районные электростанции. В европейской части России ГРЭС работают в основном на газе и мазуте, а в азиатской – на угле.

Известны ТЭС – теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), вырабатывающие электроэнергию и тепло. За счет этого коэффициент использования топлива выше, строятся они только возле потребителя, так как тепло можно передавать лишь на небольшие расстояния. Самые мощные ТЭЦ в России расположены в Москве и ее окрестностях.

Комплексы тепловых электростанций, работающих на углях одного месторождения, получили название топливно-энергетических комплексов. Экономические, технико-экономические и экологические факторы не позволяют считать тепловые электростанции перспективным способом получения электроэнергии.

Гидроэнергетические станции (ГЭС) являются самыми экономичными. Их к.п.д. достигает 93 %, а стоимость одного кВт·ч в 5–6 раз дешевле, чем при других способах получения электроэнергии. Они используют бесплатный источник энергии, обслуживаются минимальным количеством работников, хорошо регулируются. По величине и мощности отдельных гидроэлектростанций и агрегатов наша страна занимает ведущее положение в мире.

Но ГЭС имеют и ряд недостатков: значительные затраты и сроки строительства, обусловленные удаленностью мест строительства ГЭС от крупных городов, отсутствие дорог, трудные условия строительства, мощные ГЭС могут быть построены только в местах наличия соответствующих ресурсов.

Известны приливные электростанции, использующие энергию приливов и отливов морей и океанов (ПЭС); гидроаккумулирующие станции (ГАЭС), способные накапливать энергию искусственных морей и озер.

Говоря о преимуществе ГЭС, не следует забывать о том, что она находится в сложном взаимодействии с другими потребителями и пользователями воды: водным транспортом, ирригацией, водоснабжением, рыбным хозяйством. Возникает много экологических вопросов.

Атомные электростанции (АЭС) работают по одному принципу с тепловыми электростанциями, т.е. происходит преобразование тепловой энергии пара в механическую энергию вращения вала турбины, которая приводит в действие генератор, где механически энергия преобразовывается в электрическую. АЭС вырабатывают 16 % электроэнергии в стране. Главное достоинство АЭС – небольшое количество используемого топлива (1 кг обогащенного урана заменяет 2,5 тыс. т угля), вследствие чего АЭС могут быть построены в любых энергодефицитных районах. К тому же запасы урана на Земле превышают запасы традиционного минерального топлива, а при безаварийной работе АЭС незначительно воздействуют на окружающую среду.

Главным недостатком АЭС является возможность аварий с катастрофическими последствиями, для предотвращения которых требуются серьезные меры безопасности. Кроме того, АЭС плохо регулируются (для их полной остановки или включения требуется несколько недель), не разработаны технологии переработки радиоактивных отходов.

Атомная энергетика выросла в одну из ведущих отраслей электроэнергетики и продолжает быстро развиваться, обеспечивая безопасность и экологическую чистоту.

Для увеличения надежности поставок электроэнергии большое количество станций и потребителей объединяют в энергосистемы. Системы позволяют также оптимально сочетать электростанции разных типов. АЭС всегда работают на полную мощность, ТЭС работают на полную мощность в зимний период и частично летом, а ГЭС включаются для покрытия суточных пиков нагрузки. Станции почти всей европейской части страны (кроме крайнего северо-востока) и юга азиатской части вплоть до Байкала объединены в Единую энергосистему России. Эта система позволяет также перебрасывать энергию на большие расстояния, используя разницу во времени и в уровне развития электроэнергетики. Из наиболее энергоизбыточного Восточно-Сибирского района энергия передается на Урал в другие западные районы страны. В северных и в восточных регионах России работают изолированные энергосистемы, состоящие преимущественно из ТЭС и сильно зависящие от регулярности поставок топлива.

Солнечные электростанции (СЭС) развиваются в двух направлениях: машинном (генераторном) и безмашинном. При машинном способе получения электроэнергии используется солнечный парогенератор, который через турбину приводит в действие генератор электрического тока, вырабатывающий электроэнергию. Первая электростанция построена на территории Крыма. Ее первая очередь (СЭС-5) мощностью 5 тыс. кВт введена в эксплуатацию. Солнечный парогенератор Крымской СЭС расположен на башне высотой 70 м. На Земле установлены здание электростанции, зеркальные гелиостаты, оборудованные автоматической системой наблюдения за положением Солнца. Солнечные лучи, отраженные от зеркал гелиостатов, концентрируются на парогенераторе и нагревают циркулирующую в нем воду до температуры 250° С при давлении 4 МПа, благодаря чему приводятся в действие турбины, связанные с генератором электрической энергии. На электростанции предусмотрена возможность аккумуляции тепла, что позволяет обеспечивать работу турбины в облачную погоду и ночью. Ежегодная выработка около 6 млн кВт·ч электроэнергии позволяет СЭС-5 сберечь 2 тыс. т условного топлива. Основным недостатком СЭС является их большая стоимость. Особый интерес проявляется к геотермальной энергии, имеющей естественный выход на поверхность земли в виде горячей воды и пара. В нашей стране к числу наиболее перспективных геотермальных районов относятся обширные территории на Камчатке, Сахалине, Северном Кавказе, Закавказье, в Крыму и Курильских островах. На Камчатке действует первая в стране Паужетская парогидротермальная электростанция (ГеоТЭС) мощностью 11 тыс. кВт. После строительства Мутновской ГеоТЭС энергия будет вырабатываться в промышленных масштабах. Проектная мощность этой электростанции 200 тыс. кВт, она крупнейшая в мире среди ГеоТЭС. Обратная закачка геотермальных вод в подземные пласты делает ГеоТЭС экологически безвредной, что имеет большое значение для нормальной жизни многочисленных рек Камчатки, богатых ценными породами рыб.

Запасы ветровой энергии на нашей планете во много раз превышают современную выработку электроэнергии. Определено, что энергию ветра можно широко использовать всюду, где его скорость превышает 3 м/с. У нас в стране к таким районам относятся: Азово-Черноморская зона, побережье Каспийского моря, Нижнее Поволжье, южная часть Западной Сибири, побережье озера Байкал, Приморский край, остров Сахалин, побережье Охотского моря, Камчатка, Курильская гряда, побережье Северного Ледовитого океана, где среднегодовая скорость ветра достигает

5–10 м/с в течение 270–320 сут в год. Для преобразования энергии ветра выпускаются промышленные серии ветроагрегатов: АВЭУ-6 мощностью 4кВт для скоростей ветра 50 м/с, АВЭУ-4 мощностью 1 кВт для умеренных скоростей ветра и АВЭУ-12 мощностью 16кВт для расчетной скорости 10 м/с. Разрабатываются агрегаты с электрическими генераторами переменного тока мощностью 30 и 100 кВт, а также до 30 тыс. кВт с вертикальной осью и лопастями.

Использование научно-технических достижений по целому ряду направлений сдерживается низкой плотностью потоков энергии, снимаемой с единицы поверхности преобразующего оборудования, и невозможностью постоянного использования большинства из них.

Системный анализ информации по динамике мехатронных гетероструктур электроэнергетики позволяет установить новые связи между множеством требований и нарастающей гетерогенностью структур электроэнергетики, в частности существенными флуктуациями потребления и зачастую излишками производства электроэнергии в разных регионах. Установлена такая важнейшая часть системных связей – интеллект человека в энергетической системе. Воздух, вода, еда, одежда, тепло, жилище, освещение достаточны для *homo sapiens*. Для современного биовида *homo intellectus* важны в первую очередь нематериальные ценности.

2. Информационно-вычислительный комплекс «Динамика гетерогенных структур электроэнергетики»

Информационно-вычислительный комплекс «Динамика гетерогенных структур электроэнергетики» (ИВК ДГСЭ) построен на базе алгоритмов и программ анализа больших массивов разнородной информации, в том числе DataMining; включает алгоритмы и программы вычисления динамики и прочности мехатронных гетероструктур, а также нестационарных тепловых полей в гетероструктурах с фазовыми переходами; включает также алгоритмы и программы с гиперграфовыми моделями изменчивости адаптивных систем и визуализации нанонесплошностей [6–8].

В качестве фрагмента ИВК предлагается важная для практики, особенно северных территорий, модель процесса замерзания жидких слоев в многослойной гетероструктуре [9].

Модель процесса замерзания жидкого слоя

Математическое моделирование нестационарных тепловых полей состоит в решении нестационарного уравнения теплопроводности в двумерной области G с соответствующими граничными и начальными условиями:

$$\begin{aligned} C \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{W} &= 0, \\ \vec{W} &= -\lambda \operatorname{grad} T, \\ W &= -\alpha_t (T - T_c). \end{aligned}$$

Особенностью рассматриваемой задачи является необходимость учета фазового перехода из жидкого в твердое состояние.

Для сквозного счета таких задач без явного выделения фронта затвердевания нужно учесть, что при температуре фазового перехода $T - T^*$ энергия E как функция температуры испытывает переход величины Q^* , который называется теплотой фазового перехода, поэтому для энергии справедливо

$$E = \int_0^T c(T) dT + Q^* \theta(T - T^*),$$

$$\text{где } \theta(T) = \begin{cases} 1, & T \geq 0, \\ 0, & T < 0. \end{cases}$$

Это выражение подставляется в уравнение энергии: $\frac{\partial E}{\partial T} + \operatorname{div} \vec{W} = Q$, и, учитывая, что

$$\frac{dQ(T)}{dT} = \delta(T) \text{ есть дельта-функция Дирака, получается уравнение}$$

$$(C(T) + Q^* \delta(T - T^*)) \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{W} = Q,$$

справедливое и в области фазового перехода. Выражения $C(T)$ и $Q^* \delta(T - T^*)$ входят в уравнение одинаковым образом, причем $Q^* \delta(T - T^*)$ представляет собой сосредоточенную теплоемкость на поверхности $T - T^*$.

Для перехода к разностной схеме заменяется дельта-функция приближенно δ -образной или размазанной функцией $\delta(T - T^*, \Delta) \geq 0$, где Δ – величина полуинтервала, на котором функция $\delta(T - T^*, \Delta)$ отлична от нуля.

Таким образом, вводится сглаженная или эффективная теплоемкость $C_3(T) = C(T) + Q^* \delta(T - T^*, \Delta)$, которая удовлетворяет условию $C_3(T) = C(T)$ вне интервала $(T^* - \Delta, T^* + \Delta)$.

Изменение энтальпии на интервале $(T^* - \Delta, T^* + \Delta)$ сокращается, т.е.

$$\int_{T^* - \Delta}^{T^* + \Delta} C_3(T) dT = Q^* + \int_{T^* - \Delta}^{T^* + \Delta} C(T) dT.$$

На интервале $(T^* - \Delta, T^* + \Delta)$ можно, например, взять $C_3(T) = \frac{Q^*}{2\Delta} + C(T)$, что будет соответствовать интерполяции δ -функции с помощью прямоугольного импульса. На том же интервале производится сглаживание коэффициента теплопроводности λ . Вводится сглаженный, или эффективный, коэффициент $\lambda_3(T)$, совпадающий с $\lambda_1(T)$ при $T < T^* - \Delta$ и с $\lambda_2(T)$ при $T > T^* + \Delta$.

Например, если задавалось

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*, \\ \lambda_2, & T > T^*, \end{cases}$$

то можно взять

$$\lambda_3(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^* - \Delta, \\ \lambda_2, & T > T^* + \Delta, \\ \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2\Delta} T + \lambda_1 - \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2\Delta} (T^* - \Delta), & T \in (T^* - \Delta, T^* + \Delta). \end{cases}$$

В результате получается задача для уравнения теплопроводности со сглаженными коэффициентами

$$C_3(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{W} = 0,$$

$$\vec{W} = -\lambda_3(T) \operatorname{grad} T.$$

Моделирование процессов затвердевания границ льда и основы позволяют выбрать наиболее эффективные методы и средства борьбы с обледенением энергообъектов на суше и обеспечить безопасное плавание судов в условиях Арктики, Дальнего Востока и др.

Другой фрагмент ИВК – визуализация нанонесплошностей в гетероструктурах, особенно важен для мехатроники оборудования, приборов, линий передачи. Визуализация и документирование нанонесплошностей с разрешением 50...60 нм обеспечивают выполнение современных требований к надежности электроэнергетики [7].

3. Закономерности динамики гетероструктур энергетики

Использование информационно-измерительного комплекса ИВК ДГСЭ позволило установить новые нетривиальные системные связи и закономерности динамики гетероструктур энергетики России и мира.

Следует выделить основную закономерность: гетерогенность мехатроники, управления, всех видов ресурсов, технологий производства и распределения энергии постоянно растет, что требует дополнительных усилий по изучению новых нарождающихся структур.

Очевидно, что показатели среднего мирового душевого производства электроэнергии в 2500 кВт·ч, не могут быть применены для России. В настоящее время наилучшие показатели в Норвегии – 30 тыс кВт·ч, Канаде – 16 тыс кВт·ч, США, Кувейте 14 тыс кВт·ч, Франции, Японии, Германии, Катаре – 10 тыс кВт·ч.

Нашими исследованиями на ИВК ДГСЭ установлена системная связь показателей дешевого производства электроэнергии с продолжительностью и уровнем жизни в странах типа Норвегии, Катара и т.п.

Вероятно важной закономерностью и идеальной технологией для России, по нашим исследованиям, является технология, включающая мобильные АЭС, солнечные системы и разумно модернизируемые ТЭС, ГЭС, а также другие возобновляемые источники энергии.

Определение условий реализации эффективных мехатронных гетероструктур с учетом социотехнических факторов при выработке управляющих решений может быть реализовано с использованием информационно-вычислительного комплекса ДГСЭ.

Примером такого подхода может быть решения по передвижным АЭС малой мощности в 2,5 МВт, эксплуатируемым в районах мира, лежащими за пределами опасной с точки зрения бомбардировки метеоритными потоками зонами [1].

Другим примером – солнечные системы теплоснабжения.

Солнечные системы теплоснабжения обеспечивают экологическую чистоту в процессе производства тепловой энергии при минимальных требованиях к эксплуатации, при невысокой цене – до 60–250 долл. за м² коллектора и длительном сроке службы – до 15–20 лет.

В соответствии с данными Европейской федерации по солнечной энергии после принятия в ряде европейских стран стимулирующего законодательства, темпы ежегодного прироста числа солнечных коллекторов составляют 18...23 %, что позволило большинству стран ЕС перейти рубеж использования СК, составляющий 0,1 м²/чел. В настоящее время в Европе этот показатель находится в пределах 0,05...0,5 м²/чел., в США около 0,1 м²/чел.; наибольшие значения этого показателя на Кипре – 0,8 м²/чел. и в Израиле – 0,6 м²/чел.

Ведущие позиции как в разработке систем гелиотепло-потребления, так и в промышленном производстве коллекторов солнечной энергии занимают: США (выпускается более 1,6 млн м² коллекторов в год и более 18 млн м² коллекторов уже введено в эксплуатацию); страны Западной Европы и Японии (соответственно введено в эксплуатацию 5,9 млн м² и 11 млн м² гелиоколлекторов).

Промышленным производством коллекторов солнечной энергии занимаются в основном средние и мелкие фирмы, которых, например, только в США насчитывается более двухсот. Основные усилия фирм-разработчиков направлены на улучшение технико-экономических показателей за счет снижения себестоимости коллектора при высоких теплофизических показателях, на снижение материалоемкости и увеличение срока службы. Германия, Китай пошли по пути централизованного выпуска поглотителей тепловой энергии из алюминиевой и медной фольги, что позволяет снизить себестоимость их изготовления на 20 %.

В год продается солнечных коллекторов: Бельгия – 3800 м², Израиль – 180 000 м², Финляндия – 500 м², Франция – 3000 м², Австрия – 197 000 м², Германия – 350 000 м², Греция – 150 000 м².

В странах ЕС в 2020 г. планируется продажа 25 млн м² солнечных коллекторов.

Выводы

Системный анализ информации по динамике мехатронных гетероструктур электроэнергетики позволил установить новые нетривиальные связи и закономерности динамики гетероструктур. При нарастающей гетерогенности структур социотехносферы, главные из которых, вероятно, следуют с переходом из линейной в циклическую экономику – без роста ВВП, но с усиливающимся расслоением как между странами, так и внутри стран [1].

Фундаментальной закономерностью процессов, протекающих в мехатронных гетероструктурах является закономерность снижения надежности из-за поверхностных нанотрещин по границам гетероструктур [10, 11].

Разработанный информационно-вычислительный комплекс ИВК ДГСЭ позволяет определить условие реализации эффективных мехатронных гетероструктур с учетом важнейших социотехнологических факторов при выработке управляющих решений.

По результатам исследований с применением ИВК ДГСЭ определены конкурентоспособные экспортноэффективные энергетические системы с надежными мехатронными гетероструктурами.

На наш взгляд, это энергосистемы малой мощности, адаптивной конфигурации для той или иной конкретной социотехносферы в той или иной стране мира.

Библиографический список

1. Компетентность: интеллектуальный выбор молодых / О. В. Кузнецова, Д. В. Артамонов, В. В. Смогунов и др. ; под ред. В. А. Мещерякова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – 188 с.
2. Половинкин, В. Н. Эволюция мировой энергетики / В. Н. Половинкин, А. Б. Фомичев // Атомная стратегия. 2011. – URL: <http://www.proatom.ru>.
3. Алферов, Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып. 8. – С. 937.
4. Динамика гетерогенных структур. Т. 3. Моделирование гетероструктур преобразователей информации / В. В. Смогунов, В. А. Васильев, Н. И. Волчихина ; под ред. В. В. Смогунова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 467 с.
5. Динамика гетерогенных структур. Т. 1. Эволюция ракетно-космических гетерогенных структур / В. В. Смогунов, М. И. Степанов, И. П. Климинов и др. ; под ред. В. В. Смогунова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 311 с.
6. Динамика гетерогенных структур. Т. 4. Динамика микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов, И. В. Волчихин, В. В. Смогунов ; под ред. В. В. Смогунова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 621 с.
7. Динамика гетерогенных структур. Т. 5. Виброзащита гетероструктур / О. А. Вдовикина, М. И. Вольников и др. ; под ред. В. В. Смогунова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 437 с.
8. Евсеева, Ю. И. Разработка математического и алгоритмического обеспечения для системы структурно-параметрического синтеза трехмерных адаптивных приложений / Ю. И. Евсеева. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – 20 с.
9. Динамика гетерогенных структур. Т. 2. Фундаментальные модели / В. В. Смогунов, О. А. Вдовикина, Н. Я. Карасев и др. ; под ред. В. В. Смогунова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – 598 с.
10. Хади, О. Ш. Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 41–48.
11. Кочегаров, И. И. Особенности исследования динамических характеристик печатных узлов в двухмерных задачах / И. И. Кочегаров, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (14). – С. 13–23.

Смогунов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной механики
и графики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tmpg@pnzgu.ru

Кузнецов Никита Сергеевич

студент,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tmpg@pnzgu.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

Smogunov Vladimir Vasilyevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kuznetsov Nikita Sergeevich

student,
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)

Аннотация. Приведены результаты системного анализа информации о современных мехатронных гетерогенных структурах энергетики, используемых в разнообразных энергетических комплексах. Проведено математическое моделирование нестационарных тепловых полей, на основе которого получены новые нетривиальные связи и закономерности динамики гетероструктур. Разработан информационно-вычислительный комплекс, базирующийся на пакетах Data Mainning, и развитый новыми средствами построения гиперграфовых моделей и алгоритмов автоматического ситуационного выбора эффективных конфигураций при выполнении адаптивных приложений. Доказана гетерогенность мехатроники, управления, а также всех видов ресурсов, технологий производства и распределения энергии. Установлены закономерности эволюции мировой энергетики и электроэнергетики. Определены условия реализации эффективных мехатронных гетероструктур с учетом важнейших социотехнологических факторов при выборе управляющих решений.

Ключевые слова: мехатронная гетероструктура, динамика, информационно-вычислительный комплекс, энергетика, электроэнергетика, технологии производства энергии, социотехнологический фактор.

Abstract. The results of system analysis of information about modern mechatronics heterogeneous structures of energy used in various power complexes. Mathematical modeling of thermal fields nestatsionarnykh on the basis of which obtained new non-trivial communication patterns and dynamics in heterostructures. Developed information-computational complex based on the packet Data Mainning, and developed new means of constructing hypergraph models and algorithms of automatic situational choice of efficient configurations when running adaptive applications. Proven heterogeneity of mechatronics, control, and all kinds of resources, technologies of production and distribution of energy is constantly increasing. The regularities of the evolution of world energy and electricity. The conditions for the effective implementation of mechatronic heterostructures taking into account the major social and technological factors in the selection and control decisions.

Key words: mechatronic heterostructure, dynamics, information and computing center, energy, electricity, technology, energy production, social and technological factor.

УДК 531.3:681.2

Смогунов, В. В.

Модели динамики гетероструктур электроэнергетики / В. В. Смогунов, Н. С. Кузнецов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 25–32. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-4.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 658.5

DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-5

ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРОВОЛОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

А. Ю. Доросинский, О. Н. Герасимов, Д. В. Артамонов

В процессе своей эксплуатации радиоэлектронная аппаратура (РЭА) может подвергаться воздействию ударных нагрузок, достигающих значительной величины (десятки тысяч g). В результате воздействия ударов может произойти нарушение функционирования РЭА или разрушение ее отдельных элементов. Особенно интенсивные ударные нагрузки РЭА испытывает при ее жестком креплении к столу ударного стенда. Немаловажную роль в надежности играют также метод крепления отдельных элементов в составе самой аппаратуры и их конструкция.

Изучение ударных процессов относится к числу актуальных проблем, связанных с оценкой поведения различных изделий электронной техники (ИЭТ) и РЭА в условиях воздействия интенсивных нагрузок импульсного характера.

Процесс удара можно подразделить на два этапа. Первый из них (активный) заключается в том, что контактная сила соприкосновения возрастает, а деформации в зоне контакта соударяющихся тел носят упруго-пластический характер, т.е. во время активного этапа удара происходит нагружение тел. Во время второго (пассивного) этапа происходит разгрузка тел, т.е. восстановление упругих деформаций и контактная сила при этом уменьшается.

Основное уравнение удара для случая жестко закрепленной плиты

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{1}{M}P(t) = -gK(t),$$

где $V = \frac{d\alpha}{dt}$ – скорость сближения; P (2) – зависимость величины деформации от величины контактного давления; M – масса ударяемого тела.

При воздействии ударной нагрузки в поведении конструкций и материалов наблюдаются особенности, которые отсутствуют при статической нагрузке, а именно:

- упругая конструкция под действием ударной нагрузки приходит в колебательное движение, которое постепенно затухает вследствие сопротивления воздуха, внутреннего трения между частицами материала и т.д.;
- в сопротивлении ударной нагрузки принимает участие иногда не весь материал конструкции, а только часть его, расположенная в зоне контакта.

При всяком импульсивном нагружении распространение пластической деформации характеризуется волновым процессом, скорость распространения которого определяется по динамической диаграмме [1] напряжение – деформация как

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}},$$

где ρ – плотность материала; $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ – модуль упругости материала в пластической зоне.

Всякий процесс деформации материала характеризуется количеством деформации, поглощаемой при ударе материалом:

$$a_k = \frac{A_k}{F_{\min}},$$

где $F_{\min}$ – минимальная площадь в изломе; A_k – количество работы при ударе; a_k – ударная вязкость материала.

В отличие от гармонических колебаний удар является неустановившимся процессом и для его описания используют характеристики, несвязанные со свойствами исследуемых изделий, материалов. Эти характеристики основываются на функциональной зависимости параметра от времени и на зависимости спектральных характеристик от частоты. К числу характеристик во временной области [2] относятся:

а) функциональная зависимость от времени ускорения $\omega(t)$, скорости $v(t)$ или смещения $X(t)$, определяемая по формулам

$$I_\omega = \int_0^r \omega dt = v_r - v_0, I_v = \int_0^r v dt = X_r - X_0 \text{ и } I_x = \int_0^r X dx;$$

б) длительность ударного импульса;

в) длительность фронта r_ϕ ударного импульса.

Для определения характеристик в частотной области ударного импульса обычно применяется спектральная плотность процесса, определяемая спектром Фурье в форме амплитудного $S(\omega)$ и фазового $\phi(\omega)$ спектров:

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(i\omega) e^{i\omega t} d\omega, S(i\omega) = S(i\omega) e^{i\phi(\omega)}.$$

Вычисление его производится из соотношения

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (i\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Действующая ширина спектра Δf определяется на уровне 0,9 полной энергии W спектра и находится из соотношения

$$\int_0^{2\pi\Delta f} [S(\omega)]^2 d\omega = 0,9 \int_0^\infty [S(\omega)]^2 d\omega.$$

Воздействие ударного импульса вызывает изменение движения упругой системы, к которой можно отнести и ИЭТ, имеющие довольно сложную конструкцию, и заставляет ее совершать колебательные движения как переходные, так и собственные отдельных ее элементов, что вызывает в ней соответствующую реакцию, определяемую для системы с одной степенью свободы [3] на полусинусоидальный импульс

$$\sigma = \begin{cases} 2 \frac{U_m}{\omega^2} \frac{\pi / \omega_\tau}{(\pi / \omega_\tau)^2 - 1} \cos \frac{\tau \omega}{2} \sin \omega \left(t - \frac{\tau}{2} \right), \text{ при } t > \tau; \\ \frac{U_m / \omega^2}{1 - (\pi / \omega_\tau)^2} \left(\sin \frac{\pi t}{\tau} - \frac{\pi t}{\omega \tau} \sin \omega t \right), \text{ при } 0 \leq t \leq \tau. \end{cases}$$

При резком изменении скорости движения, имеющем место при ударе, может обнаружиться хрупкость в таких материалах, которые при статическом действии нагрузок являются пластичными. Возникающие при ускоренном движении изделия добавочные напряжения эквивалентны статическим напряжениям, вызываемым силами инерции, а что касается характера нарастания напряжений и деформаций, то при ударе деформация происходит хотя и быстро, но не мгновенно; динамическая нагрузка σ_d постепенно растет в течение очень короткого промежутка времени от нуля до окончательного значения; параллельно росту деформаций возрастают и силы инерции.

В большинстве случаев повреждения элементов РЭА, таких как проволочные резисторы, вызываемые воздействием ударных нагрузок, носят механический характер разрушения. Характерными отказами проволочных резисторов при воздействии ударных нагрузок являются:

- разрушение корпуса и элементов конструкции вследствие их недостаточной прочности;
- разрушение сварных и паяных соединений, приводящее к потере проводимости резистора или отдельных его плеч в случае переменного резистора;
- разрушение клеевых соединений вследствие их недостаточной адгезии;
- отклонения величин установленного значения сопротивлений, вызываемые недостаточной жесткостью фиксации регулировочного движка (в случае резисторов переменного сопротивления).

В рамках данной работы были проведены исследования по оценке стойкости различных типов проволочных резисторов к воздействию повышенных ударных нагрузок.

Большинство резисторов по своей конструкции (недостаточное контактное давление и жесткость контактной пружины) не рассчитано на эксплуатацию при воздействии механических нагрузок выше требований ТУ и доработка их конструкции с целью повышения их механической прочности к воздействиям указанных нагрузок нецелесообразна ввиду малого внутреннего объема.

Увеличение контактного давления пружины на резистивный элемент в существующих в настоящее время типах переменных проволочных резисторах приведет к его обрыву в результате перемещения подвижной системы, поэтому для повышения механической прочности переменных резисторов необходима разработка принципиально новых типов переменных резисторов, обеспечивающих надлежащую жесткость пружины после установки резисторов в РЭА. При перемещении подвижной системы резистора в его конструкции необходимо предусмотреть снижение контактного давления. Для повышения стойкости резисторов к воздействию ударных нагрузок в десятки тысяч g необходимо усилить приклейку резистивного элемента к основанию и заменить пайку выводов к резистивному элементу и токоъемнику сваркой.

Способ крепления резисторов при эксплуатации в РЭА должен быть достаточно надежным к воздействию повышенных механических нагрузок или предусматривать их заливку специальными компаундами.

Для постоянных резисторов, более стойких к воздействию повышенных механических нагрузок, необходимо разработать более жесткие способы их крепления в РЭА, исключающие разрушение их корпусов, а длину выводов ограничить минимально возможной длиной с их распайкой к соответствующим элементам РЭА. В качестве материала опрессовки резисторов необходимо применить более стойкий к ударным нагрузкам материал.

Библиографический список

1. Рейнхэрт, Дж. С. Поведение металлов при импульсивных нагрузках / Дж. С. Рейнхэрт, Дж. Пирсон. – М. : Изд. ин. лит., 1958. – 295 с.
2. Герасимов, О. Н. Способ организации производственного контроля и диагностики РЭС с заданным уровнем остаточного ресурса / О. Н. Герасимов, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 94–98.
3. Хади, О. Ш. Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 41–48.

Доросинский Антон Юрьевич

кандидат технических наук, ведущий инженер,
специальное конструкторское бюро,
ОАО «Электромеханика»
(440052, Россия, г. Пенза, ул. Гоголя, 51/53)
E-mail: antik_r13@mail.ru

Dorosinskiy Anton Yur'evich

candidate of technical sciences, lead engineer,
special design bureau,
Electromechanica factory
(440052, 51/53 Gogolya street, Penza, Russia)

Герасимов Олег Николаевич

начальник военного представительства,
Министерство обороны РФ
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: gera0502@mail.ru

Артамонов Дмитрий Владимирович

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: politeh@pnzgu.ru

Аннотация. Показано, что актуальным является оценка поведения различных изделий электронной техники и радиоаппаратуры в целом в условиях воздействия интенсивных нагрузок импульсного характера. Рассмотрены теоретические вопросы влияния ударных воздействий на конструкционные материалы и проволочные резисторы. Дано теоретическое обоснование механизмов влияния ударных процессов на конструкционные элементы радиоэлектронной аппаратуры и изделий электронной техники. Исследованы механизмы отказов проволочных резисторов и определена их работоспособность в процессе воздействия повышенных ударных нагрузок. Проведены исследования по оценке стойкости различных типов проволочных резисторов к воздействию повышенных ударных нагрузок. Разработаны рекомендации по повышению стойкости проволочных резисторов к данным видам воздействия. Показана актуальность разработки жестких способов крепления проволочных резисторов в радиоаппаратуре, исключающие разрушение их корпусов, а длину выводов ограничить минимально возможной длиной с их распайкой к соответствующим элементам радиоаппаратуры.

Ключевые слова: ударная нагрузка, конструкционный материал, резистор, контактное давление.

Gerasimov Oleg Nikolayevich

head of the military mission
The Ministry of defense RF
(440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Artamonov Dmitriy Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
director of Polytechnic Institute,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. It is shown that topical is the assessment of the conduct of various electronic equipment and radio equipment in total exposure to intense pulsed loads of character. Theoretical impact of shock effects on structural materials and wire resistors. Theoretical substantiation of mechanisms of influence of impact processes on the structural elements of electronics and electronic products. Investigated the mechanisms of wire resistors and failures determined during that exposure to elevated shock loads. Studies on the evaluation of the resistance of different types of wire resistors to the effects of elevated shock loads. Developed recommendations for improving the resistance of wire resistors to data types of impact. Shows the relevance of developing hard ways of fastening wire resistors in radios, excluding the destroying their buildings, and the length of the conclusions limit the minimum possible.

Key words: shock loading, construction material, resistor, contact pressure.

УДК 658.5

Доросинский, А. Ю.

Влияние ударных нагрузок на конструкционные материалы и проволочные резисторы / А. Ю. Доросинский, О. Н. Герасимов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 33–36. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

О. Н. Герасимов, А. Ю. Доросинский, М. Н. Березин

Введение

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) выполняет сложные и ответственные функции в разнообразных внешних условиях воздействия, поэтому изучение влияния внешних воздействующих факторов как на РЭА в целом, так и на входящие в ее состав радиоэлементы представляет собой актуальную задачу в области надежности РЭА.

Аппаратура летательных аппаратов и взрывателей особенно в процессе эксплуатации подвергается значительным механическим воздействиям – вибрации, ударным и линейным нагрузкам, вызывающим большие механические напряжения в отдельных элементах РЭА, что может привести к нарушению нормального режима работы аппаратуры или выходу ее из строя.

Развитие ракетно-космической техники, подвергающейся большим механическим нагрузкам, резко повысило требования к надежности РЭА в целом, а следовательно, и к ее элементам. В реальных условиях эксплуатации РЭА работает почти всегда при некотором комплексе воздействующих факторов, состоящем из механических, климатических и ряда других факторов. Наибольшее количество отказов РЭА приходится на долю механических факторов воздействия, поэтому повышение надежности элементов РЭА именно в этом направлении является важной научно-практической задачей, качество решения которой напрямую зависит от глубины понимания тех механизмов, которые происходят в радиоэлементах при воздействии вибрационных нагрузок.

Теоретическое описание вибрационных процессов

Вибрации являются одним из основных видов испытаний, на долю которого приходится наибольшее количество отказов РЭА, которая состоит из большого числа изделий электронной техники различного функционального назначения и в общем случае представляет собой колебательную систему, состоящую из множества материальных точек, и, следовательно, имеет большое число степеней свободы. Наиболее общей формой уравнений движения такой колебательной системы является уравнение Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{g}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial g_i} = Q_{i(i=1,2,\dots,n)},$$

где n – число степеней свободы колебательной системы; i – порядковый номер обобщенной координаты; g_i – обобщенная координата; $\dot{g}_i$ – обобщенная скорость; Q – обобщенная сила; T – кинетическая энергия системы; t – время.

В каждый момент времени состояние такой системы характеризуется перемещением X и скоростью V . С течением времени каждая точка системы будет перемещаться по фазовой плоскости, описывая фазовую траекторию, и гармоническое колебание в рассматриваемом случае будет иметь вид

$$\begin{cases} X = A \sin(\omega t + \varphi); \\ X = A_{\omega} \cos(\omega t + \varphi); \\ W = \omega^2 A \sin(\omega t + \varphi), \end{cases} \quad (1)$$

где A – амплитуда колебаний; W – ускорение.

Кроме скорости и ускорения, синусоидальная вибрация характеризуется еще величиной динамической перегрузки U (резкостью), определяемой как производная от ускорения по времени без учета фазового угла φ

$$U = \omega^3 A \cos \omega t. \quad (2)$$

Динамическая перегрузка характеризует скорость изменения действующей силы (инерции) и является дополнительной характеристикой гармонических вибраций, с помощью которой можно сравнивать режимы вибрационных нагрузок.

Из формул (1) и (2) видно, что амплитуды перемещения, скорости и ускорения и динамической перегрузки связаны между собой следующими соотношениями:

$$A_u = \omega A_v = \omega^2 A_s = \omega^3 A,$$

где величина амплитуды перемещения A в зависимости от заданной перегрузки и частоты определяется по формуле

$$A = \frac{250\Pi}{f^2}.$$

Данная формула представляет собой гиперболическую зависимость амплитуды от частоты. Величина Π – безразмерная вибрационная перегрузка, определяемая выражением

$$\Pi = \frac{A_0}{g}.$$

В практике испытаний вибрационные нагрузки подразделяются на низкочастотные ($f = 5 - 50$ Гц) и высокочастотные. Низкочастотные вибрационные нагрузки вследствие значительной величины амплитуд могут создать в отдельных деталях конструкции изгибные колебания, вызывающие недопустимо большие деформации, которые могут привести к разрушению конструкции. Высокочастотные вибрации вследствие их малых амплитуд (от десятков до долей микрона), но большого числа колебаний могут вызвать явление усталости материала конструкции и появление микротрещин, что приведет к скрытым дефектам и при длительном их воздействии к отказу РЭА.

В реальных условиях эксплуатации РЭА ряда объектов вибрации не являются регулярными и носящими синусоидальный характер. В действительности они всегда имеют случайный характер, поэтому, например, имитация окружающих условий эксплуатации РЭА летательных аппаратов приводит к необходимости проведения испытаний на воздействие случайной вибрации, которая в зависимости от ширины спектра частот подразделяется на широкополосную и узкополосную.

Узкополосная случайная вибрация занимает сравнительно небольшой участок частот и при его уменьшении вид воздействий имеет форму биений, поэтому для определения его статических характеристик требуются реализации большой длительности.

Широкополосная случайная вибрация определяется как суммарное воздействие нескольких узкополосных вибраций и в общем случае случайные вибрации являются пространственными вибрациями, раскладывающимися по трем координатным осям x , y , z , и тогда случайные вибрации рассматриваются как случайные функции одного аргумента – текущего времени t . Такие процессы не могут быть описаны какой-либо определенной функциональной зависимостью $g(t)$. Вместе с тем задание одних только дискретных значений g в различные моменты времени является обычно недостаточной и удобной характеристикой процесса, поэтому более полные и удовлетворительные характеристики даются параметрами, устанавливаемыми теорией вероятностей и математической статистики.

Математическое ожидание или среднее значение функции $X(t)$ по ансамблю

$$E[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X_p(x, t) dx,$$

где $p(x, t)dx = P(x - dx < x(t) < x)$ – одномерный закон распределения вероятности случайной величины $x(t)$.

Среднеквадратическая спектральная плотность вибрации определяется выражением $R_x(\theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) d\omega = E[x^2]$, а спектральная плотность $S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$.

Основной целью испытаний ИЭТ на воздействие вибрационных нагрузок является определение способности изделий противостоять разрушающему действию вибрации, а также определение их способности выполнять свои функции при сохранении критериальных параметров годности в пределах требований, установленных НТД на данные изделия. Для приближения достоверности испытаний к реальным условиям эксплуатации РЭА в настоящее время нашел широкое применение метод качающейся частоты при испытании на вибрационные нагрузки. Удобство данного метода испытаний заключается в том, что при логарифмическом изменении частоты вибрации возможно непосредственно с помощью пьезодатчиков, электретных датчиков и других приборов определить резонансные частоты отдельных элементов изделия, а также всего изделия в целом во всем диапазоне частот. Кроме того, данный метод позволяет определить амплитуды, возникающие на резонансных частотах.

Механизмы разрушения конструкционных материалов изделий электронной техники при воздействии вибрационных нагрузок

При воздействии вибрационных нагрузок, имеющих широкий диапазон частот, в РЭА могут возникнуть изгибные, поперечные, продольные и поверхностные волны, которые распространяясь по материалу конструкции, возбуждают виброшумы в радиоэлементах и электронных приборах. Кроме того, воздействие вибрации существенным образом развивает и ускоряет процессы разрушения, связанные с наличием отслоений, трещин и т.д. Даже те элементы изделий, дефекты которых в обычных условиях не проявляются, могут оказаться крайне чувствительными по отношению к слабым вибрациям (точечная сварка и др.)

Технические материалы, на первый взгляд кажущиеся однородными, всегда содержат большое количество дефектов различного происхождения и самых разнообразных размеров. На субмикроскопическом уровне это вакансии включения в почти правильной структуре материала, дислокации, поры. На микроскопическом уровне наблюдается разброс в ориентации, размерах и свойствах частиц, образующих материал. На микроскопическом уровне различны уже свойства материала ввиду неоднородности большого масштаба.

При действии циклически изменяющихся напряжений, создаваемых вибрацией, наблюдается явление усталости материалов. На усталостную прочность материала оказывают существенное влияние два фактора: повторность нагрузки и фактор времени.

В ряде работ [1], [2] отмечается, что при воздействии динамической знакопеременной нагрузки происходит деформация сдвига кристаллитов вдоль определенных плоскостей скольжения, что может привести вследствие различной их ориентации к пластической деформации, по мере роста которой происходит упрочнение материала и может достичь такого состояния, когда кристаллиты под действием постоянной нагрузки уже не будут деформироваться пластически, а произойдет лишь упругая деформация. При циклическом нагружении распространение пластической деформации характеризуется волновым процессом, скорость которого определяется по динамической диаграмме напряжение – деформация как

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}},$$

где ρ – плотность материала; $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ – модуль упругости материала в пластичной области.

В связи с тем, что пластическая прочность материала понижается по мере увеличения степени деформации, при дальнейшем воздействии циклической знакопеременной нагрузки приведет к образованию субмикроскопических трещинок, расположенных вдоль определенных линий или полос скольжения. Трещины усталости распространяются не по всему объему изделия, под-

вергающемуся циклическим напряжениям, а только по одному из сечений, в котором она проходит по наиболее слабым элементам материала, в большинстве своем имеющим неоднородную структуру, следовательно, в этом сечении концентрируется наибольшее местное напряжение.

Исследования по распространению усталостных трещин, проведенные Фростом, показали, что напряжение, необходимое для распространения усталостной трещины, уменьшается по мере роста трещины и для ряда материалов подчиняется эмпирической зависимости [3]

$$\sigma^3 l = c,$$

где σ – циклическое напряжение, необходимое для развития трещины длиной l ; c – постоянная.

В пластичных металлах пластические деформации не позволяют местным напряжениям превзойти величину предела текучести данного металла и способствуют тем самым на стадиях, близких к разрушению, более равномерному распределению напряжений по каждому сечению.

Одной из основных характеристик материала при воздействии на него циклических нагрузок является циклическая вязкость, которая не является постоянной величиной, так как зависит от величины циклических напряжений и от нарастания числа циклов напряжения; эти изменения циклической вязкости, характеризуемые изменением петли гистерезиса, позволяют констатировать в металле под действием циклических нагрузок наличие одновременно протекающих двух факторов:

- фактора упрочнения, за который принимается наклеп и механическое старение материала, вызываемые его пластической деформацией;
- разупрочняющего фактора, за который принимаются остаточные напряжения в кристаллитах и между кристаллитами.

Ход всякого усталостного процесса материала зависит от сравнительной интенсивности обоих факторов, меняющихся по мере нарастания числа циклов нагружения и их частоты. Степень влияния частоты нагружения на характеристики усталостной прочности материала зависит от материала, характера нагружения, уровня напряжений (отношения максимального напряжения цикла к пределу упругости), наличия концентраций напряжения, окружающей среды, температуры. На рис. 1 даны факторы, на которые влияет частота нагружения материала.

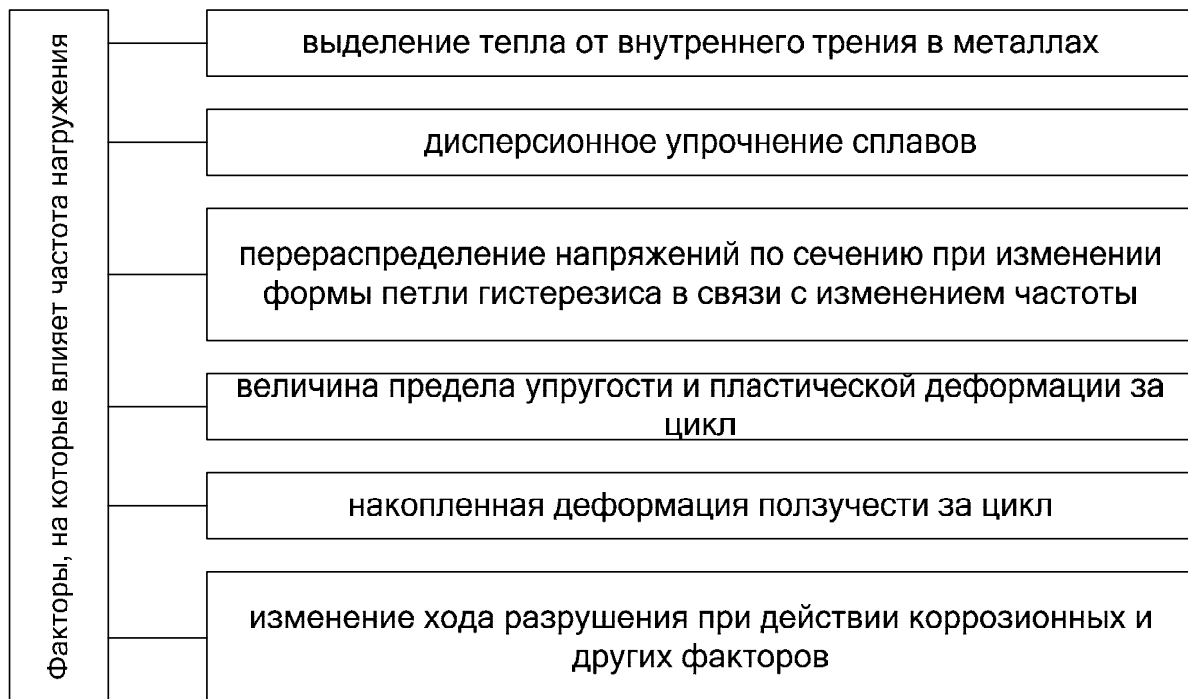


Рис. 1. Влияние частоты нагружения

При высоких частотах нагружения (порядка 10000 Гц) в ряде случаев наблюдается снижение циклической прочности, которое, как правило, связывают с разупрочняющим влиянием само-

разогрева деформируемого материала и его долговечность в единицах времени, несмотря на значительно более низкую амплитуду напряжения σ , примерно на три порядка ниже, чем при низкой частоте и высокой амплитуде [4].

При воздействии низкочастотной вибрации накопления повреждений происходят лишь от ползучести материала, а характер кривой усталости металлов зависит от условий воздействия (температура, среда, размер детали и т.д.) и может изменяться для данного материала в широких пределах.

Оценка долговечности деталей

При анализе изделий электронной техники наибольший интерес представляет оценка долговечности алюминиевых материалов и сплавов, так как именно они в основном используются при изготовлении наружных элементов конструкции.

При достаточно плавных периодически изменяющихся напряжениях вычисление долговечности деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, определяется [5] по формуле

$$[\lg N] = \frac{1}{n} \left[\lg N_{-1} \frac{\sigma_m - \sigma}{\sigma_m - \sigma_{-1} K_1 K_2 K_3 K_4} \right],$$

где n – коэффициент запаса прочности; K – коэффициент при испытании образца на изгиб с вращением; K_2 – коэффициент при испытании точечных образцов на консольный изгиб с вращением; K_3 – коэффициент, учитывающий зависимость абсолютных размеров образца от площади поперечного сечения; K_4 – коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений в опасном сечении; N_{-1} – число циклов нагружений при симметричном цикле опасных напряжений, соответствующее точке перелома усталостной кривой; σ_{-1} – предел выносливости опасных напряжений при симметричном цикле для гладких образцов.

Влияние частоты на долговечность при максимальном напряжении цикла меньшим предела упругости при прямоугольном и синусоидальном цикле определяется отношением

$$(N_{p1} / N_{p2}) (f_1 / f_2)^{n/\lambda + 1} \text{ при } f_1 > f_2,$$

где N_{p1} – число циклов до разрушения при частоте f_1 ; N_{p2} – число циклов до разрушения при частоте f_2 ; n – число приложенных циклов принимается равным единице или двум; λ – коэффициент упрочнения.

Случайная вибрация, представляющая собой спектр определенных частот, некоторые из которых могут совпадать с резонансными частотами элементов РЭА и при непродолжительном воздействии привести к выходу из строя по тем или иным признакам. Обычно воздействующие вибрации имеют широкий и в то же время равномерный спектр, что позволяет с хорошей для практики точностью считать случайный процесс нормальным или Гаусовским, а интенсивность отказов при воздействии случайной вибрации определить по формуле

$$\lambda = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_Q} e^{-\left(g_0 - M\{Q\}^2 / 2\tau^2 Q\right)}.$$

Отсюда вероятность повреждения изделий электронной техники при наличии в их элементах резонансных частот будет пропорциональна числу имеющихся резонансных частот в данном диапазоне.

Выводы

Проведенные исследования показали, что при испытании на воздействие вибрационных нагрузок характерными отказами изделий электронной техники являются:

- разрушение конструкции вследствие недостаточной прочности;
- облом выводов;
- нарушение сварных и паяных соединений.

При этом наиболее популярным видом дефекта является облом выводов, который связан, большей частью с наличием резонансных явлений, возникающих при их большой длине или наличии дефектов материала (надсечки, раковины, включения, микротрещины).

Комплексный подход к оценке результатов вибрационных испытаний позволяет выявить причины отказов и разработать комплекс мер по обеспечению повышения качества изделий.

Библиографический список

1. Сборник статей / под ред. К. Нитцше. – М. : Металлургия, 1967. – 452 с.
2. Терентьев, В. Ф. Циклическая прочность металлических материалов : учеб. пособие / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
3. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. – М. : Машиностроение, 2004. – 784 с.
4. Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний / Л. М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 304 с.
5. Карпушин, В. Б. Вибрация и удары в радиоаппаратуре / В. Б. Карпушин. – М. : Советское радио, 1971. – 344 с.

Герасимов Олег Николаевич

начальник военного представительства,
Министерство обороны РФ
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: gera0502@mail.ru

Доросинский Антон Юрьевич

кандидат технических наук, ведущий инженер,
специальное конструкторское бюро,
ОАО «Электромеханика»
(440052, Россия, г. Пенза, ул. Гоголя, 51/53)
E-mail: antik_r13@mail.ru

Березин Максим Николаевич

главный инженер
ООО НПП «Сонар»
(440004, Россия, г. Пенза, ул. Центральная, 1В)
E-mail: maximber@mail.ru

Аннотация. Обоснована целесообразность повышения вибрационной устойчивости радиоэлектронной аппаратуры. Дано теоретическое описание процессов, происходящих в конструктивных элементах радиоэлектронной аппаратуры при вибрационных воздействиях. Рассмотрены теоретические вопросы влияния вибрации и ударов на конструкционные материалы и изделия радиоэлектронной аппаратуры. Описан способ оценки долговечности деталей. Исследованы механизмы отказов изделий электронной техники в процессе воздействия повышенных механических нагрузок. Описаны механизмы разрушения конструкционных материалов изделий электронной техники при воздействии вибрационных нагрузок.

Ключевые слова: механическая нагрузка, вибрация, электронная техника, изделие, аппаратура.

УДК 54.08

Герасимов, О. Н.

Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники / О. Н. Герасимов, А. Ю. Доросинский, М. Н. Березин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 37–42. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-6.

Gerasimov Oleg Nikolayevich

head of the military mission,
The Ministry of defense RF
(440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Dorosinskiy Anton Yur'evich

candidate of technical sciences, lead engineer,
special design bureau,
Electromechanica factory
(440052, 51/53 Gogolya street, Penza, Russia)

Berezin Maksim Nikolaevich

chief engineer
RPE "Sonar"
(440004, 1V Tsentral'naya street, Penza, Russia)

Abstract. The expediency of improving the vibration stability of electronic equipment. The theoretical description of processes occurring in the structural components of electronic equipment in vibration influences. The article considers theoretical questions of the impact of vibration and shocks on structural materials and articles of electronic equipment. The described method of estimating the durability of components. We investigated the mechanisms of failure of electronic devices in the process of exposure to elevated mechanical loads. Describes the failure mechanisms of structural materials of electronic devices when exposed to vibration loads.

Key words: mechanical stress, vibration, electronics technique, product, equipment.

РАЗРАБОТКА МАКРОМОДЕЛИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

П. Н. Володин

Введение

Применение изделий электронной техники во всех сферах человеческой деятельности накладывает определенные требования по надежности, экономическим и эксплуатационным показателям, которые относятся как к ним самим, так и к их составным узлам и устройствам.

Одним из таких изделий, входящим практически во все виды электронной аппаратуры, является источник вторичного электропитания (ИВЭП). Стремление к улучшению КПД, массогабаритных показателей и расширению диапазона входных напряжений радиоэлектронной аппаратуры обусловило преимущественное распространение ИВЭП с импульсными способами преобразования энергии первичных источников питания [1].

На сегодняшний день существует великое множество ИВЭП, но мы будем рассматривать те, что монтируются в персональные электронные вычислительные машины (ПЭВМ). От качества работы блока питания (БП) во многом зависит и срок службы всего компьютера.

Современные методы проектирования электронных средств (ЭС), направленные на повышение показателей их надежности, улучшение технических характеристик, расширение спектра решаемых задач, а также применения элементной базы шестого поколения, накладывают все более жесткие требования на характеристики входящих в них устройств, в том числе и на ИВЭП. Прежде всего к этим требованиям относятся уровень стабильности и пульсаций выходных напряжений, токов потребления, динамических параметров, высокий КПД, увеличение числа выполняемых функций, условия эксплуатации и пр. Такие требования привели к структурной и схемотехнической сложности устройств электропитания, наличию в их составе элементов и функциональных узлов с нелинейными характеристиками, использованию ключевого режима работы, которые обеспечивают высокие энергетические и удельные показатели. В результате резко усложнился процесс эскизного и технического проектирования таких устройств, который определяет надежность формируемых систем электроснабжения [2]. Поэтому возникла необходимость повысить надежность проектируемых систем электроснабжения (ИИП) за счет новых методов математического моделирования с помощью ЭВМ. Практическое решение этой задачи невозможно без тщательного рассмотрения и учета особенностей устройств электропитания, требований, предъявляемых к ним, а также анализа моделей и методов расчета импульсных ИВЭП.

Таким образом, актуальной является задача разработки модели надежности импульсных ИВЭП.

Основная часть

Практически любая структурная схема импульсного источника питания может быть сведена к структуре, изображенной на рис. 1, которая включает в себя следующие узлы: входной выпрямитель/фильтр; трансформатор, выходной выпрямитель/фильтр, схему защиты, цепь обратной связи, схему управления, источник питания устройств управления.

Для разработки макромодели в качестве полной и точной характеристики надежности источника питания выбрана интенсивность отказов, так как она характеризует степень надежности объекта в данный момент времени.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник [3].

Для построения модели надежности необходим набор статистических и экспериментальных данных, позволяющих:

- оценивать влияние на характеристики надежности импульсных ИВЭП изменение нагрузки на выходе источника;
- определять уровень воздействий окружающей среды на надежность источника для каждой группы аппаратуры по ГОСТ 20.39.304–98;

- определить температуру нагрева элементов блока при изменяющейся нагрузке;
- определить изменение электрической нагрузки элементом в схеме ИВЭП при меняющейся нагрузке на выходе источника.

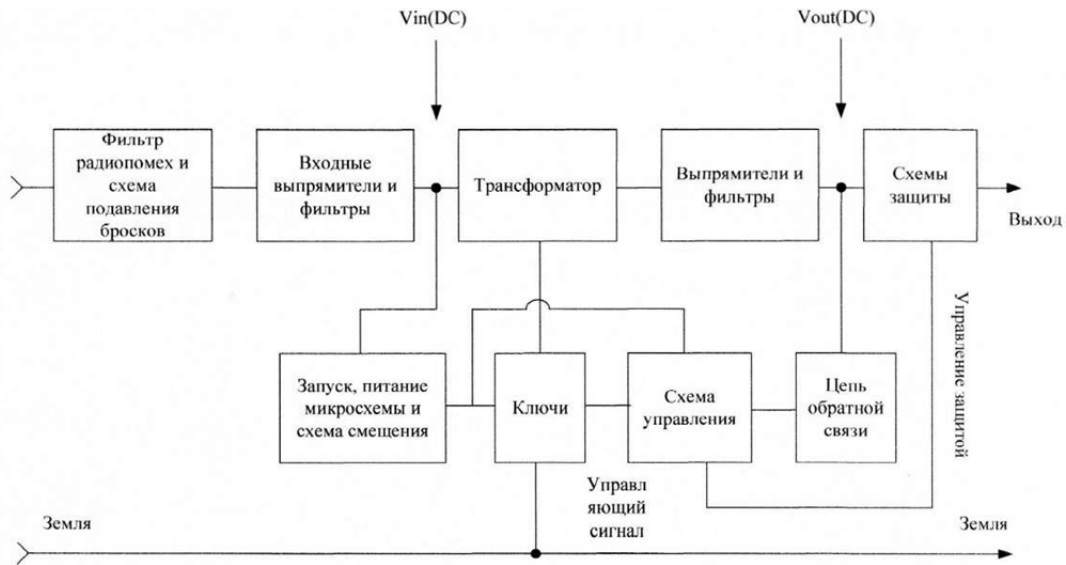


Рис. 1. Структурно-функциональная блок-схема для импульсного источника питания

При выборе исходных данных руководствуемся в первую очередь описанием реально существующих объектов и элементов в них, схемой источника, температурой окружающей среды, характером нагрузки, наиболее важными выходными, внутренними и внешними величинами.

Поскольку задача построения макромодели импульсных источников вторичного электропитания включает в себя ряд подзадач (рис. 2), то исходными данными являются данные каждой из задач.

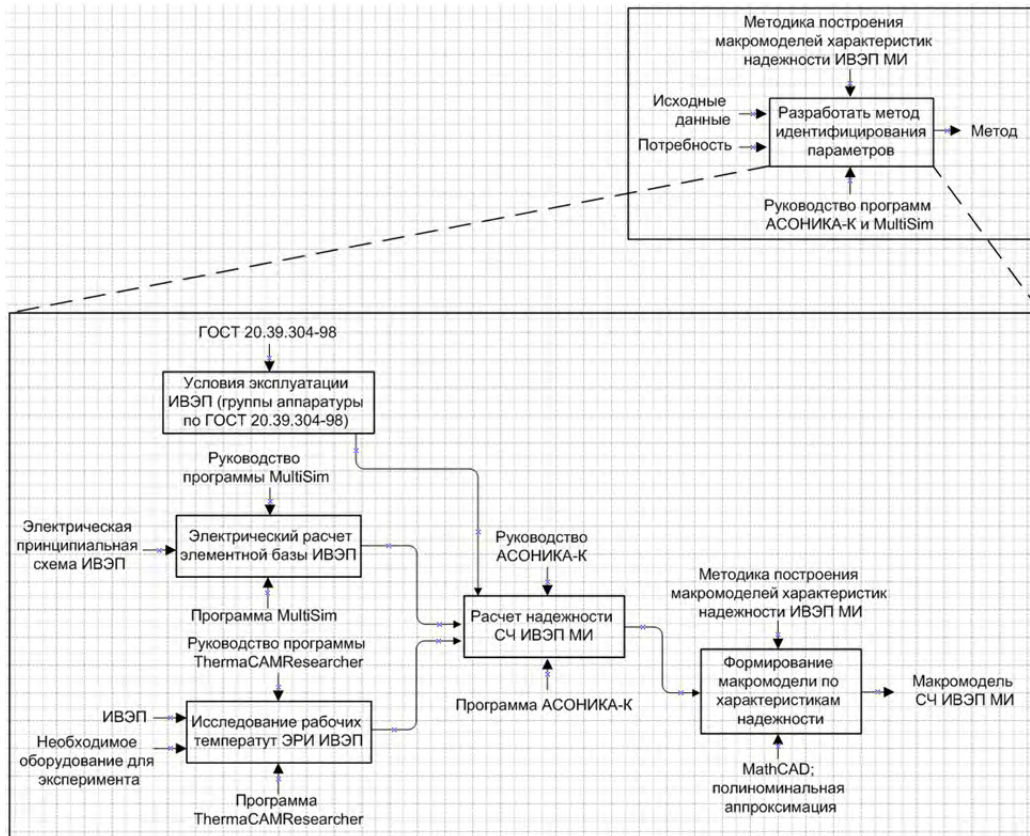


Рис. 2. Декомпозиция задачи макромоделирования импульсных ИВЭП

На этапе электрического моделирования определяем состав электрической принципиальной схемы объекта исследования, режимы работы, предельные нагрузки на дискретных электрорадио-элементах (ЭРЭ) и математические модели ЭРЭ с целью анализа в динамическом режиме [4, с. 137].

Задачей исследования не является получение макромоделей функционального узла, которая определяла бы изменение взаимозависимых электрических процессов. Работа направлена на разработку макромоделей показателя надежно импульсного ИВЭП, используя результаты электрических и тепловых расчетов.

Построение макромоделей импульсного ИВЭП на этапе электрического расчета проводим, исследуя динамику изменения электрических характеристик элементов, с помощью программы MultiSim. Для этого описываем радиоэлектронное средство на уровне его дискретных компонентов. Далее фиксируются значения падения напряжения и протекающие токи через ЭРИ при изменении выходной нагрузки от 10 до 100 %.

Задача теплового расчета состоит в определении рабочих температур ЭРИ ИВЭП при изменяющейся нагрузке источника. Для этого был проведен натурный эксперимент.

Для проведения замеров рабочих температур элементов внутри блока было необходимо демонтировать верхнюю крышку компьютерного БП. Затем были подсоединены нагрузочные сопротивления к шинам питания +3.3V, +5V и +12V. Далее устанавливаем на штатив «тренога» тепловизор FLIRA-40. Через интерфейс USB соединяем тепловизор с ПК, на котором установлена программа ThermoCAMResearcher. После запуска БП необходимо дождаться стабилизации тепловых процессов в блоке. С помощью программы сохраняем изображения с тепловизора на флэш-накопитель (рис. 3). Далее, сопоставляя цвета ЭРИ с соответствующей цветовой шкалой температур, определяем нагрев ЭРИ.

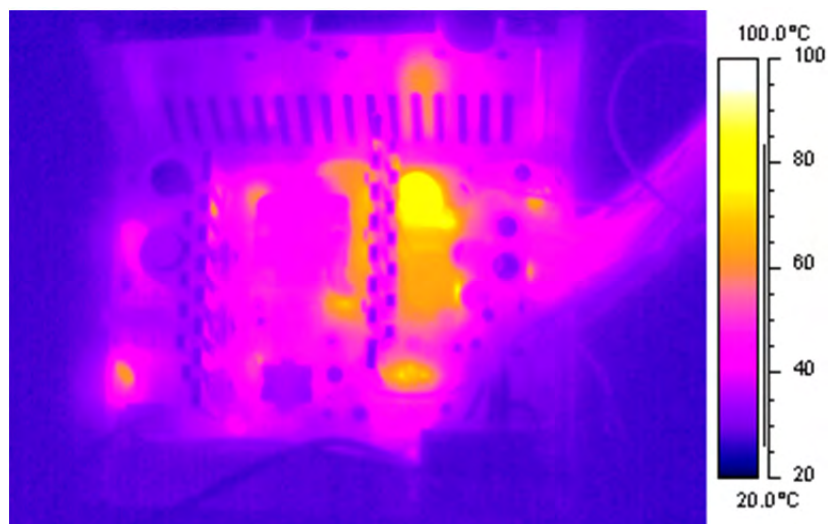


Рис. 3. Картина нагрева ЭРИ в процессе работы БП при нагрузке 100 %

Исходными данными для расчета надежности составных частей источника питания являются справочники отечественного и зарубежного производства.

На этапе расчета показателей надежности импульсного ИВЭП используем результаты первых двух этапов — электрический и тепловой расчет, а также данные нормативно-технической документации по каждому электрорадиоэлементу РЭС. Расчет проводим в системе АСНИКА-К-СЧ.

Система расчета надежности электронных модулей АСНИКА-К-СЧ позволяет проводить расчеты показателей безотказности и сохраняемости составных частей (электронных модулей 1-го уровня) электронных средств (ЭС). Система создана в обеспечение ГОСТ РВ 20.39.302-98 «Комплексная система общих технических требований. Содержание базы данных системы отвечает положениям РДВ 319.01.20-98 «Положение о справочнике «Надежность ЭРИ»[5].

На основе полученной информации проводился расчет показателя надежности (интенсивность отказов) импульсного ИВЭП для групп аппаратуры 1,1...3,4 с помощью подсистемы анализа и обеспечения надежности и качества.

Сущность метода расчета надежности с учетом режимов работы элементов состоит в том, что в расчетных формулах для определения общей интенсивности отказов аппаратуры вместо

табличных среднегрупповых интенсивностей отказов λ_i подставляются значения интенсивностей отказов $\lambda(v_i)$, зависящие от режимов работы v . Значения $\lambda(v_i)$ берутся из соответствующих графиков или вычисляются по формулам [6].

В общем виде интенсивность отказов элементов с учетом реальной электрической нагрузки и температуры можно представить следующим выражением:

$$\lambda_i = \lambda_0 + \Delta\lambda_k + \Delta\lambda_{t0},$$

где λ_0 – интенсивность отказов при номинальном режиме; $\Delta\lambda_k$ – поправка на отклонение реального электрического режима от номинального; $\Delta\lambda_{t0}$ – поправка на отклонение реального температурного режима от номинального [7, 45].

Данная модель интенсивности отказов предложена в работах [8, 9] применительно к ЭРЭ, а в работе [10] – к электронному модулю и дополнена коэффициентом, учитывающим жесткость условий эксплуатации по группам аппаратуры согласно классификации.

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_0 \cdot K_{\Sigma}(i) \cdot K_p(i, T, K_H)$$

где λ_0 – базовая интенсивность отказов (интенсивность отказов СЧ при нормальных условиях (НУ) и номинальной нагрузке); K_{Σ} – функция эксплуатации (функция, учитывающая жесткость условий эксплуатации); i – номер группы аппаратуры по классификации [11] ($i=1, 2, \dots, I$, где I – количество групп); K_p – функция режима (функция, учитывающая режим эксплуатации);

T – температура среды, окружающей СЧ; K_H – коэффициент нагрузки ($K_H = \frac{R_{\text{раб}}}{R_{\text{ном}}}$, где $R_{\text{раб}}$ и $R_{\text{ном}}$ – рабочая и номинальная (по НТД) электрическая нагрузка СЧ).

Коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации, показывает, во сколько раз интенсивность отказов ЭРИ в аппаратуре конкретного класса (группы эксплуатации по [11]) выше при всех равных условиях, чем в наземной стационарной аппаратуре (группа 1.1).

Для корректировки изменяющихся условий вводится функция режима, которая зависит от температуры и коэффициента нагрузки.

Однако если тепловые и механические условия эксплуатации не меняются, интенсивность отказов можно представить в виде

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_0 \cdot K_{\Sigma}(i) \cdot K_H(i),$$

где λ_0 – интенсивность отказов при номинальном режиме; K_{Σ} – коэффициент, учитывающий жесткость условий эксплуатации; i – номер группы аппаратуры по классификации [12] ($i = 1, 2, \dots, I$, где I – количество групп); $K_H(i)$ – коэффициент электрической нагрузки, который определяется отношением рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой электрической нагрузке с фиксированным значением температуры, не превышающей максимальную по ТУ.

Таким образом, при составлении макромодели переходим к **коэффициентному** методу расчета надежности.

Ввиду недостатков существующих методов расчета показателей надежности импульсных ИВЭП поставлена задача разработки макромодели интенсивности отказов импульсных ИВЭП. Для разработки макромодели был использован метод упрощения структуры полной математической модели $\Delta_{\text{ИВЭП}} = \Delta_{\text{НТД}} = \text{const}$ [13]. Применение этого метода позволяет унифицировать макромодель с математическими моделями эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ и упростить структуру макромодели интенсивности отказов для типоразмера ИВЭП до минимума:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_0 \cdot K_{\text{пр}}(j) \cdot K_{\Sigma}(i) \cdot K_p(i, T, K_H),$$

где λ_0 – базовая интенсивность отказов; $K_{\text{пр}}$ – функция качества; j – номер приемки по классификации [11]; K_{Σ} – функция эксплуатации; i – номер группы аппаратуры по классификации [12]; K_p – функция режима; T – температура среды, окружающей ИВЭП; K_H – коэффициент электрической нагрузки ИВЭП.

Заключение

Разработана методика макро моделирования характеристик надежности импульсных ИВЭП. Методика основана на использовании возможностей систем ThermaCAMResearcher, MultiSim и АСОНИКА, позволяет провести исследование тепловых, электрических характеристик и показателя надежности (интенсивности отказов) импульсного ИВЭП.

Разработан алгоритм построения макро модели характеристики надежности импульсных ИВЭП.

Выполненные экспериментальные исследования определили вид макро модели импульсного ИВЭП $\lambda_3 = \lambda_6 \cdot K_{пр}(j) \cdot K_3(i) \cdot K_p(i, T, K_n)$ и подтвердили правильность основных положений и выводов работы.

Библиографический список

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 342 с.
2. Антипенский, Р. В. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р. В. Антипенский, А. Г. Фадин. – М. : Техносфера, 2007. – 128 с.
3. Брук, Б. М. Курсовая работа по дисциплине «Информатика» Тема: «Аппроксимация методом наименьших квадратов» / Б. М. Брук. – СПб. : Изд-во ЛЭТИ, 2000. – 32 с.
4. Кожарский, Г. В. Методы автоматизированного проектирования источников вторичного электропитания / Г. В. Кожарский, В. И. Орехов. – М. : Радио и связь, 1985. – 184 с.
5. Галушкин, А. И. Оперативная обработка экспериментальной информации / А. И. Галушкин, Ю. Я. Зотов, Ю. А. Шикун. – М. : Энергия, 1972. – 360 с.
6. Дивеев, А. И. Поиск закона изменения надежности электронных модулей методом символьной регрессии / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько, В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (2). – С. 32–38.
7. Шишенок, Н. А. Надежность радиоэлектронной аппаратуры. Лекции 6-8. Методы расчета надежности радиоэлектронной аппаратуры / Н. А. Шишенок. – Киев, 1962. – 164 с.
8. Тумковский, С. Р. Разработка методов автоматизированного схемотехнического проектирования бортовых устройств электропитания радиотехнических систем : дис. ... канд. техн. наук / Тумковский С. Р. – М. : МИЭМ, 1989. – 189 с.
9. Жданкин, В. Надежность преобразователей напряжения и ее количественная оценка / В. Жданкин // В записную книжку инженера. – 1997. – № 4. – С. 116–119. – URL: <http://www.cta.ru>
10. Надежность ЭРИ : справочник / С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, А. А. Борисов и др. ; науч. рук. С. Ф. Прытков. – М. : 22 ЦНИИ МО РФ, 2002. – 547 с.
11. Надежность ЭРИ : справочник. – М. : 22 ЦНИИ МО РФ, 2006. – 600 с.
12. ГОСТ РВ 20.39.301–98 Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к стойкости внешних воздействующих факторов.
13. Герасимов, О. Н. Способ организации производственного контроля и диагностики РЭС с заданным уровнем остаточного / О. Н. Герасимов, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (2). – С. 94–98.

Володин Павел Николаевич

магистрант,
Московский институт электроники
и математики им. А. Н. Тихонова
(123458, Россия, г. Москва, ул. Таллинская, 34)
E-mail: pavelj.volodin2013@yandex.ru

Volodin Pavel Nikolaevich

master degree student,
Moscow Institute of Electronics and Mathematics
named after A. N. Tikhonov
(123458, 34 Tallinskaya street, Moscow, Russia)

Аннотация. В данной статье объектом исследования является импульсный источник вторичного электропитания (ИВЭП) персональной вычислительной машины (ПВМ). Цель работы – анализ изменения показателей надежности ИВЭП в зависимости от температуры, электрической нагрузки и условий эксплуатации, построения модели надежно-

Abstract. In this article, the object of study is the pulsed secondary power source (IWEP) personal computers (PVM). The work purpose – analysis of changes in indicators of reliability of IWEP depending on temperature, electrical load and operating conditions, constructing a model of reliability. In the process of exploratory works were carried out a literature review on the research top-

сти. В процессе выполнения исследовательской работы был проведен обзор литературных источников по теме исследования, обзор основных направлений научной деятельности. Был сделан вывод о том, что наиболее часто в теории надежности используются экспоненциальный закон распределения, распределения Вейбулла и Рэлея, логнормальный закон распределения и др. Сформулированы основные требования к модели характеристик надежности импульсных ИВЭП. Разработан алгоритм построения модели характеристики надежности импульсных ИВЭП, основанный на методах факторизации, планирования эксперимента и полного расчета надежности аппаратуры. Сформулированы необходимые исходные данные для формирования модели. Проведен обзор методов для этапов электрического расчета и расчета надежности, проведены соответствующие работы по получению необходимых исходных данных. После небольшого обзора программ, позволяющих проводить схемотехническое моделирование и моделирование электрических процессов в схеме, было решено остановиться на Electronic WorkBench. Для определения рабочих температур ЭРИ компьютерного БП был проведен натурный эксперимент с использованием тепловизора. Далее была разработана макро модель интенсивности отказов ИВЭП с использованием метода полиномиальной аппроксимации.

Ключевые слова: источник вторичного электропитания, надежность, эксплуатационная интенсивность отказов, модель, проектирование.

ic, an overview of the main areas of scientific activity. It was concluded that the most often in the theory of reliability uses the exponential distribution, Weibull distribution and Rayleigh, lognormal distribution law etc. are Formulated the main requirements to model the reliability characteristics of the pulse of IWEP. The algorithm for the construction of the model the reliability characteristics of the pulse of IWEP based on the factorization methods, experiment design and complete calculation of the reliability of the instrument. Formulated the necessary inputs for model generation. A review of methods for stages of electrical calculation and calculation of reliability undertaken to obtain the necessary source data. After a short review of programs allowing to perform circuit simulation and modeling of electric processes in the circuit, it was decided to focus on Electronic WorkBench. To determine the operating temperatures of ERIE computer PSU, was carried out the experiment using the thermal imager. We developed a macro model of the failure rate of IWEP using the method of polynomial approximation.

Key words: secondary power supply, reliability, operational failure rate, model, design.

УДК 662.621.3

Володин, П. Н.

Разработка макро модели интенсивности отказов импульсного источника вторичного электропитания / П. Н. Володин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 43–48. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-7.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ФОРМИРОВАНИЮ СМЕШАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Ю. Т. Зырянов, В. В. Лебедев, Д. Н. Ледовских, И. Г. Рязанов

Введение

Одним из путей повышения качественных показателей технического состояния (ТС) РТС на протяжении жизненного цикла при одновременном снижении расходов на эксплуатацию является переход на ТО по состоянию с периодическим контролем параметров. Основными целями совершенствования ТО РТС являются: повышение эффективности использования имеющихся сил и средств в процессе эксплуатации и поддержание техники в работоспособном и боеготовом состоянии; восстановление исправности (работоспособности) РТС в установленные сроки и продление ресурса.

Существующая организация планирования и управления ТС РТС имеет ряд недостатков: многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на РТС приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации объекты имеют различное фактическое состояние, в связи с чем наработка или календарный срок службы не характеризуют однозначно ТС объекта в процессе эксплуатации; техническое обслуживание при эксплуатации РТС проводится с обязательным совмещением по месту и времени установленных видов ТО одинаковых по наименованию и периодичности на всех составных частях техники, не учитывая их эксплуатационно-технические характеристики; низкая ремонтпригодность техники, приводящая к значительным затратам на ТО за период эксплуатации; необходимость поддержания показателей боевой готовности РТС на заданном уровне в условиях сокращения материальных, временных и трудовых затрат на ТО [1, 2].

В настоящее время на практике при эксплуатации РТС все большее применение находят методы управления с периодическим контролем параметров, учитывающие их фактическое состояние. При этом необходимо отметить, что ни один из методов управления ТС не реализуется без проведения профилактики, и каждый из них имеет свою специфику при определении сроков и объемов ПР. Это определяет актуальность задачи планирования и управления профилактикой. Цель управления профилактикой можно сформулировать как обеспечение заданного уровня готовности и эффективности применения РТС при минимальных затратах на эксплуатацию.

Формализованная постановка задачи

Формализованная постановка задачи по разработке смешанной системы управления техническим состоянием представлена следующим образом:

– необходимо сформировать смешанную систему управления техническим состоянием РТС, состоящего из $S = \{s_i, i = \overline{1, S}\}$ элементов, в наибольшей степени удовлетворяющую множеству эксплуатационно-технических характеристик

$$\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_\eta\},$$

где Γ – множество эксплуатационно-технических характеристик; γ_η – η -я характеристика; η – число характеристик;

– на уровне элемента s_i необходимо определить последовательность ϵ^{s_i} проведения ПР

$$\epsilon^{s_i} = \langle t_1^{s_i}, t_2^{s_i}, \dots, t_m^{s_i} \rangle,$$

где $t_m^{s_i} > t_2^{s_i} > t_1^{s_i}$ периодичность проведения ПР; m – общее число проверок (контроля), зависящее от конкретного выбранного метода управления ТС и ресурса T элемента.

Смешанная система управления ТС для элементов РТС включает все базовые методы ТО и является комбинацией всех m проверок. В общем случае для РТС, состоящей из S элементов

$$E = \epsilon^{(1)} \times \epsilon^{(2)} \times \dots \times \epsilon^{(s)},$$

где E – комбинация последовательностей ПР.

Результаты исследований

Пусть имеется множество ПР $Q = \{q_n\}$, $n = \overline{1, N}$, выполнение которых обеспечивает управление ТС РТС при эксплуатации по ресурсу достаточное для эффективного применения объекта по назначению и достижению заданного уровня его надежности. При эксплуатации по состоянию с контролем параметров в зависимости от ТС – ξ , установленного с достоверностью d , может быть выбрано любое подмножество ПР $\{q_n\}$. Тогда средние удельные затраты на проведение ТО $R_{уд}$, зависящие от решений, принимаемых с учетом текущего ТС – ξ_0 , запишутся в виде $R_{уд}(\xi_0, d, q_n)$.

Обозначим через $P(\tau, \xi_0, d, q_n)$ – вероятность безотказной работы на заданном интервале времени τ кратному периоду ТО, которая определяется с учетом текущего технического состояния РТС ξ_0 в момент t , установленного с достоверностью d . Тогда критерии, характеризующие методы управления по техническому состоянию, будут формализованы следующим образом: минимум удельных затрат на проведение ПР $R_{уд}(\xi_0, d) = \min_{q_n, n \in N} \{R_{уд}(\xi_0, d, q_n)\}$ при заданной вероятности безотказной работы объекта при эксплуатации по состоянию с контролем параметров $P(\tau, \xi_0, d, q_n) \geq P_{зад}(\tau)$; максимум вероятности безотказной работы объекта $P(\tau, \xi_0, d_n) = \max_{q_n, n \in N} \{P(\tau, \xi_0, d, q_n)\}$ при заданном значении удельных затрат при эксплуатации по состоянию с контролем уровня надежности $R_{уд}(S_0, d, q_n) \leq R_{зад}$.

Классификация методов управления ТС по соответствующим критериям проводилась с учетом конкретизации набора ПР $\{q_n\}$, $n \in N$.

Исходными данными для организации ТО являются: $Q = \{q_n\}$ – объем ПР, проводимых при ТО; $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$ – множество эксплуатационно-технических характеристик объекта; τ – интервал времени между ТО; $\mathcal{E}$ – показатель эффективности, характеризующий метод управления техническим состоянием по наработке. В качестве показателя эффективности предложен коэффициент технического использования, характеризующий долговременное нахождение объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

Модель управления техническим состоянием РТС по наработке (рис. 1) реализует принцип управления по возмущению (входного параметра) $X(t)$, возникающему под действием внешней среды.

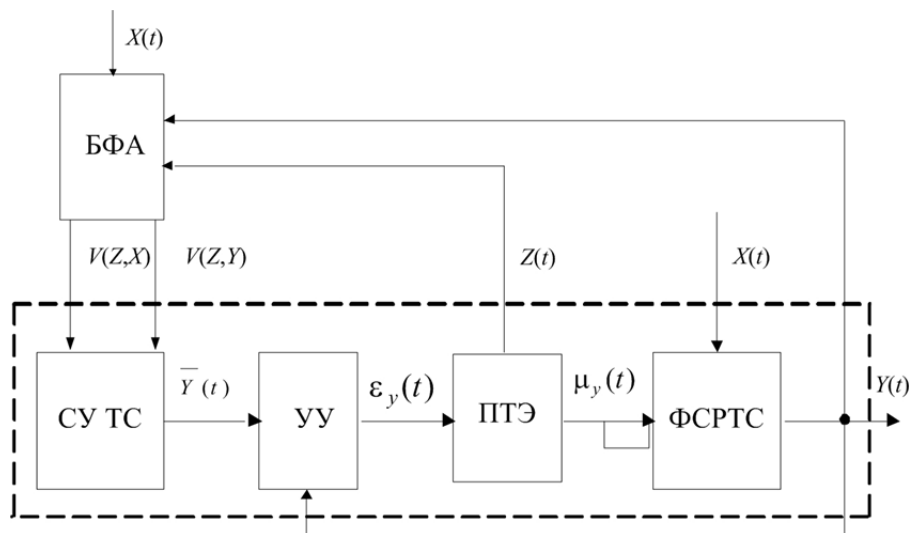


Рис. 1. Модель управления техническим состоянием РТС по наработке

На рис. 1 обозначено: БФА – блок формирования алгоритмов; СУ ТС – система управления ТС; УУ – устройство управления; ОУ – объект управления; ФСРТС – функциональная система РТС; ПТЭ – процесс технической эксплуатации. По разомкнутой схеме управления производится ТО, основанное на выполнении постоянных объемов ПР через заранее запланированные интервалы календарного времени. Модель управления техническим состоянием РТС с контролем пара-

метров реализует принцип управления по отклонению регулируемой величины (выходного параметра) $Y(t)$, которая сравнивается с задающим воздействием $\bar{Y}(t)$. В зависимости от наблюдаемого отклонения $\varepsilon(t)$ формируется соответствующее управляющее воздействие $\varepsilon_y(t)$ на ПТЭ, а через него и регулирующее $\mu_y(t)$ на объект, которое уменьшает это отклонение. Задача управления техническим состоянием РТС с контролем параметров была сформулирована как задача определения апостериорного закона распределения времени до первого выхода значения вектора определяющего параметра процесса $X(s)$ за пределы допусковой области S_0 относительно наблюдаемой реализации $x^j(t)$, т.е. как задача определения вероятности безотказной работы $P^*(s)$ изделия с номером j до момента $s > t_k$, если до момента t_k включительно его состояние определялось реализацией

$$P^*(s) = P\{X(s) \in S_0 / x^j(t)\}, \quad t_1^j \leq t \leq t_k^j, \quad s \geq t_k.$$

На рис. 1 первый контур схемы, отмеченный штриховыми линиями, функционирует при управлении техническим состоянием РТС по наработке. При управлении техническим состоянием РТС с контролем параметров используется второй контур, включающий БФА, который по измеряемым значениям выходных параметров объекта $Y(t)$ и показателей ПТЭ $Z(t)$ формирует оператор $V(Z, Y)$ или $V(Z, X)$, обеспечивающий изменение алгоритмов управления. На рис. 2 представлена модель управление техническим состоянием РТС с контролем уровня надежности, где объектом управления является сам объект эксплуатации и ПТЭ.

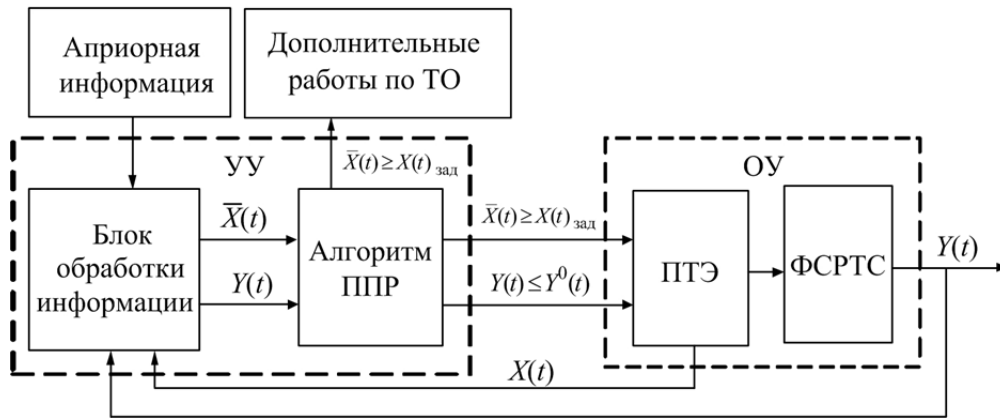


Рис. 2. Модель управление техническим состоянием РТС с контролем уровня надежности

На рис. 2 обозначено: ППР – прогнозирование объема и периодичности ПР.

В качестве регулируемой величины использовались периоды и объем ПР, при которых суммарные затраты $R(E)$ не превышают допустимой величины при заданной вероятности безотказной работы $P(E)$. Цель управления ТС состоит в обеспечении заданного уровня надежности, готовности и эффективности при минимальных затратах на их эксплуатацию. Система показателей эффективности управления ТС представим в виде

$$\Xi(t) = \{C_\Sigma(U, t), K_{\text{ти}}(U, t), W(U, t)\}, \quad (1)$$

где $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ – вектор параметров, обусловленный характеристиками системы ТО; $C_\Sigma(t)$ – суммарные затраты на ТО; $K_{\text{ти}}(t)$ – коэффициент технического использования; $W(t)$ – эффективность применения.

Одним из важных требований, предъявляемым к системе ТО, является ограниченность ресурсов, а именно, суммарных затрат, при неограниченном возрастании времени:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_\Sigma(U, t)}{t} < \infty. \quad (2)$$

Выполнение условия (2) обеспечивается выбором соответствующей стратегии и рациональной организации ТО. В качестве критерия оптимизации управления ТС примем минимум затрат

на ТО при условии выполнения целевых требований по повышению $K_{\text{ТИ}}$ и эффективности применения РТС. Поэтому оптимизация управления ТС возможна, в том числе и за счет определения оптимальной периодичности ТО $T_{\text{ТО}}$ при фиксированных остальных значениях параметров вектора U системы ТО.

Тогда задача определения оптимального периода ТО может быть записана в виде

$$C_{\Sigma}(T_{\text{ТО}}^*, t | U) = \min_{T_{\text{ТО}} \in U} \{C_{\Sigma}(T_{\text{ТО}}, t | U)\} \text{ при } \begin{cases} K_{\text{ТИ}}(T_{\text{ТО}}, t | U) \geq \hat{K}_{\text{ТИ}}; \\ W(T_{\text{ТО}}, t | U) \geq \hat{W}, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{\text{ТО}}^*$ – оптимальный период ТО; $\hat{K}_{\text{ТИ}}$ – заданное значение КТИ; $\hat{W}$ – заданное значение эффективности применения РТС по назначению.

В работах [3, 4] рассмотрен подход к оптимизации периодичности ТО по критерию максимума $K_{\text{ТИ}}$, однако для учета не только временных, но и экономических характеристик системы ТО РТС следует использовать критерий, наиболее полно учитывающий условия (1) и (2). Поэтому в предлагаемом способе в качестве критерия оптимизации выбран минимум относительного непроизводительно расходуемого ресурса $R_{\text{отн}}^*(\tau_i)$ изделия за время τ_i , который позволяет учесть в том числе и суммарные затраты на ТО за время τ_i и определяется по выражению

$$R_{\text{отн}}^*(\tau_i) = \frac{C_0 \cdot \left[\tau_i - \int_0^{\tau_i} P_{\text{пар}}(t) dt \right] + C_{\phi} \cdot \int_0^{\tau_i} P_{\text{пар}}(t) dt + C_o \cdot \left[\tau_i - \int_0^{\tau_i} P_{\text{пар}}(t) dt \right] + C_k \tau_k + C_{\text{п}} \tau_{\text{п}} P_{\text{пар}}(\tau_i) + C_{\text{в}} \tau_{\text{в}} \cdot (1 - P_{\text{пар}}(\tau_i))}{C_k \tau_k + C_{\text{п}} \tau_{\text{п}} P_{\text{пар}}(\tau_i) + C_{\text{в}} \tau_{\text{в}} \cdot (1 - P_{\text{пар}}(\tau_i))}. \quad (4)$$

В этом случае оптимальный период ТО определяется из выражения

$$T_{\text{ТО}}^* = \max \{ \tau_i : R_{\text{отн}}^*(\tau_i) \rightarrow \min \}, \quad (5)$$

где $R_{\text{отн}}^*(\tau_i)$ – затраты относительного непроизводительно расходуемого ресурса изделия за время τ_i ; τ_i – интервалы времени между предполагаемыми ТО изделия $\tau = t_n - t_{n-1}$; C_o – средний расход ресурса изделия в единицу времени при нахождении изделия в состоянии скрытого отказа; C_k – средний расход ресурса изделия в единицу времени при проведении контроля работоспособности изделия; τ_k – среднее время контроля работоспособности изделия; $C_{\text{п}}$ – средний расход ресурса изделия в единицу времени при проведении ТО; $\tau_{\text{п}}$ – среднее время проведения планового ТО; $C_{\text{в}}$ – средний расход ресурса изделия в единицу времени при проведении аварийно-восстановительных работ; $\tau_{\text{в}}$ – среднее время проведения аварийно-восстановительных работ; C_{ϕ} – средний расход ресурса изделия в единицу времени при нахождении изделия в работоспособном состоянии; $P_{\text{пар}}(\tau_i)$ – параметрическая вероятность безотказной работы изделия за время τ_i .

Очевидно, что при решении задачи определения оптимального периода ТО при эксплуатации по состоянию основные затруднения вызывает необходимость определения вероятности безотказной работы РТС. При наличии нескольких независимых определяющих ТС параметров параметрическая вероятность безотказной работы изделия определяется по выражению

$$P_{\text{пар}}(\tau_i) = \prod_{r=1}^M P_r(\tau_i), \quad (6)$$

где M – количество определяющих предельное состояние параметров изделия; $P_r(\tau_i)$ – вероятность невыхода r -го определяющего параметра ТС за пределы допусков в течение прогнозируемого периода τ_i .

Так как на процесс изменения параметра во времени влияет множество различных независимых факторов, то вероятность безотказной работы (невыхода параметра за пределы допуска) изделия по r -му определяющему параметру за время $T = t_n - t_{n-1}$ определяется как

$$P_r(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r^2(T)}} \int_{v_r^H}^{v_r^B} \exp\left\{-\frac{[v_r - \bar{v}_r(T)]^2}{2\sigma_r^2(T)}\right\} dv_r, \quad (7)$$

где t_{n-1} – момент времени проведения последнего измерения определяющего параметра; v_r^B и v_r^H – верхняя и нижняя границы допуска r -го определяющего предельное состояние системы параметра; $\bar{v}_r(t)$ – наиболее адекватная модель r -го определяющего ТС параметра; $\sigma_r^2(t)$ – дисперсия r -го определяющего параметра.

Формирование математических моделей изменения определяющих параметров во времени осуществлялось на основе методов анализа и прогнозирования временных рядов (метод группового учета аргументов, сингулярный спектральный анализ и т.д.) в области полиномов вида

$$v(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i + \sum_{j=2}^n b_j t^{j-1}, \quad i, j \in Z, \quad n \leq n_{\max}, \quad (8)$$

где a_i, b_j – неизвестные коэффициенты; Z – множество натуральных чисел; $n_{\max}$ – установленное значение максимальной степени полинома.

Расчет коэффициентов математических моделей производится на основе обучающей части исходных данных объемом k_o . В качестве критерия адекватности математических моделей изменения определяющих параметров выбрана относительная квадратическая погрешность временного тренда:

$$\Delta_m^2(v) = \frac{\sum_{j=1+k_o}^k (v_{jm} - \tilde{v}_j)^2}{\sum_{j=1+k_o}^k \tilde{v}_j^2}, \quad (9)$$

где $\tilde{v}_j$ – измеренное значение определяющего параметра; v_{jm} – значение определяющего параметра в j -й момент времени, полученное с помощью m -й модели; k – объем исходных данных: $k = k_n + k_o$; k_n – объем проверочной части исходных данных.

Практическая реализация способа предложена на основе адаптивной системы управления техническим состоянием с настраиваемой моделью, представленной на рис. 3.

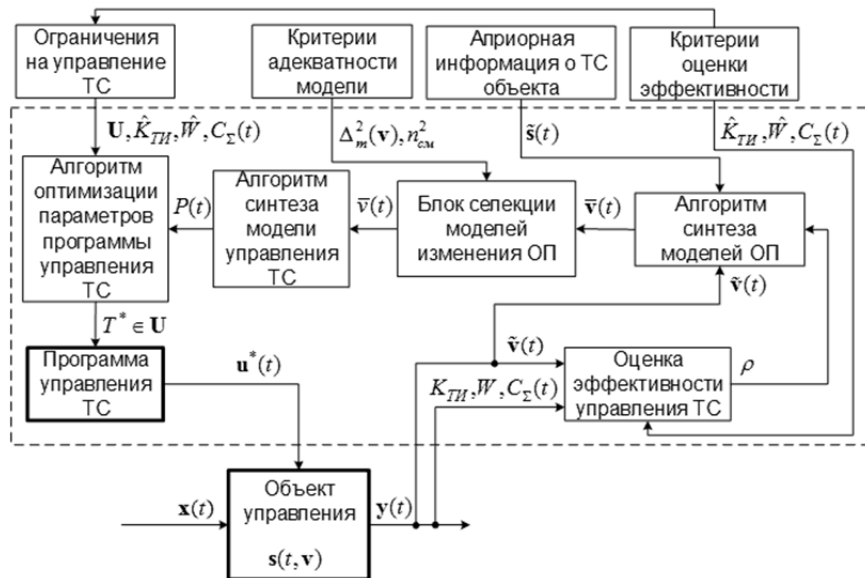


Рис. 3. Структура адаптивной системы управления техническим состоянием

Для оценки влияния эксплуатационно-технических характеристик изделий на эффективность эксплуатации РТС в работе модернизирован метод формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции РТС и устройство для его реализации [5]. Модернизированный метод формирования смешанной системы управления ТС заключается в ранжировании эксплуатационно-технических характеристик с учетом веса w_ψ и пошаговой процедуре выбора метода управления техническим состоянием РТС. Алгоритм выбора метода управления техническим состоянием РТС представлен на рис. 4 и состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Определение принадлежности методу управления ТС – Ω_l свойства $\gamma_{\psi,f}$ характеристики γ_ψ : $\Omega_{l,\psi,f} = \begin{cases} 0, & \text{если } \gamma_{\psi,f} \notin \Omega_l; \\ 1, & \text{если } \gamma_{\psi,f} \in \Omega_l. \end{cases}$

Шаг 2. Определение количества свойств F_ψ характеристики γ_ψ , принадлежащих методу управления ТС Ω_l с учетом w_ψ : $\Omega_{l,\psi} = w_\psi \sum_{f=1}^{F_\psi} \Omega_{l,\psi,f}$.

Шаг 3. Определение общего количества свойств всех характеристик, принадлежащих методу управления ТС Ω_l : $\Omega_l^0 = \sum_{\psi=1}^{\Psi} \Omega_{l,\psi}$.

Шаг 4. Вычисление относительного коэффициента Θ_l : $\Theta_l = \frac{\Omega_l^0}{\Xi}$, где $\Xi = \sum_{\psi=1}^{\Psi} F_\psi$.

Шаг 5. Алгоритм выбора наиболее эффективного метода управления техническим состоянием РТС представлен на рис. 4.

$\Omega_{l_3} \Leftrightarrow l_3 = \arg \max_l \Theta_l$.

Γ	w_ψ	$\gamma_{\psi,f}$	Ω_1	Ω_2	Ω_3
γ_1	0,32	γ_{11}	0	1	0
		γ_{12}	1	0	1
		γ_{13}	0	1	1
		3	0,32	0,64	0,64
γ_2	0,5	γ_{21}	1	0	1
		γ_{22}	0	1	1
		2	0,5	0,5	1
γ_3	0,18	γ_{31}	1	0	0
		γ_{32}	0	0	1
		γ_{33}	0	1	0
		3	0,18	0,18	0,18
Сумма $\Sigma = 1$		8	$\Omega_1^0 = 1$	$\Omega_2^0 = 1,32$	$\Omega_3^0 = 1,82$
			$\Theta = 0,125$	$\Theta = 0,165$	$\Theta = 0,227$
Максимум					0,227
l_Θ					3

$$\Omega_{l,\psi,f} = \begin{cases} 0, & \text{если } \gamma_{\psi,f} \notin \Omega_l \\ 1, & \text{если } \gamma_{\psi,f} \in \Omega_l \end{cases}$$

$$\Omega_{l,\psi} = w_\psi \sum_{f=1}^{F_\psi} \Omega_{l,\psi,f}$$

$$\Omega_l^0 = \sum_{\psi=1}^{\Psi} \Omega_{l,\psi}$$

$$\Theta_l = \frac{\Omega_l^0}{\Xi}$$

$$l_\Theta = \max_l \Theta_l$$

$$\Xi = \sum_{\psi=1}^{\Psi} F_\psi$$

Рис. 4. Алгоритм выбора метода управления техническим состоянием РТС

Разработанные метод и устройство, его реализующее, позволяют учитывать свойства характеристик Γ по их уровням $\gamma_{\psi,f}$ и могут быть использованы для выбора периодичности и объема ПР с целью применения смешанной системы управления техническим состоянием РТС. С целью реализации предложенных моделей, алгоритма и метода управления техническим состоянием РТС разработана методика комплексного ТО. Отличительной особенностью методики является комплексный подход к решению задачи технического обслуживания РТС, позволяющий для момента времени, кратному периоду ТО, определить объем ПР за счет применения выбранных ме-

тодов управления ТС и алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, при которых затраты на ТО минимальны, а вероятность безотказной работы не ниже требуемой. Разработанный алгоритм прогнозирования периодичности и объема выполнения ПР при применении метода управления ТС с контролем уровня надежности позволяет определить периодичность ТО элементов РТС $E^* \{ \tau_i^*, i=1, \dots, n \} \subset E$, при котором суммарные затраты $R(E)$ не превышают допустимой величины R_0 , и выполняются условия

$$P^*(E^*) = \max_E \min_t P(E, t),$$

где $t \in [0, T]$, $P(E, t)$ – вероятность безотказной работы РТС.

С помощью рекуррентного уравнения, полученного путем применения принципа оптимальности Беллмана, на каждом этапе вычислений определялась функция $\phi_i(R_i)$ – $\min$ суммарной интенсивности отказов при проведении ПР, решение о проведении которых были приняты на этапах 1, 2, ..., $i-1$ при заданном состоянии затрат R_i :

$$\phi_i(R_i) = \min_{x_i} \frac{1}{x_i} \left[a_i - \phi_{i-1} \left(\frac{R_i - (x_i - 1)r_i}{x_i} \right) \right]. \quad (10)$$

Разработанный алгоритм позволяет определить оптимальный период ТО РТС при применении метода управления ТС с контролем уровня надежности. Программный продукт зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ Роспатента по заявке 2006614190 от 08.12.06 [6].

Разработан алгоритм прогнозирования периодичности и объема выполнения ПР при применении метода управления ТС с контролем параметров [7]. Алгоритм включает следующие этапы: получение с помощью ЭВМ случайной величины с заданным законом распределения для моделирования исследуемого случайного процесса (СП) $Z(t)$ в целом; получение апостериорного СП $Z(y)$, $y \geq t_k$ на основе конкретной реализации $z_j(t)$, $t_1 \leq t \leq t_k$, процесса $Z(t)$.

Обоснован подход, основанный на представлении исследуемого СП $Z(t)$ в виде канонического разложения В. С. Пугачева

$$Z(t) = m(t) + \sum_v V_v \phi_v(t), \quad (11)$$

где $m(t)$ – математическое ожидание (МО) условного СП; $\phi_v(t)$ – неслучайные функции времени, называемые координатными; V_v – случайные коэффициенты, некоррелированные между собой ($M[V_v] = 0$, $M[V_v V_\mu] = 0$, $v \neq \mu$).

Для получения аналитического описания исследуемого СП и воспроизведения множества его реализаций проводились экспериментальные исследования с целью оценки и прогнозирования ТС РТС. На основе результатов исследований разработана комплексная методика ТОРСБН-4Н, структура которой представлена на рис. 5.

В ходе эксперимента проведены измерения прогнозирующих параметров РТС, входящих в состав РСБН-4Н, при проведении ежемесячного технического обслуживания ТО-1 с целью получения оценок вероятностных характеристик и прогнозирования ТС изделий. Проведены анализ результатов измерений прогнозирующих параметров при проведении ТО-1 и проверка о принадлежности их нормальному закону распределения случайных величин. Так, при степени свободы $r = 2$ гипотезу принять нельзя – ($\mu = 6,01$; $\sigma = 2,47$; $\chi^2 = 176,99$). С учетом этого на втором этапе привлекались дополнительные данные по измерениям, проведенным при осуществлении ежемесячного технического обслуживания. Повторная проверка проводилась с использованием критерия χ^2 и оцениванием коэффициентов асимметрии и эксцесса на основании результатов контроля 10 изделий, входящих в состав РСБН-4Н с разной наработкой. Результаты проверки подтвердили гипотезу о нормальности распределения результатов измерений. Для решения задачи прогнозирования ТС изделия на третьем этапе разработан алгоритм, позволяющий учитывать значения конкретной реализации и получать на этой основе реализацию апостериорного СП [8]. Предложенный подход может быть использован для решения других прикладных задач в теории надежности [9, 10].

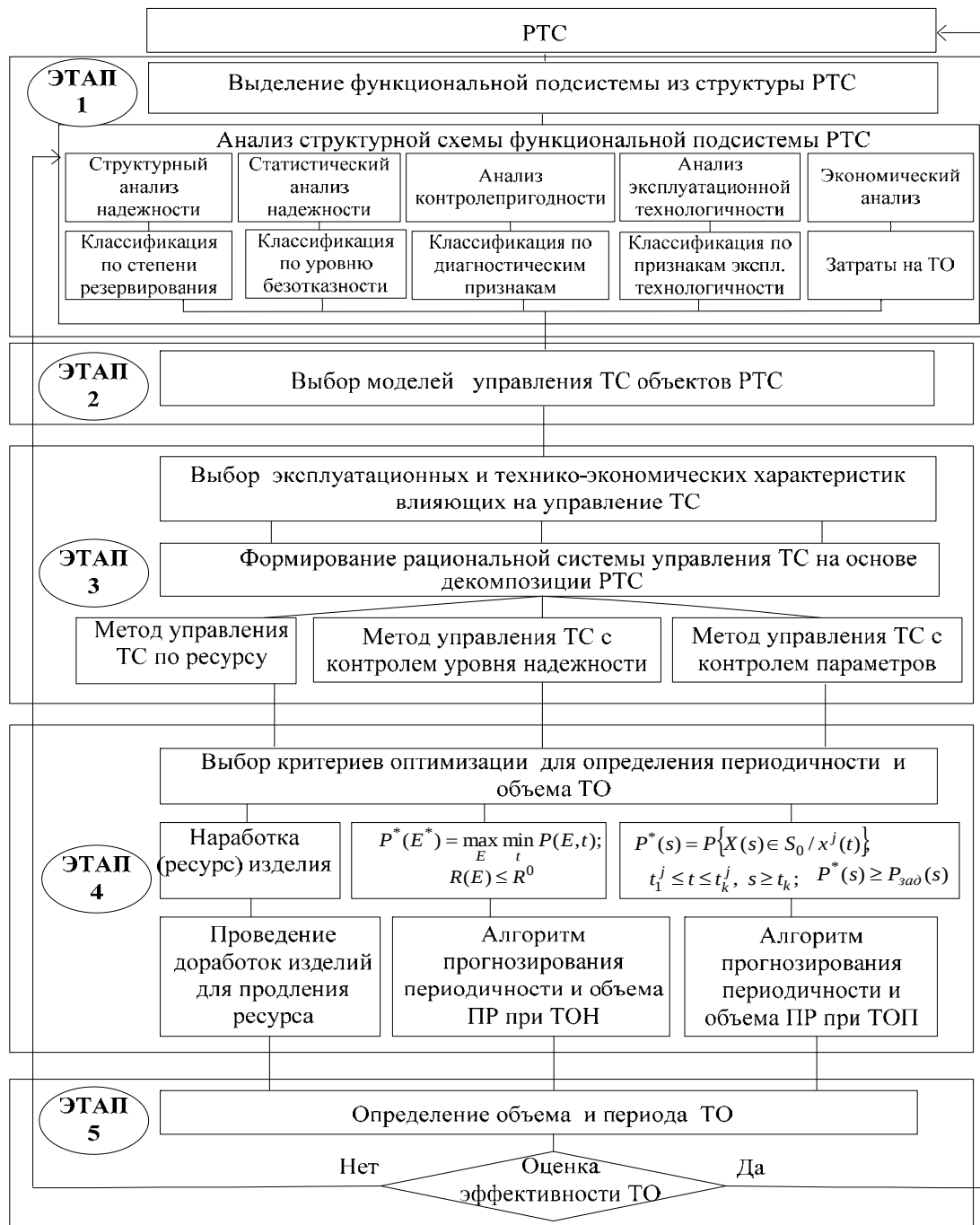


Рис. 5. Смешанная система управления техническим состоянием РТС

Выводы

Таким образом, разработана смешанная система управления техническим состоянием РТС, отличительной особенностью которой является комплексный подход к решению задачи технического обслуживания РТС, позволяющий для момента времени, кратному периоду ТО, определить объем ПР на основе применения выбранных методов управления ТС и алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, при которых затраты на ТО минимальны, а вероятность безотказной работы не ниже требуемой. Основой построения методики служат взаимосвязь моделей управления техническим состоянием РТС, модернизированного метода формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции РТС, алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, апробация и оценка эффективности выполнения ТО.

Библиографический список

1. Лебедев, В. В. Модели технического обслуживания комплексов средств автоматизации : моногр. / В. В. Лебедев, Ю. Т. Зырянов. – Воронеж : Изд-во ВУНЦ ВВС ВВА, 2014. – 99 с.
2. Зырянов, Ю.Т. Планирование профилактики в организационно-технических системах / Ю. Т. Зырянов, К. А. Малыков // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 2. – С. 410–420.
3. Зырянов, Ю. Т. Планирование контроля технического состояния радиотехнических систем / Ю. Т. Зырянов, Д. Н. Ледовских // Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. – Казань : КГТУ им. А. Н. Туполева, 2008. – С. 326–329.
4. Зырянов, Ю. Т. Пути совершенствования технического обслуживания авиационных радиотехнических систем / Ю. Т. Зырянов, К. А. Малыков, Д. Н. Ледовских // Вестник Тамбовского ВВАИУРЭ (ВИ). – 2008. – № 3. – С. 32–40.
5. Пат. 2305640 Российская Федерация, МКИ⁷В60S5/00, G01M17/00. Устройство для оценки влияния функционального состояния конструктивных узлов на безопасность эксплуатации технических средств / Лебедев В. В.; заявитель и патентообладатель Тамбовский ВАИИ. – № 2305640; заявл. 23.06.05; опубл. 10.09.07, Бюл. № 25. – 6 с.
6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2007610585 Российская Федерация. Оптимизация периодичности и объема профилактических работ при планировании и организации технического обслуживания комплексов («ОПОПР – ПОТОК») / В. В. Лебедев, А. Н. Потапов ; заявитель и правообладатель В. В. Лебедев. – № 2006614190; заявл. 08. 12.06; зарег. в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 06.02.07.
7. Лебедев, В. В. Оптимизация методов технического обслуживания радиотехнических систем / В. В. Лебедев, С. Н. Моисеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 14. – С. 178–181.
8. Лебедев, В. В. Алгоритм периодичности планирования и организации технического обслуживания комплексов средств автоматизации / В. В. Лебедев, А. Н. Потапов // Научный вестник МГТУ ГА. Сер.: Радиофизика и радиотехника. – 2007. – № 112 (3). – С. 49–51.
9. Назаров, Д. А. Алгоритм построения гиперпараллелепипедов, вписанных в область работоспособности аналоговых технических систем / Д. А. Назаров, А. В. Саушев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 88–90.
10. Юрков, Н. К. Формирование моделирующей среды авиационного тренажера // Н. К. Юрков, Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 9–16.

Зырянов Юрий Трифонович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования радиоэлектронных
и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный технический
университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: zut-tmb@mail.ru

Лебедев Вадим Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра специального вооружения,
ВУНЦ ВВС «ВВА» имени проф. Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина
(394064, Россия, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, 54 А)
E-mail: ww168@mail.ru

Ледовских Дмитрий Николаевич

старший помощник начальника организации
подготовки научно-педагогических кадров,
ВУНЦ ВВС «ВВА» имени проф. Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина
(394064, Россия, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, 54 А)
E-mail: Dmitry_ledovskikh@mail.ru

Zyryanov Yuri Trifonovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of designing radio-electronic
and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(392000, 106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Lebedev Vadim Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of special weapons,
VUNTS VVS "VVA"
named after prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin
(394064, 54 A Starykh Bol'shevikov street,
Voronezh, Russia)

Ledovskikh Dmitri Nikolaevich

senior assistant chief of training scientific-pedagogical
personnel,
VUNTS VVS "VVA"
named after prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin
(394064, 54 A Starykh Bol'shevikov street,
Voronezh, Russia)

Рязанов Илья Георгиевич

аспирант,
Тамбовский государственный технический
университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: chief.ryazanoff2012@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность.* Существующая организация планирования и управления ТС РТС имеет ряд недостатков: многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на РТС приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации объекты имеют различное фактическое состояние, в связи с чем наработка или календарный срок службы не характеризуют однозначно ТС объекта в процессе эксплуатации; техническое обслуживание при эксплуатации РТС проводится с обязательным совмещением по месту и времени установленных видов ТО одинаковых по наименованию и периодичности, на всех составных частях техники, не учитывая их эксплуатационно-технические характеристики; низкая ремонтпригодность техники, приводящая к значительным затратам на ТО за период эксплуатации; необходимость поддержания показателей боевой готовности РТС на заданном уровне в условиях сокращения материальных, временных и трудовых затрат на ТО. *Цель.* Основная цель работы – разработать смешанную систему управления техническим состоянием (ТС) радиотехнических средств (РТС), отличительной особенностью которой является комплексный подход к решению задачи технического обслуживания (ТО) РТС, позволяющий определить объем профилактических работ (ПР) на основе применения выбранных методов управления ТС и алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, при которых затраты на ТО минимальны, а вероятность безотказной работы не ниже требуемой. *Методы решения.* Математические расчеты проведены с использованием методов теории вероятностей и математической статистики, методов интегрального и дифференциального исчисления, метода анализа иерархий, метода группового учета аргументов, сингулярного спектрального анализа, принципа оптимальности Беллмана. *Результаты.* Обоснован подход, основанный на представлении исследуемого СП $Z(t)$ в виде канонического разложения В. С. Пугачева. Для получения аналитического описания исследуемого СП и воспроизведения множества его реализаций проводились экспериментальные исследования с целью оценки и прогнозирования ТС РТС. На основе результатов исследований разработана комплексная методика ТО РСБН-4Н. В ходе эксперимента проведены измерения прогнозирующих параметров РТС, входящих в состав РСБН-4Н, при проведении ежемесячного технического обслуживания ТО-1 с целью получения оценок вероятностных характеристик и прогнозирования ТС изделий. Проведены анализ результатов измерений прогнозирующих параметров при прове-

Ryazanov Ilya Georgievich

postgraduate student,
Tambov State Technical University
(392000, 106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Abstract. *Background.* The existing organization of the planning and management of TC RTS has a number of disadvantages: the diversity and the stochastic nature of the impact of operational factors on the RTS lead to the fact that at the same time or the duration of the operation objects have different actual state, in this connection, the operating time or calendar life does not characterize uniquely the TS of the object during operation; maintenance in the operation of RTS is carried out with the obligatory combination of the time and place of the established types of THE same name and frequency, all the composite parts of the equipment without taking into account their operational and technical characteristics; low maintainability of equipment, leading to significant costs for the period of exploitation; the need to maintain the indicators of combat readiness of the RTS at a given level in terms of reducing material, time and labour costs. *Goal.* Main goal: to develop a mixed system of control of technical condition (TC) radio equipment (RTS), the distinctive feature of which is a comprehensive approach to solving the problem of technical maintenance (THAT) of the RTS to determine the scope of preventive maintenance (OL) through the application of selected methods of management of the vehicle and algorithms to predict the frequency and scope of PR in which the expense is minimal and the probability of failure is not lower than required. *Methods of solution.* Mathematical calculations are carried out using methods of probability theory and mathematical statistics, methods of integral and differential calculus, the analytic hierarchy process, method of group account of arguments, singular spectrum analysis, principle of optimality of Bellman. *Results.* It justifies the approach based on representation of the studied SP $Z(t)$ in the form of canonical decomposition V. S. Pugachev. To obtain an analytical description of the investigated SP and reproduction of many of his implementations were carried out experimental investigations to assess and predict TC RTS. Based on the results of the research developed a comprehensive methodology THE RSBN-4N. The experiment measured the prediction parameters of the RTS, members of the RSBN-4N, when performing monthly maintenance, IT-1, with the purpose of obtaining estimations of probability characteristics and prediction of TC products. The analysis of the measurement results of the prediction parameters during TM-1 and check on the backgrounds of their normal law of distribution of random variables. So, when the degrees of freedom $r=2$ hypothesis can not be accepted – (; $\chi^2=176,99$). With this in mind, the second stage involved additional data on measurements carried out in conducting monthly maintenance. The re-inspection was performed using the χ^2 criterion and by evaluation of skewness and kurtosis

дении ТО-1 и проверка о принадлежности их нормальному закону распределения случайных величин. Так, при степени свободы $r = 2$ гипотезу принять нельзя – ($\mu = 6,01$; $\sigma = 2,47$; $\chi^2 = 176,99$).

С учетом этого на втором этапе привлекались дополнительные данные по измерениям, проведенным при проведении ежемесячного технического обслуживания. Повторная проверка проводилась с использованием критерия χ^2 и оцениванием коэффициентов асимметрии и эксцесса на основании результатов контроля 10 изделий, входящих в состав РСБН-4Н с разной наработкой. Результаты проверки подтвердили гипотезу о нормальности распределения результатов измерений. Для решения задачи прогнозирования ТС изделия на третьем этапе разработан алгоритм, позволяющий учитывать значения конкретной реализации и получать на этой основе реализацию апостериорного СП. *Выводы.* Разработана смешанная система управления техническим состоянием РТС, отличительной особенностью которой является комплексный подход к решению задачи технического обслуживания РТС, позволяющий для момента времени, кратного периоду ТО, определить объем ПР на основе применения выбранных методов управления ТС и алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, при которых затраты на ТО минимальны, а вероятность безотказной работы не ниже требуемой. Основой построения методики служат взаимосвязь моделей управления техническим состоянием РТС, модернизированного метода формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции РТС, алгоритмов прогнозирования периодичности и объема ПР, апробация и оценка эффективности выполнения ТО.

Ключевые слова: смешанная система ТС РТС, оптимальный период ТО, эксплуатационно-технические характеристики.

based on the results of the 10 products included in the RSBN-4N with different operating time. The test results confirmed the hypothesis of normality of the distribution of measurement results. To solve the problem of predicting the TC of the product in the third stage of the algorithm, allowing to consider values of a particular implementation and to obtain on this basis the implementation of the a posteriori SP. Conclusions. Developed a mixed system of the technical state of RTS, the distinctive feature of which is a comprehensive approach to solving the problem of maintenance of RTS that allows for point-in-time multiple of the period, to define the scope of PR through the application of selected methods of management of the vehicle and algorithms to predict the frequency and scope of PR in which the expense is minimal and the probability of failure is not lower than required. The basis of constructing methods are the relationship between management models of the technical state of RTS, the modernized method of forming a mixed system of management of the vehicle based on the decomposition of RTS, algorithms to predict the frequency and scope of PR, test, and evaluate.

Key words: combined system TS RTS, the optimal period of THE performance parameters.

УДК 519.2

Зырянов, Ю. Т.

Об одном подходе к формированию смешанной системы управления техническим состоянием радиотехнических средств / Ю. Т. Зырянов, В. В. Лебедев, Д. Н. Ледовских, И. Г. Рязанов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 49–59. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-8.

УЧЕТ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ИМИТАТОРЕ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ РАДИОВЫСОТОМЕРОВ

А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. В. Гусев,
Д. Ж. Нагашибаев, А. А. Иофин

Введение

Для надежной всепогодной навигации летательных аппаратов (ЛА) применяют различные бортовые радиолокационные системы (БРЛС). Например, для измерения высоты полета ЛА относительно подстилающей поверхности используют радиовысотомеры (РВ).

Для качественной предполетной проверки функционирования БРЛС и РВ, в том числе при взаимодействии с другим бортовым оборудованием, могут использоваться комплексы полунатурного моделирования (ПНМ) или имитаторы отраженного сигнала. Для современных БРЛС и РВ характерно использование сложных видов модуляции с переменными или случайными параметрами, поэтому для корректной имитации при сохранении когерентности формируемого сигнала необходима адаптация работы имитаторов к параметрам излучаемого сигнала.

Основная часть

Один из вариантов построения имитаторов отраженных «эхо-сигналов» основан на выполнении непрерывного преобразования зондирующего СВЧ-сигнала с антенны передатчика БРЛС или РВ в некоторый отраженный сигнал, подаваемый на антенну приемного устройства, с учетом имитации движения ЛА по заданной траектории над имитируемой поверхностью. Подключение к БРЛС или РВ возможно с использованием пар приемо-передающих антенн (в том числе в безэховой камере), а также для повышения точности и исключения излучений, непосредственно СВЧ-кабелями.

Для возможности быстрого и точного управления параметрами имитации необходимо использовать методы цифровой обработки сигналов (ЦОС). Тогда для имитации отражения от точечной цели (для БРЛС) или зеркального отражения от подстилающей поверхности (для РВ) эквивалентность формируемого СВЧ-сигнала может быть обеспечена при выполнении следующих основных преобразований:

- 1) перенос зондирующего сигнала в область низких частот (в рабочую зону Найквиста – полосу работы аналого-цифрового преобразователя АЦП) и его оцифровка (с частотой дискретизации не менее удвоенной ширины полосы частот сигнала);
- 2) переменная задержка для имитации заданной переменной дальности (высоты для РВ);
- 3) переменное ослабление сигнала для имитации затухания в соответствии с дальностью распространения и типом отражающей поверхности;
- 4) для имитации эффектов доплеровского смещения частоты реализуется возможность переменного сдвига частоты (или фазы) формируемого сигнала;
- 5) цифроаналоговое преобразование (ЦАП) полученного сигнала и его перенос в исходную область СВЧ.

Пункты 2–4 для точечного (зеркального) отражателя могут быть выполнены в произвольном порядке, пункт 3 может быть распределен и частично реализован с помощью аналоговых аттенуаторов до выполнения АЦП и/или после выполнения ЦАП.

Для многоточечных (распределенных по площади или объему) целей в зависимости от сложности дальностного и/или доплеровского портрета цели все или часть пунктов 2–4 могут быть реализованы для каждого точечного отражателя, а затем просуммированы. При этом возможны варианты экономии аппаратных ресурсов за счет временного разделения и совмещения ряда преобразований [1].

Для имитации доплеровского смещения частоты при ЦОС (пункт 4) сигнал предварительно должен быть разделен на квадратурные составляющие (возможные методы: квадратурный гетеродин, преобразователь Гильберта и др.).

Имитация переменной задержки может быть реализована на основе «цифровой сигнальной памяти» (digital signal memory – DSM), которая может содержать набор одинаковых последовательных ячеек задержки либо быть реализована в виде буфера *FIFO*-типа (*First Input – First Output*) в оперативной памяти устройства обработки сигнала.

Для построения имитатора эхо-сигнала по описанному принципу для пунктов 1–5 можно использовать отдельные микросхемы либо выбрать комплексное решение – «систему на кристалле», например специализированную СБИС 1879ВМЗ(DSM) от ЗАО НТЦ «Модуль», г. Москва. С использованием этой СБИС, размещенной на инструментальном модуле МС23.01 [2], в 2000-х гг. разработаны ретрансляционные имитаторы отраженных сигналов для бортовых радиовысотомеров, работающих в диапазоне частот 4200–4400 МГц; ИЦ-БСУ и ИОС-РВ [3, 4]. Они позволяют имитировать переменную высоту полета ЛА путем изменения ослабления, задержки и доплеровского сдвига формируемого «отраженного» сигнала.

По результатам исследований, несмотря на невысокую эффективную разрядность двух АЦП (работающих с тактовой частотой до 600 МГц в составе СБИС 1879ВМЗ), характеристики ИОС-РВ позволяют работать с различными серийными бортовыми РВ, включая РВ с импульсным и непрерывным линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом в диапазоне высот до 24 км и вертикальных скоростях до 1500 м/с, в том числе при имитации отражений от протяженных (многоточечных) целей [1, 3].

Поскольку линия задержки представляет собой *FIFO*-буфер заданной целочисленной длины, то возникает характерная дискретность имитации дальности (высоты для РВ). При блочной потоковой обработке дискретность может увеличиться в 2–4–8 раз в зависимости от шага адресных счетчиков. Для образца ИОС-РВ фактический дискрет по высоте составил $\Delta H \approx 2,3$ м (до 2,0 м при максимальной тактовой частоте ЦОС 600 МГц).

Второй важный для тестирования радиовысотомеров параметр – минимальная имитируемая высота, составила порядка 14 м. Это значение минимальной имитируемой высоты для типовых «следающих» (с переменной длительностью периода модуляции, зависящей от высоты) и неследающих ЛЧМ РВ может быть уменьшено практически до 0 при применении метода дополнительного сдвига частоты формируемого сигнала [4].

Отсутствие функции суммирования сигналов для имитации многоточечных и протяженных целей может быть компенсировано использованием программной коммутации аппаратных сигнальных каналов (всего их восемь в каждой СБИС 1879ВМЗ) [3, 5] и/или одновременным применением до четырех модулей МС23.01 в составе одного ИОС-РВ.

Однако модуль МС-23.01 и СБИС 1879ВМЗ сняты с поставок их разработчиком [2]. Поэтому для работы с произвольными зондирующими сигналами и потенциальной возможностью имитации более сложных условий отражения (от сложных рельефных подстилающих поверхностей) для различных типов радиовысотомерных и радиолокационных систем была предложена структура имитатора ИОС-РВМ с «вариативным» принципом формирования величины задержки сигнала [6]. Для реализации функций ЦОС использована система на кристалле XC7Z045 семейства Zynq-7000 AP SoC (*All-Programmable System on Chip*), включающая двухъядерный процессор ARM CORTEXA9 1 ГГц и программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) семейства Kintex-7.

Испытания первых версий программного обеспечения (ПО) имитатора ИОС-РВМ показали предварительные возможности ЦОС и линии задержки на ПЛИС: дискрет линий задержки (ЛЗ) соответствует $\Delta H \approx 0,6$ м, минимальная имитируемая высота без использования сдвига частоты – около 65 м. Значение минимальной высоты обусловлено достаточно большой собственной задержкой алгоритмов квадратурной ЦОС в ИОС-РВМ. Поэтому для имитации малых высот до 65 м, в текущей версии ПО используется метод положительного сдвига частоты входного сигнала. Этот метод эффективен для РВ с несимметричной ЛЧМ (НЛЧМ) при известной зависимости крутизны ЛЧМ сигнала от высоты (рис. 1).

Для снижения минимальной имитируемой высоты и компенсации собственной задержки в любой аппаратной реализации возможно использование сдвига частоты: РВ с НЛЧМ будет регистрировать эквивалентную малую высоту, если при формировании сигнала выполнить дополнительный частотный сдвиг в сторону «сближающую» на измерительном участке графики $f_{\text{излуч}}(t)$ и $f_{\text{форм}}(t)$. Для разных периодов модуляции: $T_{M1} < T_{M2}$ на рис. 1, требуется разный дополнительный частотный сдвиг $F_{sh1} > F_{sh2}$.

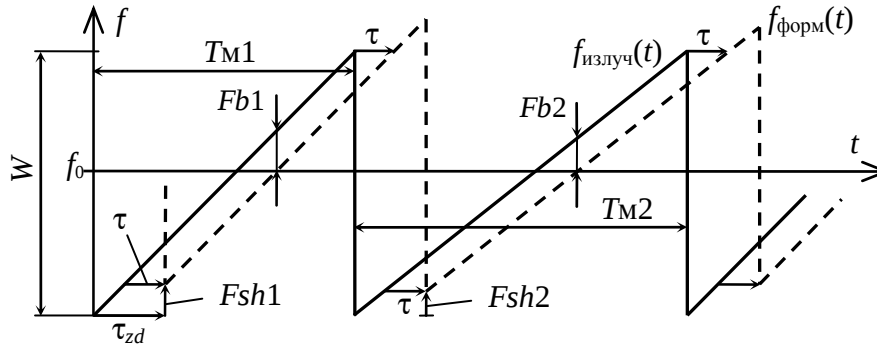


Рис. 1. Имитация эквивалентных малых высот при несимметричной ЛЧМ при переменном периоде модуляции

Разностная частота на выходе смесителя РВ, называемая частотой биений, является разностью частот двух сигналов: излучаемого и отраженного: $f(t) = f_{\text{излуч}}(t) - f_{\text{форм}}(t)$. При несимметричной нарастающей силе ЛЧМ в основной части измерительного участка (исключая участки скачкообразного изменения параметров модуляции $f_{\text{излуч}}(t)$, $f_{\text{форм}}(t)$) в установившемся режиме слежения должно обеспечиваться

$$f(t) = Fb \approx Fo = \text{const}, \quad (1)$$

где Fb – текущее значение разностной частоты – частоты биений в основной части измерительного интервала; Fo – переходная частота частотного дискриминатора РВ (стабилизируемая частота биений).

Видно, что положительный сдвиг частоты Fsh для сигнала, задержанного на τ_{zd} (здесь индекс zd означает «нулевую» задержку “zerodelay”), приведет к уменьшению значения частоты биений Fb и соответственно к уменьшению измеряемой высоты, вычисляемой в РВ:

$$H_T = \frac{cFb}{2W} T_M - H_c, \quad (2)$$

где H_T – текущая измеренная высота РВ; T_M – текущее значение рабочего хода (периода) модуляции; W – девиация частоты излучаемых радиоволн; c – скорость распространения радиоволн; H_c – высота компенсации остаточной высоты РВ (для учета внутренних задержек и используемых кабелей для соединения РВ с антеннами).

Для адаптации к сигналу и расчета требуемого сдвига частоты Fsh от требуемой имитируемой высоты H при известной переходной частоте частотного дискриминатора, можно использовать следующую аналитическую зависимость, верную для «слеющих за высотой» типов РВ:

$$Fsh = \frac{Hzd - H}{Hc + H} Fo, \quad (3)$$

где Hzd – высота, соответствующая задержке τ_{zd} (zd – “zerodelay”); H – имитируемая (заданная) высота РВ.

Для учета сдвига Доплера за счет вертикального движения ЛА выражение (3) для несимметричной нарастающей ЛЧМ требуется дополнить известным «доплеровским сдвигом частоты» равным $2V_y/\lambda$. Тогда получим

$$Fsh = \frac{Hzd - H}{Hc + H} Fo - \frac{2V_y}{\lambda}, \quad (4)$$

где V_y – имитируемая скорость движения ЛА вдоль вертикали (при снижении значение скорости V_y отрицательное); λ – средняя длина волны излучения РВ.

Для корректного формирования отраженного сигнала для ЛЧМ РВ с переменными параметрами, без априорной информации о стабилизируемой частоте биений выражения (3)–(4) не подходят, так как значение Fo точно неизвестно.

Кроме того, описанный метод недостаточно эффективен для ЛЧМ РВ, у которых имеется вобуляция длительности периода модуляции, так как измеренная в РВ высота должна обрабатываться и усредняться для получаемых разных частот сигналов биений: $Fo1 > Fo2$ для рис. 1. При большом несоответствии частоты сигнала биений такой сигнал может не попасть в требуемый диапазон частот фильтров частотного дискриминатора, что приведет к переходу такого РВ в режим «поиска» сигнала.

Поэтому необходима синхронизация работы имитатора либо по дополнительному сигналу от РВ (с текущим значением Fo), либо путем косвенной оценки текущего значения Fo по получаемому СВЧ сигналу.

Одним из таких параметров является скорость линейного изменения частоты зондирующего сигнала V_f :

$$V_f = W/T_M. \quad (5)$$

Во многих современных РВ с ЛЧМ для повышения помехоустойчивости работы может варьироваться и знак, и значение скорости линейного изменения частоты даже при постоянном значении высоты.

Непосредственное измерение текущих значений W и T_M возможно, однако даже в случае применения сигнальных процессоров результат измерения станет известен по окончании текущего периода модуляции.

Но оценка скорости линейного изменения частоты зондирующего сигнала возможна и по более коротким интервалам времени:

$$V_f = \Delta f / \Delta t, \quad (6)$$

где Δf – измеренное изменение частоты зондирующего сигнала за интервал времени Δt (внутри рабочего хода модуляции).

Тогда из (4), (6) с учетом вертикальной скорости можно получить

$$Fsh \approx \frac{2}{c} V_f (H_{zd} - H) - \frac{2V_y}{\lambda} = \frac{2 \Delta f}{c \Delta t} (H_{zd} - H) - \frac{2V_y}{\lambda}. \quad (7)$$

Подставляя $\lambda = c/f_0 \approx c/f$, где f_0 – средняя частота зондирующего сигнала, а f – мгновенная частота ЛЧМ сигнала, получим

$$Fsh = \frac{2}{c} \left(\frac{\Delta f}{\Delta t} (H_{zd} - H) - V_y f \right). \quad (8)$$

Ситуация корректного формирования сигнала приведена на рис. 1. Значения $Fb1 > Fb2$ (так как $Fo1 > Fo2$, а $Fb1 \approx Fo1$ и $Fb2 \approx Fo2$), и главное, что $\tau = \text{const}$, что и нужно для корректной работы РВ в режиме слежения.

Таким образом, на высотах $H < H_{zd}$ для корректной работы имитатора с реализацией независимого определения параметров линейной частотной модуляции необходимо знать текущие значения скорости линейного изменения частоты $V_f = \Delta f / \Delta t$, заданные значения высоты H и вертикальной скорости V_y , а также значение высоты H_{zd} , которая соответствует минимальной собственной задержке в имитаторе τ_{zd} . Значение частоты $f \approx f_0$ для РВ известно с достаточной степенью точности: порядка $\pm 2\%$ для серийных ЛЧМ РВ диапазона 4300 МГц.

Вариант схемы ретрансляционного имитатора для реализации алгоритма формирования СВЧ сигнала, отраженного от точечной цели, приведен на рис. 2. Входной $A(t)$ и выходной $X(t)$ аналоговые сигналы проходят аттенюаторы А1-А2, смесители См1-См2 и полосовые фильтры Ф с полосой 1200 ± 100 МГц. Блоки, выделенные штриховой линией, реализуются программно в ПО процессора ARM CORTEXA9.

На схеме E_0 – сигнал управления затуханием (определяется при автокалибровке) в аттенюаторе А1; $E_{ЭПР}$ – переменный сигнал управления затуханием в аттенюаторе А2 (соответствует ЭПР отражающей поверхности/цели, а также учитывает величину ослабления во всех цепях имитатора и в радиотракте, включая E_0); Δa – блок контроля работы FIFO.

Средняя и нижняя часть схемы реализуют вариативный метод изменения задержки [6], для этого в основе схемы ЦОС присутствует двухпортовая (для одновременных операций записи и считывания) память выборок в ОЗУ, которая позволяет реализовать *FIFO*-буфер для задержки сигнала на разность циклических адресов с двух формирователей адресов ФА: записи $a_{\text{зап}}$ и считывания $a_{\text{сч}}$. Если в блоке сравнения $\Delta a = (a_{\text{зап}} - a_{\text{сч}})$ не соответствует $n\text{Delay} = \text{round}((H - H_{\text{зд}})/\Delta H)$, где $\Delta H = c/2Ft \approx 0,6$ м, H – заданная высота, то блок прямого цифрового синтеза DDS3 изменяет тактовую частоту работы квадратурного модулятора и ЦАП.

Для уменьшения тактовой частоты ЦОС и для получения возможности квадратурной обработки после АЦП применен сдвиг частоты на величину $F_{down} = \text{const} = 1200$ МГц: реализован в квадратурном демодуляторе. Обратное повышение частоты реализовано аналогично в квадратурном модуляторе. При этом в квадратурном модуляторе реализована возможность внести дополнительный переменный сдвиг частоты с помощью квадратурного гармонического сигнала с DDS4: для имитации малых высот и для имитации доплеровского сдвига частоты: $F_{up} = F_{down} + Fsh$.

Для учета возможного, встречающегося в практике, более сложного случая недостаточно высокого отношения сигнал/шум и для РВ с переменной (одной из двух) крутизной ЛЧМ сигнала (см. рис. 1), где фактически стабилизируется либо 1-я либо 2-я частота сигнала биений, для расчета требуемого сдвига частоты можно использовать выражение (4), как и для РВ с одной известной стабилизируемой частотой биений.

На рис. 3 приведен пример имитации простой траектории снижения ЛА в области высот 65 м.

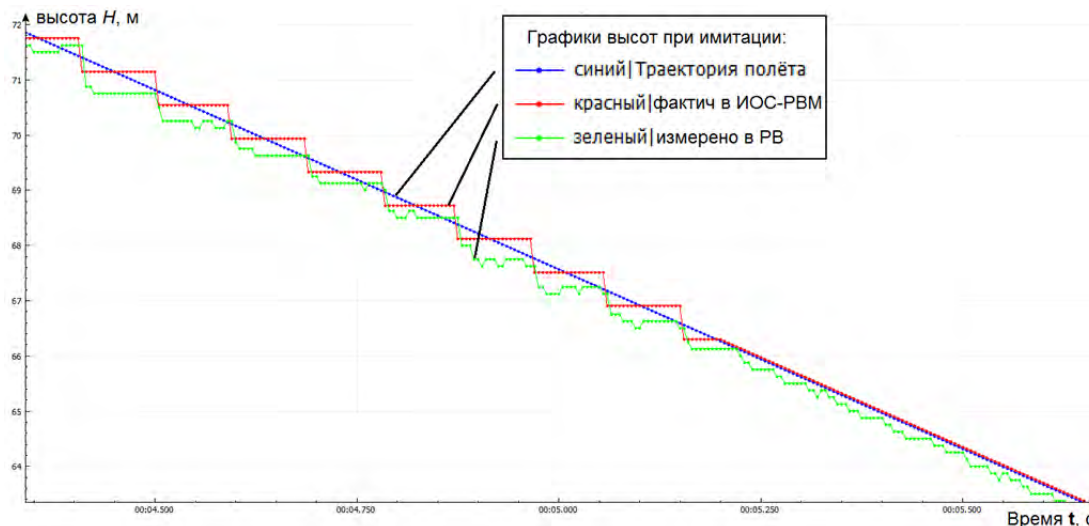


Рис. 3. Пример графика траектории при имитации снижения ЛА

Здесь не задействовано плавное изменение задержки в соответствии с вариативным методом (при включении все графики практически совпадают). Поэтому на рис. 3 зеленый график измеренной в РВ высоты «повторяет» ступеньки высоты, заданной в ИОС-РВМ.

На высотах менее 65 м дискретная ошибка задания высоты ΔH отсутствует, так как выполняется компенсация собственной задержки с использованием сдвига частоты по выражению (8).

Пример сигнала биений и сигнала измерительного интервала РВ с учетом подстройки — адаптации ИОС-РВМ к переменной крутизне ЛЧМ сигнала РВ показан на рис. 4. Видно, что в двух соседних периодах модуляции частоты сигнала биений отличаются, имеется задержка появления сигнала биений, вызванная частично временем анализа (оценка + усреднение) и реакции ИОС-РВМ на изменение крутизны ЛЧМ зондирующего сигнала от РВ.

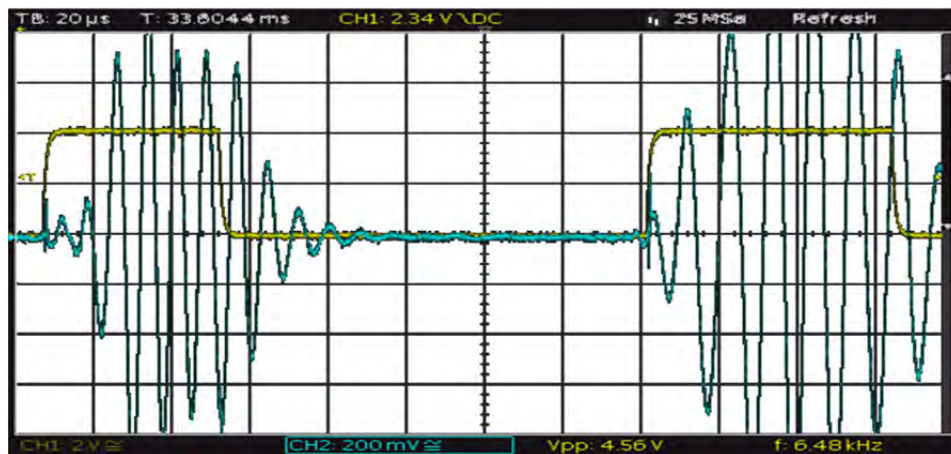


Рис. 4. Осциллограмма сигнала биений и сигнала измерительного интервала РВ

Заключение

Только при ретрансляционном методе имитации с уточнением параметров модуляции могут быть автоматически учтены изменения амплитуд, фаз и длительностей сигналов конкретного радиопередатчика реальной БРЛС для формирования когерентного эхо-сигнала.

В соответствии с выражением (8) для корректной работы имитатора сигнала для РВ с ЛЧМ необходимо знать текущие значения скорости ЛЧМ $V_f = \Delta f / \Delta t$, заданные значения высоты H и вертикальной скорости V_y , а также значение высоты H_{zd} , которая уточняется экспериментально и соответствует минимальной собственной задержке в имитаторе τ_{zd} .

Для реализации адаптации к параметрам излучаемого сигнала радиовысотомера значение крутизны ЛЧМ сигнала $\Delta f / \Delta t$ определяется по известным методам ЦОС и схемным решениям по

квадратурным составляющим сигнала [7] в специальном «ЦОС-детекторе» параметров модуляции, который позволяет выполнить синхронное изменение параметров преобразования и формирования сигнала, имитирующего отражение от точечной или распределенной цели или поверхности.

Библиографический список

1. Пат. № 2568899 РФ Имитатор радиолокационной цели при зондировании преимущественно длительными сигналами / Боков А. С., Важенин В. Г., Дядьков Н. А., Мухин В. В., Щербаков Д. Е., Пономарев Л. И. – Опул. в Б. И., 2015. – № 32. – 10 с. – URL: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty=29&docid=2568899> (дата обращения 31.03.2017).
2. Инструментальный модуль MC23.01. – URL: https://www.module.ru/catalog/micro/instrument_23/ (дата обращения 07.04.2017).
3. Возможности исследования точностных характеристик бортовых радиовысотомерных систем на базе имитатора отраженных сигналов / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 86–93.
4. Экспериментальное исследование полунатурного моделирования радиолокационного канала / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3 (11). – С. 91–98.
5. Пат. № 2486540 РФ Имитатор ложной радиолокационной цели при зондировании сигналами с линейной частотной модуляцией / Боков А. С., Важенин В. Г., Дядьков Н. А., Мухин В. В., Щербаков Д. Е., Пономарев Л. И. – Опул. в Б. И., 2013. – № 18. – 13 с. – URL: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty=29&docid=2486540> (дата обращения 31.03.2017).
6. Пат. № 2522502 РФ Имитатор сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой / Валов С. В., Сиротин А. И., Щербаков С. В. Дата приоритета: 10.12.2012. – URL: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty=29&docid=2522502> (дата обращения 07.04.2017).
7. Юрков, Н. К. Системный анализ проблем управления процессом повышения радиолокационного контраста / Н. К. Юрков // Радиовысотометрия – 2013 : тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. Каменск-Уральский ; Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2013. – С. 324–328.

Боков Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

Важенин Владимир Григорьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: v.g.vazhenin@urfu.ru

Гусев Андрей Викторович

старший преподаватель, ведущий инженер,
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.v.gusev@urfu.ru

Bokov Alexander Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics of information systems,
Institute of Radioelectronics and Information Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Vazhenin Vladimir Grigor'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics of information systems,
Institute of Radioelectronics and Information Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Gusev Andrey Victorovich

senior teacher, principal engineer,
sub-department of radio electronics of information systems,
Institute of Radioelectronics and Information Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Нагашибаев Дмитрий Жубатканович

начальник отдела,
АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: dmitriy.nagashibaev@gmail.com

Иофин Александр Аронович

кандидат технических наук,
заместитель главного конструктора,
АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: tehdep630@yandex.ru

Аннотация. Для проверки бортовых радиовысотомеров с применением сложных видов модуляции зондирующих сигналов имитатор отраженных сигналов в ряде случаев должен подстраивать некоторые параметры формирования эхо-сигнала в реальном масштабе времени. Предложенный имитатор позволяет проводить проверку характеристик радиовысотомеров, включая СВЧ-тракт, алгоритмы обработки сигнала и измерения высоты до имитируемой подстилающей поверхности (на примере точечного отражателя). При экспериментальном исследовании показано, что имитатор в режиме реального времени может преобразовать копию зондирующего сигнала в сигнал с переменными задержкой, затуханием и доплеровским сдвигом частоты с автоматической адаптацией к переменной крутизне линейной частотной модуляции и амплитуде сигнала только по самому излучаемому сигналу.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, линейная частотная модуляция, бортовой радиовысотомер, цифровая сигнальная память, цифровая обработка сигналов.

Nagashibaev Dmitry Zhubatkanovich

head of department,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,
Sverdlovsk Region, Russia)

Iofin Alexander Aronovich

candidate of technical sciences, deputy chief designer,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,
Sverdlovsk Region, Russia)

Abstract. To test onboard radio altimeters, which use complex types of probing signal modulation, the reflected signal simulator in some cases should adjust some echo formation parameters in real time. The proposed simulator makes it possible to conduct an end-to-end test of an operation of radar altimeters, including microwave parts, signal processing algorithms of measuring aircraft altitude above simulated underlying surface (with example of a point reflector). Experimental study of the simulator showed that the simulator can convert a probing signal copy into a signal with variable delay, attenuation and Doppler frequency shift with automatic adaptation to the slope of a linear frequency modulation and to the signal amplitude by using only probing altimeter signal.

Key words: seminatural modeling, chirp, linear frequency modulation, onboard altimeter, digital signal memory, digital signal processing.

УДК 629.7.058.42, 621.396.96

Учет переменных параметров линейной частотной модуляции в имитаторе отраженных сигналов для радиовысотомеров / А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. В. Гусев, Д. Ж. Нагашибаев, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 60–67. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-9.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ПОГРЕШНОСТЕЙ СКОРОСТНОГО КАНАЛА
КОМБИНИРОВАННОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО
ИЗМЕРИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛА,
ЗАПИСАННОГО ПРИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ¹**

Н. Н. Калмыков, С. А. Мельников, Д. П. Седов, А. В. Васильева

КРИ обеспечивает измерение геометрической высоты (H), вертикальной скорости (V_y) и продольной и боковой составляющих вектора путевой скорости полета объекта (V_x , V_z соответственно).

В основу работы высотомерного канала КРИ положен импульсный радиолокационный метод измерения высоты со статистической обработкой отраженных сигналов посредством микропроцессорного блока обработки сигналов.

Канал корреляционного измерителя составляющих вектора путевой скорости встроен в канал импульсного радиовысотомера. По максимуму взаимно-корреляционных функций (ВКФ) сигналов, принятых на разнесенные по корпусу антенны, определяется временной сдвиг и, учитывая геометрию антенной системы, вычисляются составляющие вектора путевой скорости [1].

Какими бы совершенными не были средства разработки, вопрос об отладке и испытаниях аппаратуры в условиях наиболее приближенных к реальным эксплуатационным остается актуальным.

Целью работы является проработка методов использования реального сигнала, полученного в ходе летных испытаний, для анализа скоростного канала КРИ.

Для записи отраженного от подстилающей поверхности сигнала в условиях автономных летных испытаний КРИ используется специализированное устройство записи сигнала – блок сохранения информации (БСИ).

БСИ встраивается в КРИ, имеет объем памяти порядка 8 Гб, что позволяет производить запись данных, необходимых для анализа работы его скоростного канала. Функциональная схема БСИ приведена на рис. 1.

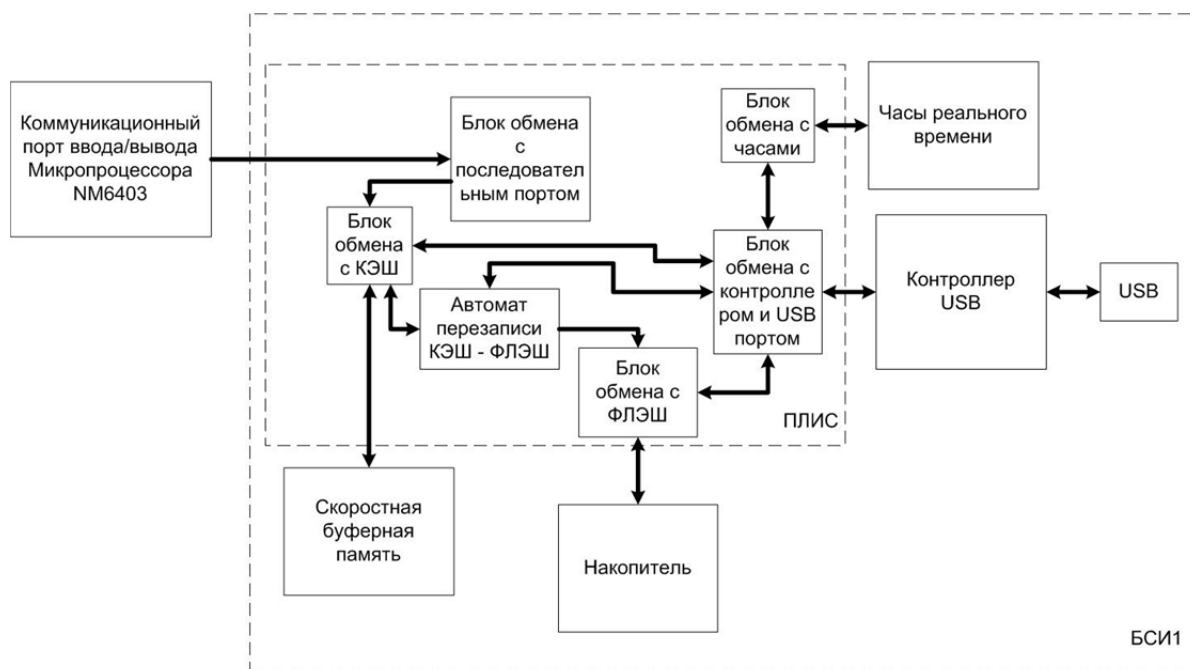


Рис. 1. Функциональная схема БСИ

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.2538.2017/4.6).

В состав БСИ входят следующие блоки:

- ПЛИС;
- контроллер USB;
- часы реального времени;
- накопитель;
- скоростная буферная память.

Накопитель представляет собой энергонезависимую память. Он предназначен для хранения данных, получаемых от КРИ. Накопитель состоит из четырех банков, каждый из которых состоит из четырех микросхем объемом 512 Мб. Такая организация накопителя позволяет осуществлять параллельную запись в четыре банка, что значительно ускоряет процесс записи.

Для управления системой и обеспечения связи с ПК был использован микроконтроллер со встроенным USB-интерфейсом. Микроконтроллер является центральным управляющим звеном ячейки. Он работает по заданной программе, следовательно, алгоритм работы контроллера определяет алгоритм работы всей ячейки. Это дает возможность изменять логику работы ячейки без вмешательства в ее аппаратную реализацию. Использование USB-интерфейса позволяет получить высокую скорость обмена данными между устройством и ПК.

В БСИ предусмотрены часы реального времени, которые позволяют на этапе обработки полученной информации осуществить синхронизацию данных с данными, полученными от других приборов регистрации.

Основным требованием, которое должно соблюдаться при осуществлении сопряжения БСИ с КРИ, является обеспечение штатного функционирования изделия без существенного ухудшения его динамических характеристик.

Массив данных, передаваемый в БСИ за один сеанс, должен представлять собой непрерывную область памяти объемом 8 Кб, содержимое которой не изменяется до окончания процесса передачи. Вместе с тем данные, предназначенные для передачи, становятся доступными на различных по времени этапах обработки сигнала, и некоторые из них не сохраняют своих значений к моменту окончания обработки. В связи с этим память, выделенная под массив, разбита на две страницы – одна из них в данный момент времени формируется, другая передается, затем производится переключение страниц.

Для осуществления обмена данными между ПК и БСИ было разработано программное обеспечение (ПО), интерфейс которого представлен на рис. 2. Данное ПО позволяет:

- производить считывание таблицы файлов, хранящихся в накопителе;
- установить системное время;
- произвести очистку накопителя;
- произвести считывание выбранного файла.

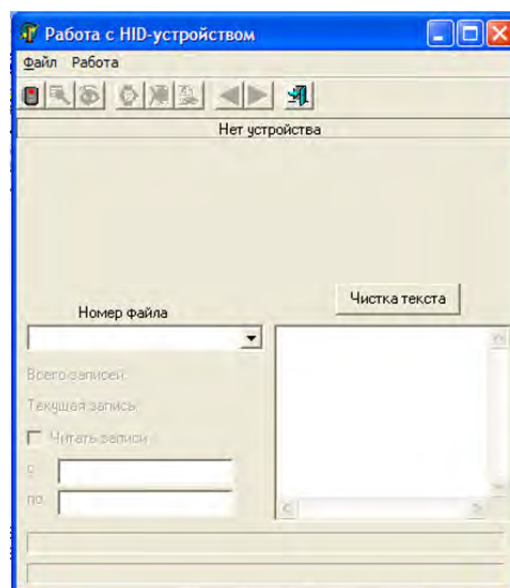


Рис. 2. Интерфейс ПО для работы с БСИ

Для просмотра данных, записанных ячейкой БСИ в ходе летных испытаний, разработано программное обеспечение, отображающее параметры функционирования КРИ и сигналы, отраженные от подстилающей поверхности, как в текстовом, так и в графическом представлении (рис. 3).

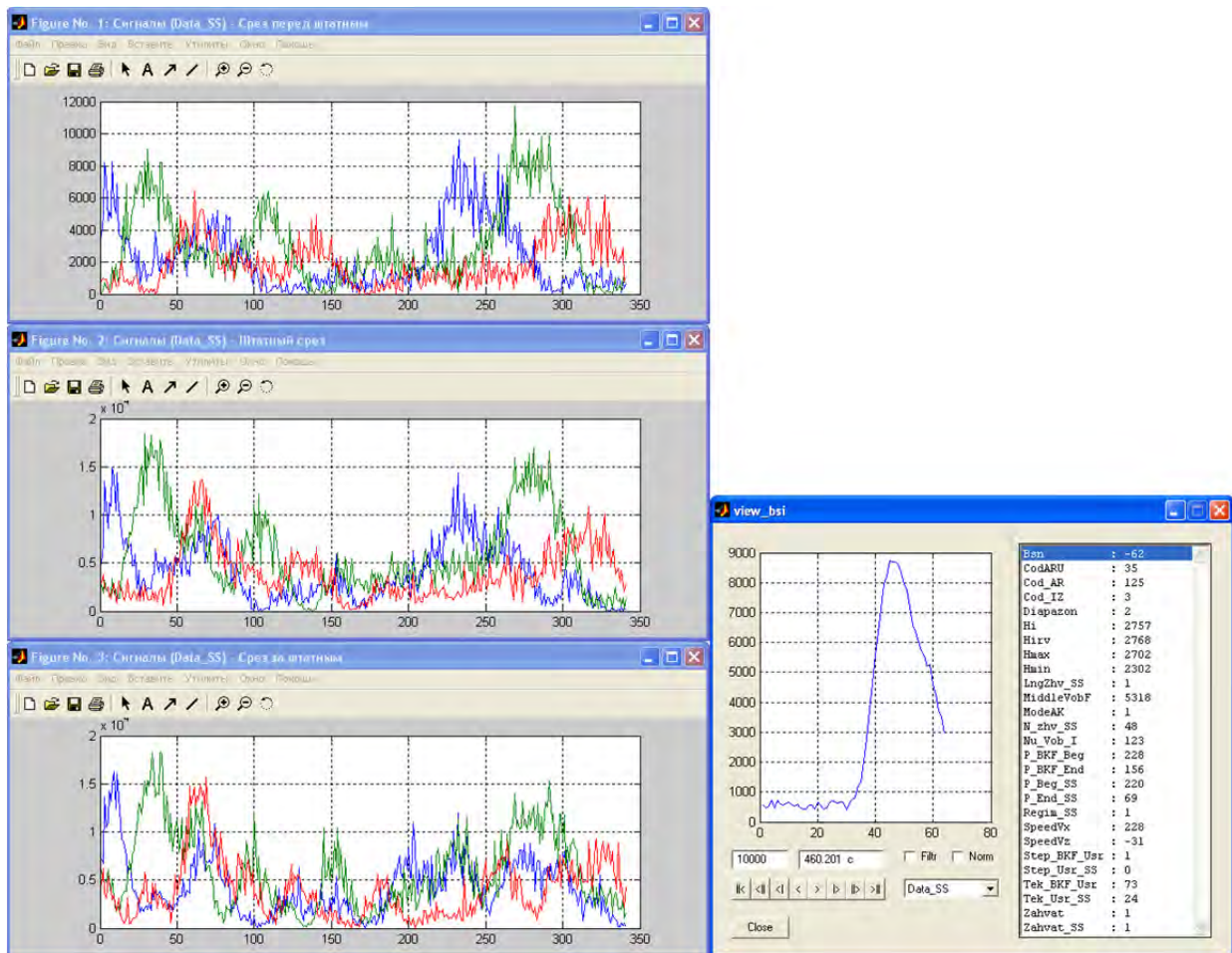


Рис. 3. Интерфейс программы визуализации

В основном окне (справа) отображается результат усреднения отраженного сигнала вертикального канала, номер массива, системное время и значения параметров функционирования изделия (программных переменных). Имеются кнопки, с помощью которых можно осуществлять навигацию, просматривая по выбору каждый массив или с шагом 20 или 400 массивов. Кроме того, имеется возможность перейти к первому или последнему массиву записанных данных.

Помимо основного окна, имеются три дополнительных графических окна (слева), в которых могут отображаться по выбору сигналы скоростного канала или их квадратуры (с фазами 0 и $\pi/2$), мгновенные взаимно-корреляционные функции (ВКФ), построенные по данным сигналам, усредненные ВКФ, записанные в процессе летных испытаний, и т.п.

Для определения транспортных задержек τ_1 и τ_2 вычисляются взаимные корреляционные функции F_{12} между сигналами, принятыми 1-й и 2-й антеннами, и F_{23} между сигналами, принятыми 2-й и 3-й антеннами:

$$F_{12\ k} = \frac{1}{256} \left(\frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{1\ 8+i} \cdot u_{2\ k+i} - \left(\frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{1\ 8+i} \right) \left(\frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{2\ k+i} \right) \right),$$

$$F_{23\ k} = \frac{1}{256} \left(\frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{2\ 8+i} \cdot u_{3\ k+i} - \left(\frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{2\ 8+i} \right) \left(\frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{3\ k+i} \right) \right),$$

где $k = 0 \dots 63$.

Измерение составляющих вектора скорости с погрешностью, заданной в ТЗ, требует точного определения положения максимумов ВКФ. Для этой цели производится аппроксимация ВКФ параболой методом наименьших квадратов с использованием треугольной весовой функции.

Геометрия антенной системы, а именно: взаимное расположение излучающей и приемных антенн, дает формулы для вычисления составляющих вектора скорости и угла сноса

$$V_x = \frac{\tau_1 + \tau_2}{X_0} \cdot \frac{2}{\left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{Y_0}\right)^2}, \quad (1)$$

$$V_z = \frac{\tau_2 - \tau_1}{Y_0} \cdot \frac{2}{\left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{Y_0}\right)^2}, \quad (2)$$

$$\beta_{\text{сн}} = \text{arctg} \left(\frac{X_0}{Y_0} \cdot \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \right), \quad (3)$$

где X_0, Y_0 – параметры антенной системы.

БСИ на этапе автономных летных испытаний позволяет сократить количество полетов самолета, требуемых для отработки скоростного канала КРИ, так как полученные данные можно использовать для отработки математической модели и программного обеспечения КРИ в лабораторных условиях [2–4].

С помощью математической модели для обработки реальных сигналов, записанных в ходе летных испытаний на самолете Як-52, был получен ответ на ряд вопросов, возникших в процессе разработки КРИ:

- положение «сигнального» строга при полете над сушей не оказывает существенного влияния на точность измерения составляющих вектора скорости;
- усреднение ВКФ и последующая аппроксимация усредненных ВКФ квадратичной функцией для определения транспортных задержек между сигналами дает меньшие погрешности, чем способ обработки, подразумевающий получение по мгновенным ВКФ оценок транспортных задержек с последующим их усреднением;
- мгновенные ВКФ имеют разброс по ширине, уровню и положению максимума, а форма их существенно искажена. Усредненные ВКФ, построенные на их основе, имеет приемлемую для аппроксимации форму и стабильны от пакета к пакету зондирующих импульсов;
- метод усреднения ВКФ, подразумевающий адаптацию количества усреднений к мощности флюктуаций отраженного от подстилающей поверхности сигнала, обеспечивает стабильное сопровождение сигнала скоростного канала без снятия исправности.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что использование реального сигнала, записанного в ходе натурных испытаний, позволяет исследовать возможности КРИ, определить источники погрешностей и выработать решения, позволяющие повысить точность измерения параметров.

Библиографический список

1. Боркус, М. К. Корреляционные измерители путевой скорости и угла сноса летательных аппаратов / М. К. Боркус, А. Е. Черный. – М. : Сов. радио, 1973. – 169 с.
2. Полунатурное моделирование бортовых радиолокационных систем, работающих по земной поверхности : учеб. пособие / В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. С. Боков, А. К. Сорокин, Ю. В. Марков, Л. Л. Лесная ; под общ. ред. В. Г. Важенина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 208 с.
3. Полунатурное моделирование радиолокационного канала с переменными параметрами / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т 1. – С. 125–129.
4. Имитация коррелированных сигналов, рассеянных протяженной поверхностью / В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, Н. Н. Калмыков, А. В. Васильева, С. А. Мельников, Ю. С. Тимошенкова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 129–132.

Калмыков Николай Николаевич

заместитель главного конструктора по направлению,
АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: solovjev@nexcom.ru

Мельников Сергей Андреевич

ведущий конструктор,
АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: solovjev@nexcom.ru

Седов Дмитрий Петрович

ведущий инженер,
АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: solovjev@nexcom.ru

Васильева Анна Валерьевна

инженер-конструктор,
АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: solovjev@nexcom.ru

Аннотация. Показана возможность создания системы записи радиолокационного сигнала в процессе летных испытаний. Приведена функциональная схема записывающей аппаратуры, показан принцип ее действия и программное обеспечение для обработки данных. Указаны основные выражения для вычисления параметров движения. Сохраненный в процессе испытаний сигнал в дальнейшем используется для отработки алгоритмов функционирования прибора. Это позволило выявить источники дополнительных погрешностей КРИ и выработать пути их устранения.

Ключевые слова: радиовысотомер, испытания, программное обеспечение.

Kalmykov Nikolai Nikolaevich

deputy chief designer in the direction,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street,
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

Melnikov Sergey Andreevich

leading designer,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street,
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

Sedov Dmitriy Petrovich

leading engineer,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street,
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

Vasilyeva Anna Valeryevna

engineer-designer,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street,
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

Abstract. The article shows the possibility of creating a system for recording a radar signal in the flight tests. The functional scheme of the recording equipment is given, the principle of its operation and the software for data processing are shown. The main expressions for calculating motion parameters are indicated. The signal stored in the process of experiment is subsequently used for testing the algorithms for the functioning of the device. This allowed us to identify sources of additional errors in the device and work out ways of eliminating them.

Key words: radio altimeter, experiment, software.

УДК 629.7.058.42

Калмыков, Н. Н.

Исследование причин возникновения погрешностей скоростного канала комбинированного радиотехнического измерителя с использованием сигнала, записанного при натурных испытаниях / Н. Н. Калмыков, С. А. Мельников, Д. П. Седов, А. В. Васильева // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 68–72. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-10.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ В ДИНАМИЧЕСКИХ МИКРОСХЕМАХ ПАМЯТИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

К. И. Хомутов, А. А. Шегал, А. А. Иофин, В. Э. Иванов

Введение

Хорошо известно, что для исследования поведения сложных объектов в условиях воздействия внешней среды широко используются методы математического или натурного моделирования [1–3]. В предлагаемой работе при изучении особенностей хранения информации в динамических микросхемах памяти, на основе которых реализуется оперативная память компьютера (ДБИС ОЗУ) [4], применяется программное обеспечение Matlab/Simulink. Пакет Simulink является составной частью системы моделирования MATLAB и поставляется вместе с ней. Основа его работы – принципы визуально ориентированного программирования с использованием моделей, представленных в виде блоков, структурированных по разделам библиотеки [5].

Поставим задачу: с помощью специализированных блоков Simulink построить модель байтовой ячейки динамической памяти, работающей в условиях естественного радиационного фона и провести сравнительный анализ помехоустойчивости хранения данных при отсутствии и использовании избыточного кода Хемминга [6].

Влияние альфа-частиц на надежность хранения информации в ОЗУ

Динамические микросхемы памяти обладают следующими особенностями:

- запоминающим элементом (ЗЭ) ДБИС ОЗУ является конденсатор C_3 , образованный поликремниевой областью канального транзистора (рис. 1) [7]. Под этой областью создается потенциальная яма, которая пуста при хранении «1» и заполнена электронами при хранении «0»;
- ограниченное время хранения заряда запоминающим элементом. Через интервал времени, равный периоду регенерации $t_{\text{рег}}$, информацию, хранимую в ЗЭ, необходимо восстанавливать (регенерировать). Наличие дефекта вызывает ток утечки, который может разрядить запоминающую емкость за время, меньшее $t_{\text{рег}}$, что приведет к потере информации [4, 7, 8].

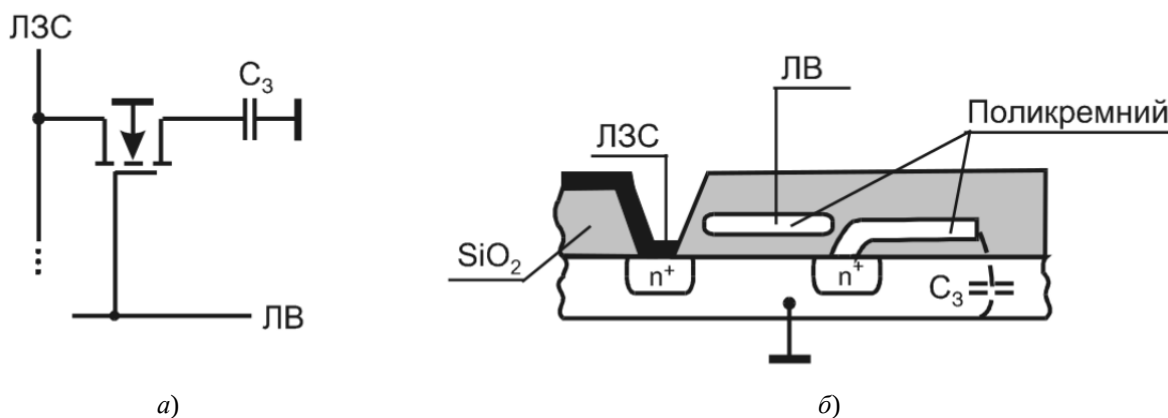


Рис. 1. Схема ячейки динамического ОЗУ:

а – эквивалентная схема; б – МОП-структура: ЛВ – линии выборки; ЛЗС – линии записи-считывания

Содержащиеся в керамических корпусах микросхем остатки урана и тория излучают альфа-частицы [9, 10]. Попадания альфа-частиц в ЗЭ и разрядную шину выбранного ЗЭ вызывают переход логического состояния «1» в «0». Попадания альфа-частиц в невыбранные разрядные шины и ЗЭ приводят к переходу логического «0» в «1». Попадания альфа-частиц в усилители считывания и схемы управления являются источниками сбоев обоих типов: перехода логического состояния «1» в «0» и логического «0» в «1».

Для исправления ошибок хранения информации в ДБИС ОЗУ широко используются специальные корректирующие коды Хемминга, обнаруживающие и исправляющие однобитовые ошибки в n -разрядных словах [6]. Так, для 8-разрядного слова информации требуется четыре дополнительных контрольных бита (табл. 1).

Таблица 1

Распределение разрядов 12-битного слова

Номер бита	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Бит данных	D ₈	D ₇	D ₆	D ₅		D ₄	D ₃	D ₂		D ₁		
Контр.биты					P ₈				P ₄		P ₂	P ₁

Контрольные биты определяются по правилам, представленным формулой

$$P1=D1 \oplus D2 \oplus D4 \oplus D5 \oplus D7 ;$$

$$P2=D1 \oplus D3 \oplus D4 \oplus D6 \oplus D7 ;$$

$$P4=D2 \oplus D3 \oplus D4 \oplus D8 ;$$

$$P8=D5 \oplus D6 \oplus D7 \oplus D8 ,$$

где $\oplus$ – поразрядная логическая операция «исключающее или».

Процедура моделирования. На основе данных [3, 4, 7–10] в среде моделирования MATLAB/Simulink разработана имитационная модель битовой ячейки ДБИС ОЗУ, а также собрана байтовая ячейка памяти 8x1, защищенная избыточным кодом Хемминга.

В разработанной модели битовой ячейки ДБИС ОЗУ (рис. 2) используются типовые блоки пакета Simulink: логические блоки: И,ИЛИ, НЕ; памяти, порты ввода и вывода, триггерный блок. Модель имеет входы WL (линия выборки) и BL (линия записи), выход (OUT) работает как продолжение ЛЗС, через него осуществляется чтение бита. Наличие триггера, обозначенного Cs1, определяет модель как квазидинамическую ячейку, поскольку хранение данных зависит от изменения состояния триггера, а разряд конденсатора во время хранения не учитывается.

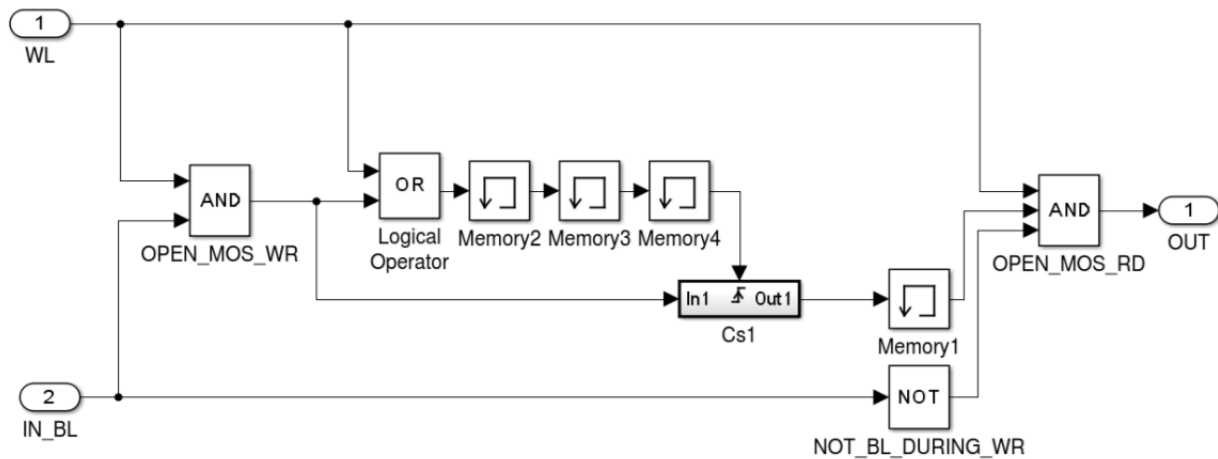


Рис. 2. Модель битовой динамической ячейки памяти

Также были построены следующие модели:

– битовая ячейка с возможностью принудительной записи нуля или единицы при подаче импульса на входы ERR0 и ERR1. Так моделируется пролет альфа-частицы через каждую битовую ячейку;

– усилитель считывания, который представляет собой триггер, реагирующий на импульс, поступающий при чтении содержимого битовой ячейки. По стробу OE осуществляется защелкивание значения считанного бита;

– блок REFRESH, реализующий восстановление записанного в ячейке памяти бита после операции чтения. В общей схеме эксперимента этот блок помещается между генератором управляющих сигналов (RAS, WE, выбор строки WL) и ячейкой памяти. Схемы перечисленных выше

устройств объединены с помощью блока Subsystem в отдельные макроблоки: BitCell, SA и REFRESH, на основе которых собрана структура 8-разрядной ячейки динамического ОЗУ (рис. 3);

– генератор ошибок, имитирующий воздействие альфа частиц (рис. 4). Схема выполнена на основе библиотечного блока генератора случайной бинарной последовательности с распределением Бернулли [11]. Для распределения Бернулли задается вероятность p – неоявления альфа частицы (событие «0»), соответственно, вероятность появления альфа частицы равна $(1-p)$, где $0 \leq p \leq 1$. Также используются 16 блоков Unbuffer, с помощью которых реализуется возможность появления ошибки в любом бите 16-разрядного слова, эмулированного в эксперименте. Поскольку для моделируемой 8-разрядной ячейки требуется четыре дополнительных контрольных бита (см. табл. 1) в модели генератора ошибок используются четыре заглушки (Terminator);

– генератор управляющих сигналов, в котором управляющие сигналы реализуются блоком Signal Builder (рис. 5). В модели используется только одна байтовая ячейка, поэтому можно обойтись без строба выбора столбца. По переднему фронту сигнала регистрации ошибки (EDS) выявляется несоответствие считанного и записанного битов данных. При проведении эксперимента количество несоответствий суммируется и определяется общее количество выявленных ошибок.

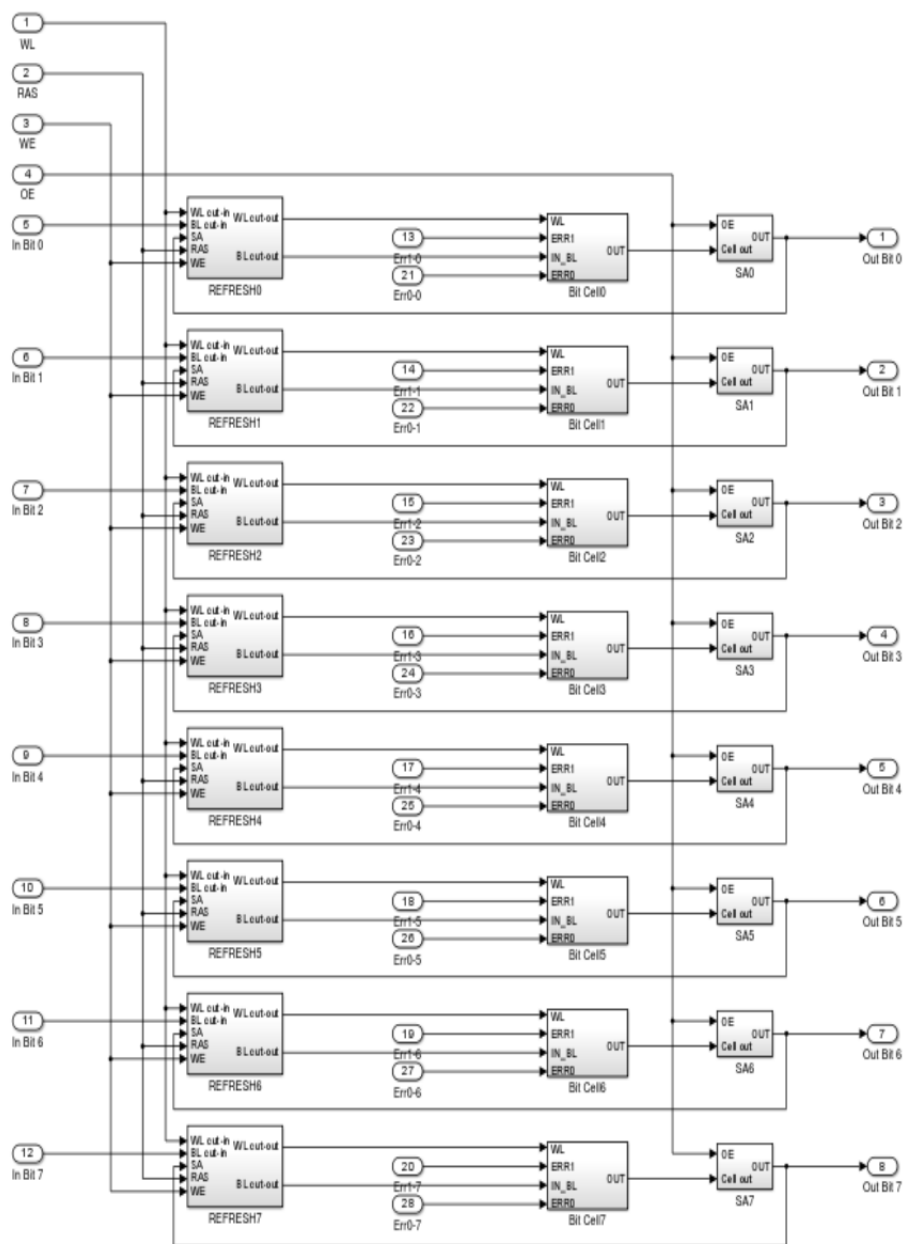


Рис. 3. Модель байтовой ячейки динамической памяти


```

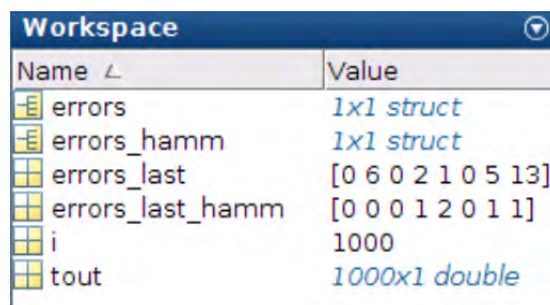
errors = [0 0]; % Обнуление массивов ошибок
errors_hamm = [0 0];
set_param('test_final/IN_bit0', 'Value', '1');%входные данные
set_param('test_final/IN_bit1', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit2', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit3', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit4', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit5', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit6', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit7', 'Value', '1');
% проверяем код 11111111b, отключаем генератор ложных единиц
set_param('test_final/Bernoulli Binary Generator1','P','1');
% устанавливаем вероятность появления ошибок в генераторе ложных нулей
set_param('test_final/Bernoulli Binary Generator0','P','0.99999');
for i = 1:1000% одна тысяча опытов
% запуск моделирования
set_param('test_final', 'SimulationCommand', 'start');
i% вывод номера текущего опыта в консоль MATLAB
pause(2);% задержка в 2 сек. – гарантия выполнения текущего опыта
end

```

Рис. 6. Текст *m*-файла для запуска эксперимента

Использовались следующие параметры моделирования: время моделирования – 1 мкс, шаг моделирования – 1 нс.

После проведения 1000 опытов получены результаты моделирования в виде вектора ошибок в рабочей области Simulink – Workspace (рис. 7).



Name	Value
errors	1x1 struct
errors_hamm	1x1 struct
errors_last	[0 6 0 2 1 0 5 13]
errors_last_hamm	[0 0 0 1 2 0 1 1]
i	1000
tout	1000x1 double

Рис. 7. Результаты моделирования

Каждый элемент вектора – сумма накопленных несоответствий между записанным и считанным битом по всему эксперименту. В векторе errors фиксируются ошибки хранения 8-разрядного слова без применения кода Хэмминга, в переменной errors_hamm – накопленные ошибки хранения с применением помехозащищенного кодирования. Поскольку коды Хэмминга позволяют исправлять одиночные ошибки, в векторе errors_last_hamm представлены ошибки большей разрядности. Полученный результат позволяет судить об эффективности применения кода Хэмминга в системах хранения информации: количество ошибок в векторе errors last в 5,4 раза превышает количество ошибок, накопленное в векторе errors last_hamm.

Выводы и рекомендации. На базе программного комплекса Matlab/Simulink впервые построена модель ячейки динамической памяти на фоне естественного радиационного излучения и исследовано влияние помехоустойчивого кода Хемминга на надежность хранения информации. Предлагаемая модель может быть использована для исследования работы тестов, контролирующей работу ОЗУ, а также изучения влияния повышенного радиационного фона, особенно в космическом пространстве на надежность работы динамических микросхем памяти.

Библиографический список

1. Острейковский, В. А. Теория систем : учебник / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 1997. – 240 с.
2. Полтавский, А. В. Концепция принятия решений при создании сложных технических систем / А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 8–12.

3. Чаусов, М. В. Учебная модель функционирования статического оперативного запоминающего устройства / М. В. Чаусов, С. С. Смирнов, С. М. Чаусова // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2010. – № 2 (22). – URL: <https://www.isuct.ru/e-publ/snt/sites/ru.epubl.snt/files/2010/>
4. Столингс, У. Структурная организация и архитектура компьютерных систем : пер. с англ. / У. Столингс. – 5-е изд. – М. : Вильямс, 2002. – 896 с.
5. Дьяконов, В. П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 976 с.
6. Орлов, С. А. Организация ЭВМ и систем : учебник для вузов / С. А. Орлов, Б. Я. Цилькер. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2011. – 688 с.
7. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника : учеб. пособие для вузов / Е. П. Угрюмов. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 816 с.
8. SIEMENS HYB 3164(5)800AJ/AT(L) 8Mx8-DRAM Datasheet // Semiconductor Group. – 2009. – URL: <http://pdf.dzsc.com/20090603/200903051124143712.pdf>.
9. Зебрев, Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции / Г. И. Зебрев // НИЯУМИФИ. – 2010. – URL: http://www.researchgate.net/profile/Gennady_Zebrev/publication/268277455_Radiation_Effects_in_Silicon_High_Scaled_Integrated_Circuits_in_Russian/links/
10. Огнев, И. В. Надежность запоминающих устройств / И. В. Огнев, К. Ф. Сарычев. – М. : Радио и связь, 1988. – 454 с.
11. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608с.

Хомутов Константин Игоревич

магистрант,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.a.shegal@urfu.ru

Шегал Анна Айзиковна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.a.shegal@urfu.ru

Иофин Александр Аронович

кандидат технических наук,
заместитель главного конструктора,
АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: tehdep630@yandex.ru

Иванов Вячеслав Элизбарович

доктор технических наук, профессор,
кафедра радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: v.e.ivanov@urfu.ru

Khomutov Konstantin Igorevich

master degree student,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Shegal Anna Ayzikovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics and
communications,
Institute of Radioelectronics and Information
Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Iofin Alexander Aronovich

candidate of technical sciences, deputy chief designer,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street,
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

Ivanov Vyacheslav Elizbarovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of Radio electronics and
communications,
Institute of Radioelectronics and Information
Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Аннотация. Показано, что при изучении особенностей хранения информации в динамических микросхемах памяти, на основе которых реализуется оперативная память компьютера, широко применяется программное обеспечение Matlab/Simulink. Пакет Simulink является составной частью системы моделирования MATLAB и поставляется вместе с ней. Основа его работы – принципы визуально ориентированного программирования с использованием моделей, представленных в виде блоков, структурированных по разделам библиотеки. Решена задача: с помощью специализированных блоков Simulink построить модель байтовой ячейки динамической памяти, работающей в условиях естественного радиационного фона и провести сравнительный анализ помехоустойчивости хранения данных при отсутствии и использовании избыточного кода Хемминга. Впервые построена модель ячейки динамической памяти на фоне естественного радиационного излучения и исследовано влияние помехоустойчивого кода Хемминга на надежность хранения информации. Предлагаемая модель используется для исследования работы тестов, контролирующих работу ОЗУ, а также изучения влияния повышенного радиационного фона, особенно в космическом пространстве на надежность работы динамических микросхем памяти.

Ключевые слова: надежность, моделирование, ячейка динамической памяти, Matlab/Simulink, помехоустойчивое кодирование, радиационный фон.

Abstract. It is shown that, when examining the characteristics of the storage of information in dynamic memory chips based on the sale of computer memory widely used software Matlab/Simulink. Batch Simulink is an integral part of the MATLAB simulation systems and comes along with it. The basis of his work is visually-oriented programming principles using models presented in the form of blocks, structured by sections of the library. The problem with the help of specialized units to build a model cell byte Simulink dynamic memory running under conditions of natural background radiation and a comparative analysis of noise in the absence of data storage and Use redundant code Hamming. First model of dynamic memory cells on natural background radiation and the influence of noise on reliability of Hamming code information. The proposed model is used to study the work of controlling the test work RAM, as well as the impact of elevated radiation levels, especially in outer space on dynamic reliability of memory chips.

Key words: reliability, modeling, dynamicmemory cell, Matlab / Simulink, error – correctional coding, radiation background.

УДК 621.396

Хомутов, К. И.

Моделирование надежности хранения данных в динамических микросхемах памяти в среде Matlab/Simulink / К. И. Хомутов, А. А. Шегал, А. А. Иофин, В. Э. Иванов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 73–79. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-11.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 519.7

DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-12

«РЕЗОНАНС ТОКОВ» И «ВЗРЫВЫ» КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПОЛЯ

В. К. Дедков

Положительный источник гравитационного поля, как неоднократно отмечалось в работах автора, состоит из сверхпроводящего ядра, субъядерной и переходной зоны. Сверхпроводящее ядро – это частица конденсированной материи высокой плотности, не имеющая структуры. Такое состояние материи будем называть «ядерной жидкостью». Ядерная жидкость образуется путем преобразования кинетической энергии упругой однородной, диффузной среды в потенциальную энергию деформации сжатия. Ядерная жидкость создается в ядрах галактик. Звезды, планеты, атомы и другие объекты конденсированной материи возникают путем деления ядерной жидкости и ее последующего разуплотнения.

Свойство «положительности» космические источники поля приобретают путем разуплотнения поверхностных слоев своих ядер, образованных ядерной жидкостью, и «натекания» (смещения) упругой разуплотненной среды в окружающее ядра пространство. Пространство, заполненное разуплотненной средой, истекающей из ядра источника, называется «переходной зоной» космического источника поля. Конвективные силы инерции, возникающие в потоках среды, истекающей из ядер источников поля, предохраняют ядра источников от быстрой (в пределе «мгновенной») аннигиляции ядерной жидкости и превращения ее в диффузную материю (эфир).

Субъядерная зона космического источника поля представляет собой область, заполненную продуктами распада и дезинтеграции его ядра, образующимися в процессе эволюционных преобразований ядерной материи. Субъядерная зона источника поля служит «накопителем» (конденсатором) энергии электрических токов в форме потенциальной энергии деформации сжатия и растяжения диполей, заполняющих субъядерную зону. Она является «электрической емкостью», обеспечивающей как преобразование кинетической энергии токов, текущих через источник поля, в потенциальную энергию деформации среды, так и накопление потенциальной энергии в форме «деформируемых элементов», называемых диполями.

Поскольку космические источники поля любого уровня, начиная со спутников планет и заканчивая галактиками, находятся в переходных зонах космических объектов более высокого уровня, то через их ядра и субъядерные зоны текут конвективными токи, создающие разноименные потенциалы полярных полюсов субъядерных зон этих источников.

Структурная схема положительного космического источника поля, содержащего электрическую емкость (субъядерная зона источника поля) и индуктивность (ядро источника поля), представлена на рис. 1,а, а соответствующая ей принципиальная схема электрической цепи, образованной параллельно «включенными» емкостью и индуктивностью с активным сопротивлением, представлена на рис. 1,б.

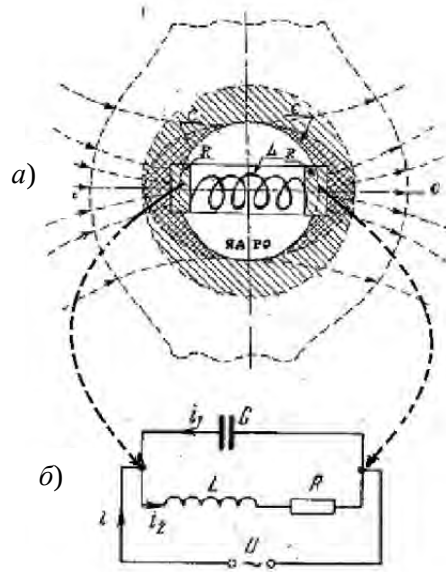


Рис. 1. Схема космического источника поля: а – структурная схема космического источника поля, находящегося в потоке смещения $\vec{u}^{ex}$ среды, «нагруженной» внешним источником поля; б – принципиальная схема (образованная параллельно включенными емкостью (ядром источника) и индуктивностью с активным сопротивлением (субъядерная зона)), электрической цепи тока, проходящего через космический источник поля, находящийся в нагруженной среде

Применим символический метод представления векторных величин напряжений и токов [1], протекающих через ядра и субъядерные зоны космических источников поля. Согласно этому методу умножение вектора на комплексное число $e^{j\varphi} = j$ равнозначно его повороту на угол $\varphi = \pi/2$ против часовой стрелки, а аналогичное умножение на $1/j = -j$ равнозначно повороту вектора на угол $\varphi = \pi/2$ по часовой стрелке [1].

Согласно этому методу внешнее напряжение, приложенное к индуктивности (ядру источника), записывается в следующей форме:

$$\bar{U}_L = L \frac{d\bar{i}}{dt} = L \frac{d}{dt} (I_m e^{j\omega t}) = j\omega L \bar{i}, \quad (1)$$

где $\bar{i} = I_m e^{j\omega t}$ – ток, текущий через индуктивность; I_m – амплитуда тока.

Соответственно, напряжение, приложенное к емкости, в символической записи имеет следующий вид:

$$\bar{U}_C = \frac{1}{j\omega C} I_m e^{j\omega t} = -j \frac{1}{\omega C} \bar{i}. \quad (2)$$

Падение напряжения на активном сопротивлении R равно

$$\bar{U}_R = R \bar{i}. \quad (3)$$

Комплексное сопротивление цепи тока, проходящего через источник поля, имеет следующий вид:

$$\bar{Z} = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = R + jX. \quad (4)$$

При параллельном соединении элементов электрической цепи комплексное сопротивление определяется по формуле

$$\frac{1}{\bar{Z}} = \sum \frac{1}{\bar{Z}_k}. \quad (5)$$

Рассмотрим цепь, образованную параллельно включенными индуктивностью и емкостью (см. рис. 1,б). Полагая активные сопротивления индуктивности и емкости пренебрежимо малыми, на основании выражений (1) и (2) можем записать [1]:

$$\begin{aligned}\bar{i}_1 &= j\omega C\bar{U}; \\ \bar{i}_2 &= \frac{\bar{U}}{j\omega L} = -j\frac{\bar{U}}{\omega L}; \\ (U_c &= \bar{U}_L = \bar{U}).\end{aligned}\tag{6}$$

Как следует из выражений (6), токи, текущие через емкость и индуктивность, находятся в противофазе: ток в индуктивности отстает от напряжения ($\bar{U}$) на $\varphi = \pi/2$, а ток в емкости опережает напряжение ($\bar{U}$) на $\varphi = \pi/2$. Ток, текущий через источник поля, равен сумме токов $\bar{i}_1$ и $\bar{i}_2$:

$$\bar{i} = \bar{i}_1 + \bar{i}_2 = j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\bar{U}.\tag{7}$$

Когда наступает состояние, при котором

$$\omega C - \frac{1}{\omega L} = 0,\tag{8}$$

то ток во внешней цепи будет отсутствовать, хотя токи, текущие через емкость и индуктивность, могут быть очень велики.

Состояние источника поля, при котором токи, текущие во внутренней цепи источника, существенно возрастают, называется резонансом токов.

Как следует из выражения (8), условие, при котором наступает резонанс токов, такое же, как и условие для наступления резонанса напряжений. Можно показать [1], что полное сопротивление цепи источника тока (5) при резонансе токов характеризуется следующим выражением:

$$\bar{Z} = \frac{R + j\left[\omega L(1 - \omega^2 LC) - \omega CR^2\right]}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2}.\tag{9}$$

Максимум полного сопротивления $\bar{Z}$ (т.е. резонанс токов) достигается при условии, что реактивная составляющая $\bar{Z}$ обращается в нуль и, следовательно, полное сопротивление становится чисто активным (см. рис. 1,б).

Резонансную частоту можно найти, приравняв нулю мнимую часть выражения (9):

$$\omega L(1 - \omega^2 LC) - \omega CR^2 = 0.$$

Исходя из этого,

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}.\tag{10}$$

При $R = 0$ формула (10) преобразуется в (8).

Таким образом, при резонансе токов полное сопротивление цепи $\bar{Z}$ источника поля оказывается чисто активным и имеет наибольшую возможную величину при данных параметрах. При резонансе напряжений в отличие от резонанса токов полное сопротивление цепи $\bar{Z}$ имеет наименьшую величину. При резонансе токов внутренние токи $\bar{i}_1$ и $\bar{i}_2$ существенно превосходят ток $\bar{i}$, текущий из внешней среды и выполняющий функцию «подзарядки», компенсирующей потери энергии в контуре на нагрев и излучение. Развиваемая космическим источником мощность выделяется в активном сопротивлении цепи R .

Как показано в статье «Физическая природа солнечных пятен» [2], «в потоке смещения, пересекающем границу раздела субъядерной зоны и ядра Солнца со стороны субъядерной зоны, возникает конвективный ток смещения, направленный к ядру Солнца, и конвективный ток инерции, направленный противоположно – в субъядерную зону. При пересечении магнитным потоком (возникающим в процессе преобразования потока смещения) границы раздела ядра и субъядерной зоны со стороны ядра Солнца, возникает конвективный ток инерции, направленный в субъядерную зону, и конвективный ток смещения, направленный противоположно – к ядру. Таким образом, при пересечении конвективным током границы раздела ядра и субъядерной зоны как с «внешней», так и с «внутренней» стороны, возникающие при этом силы инерции $F_{\text{и}}$ направлены от ядра в субъядерную зону, а силы упругости $F_{\text{упр}}$ направлены от субъядерной зоны к ядру. В этой статье отмечалось также, что ток инерции и «зарядный» ток, текущие между взаимно противоположными полушариями субъядерной зоны Солнца, достигают наибольшей величины вблизи полярной оси Солнца.

Во время резонанса токов, когда токи $\bar{i}_1$ и $\bar{i}_2$, пересекающие границы ядра и субъядерной зоны источника поля (например, Солнца), существенно возрастают, то, соответственно, возрастают и силы инерции, «отрывающие» субъядерную зону от ядра космического источника поля (рис. 2).

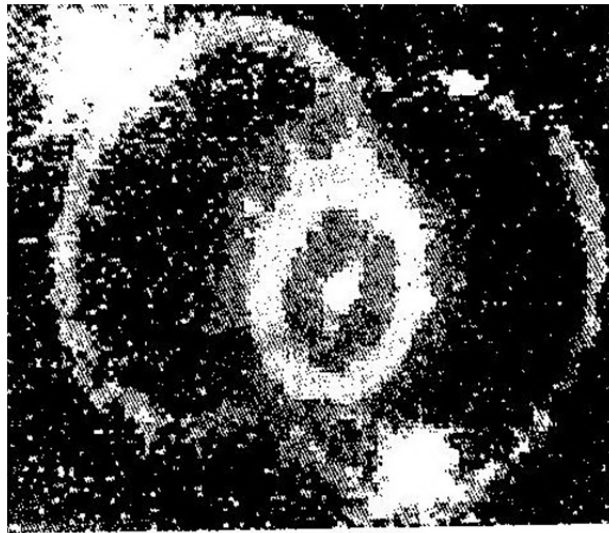


Рис. 2. Сверхновая звезда 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке. После взрыва сверхновой во все стороны расходится сферическое облако продуктов взрыва (Земля и Вселенная. 1994. № 10)

При резонансе токов силы инерции, направленные от ядра источника в сторону его Северного и Южного полюсов, отделяют полярные полусферы субъядерной зоны от ядра источника поля во взаимно противоположных направлениях. «Остатками» взрывного деления космического источника поля являются: ядро, лишенное субъядерной зоны, и расходящиеся во взаимно противоположных направлениях продукты эволюционной дезинтеграции ядра источника – его субъядерной зоны.

Почему почти все звезды в различной форме проявляют свойства «осцилляторов»? Ответ достаточно прост, «потому, что в Природе существует только два вида сил: сила упругости и сила инерции» [2]. Изменение величины или направления одной из сил с неизбежностью влечет изменение величины или направления «сопряженной» с ней силы.

Материя, из которой «соткан» мир, обладает единственным свойством – упругостью. Изменение, т.е. уменьшение упругости, связано с разуплотнением материи, т.е. с ее расширением в пространстве. Поскольку количество энергии в природе постоянно, то насколько уменьшается энергия упругости (энергия деформации упругой среды – потенциальная энергия), настолько же увеличивается энергия движения (кинетическая энергия). Количества энергий двух видов взаимно обратимы.

Во всех процессах преобразования энергий из одного вида в другой количество изменения одного вида энергии равно количеству изменения другого вида энергии за равные промежутки времени или на отрезках пути, проходимых токами за эти промежутки времени.

Электрические токи представляют собой потоки упругой диффузной среды (эфира), возникающие при изменении величины потенциальной и кинетической энергии в потоке как во времени, так и по пространству. Поэтому электрические токи являются формой преобразования одного вида энергии в другой. Потенциальная энергия (энергия упругой деформации среды) не может преобразоваться в кинетическую энергию (энергию движения) без образования потока среды, реализующего и аккумулирующего эти преобразования энергий.

Преобразования энергий могут реализовываться как на малом интервале времени или малом отрезке пути, так и на большом. Соответственно, и силы, возникающие при таких преобразованиях энергий, могут быть либо большими, либо малыми.

Как отмечалось выше, когда токи, вызываемые силами инерции и силами упругости, текущие через индуктивность и емкость, изменяются в противофазе (ток в индуктивности отстает от напряжения $(\bar{U})$ на угол $\varphi = \pi/2$, а ток в емкости опережает напряжение $(\bar{U})$ на угол $\varphi = \pi/2$), то наступает режим резонанса токов. В этом случае силы инерции и силы упругости, будучи максимальными по модулям и направленными во взаимно противоположных направлениях, «разрывают» объект, состоящий из емкости и индуктивности, по поверхности раздела образующих их сред.

При этом полярные полусферы субъядерной зоны космического источника поля, образующие его электрическую емкость, выбрасываются силами инерции в окружающее звезду пространство, а направленные противоположно им силы упругости сжимают остатки ядра источника. Внешняя граница ядра космического источника поля, лишенного переходной зоны, непосредственно граничит с внешней средой.

Граница раздела между сверхпроводящим ядром звезды и непроводящей космической средой представляет собой «абсолютно жесткую стенку». Конвективный ток, текущий через ядро звезды из одного полушария в другое, отражается от границ раздела ядра и внешней космической среды без потери энергии и без затраты времени на преобразование и на накопление энергии тока. При этом частота колебаний тока между границами полярных полусфер ядра звезды возрастает до тысячных долей секунды.

Библиографический список

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. Т. II. Электричество / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1973. – С. 353.
2. Дедков, В. К. Как устроен мир, в котором мы живем. Динамика процессов колебания активности Солнца и звезд. Книга третья. Физическая природа «солнечных пятен» / В. К. Дедков. – М. : ОнтоПринт, 2015. – С. 188–215.

Дедков Виталий Кириллович

доктор технических наук, профессор,
научный сотрудник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление
Российской академии наук»
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: dedkov-33@rambler.ru

Dedkov Vitaliy Kirillovich

doctor of technical sciences, professor,
scientific worker of the division of safety
and nonlinear analysis,
Federal Research Center
«Computer Science and Control» of RAS
(Dorodnitsyn Computer Center
of the Russian Academy of Sciences)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Аннотация. Рассматриваются структура и свойства положительных источников поля космических масштабов. Показано, что при определенных изменениях структуры космического источника поля, возникающих в процессе его эволюционных преобразований, наступает так называемый режим «резонанса токов». При этом внутренние токи источника поля существенно превосходят внешние токи. В режиме «резонанса токов» происходит структурная перестройка звездного объекта путем «взрыва» его субъядерной зоны и отделения ее от ядра источника.

Abstract. In this article the structure and properties of positive sources of the field of space scales are considered. It is shown that in case of the certain changes of structure of a space source of the field arising in the course of its evolutionary transformations there comes the so-called mode of «a resonance of currents». At the same time, internal currents of a source of the field significantly exceed external currents. In the mode of «a resonance of currents» there is a structural adjustment of a star object by «explosion» of its subnuclear zone and its department from a source kernel.

Ключевые слова: положительный источник поля, ядро источника, субъядерная зона, переходная зона, резонанс токов.

Key words: positive source of the field, source kernel, subnuclear zone, transitional zone, current resonance.

УДК 519.7

Дедков, В. К.

«Резонанс токов» и «взрывы» космических источников поля / В. К. Дедков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 80–85. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-12.

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ МУЛЬТИКОПТЕРОВ С ПОЗИЦИИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

А. П. Адамов, А. А. Адамова, Н. В. Герасимов

Введение

В последнее время все большее распространение для решения задач локального мониторинга окружающего пространства находят беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1, 2]. Одним из перспективных вариантов конструктивной реализации БПЛА являются мультикоптеры (англ. *Multirotor, multicopter* – многороторный вертолет, многолет) – это летательный аппарат, построенный по вертолетной схеме с тремя и более несущими винтами [3].

В основе самого обычного мультикоптера лежит корпус, от 4 до 12 электродвигателей с винтами, пульт дистанционного управления, приемопередатчик и элемент питания (батарея или аккумулятор) [3–5]. Такое устройство уже успело зарекомендовать себя во многих отраслях и сферах хозяйственной деятельности, начиная от съемок, заканчивая доставкой еды. Существуют режимы управления мультикоптерами, в том числе и большим их числом (стая), которое позволяет выполнить функцию наблюдения, например целого района за несколько минут. Но появляется большое количество проблем, как юридических, так и безопасности, которые возникают при использовании дронов.

В работах Е. Г. Ефимовой, В. С. Фетисова и А. Г. Гребеникова [4, 5] проанализирована классификация беспилотников и их характеристики. В работах К. А. Неусыпина [6, 7] идет анализ систем управления беспилотниками и предложены методы по улучшению таких составляющих, как навигация, наведение и управляемость. Следует отметить, что в ряде стран выпускают новые постановления и законы, которые касаются БПЛА, в список которых входят квадрокоптеры, чтобы обезопасить эксплуатацию, принять меры к защите от незаконных действий со стороны владельцев данных устройств. Незаконная слежка, проникновение на запрещенную для посещения территорию или просто вопрос о безопасности пользования данного устройства в общественных местах – все это проблемы, с которыми сталкиваются сегодня современные государства, что говорит об актуальности данной темы.

1. Анализ и классификация летательных аппаратов, реализованных по схеме многовинтовых вертолетов

1.1. Классификация многовинтовых вертолетов

Первым многовинтовым вертолетом признается квадрокоптер Георгия Ботезата, созданный в 1922 г. в авиационном центре в Дейтоне, Огайо. Аппарат имел вес 1600 кг (благодаря алюминиевой раме), двигатель мощностью 170 л.с. и был способен выдержать вес трех пассажиров, а также имел по тем временам достаточно высокую управляемость. Недостатком этого аппарата была сложная трансмиссия, передававшая вращение одного мотора на несколько винтов [4, 5].

К недостаткам таких летательных аппаратов можно отнести сложность синхронизации работы винтов, большой вес устройства, невозможность управлять вертолетом при выходе из строя хотя бы одного двигателя, невозможность посадить аппарат в режиме авторотации. В связи с этими проблемами производство многовинтовых вертолетов приостановилось вплоть до 1950-х гг., но дальше прототипов производство не продвинулось. Новый виток развития многовинтовых вертолетов приобрел уже в XXI в., когда был решен вопрос массы устройства за счет применения сверхлегких материалов, таких как карбон, а также решен вопрос синхронизации винтов за счет применения мощных вычислительных микросхем. Сегодня такие аппараты называют БПЛА – беспилотный летательный аппарат.

Под понятием беспилотного мобильного средства можно подразумевать искусственный мобильный объект без экипажа на борту, обладающий разной степенью автономности – от дистан-

ционного управления, осуществляемого оператором или диспетчерским центром, до полностью автономного (при помощи собственной управляющей программы).

Именно термин «беспилотное мобильное средство» представляется наиболее точным русскоязычным эквивалентом термина «unmanned vehicle» (UV). Его часто неудачно переводят как «беспилотное транспортное средство», тем самым сильно сужая смысл широкого понятия UV, так как спектр применений беспилотных мобильных средств далеко не ограничивается только транспортными функциями [2].

Мультикоптер в свою очередь представляет собой беспилотный летательный аппарат вертолетного типа, имеющий от трех до двенадцати электродвигателей с воздушными винтами [3].

При этом равновесие реактивных моментов достигается за счет попарно разнонаправленного вращения несущих винтов.

Также данный тип аппаратов относят к БПЛА с вращающимся крылом (англ. *rotary-wing UAV, rotorcraft UAV, helicopter UAV*).

Подъемная сила у аппаратов этого типа создается аэродинамически, но не за счет крыльев, а за счет вращающихся лопастей несущего винта (винтов). Крылья либо отсутствуют вовсе, либо играют вспомогательную роль. Очевидными преимуществами БПЛА вертолетного типа являются способность зависания в точке и высокая маневренность, поэтому их часто используют в качестве воздушных роботов.

Основываясь на данных терминах и определениях [4–8], можно перейти к составлению классификации мультикоптеров по тактико-техническим характеристикам.

Классификация мультикоптеров по назначению:

- любительские, предназначенные для пилотирования или фото/видеосъемки;
- реализация для бизнеса, например, В2В (продвижение различных услуг компании) или В2С (подразумевает доставку почты или различных товаров);
- применение для научных исследований, например, наблюдение за различными объектами или сбор статистической информации;
 - для силовых структур или военных, которые в свою очередь могут подразделяются:
 - на наблюдательные;
 - разведывательные;
 - ударные;
 - разведывательно-ударные;
 - бомбардировочные;
 - радиотрансляционные;
 - БПЛА РЭБ (для целей радиоэлектронной борьбы);
 - транспортные;
 - БПЛА-мишени;
 - БПЛА-имитаторы цели;
 - многоцелевые БПЛА;
 - мониторинг, дистанционный контроль и наблюдение, например:
 - видеонаблюдение с целью охраны различных объектов, таких как лесные массивы или посевы фермеров и предприятия сельского хозяйства;
 - патрулирование заданных зон полицией;
 - картографирование земной поверхности;
 - разведка и составление планов помещений с помощью малых БПЛА внутри разрушенных или опасных зданий;
 - мониторинг нефтегазовых объектов, особенно трубопроводов;
 - инспектирование строек;
 - видео-фотосъемка труднодоступных промышленных объектов (линий электропередач, опор мостов, дымовых труб, ветрогенераторов, антенн и т.д.);
 - радиационная и химическая разведка на опасных территориях;
 - экологический мониторинг атмосферы и поверхности водоемов;
 - мониторинг опасных природных явлений (паводков, извержений вулканов, лавиноопасных горных районов и др.);

- оценка результатов стихийных бедствий и ликвидации их последствий;
- наблюдение за дикими животными в заповедниках.
- наземные (в атмосфере) квадрокоптеры и для космоса, например, использование для метеорологических наблюдений;

Классификация мультикоптеров в зависимости от массы.

В этой классификации беспилотные аппараты колеблются в размерах от микрокоптеров менее 10 кг, которые находятся поблизости от оператора, до тяжелых, способных подниматься на 20 км и быть в воздухе 24 ч:

- микро- и мини-БПЛА имеют вес менее 5 кг и способны удаляться от оператора на расстояние до 40 км;
- легкие квадрокоптеры имеют вес до 100 кг и способны отлетать на расстояние до 120 км;
- средние БПЛА имеют вес до 300 кг и могут находиться на расстоянии до 1000 км от оператора;
- среднетяжелые квадрокоптеры имеют вес до 500 кг и способны отлетать на расстояние до 2000 км;
- тяжелые квадрокоптеры имеют вес от 500 кг и способны удаляться от оператора на расстояние до 3000 км, при этом они могут находиться в воздухе довольно продолжительное время.

Классификация мультикоптеров в зависимости от размера рамы:

- микро- и мини-класс, имеют длину рамы менее 250 мм и применяются в основном для любительских целей;
- от 250 до 350 мм, могут быть оборудованы фото- или видеокамерой и способны развивать достаточно большую скорость;
- от 350 до 450 мм, способны поднимать вес оборудования, достаточный для осуществления прямых видеотрансляций;
- от 450 до 550 мм, часто применяются для осуществления бизнес-деятельности и доставки различных товаров;
- от 550 до 750 мм, применяются в основном для осуществления научной деятельности, так как способны нести на борту достаточное количество исследовательского оборудования;
- свыше 750 мм, входят в раздел тяжелых коптеров и способны осуществлять военную деятельность.

Обобщенную классификацию многовинтовых вертолетных систем можно представить в виде ментальной карты (рис. 1) [9].

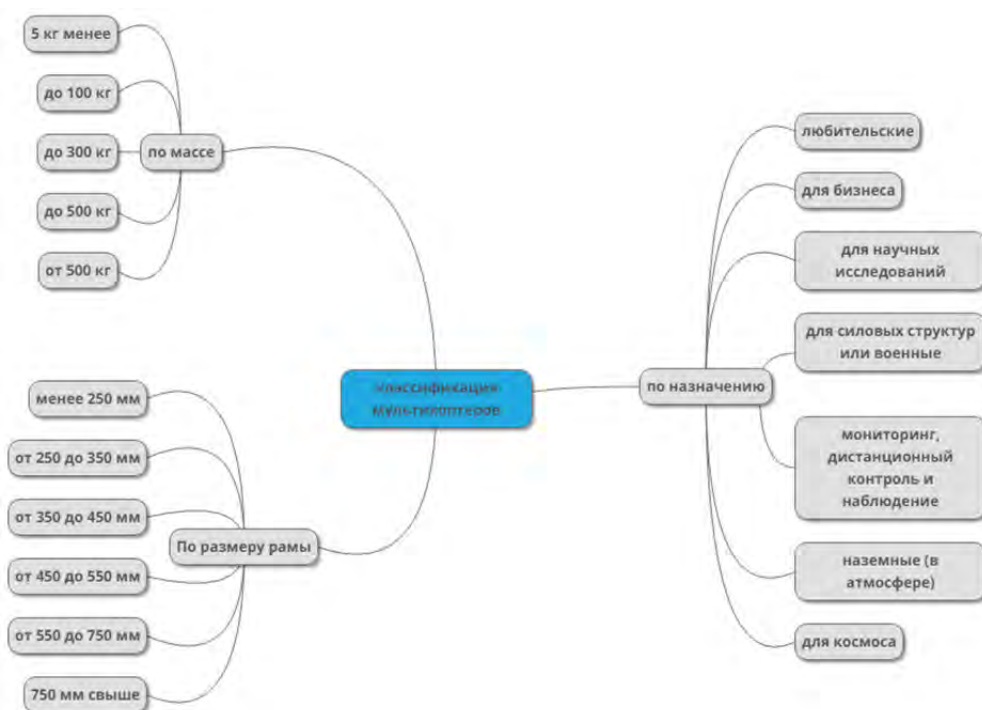


Рис. 1. Классификация многовинтовых вертолетов

Одной из популярных схем построения многовинтовых вертолетов является схема с симметрично расположенными винтами, такая схема получила название **квадрокоптер** – это устройство для полетов с четырьмя винтами, которые вращаются диагонально в противоположных направлениях [3]. Рассмотрим вопросы их эксплуатации с позиции надежности и безопасности более подробно.

1.2. Методика анализа эксплуатации квадрокоптеров с позиции надежности и безопасности

В основе анализа квадрокоптеров с позиции надежности и безопасности лежит учет характеристик их конструктивной реализации. Одним из базовых недостатков является применение в качестве источников питания бесколлекторных электродвигателей – литий-полимерные аккумуляторы, что сильно снижает время и дальность полета квадрокоптеров. Эти и многие другие особенности значительно снижают показатели надежности и безопасности квадрокоптеров (рис. 2).

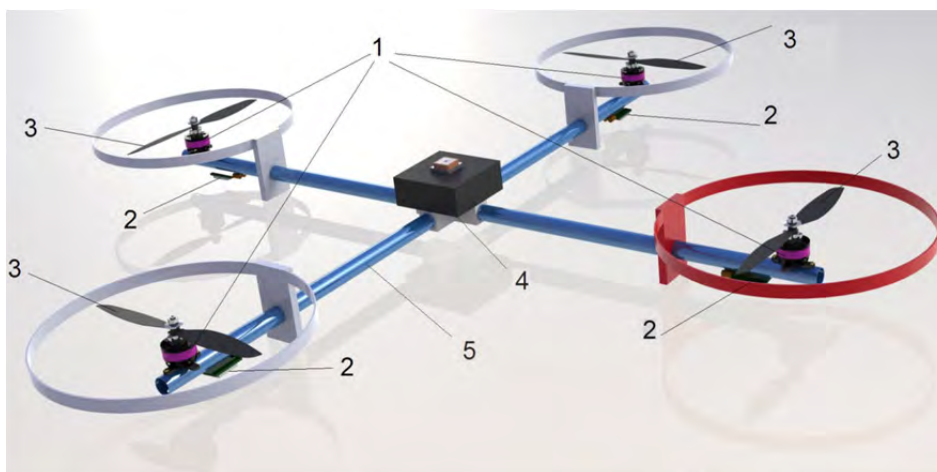


Рис. 2. Обобщенная схема квадрокоптера:
1 – двигатель; 2 – гироскоп; 3 – винт; 4 – аккумулятор; 5 – рама

Авиация в последние годы становится все в большей степени беспилотной. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) постепенно становятся главной продукцией многих авиационных фирм [7–12]. Появляется большое количество разработчиков и производителей БПЛА, занимающихся исключительно беспилотными аппаратами и системами. Это происходит по ряду причин. Сами БПЛА, как правило, гораздо дешевле пилотируемых самолетов и вертолетов. Дешевле, чем подготовка летчика, обходится и подготовка оператора беспилотной системы. Отсутствие пилота позволяет исключить бортовые системы жизнеобеспечения, уменьшить массу и габариты БПЛА, а также увеличить диапазон допустимых перегрузок и влияющих факторов [8]. Применение сверхлегких материалов, позволяет аппарату за небольшой промежуток времени развивать свою максимальную скорость полета.



Рис. 3. Основные технические параметры квадрокоптеров

Основными техническими параметрами квадрокоптеров (рис. 3) являются:

- 1) **габариты.** Длина и высота изделия. Влияет в основном на размер двигателей и винтов, что в свою очередь влияет на максимальную скорость, скорость подъема и снижения аппарата;
- 2) **аккумулятор.** Измеряется емкость батареи в миллиамперах в час. Чем показатель выше, тем дольше квадрокоптер летает на одном заряде;
- 3) **радиус действия.** Диаметр, в пределах которого сможет летать квадрокоптер;
- 4) **частота передатчика/приемника.** Влияет на качество приема и передачи сигнала:
 - **900 Mhz.** Плюс этой частоты – сигнал с легкостью проходит сквозь деревья, сочетается с аппаратурой, работающей на 2,4 Ghz;
 - **1,2 Ghz.** Работающие на этой частоте дроны, преодолевают длинные дистанции. Сигнал легко проходит через твердые предметы;
 - **2,4 Ghz.** Сигнал хуже проходит через твердые предметы, но дрон улетает на этой частоте на дальние дистанции;
- 5) **вес.** Влияет на управляемость, т.е. способность сопротивляться ветру. Напрямую зависит от габаритов конструкции;
- 6) **разрешение камеры.** Влияет на детализацию картинки. При низком разрешении не получится ухватить много объектов и развернуть их на широкоформатном экране. Иногда качество съемки у камер, снимающих в низком разрешении, лучше. К базовым факторам, влияющим на качество видео, относят: оптику, оптическую стабилизацию, размер матрицы.

2. Анализ эксплуатации квадрокоптеров с позиции надежности

Квадрокоптеры являются в своем роде визитной карточкой настоящего времени. В первую очередь квадрокоптеры видятся как помощники правоохранительных органов. Любой теракт, экстренный случай, который может повести за собой ущерб здоровью человека (пожар, выбросы химических отходов и т.д.) Но пока полиция не приняла на вооружение квадрокоптеры (хотя японская полиция уже ведет борьбу своими квадрокоптерами с квадрокоптерами Якудза, перевозящими запретные аппараты), в настоящий момент они используются в зонах, где не возникает вопрос об этике и личном пространстве – открытые территории. Основные задачи таких квадрокоптеров-патрульных – отслеживание и патрулирование границ, например на пересечении США и Мексики. Также всемирный фонд дикой природы получил гранд, на средства которого разрабатывает систему отслеживания браконьеров.

Возможности поднятия груза на любую высоту без громоздких конструкций и кранов – звучит воодушевленно для строителей. Несколько квадрокоптеров нужной мощности могут осилить подъем тяжелого груза на высоту. Многие компании уже выпускают программы, которые управляют стаей квадрокоптеров одновременно, что позволяет синхронизировать движения и создать единую систему контроля. Беспилотные роботы как замена строителям в опасных для жизни ситуациях выглядят очень перспективно и востребовано.

В Массачусетском технологическом институте был разработан и опробован квадрокоптер SkyCall – проводник по местности с большим потенциалом. Допустим, студенту нужно попасть в аудиторию, которая находится в отдаленном корпусе, неизвестно где. Студент может послать запрос со смартфона, и маленький дрон сам находит его, обрабатывает запрос и ведет в нужное место с помощью системы меток и GPS.

Нельзя не упомянуть полезные свойства квадрокоптеров в научных исследованиях. Например, тяжелейшие погодные условия, в которых снять показания обычному человеку или дорогостоящему устройству не предоставляется возможным. Похожие квадрокоптеры уже разрабатываются в университете Флориды, они имеют малые габариты и вес, что позволяет им влетать в нужные точки шторма и отключать двигатели для экономии топлива, при этом собирая информацию вокруг с помощью датчиков.

Сейчас компания Falkor Systems занимается разработкой искусственного интеллекта для квадрокоптеров, которые в перспективе смогут заменить системы «умный дом» или же стать ее частью. Одной из полезных функций будет отслеживание грабителей, фотография и отправление снимков полиции.

Многие пиццерии и кафе используют для доставки квадрокоптеров. Воздух не бывает в пробках, и это позволяет минимизировать время доставки, что положительно сказывается на сер-

висе и на работе всего заведения в целом. На музыкальном фестивале Оррікоррі популярностью пользовался так называемый пивной дрон. Находясь в палатке, посетитель фестиваля мог достать телефон и сделать заказ. Квадрокоптер доставлял пиво, руководствуясь GPS-навигатором. Возможно, в скором времени почта и услуги доставки компаний разного направления (начиная от запчастей – заканчивая одеждой) начнут пользоваться квадрокоптерами-курьерами.

Широко применяются квадрокоптеры для локального мониторинга окружающего пространства. Квадрокоптеры начали переделываться разными компаниями для снятия вибраций со всей конструкции и итог – невероятно приятная и четкая видеосъемка. Киностудии не стесняются новинок индустрии и всю используют квадрокоптеров для различных кадров, что можно заметить уже во многих новинках кино. Рельсы с кранами, вертолеты и самолеты – все заменилось меньшими габаритами и удобством эксплуатации.

3. Анализ эксплуатации квадрокоптеров с позиции безопасности

3.1. Юридические аспекты эксплуатации малой беспилотной авиации

Квадрокоптеры являются мобильным движущимся аппаратом, следовательно, главной проблемой является проблема столкновения двух устройств, а также с людьми и зданиями. Поэтому каждый владелец квадрокоптера должен иметь лицензию на него. На территории РФ дроны-беспилотники запрещены. Изначально данный вид ограничения распространялся только на военную технику. В настоящий момент распространяется и на физические лица. Вдобавок ко всему, данное устройство является воздушным судном, следовательно, на него необходимо разрешение. Для регистрации квадрокоптера необходим следующий перечень документов: удостоверение о летной годности, свидетельство о допуске к управлению воздушным средством, разрешение на использование воздушного пространства. Отсутствие какого-либо документа из этого перечня повлечет за собой наказание в виде штрафа. Размер штрафа зависит от вида лица (физическое, юридическое). Фактически лицензионные полеты для дронов в нашей стране невозможны.

В связи с этим следует обратиться к опыту зарубежных стран, где уже подготовлена нормативно-правовая база в области беспилотной авиации. В европейском законодательстве распространена практика получения лицензий на полеты за определенную сумму. Также установлены определенные правила полетов. Среди них можно выделить ограничения по массе дрона, ограничение по высоте полета, частоты радиуправления, а также не летать над густонаселенными местами. Также есть определенные нормы безопасности, которые касаются военных объектов. Квадрокоптер не может приближаться на расстояние менее, чем указано в правилах. На территории стран СНГ, как правило, полеты и вовсе разрешены без лицензии, однако это может привести к нарушению законодательства на территории этих стран. Стоит также отметить, что в некоторых странах, например в ЮАР, есть угроза даже уголовного преследования за нарушение правил полета.

Из всего вышесказанного, а также того, что в нашей стране квадрокоптеры приобретают популярность, возникает необходимость перенять зарубежные правила перелета. Во многих странах данные правила являются общими, что предполагает в дальнейшем развитие общих международных норм регулирования полетов.

3.2. Анализ технических проблем эксплуатации квадрокоптеров

Квадрокоптер можно назвать сложным техническим устройством, так как в его состав входит большое количество механических деталей, которые находятся под постоянной нагрузкой, что влечет за собой поломку самого дрона, рано или поздно. В настоящее время рынок не предоставляет широкий выбор деталей для замены, а по большей части производители не предусматривают ремонт своих же устройств вообще.

В число самых распространенных проблем входят:

- отсутствие соединения между передатчиком и квадрокоптером;
- неправильная работа системы стабилизации;
- превышение нормы шума для устройства или вибрация;
- квадрокоптер не может оторваться от земли;
- отказ одного из двигателей, полетного контроля или регулятора скорости;
- неправильная калибровка, перевес;
- плохое качество видеосъемки (касается квадрокоптеров, предназначенных для съемок).

Выводы

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что в большинстве стран, в том числе и в России, несмотря на популярность мультикоптеров, им уделяется недостаточное внимание в вопросах законности и обслуживания. Увеличивающиеся случаи нанесения вреда человеку или нарушение чьих-либо прав говорят о том, что правительству стран, где еще нет законов или постановлений о лицензии, стоит уделить больше внимания упорядочиванию процесса эксплуатации квадрокоптера на своей территории. Производителям же стоит обратить внимание на самые распространенные технические проблемы и задуматься об их решении и выпуске дополнительных деталей на замену.

Библиографический список

1. Фетисов, В. С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В. С. Фетисов, Л. М. Неугодникова, В. В. Адамовский и Р. А. Красноперов ; под ред. В. С. Фетисова. – Уфа, 2014. – 346 с.
2. Гребеников, А. Г. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов : справ. пособие / А. Г. Гребеников, А. К. Мялица, В. В. Парфенюк. – Харьков : Изд-во Харьковского ин-та, 2008. – 377 с.
3. Корнилов, В. А. Система управления мультикоптером / В. А. Корнилов, Д. С. Молодяков, Ю. А. Синявская. – М., 2012. – 512 с.
4. Ефимова, М. Г. Конструкция и основные функциональные системы летательных аппаратов : учеб. пособие / М. Г. Ефимова. – М. : МГТУГА, 2005. – 52 с.
5. Классификация вертолетов. – URL: <http://rc-dom.ru/stati/vertolety/klassifikacija-vertoletov.html>.
6. Адамова, А. А. Автоматизация формирования показателей для оценки технологичности изделий / А. А. Адамова, А. П. Адамов // Будущее машиностроения России : сб. Восьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. – М., 2015. – С. 362–366.
7. Адамова, А. А. Многоуровневая модель формирования технологичности электронных средств на этапах проектирования и производства / А. А. Адамова, А. П. Адамов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 11 (23). – С. 12.
8. Гибридная система управления малыми беспилотными летательными аппаратами / А. И. Власов, Д. Е. Зотьева, В. С. Евдокимов, Г. Г. Ревзин, Д. В. Феоктистов // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – № 8. – С. 15–24.
9. Адамова, А. А. Применение инструментов когнитивной графики в преподавании конструкторско-технологических дисциплин / А. А. Адамова // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2016. – № 3 (163). – С. 79–85.
10. Антохин, А. И. Концепция системы стабилизации на базе МЭМС гироскопа / А. И. Антохин и др. // Наука и образование : электрон. науч.-техн. изд. – 2011. – № 10. – С. 51.
11. Неусыпин, К. А. Повышение степени управляемости летательного аппарата / К. А. Неусыпин, С. Ф. Фам // Автоматизация. Современные технологии. – 2007. – № 2. – С. 21–25.

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный технический
университет
(367006, Россия, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Пирамидальная, 49)
E-mail: info@iu4.bmstu.ru

Адамова Арина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии производства
электронной аппаратуры,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Adamov Aleksandr Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(367006, 49 Piramidal'naya street, Mahachkala,
Dagestan, Russia)

Adamova Arina Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and production technology
of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, page 1, apartment 5, 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Герасимов Никита Вячеславович

магистрант,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: wocha96@mail.ru

Аннотация. Данная статья посвящена безопасности квадрокоптеров в современное время. Основное внимание уделено угрозе здоровью и безопасности человека. Кратко рассмотрены история и технические характеристики квадрокоптеров. Проведен анализ существующих законов и ограничений, введенных в других странах. В результате исследования, что угроза существует, предложены методы ее урегулирования.

Ключевые слова: квадрокоптеры, классификация мультикоптеров, эксплуатация БПЛА, БПЛА, юридические аспекты, технические возможности.

Gerasimov Nikita Vyacheslavovich

master degree student,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, page 1, apartment 5, 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Abstract. This article is devoted to the safety of quadcopters in modern times. The main attention is paid to the threat to human health and safety. The history and technical characteristics of quadcopters are briefly considered. The article analyzes the existing laws and restrictions introduced in other countries. As a result of the research, the threat exists and methods for its settlement are proposed.

Key words: quadrocopter, classification of multicopters, operation of UAV, UAV, legal aspects, technical capabilities.

УДК 658.52

Адамов, А. П.

Анализ эксплуатации мультикоптеров с позиции надежности и безопасности / А. П. Адамов, А. А. Адамова, Н. В. Герасимов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 86–93. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-13.

СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ¹

А. П. Адамов, А. А. Адамова

Введение

Современные мировые тенденции развития микроэлектронной промышленности связаны с повышением надежности и непрерывным улучшением показателей качества перспективных изделий микро- и наноэлектроники. Микроэлектронная промышленность является мета-системой для электронной компонентной базы изделий. Для оценки надежности системы, выбора показателей качества, описания связей системы и мета-системы используется системный анализ и системный подход [1]. Проблема компактного визуального представления многофакторной и сложносвязанной информации является одной из основных в современных проектных процедурах. Рассмотрим методы и подходы визуального семантического анализа сложных систем и процессов на примерах перспективных объектов и процессов микро- и наноэлектроники.

Системный подход представляет собой совокупность методов и средств, позволяющих исследовать свойства, структуру и функции объектов и процессов в целом, представив их в качестве систем со сложными межэлементными взаимосвязями, взаимовлиянием самой системы на ее структурные элементы [2].

Системный подход заключается в рассмотрении элементов системы как взаимосвязанных и взаимодействующих для достижения глобальной цели функционирования системы. Особенностью системного подхода является оптимизация функционирования не отдельных элементов, а всей системы в целом.

В последние годы для прорывных решений в микро- и наноэлектронике наибольшее значение приобретают электромеханические свойства используемых материалов. Одним из новых материалов является графен – двумерная аллотропная модификация углерода. Уникальные свойства графена обуславливаются особенностями взаимодействия электронов в двумерной кристаллической структуре. Атомы углерода в кристаллической структуре графена обладают четырьмя валентными электронами. Три электрона образуют sp^2 гибридизованные орбитали, формирующие ковалентные связи с соседними атомами. sp^2 гибридизованные орбитали расположены в одной плоскости под углами 120° . Четвертый электрон атома углерода отвечает за низкоэнергетические электронные свойства графена. Данный электрон образует $2p_z$ орбиталь, перпендикулярную к плоскости sp^2 гибридизованных орбиталей. Кристаллическая решетка графена имеет гексагональную структуру, являющуюся совокупностью двух треугольных подрешеток. В кристаллической решетке графена электроны ведут себя как безмассовые переносчики тока, что позволяет использовать эффекты квантовой физики для описания поведения материала при различных внешних воздействиях. Для графена характерны парадокс Клейна, эффект дрожания электронов, квантовый эффект Холла, амбиполярность.

Модуль Юнга одного слоя графена равен $\sim 1,0$ ТПа. Коэффициент жесткости графена превышает коэффициент жесткости алмаза. Экспериментально подтвержденный предел прочности графена на разрыв составляет ~ 42 Н·м⁻¹. На сегодняшний день графен является одним из самых прочных материалов, исследованных в лаборатории.

Открытие графена, сделанное в 2004 г. двумя учеными-физиками Андреем Геймом и Константином Новоселовым, подтвердило положения, сформулированные П. Воллеса о свойствах графита, который еще в 1947 г. показал, что структура этого материала аналогична металлам и некоторые его характеристики подобны тем, какими обладают ультрарелятивистские частицы, нейтрино и безмассовые фотоны. Российские ученые создали углеродную пластину, более твер-

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по Гранту РФФИ №17-07-00689.

дую, чем алмаз, толщина которой при этом составила всего один атом. Полученный углерод в свободном состоянии исследователи назвали графеном. В новом материале обнаружились уникальные физические свойства. Результаты своей работы вместе с описанием способа получения графена на подложке окисленного кремния Гейм и Новоселов опубликовали в журнале Science [4–8].

Несмотря на высокие прочностные характеристики, графен обладает гибкостью и эластичностью. Для графена допустима 20 %-я деформация без нарушения его кристаллической структуры.

Монослой графена обладает чрезвычайно высокой теплопроводностью ~ 5000 Вт/(м·град). По теплопроводности графен в 3 раза превосходит медь, активно используемую в теплоотводных устройствах [9].

Наибольший интерес представляют уникальные электрические свойства графена. Максимальная подвижность носителей тока в монослое графена $\mu \sim 10^6$ – 10^7 см²/Вт·с. При размещении слоя графена на поверхности оксида кремния подвижность носителей заряда более чем в 20 раз превышает аналогичный показатель для кремния. Столь большие значения μ обусловлены нулевой массой носителей заряда – амбиполярных пар «электрон-дырка» в графене. Также графен позволяет получать экстремально высокие магнитные поля.

Проблема широкого применения материала с такими феноменальными свойствами кроется в методах получения графеновых наноструктур. Наиболее прорывные исследования направлены на разработку перспективных технологий синтеза графеновых структур и конструкций из них. В своей работе К. С. Новоселов и А. К. Гейм предложили метод получения графена методом пилинга – расслоения графита. При трении графитового стержня об окисленную поверхность кремния на SiO₂ остаются чешуйки наноструктур, которые можно наблюдать в оптический микроскоп по интерференционной картине [4–8]. Метод пилинга прост и позволяет получать образцы высокого качества для лабораторных исследований. Однако данный метод не позволяет осуществлять производство графена в промышленных масштабах. Метод промышленного производства графена был описан и запатентован группой американских ученых лишь в 2016 г. Следует ожидать, что внимание ученых в ближайшее время будет сконцентрировано на вопросах технологической подготовки производства и адаптации технологических процессов к требованиям синтеза графеновых структур.

Анализ методов подготовки производства с точки зрения повышения надежности и увеличения ключевых показателей качества изделия

Совокупность уникальных свойств графена, обусловленных его кристаллической структурой, позволяет отнести данный материал к метаматериалам. Графен как метаматериал является средой для управления плазмонами в терагерцовой части спектра электромагнитных волн. Плазмон (квант плазменных колебаний) является квазичастицей, возникающей в приповерхностном слое в результате коллективных колебаний электронов относительно ионов. В случае графена возникновение плазмонов обуславливается внешним облучением поверхности. Плазмоны могут быть рассмотрены как средство передачи информации на сверхвысоких частотах. Данная информация требует систематизации и формализации.

С позиции системного анализа для формализации разнородной информации по межпредметной области следует использовать когнитивные семантические конструкции, например в виде СМАП карт (рис. 1) [10, 11]. Маршруты проектирования микро- и наносистем можно представить в виде иерархического семантического дерева, верхним уровнем декомпозиции которого является блок «Маршруты проектирования микро- и наносистем».

Создание новых видов продукции осуществляется в процессе подготовки производства [12]. Задача подготовки производства состоит в том, чтобы обеспечить необходимые условия для функционирования производственного процесса. Подготовка производства – это процесс непосредственного приложения труда коллектива работников в целях разработки и организации выпуска новых видов продукции или модернизации изготавливаемых изделий. Процесс подготовки производства представляет собой особый вид деятельности, совмещающий выработку научно-технической информации с ее превращением в материальный объект – новую продукцию [13].

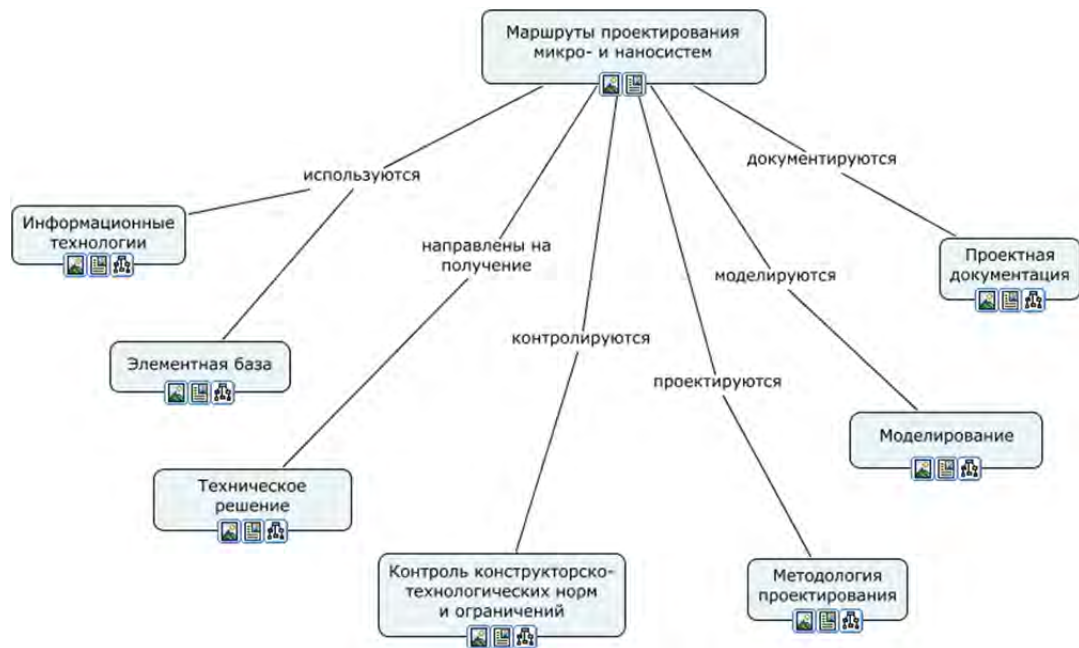


Рис. 1. Структура области знаний «Маршруты проектирования микро- и наносистем»

Аналогично маршруты производства могут быть представлены в виде семантического дерева на рис. 2.

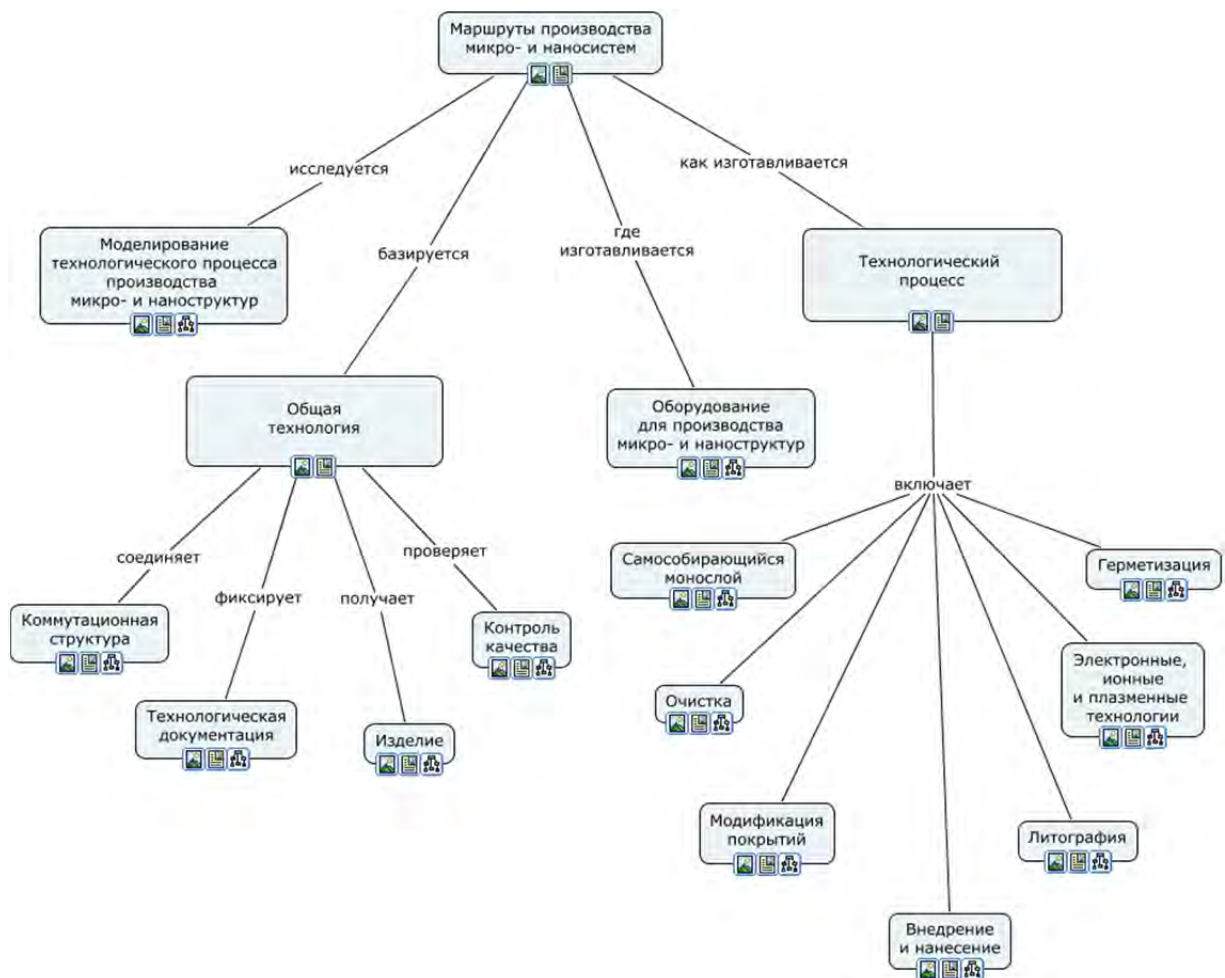


Рис. 2. Структура области знаний «Маршруты производства микро- и наносистем»

При синтезе новой компонентной базы, в том числе на основе графена, необходимо уделять повышенное внимание вопросам технологической подготовки производства, обеспечения качества и технологичности. Технологичность должна обеспечиваться с самых ранних стадий конструкторско-технологического проектирования и производства. Для нормирования технологичности и ее формирования в процессе разработки изделий электронной техники установлена система оценок технологического качества (ТК) изделий. Под оценкой ТК изделия понимают комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих последовательное выявление технологичности отдельных составных элементов изделия в целом на основе сопоставления выявленных свойств данного изделия со свойствами изделия-аналога, которое принято в качестве базы сравнения, и представление результатов сопоставления в форме, приемлемой и, по мнению специалистов, оптимальной для принятия управленческих решений по совершенствованию анализируемой конструкции разрабатываемого изделия и технологии его изготовления [14–18]. Достоверные и своевременные оценки ТК изделий занимают важное место в комплексной системе обеспечения их технологичности, так как влияют непосредственно на эффективность обработки изделий на технологичность.

Анализ подходов к синтезу элементной базы на основе графена

Синтез новой элементной базы – сложная, многовариантная задача, которая может быть обобщена в виде следующей иерархии, отражающей вариативность решений (рис. 3).

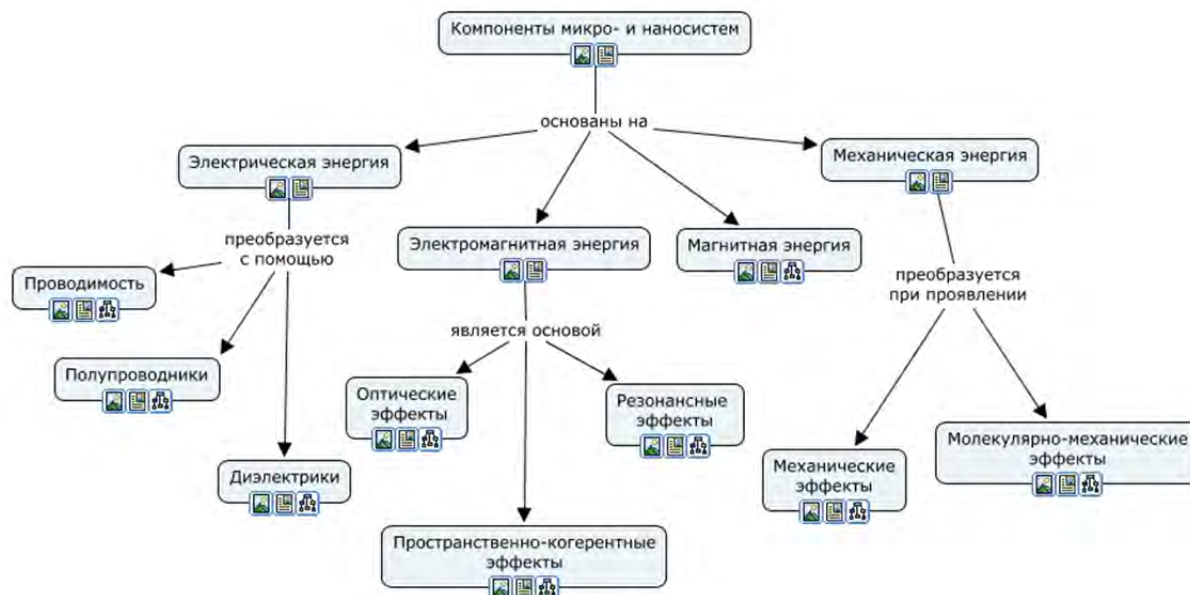


Рис. 3. Структура области знаний «Компоненты микро- и наносистем»

На сегодняшний день основой любого микроэлектронного устройства является транзистор. Использование графена для формирования транзисторных структур позволяет не только значительно увеличить механическую прочность структуры, но и значительно повысить предельную частоту работы транзистора.

Графеновые транзисторы могут корректно работать в гигагерцовом диапазоне частот, что соответствует миллиметровому диапазону длин волн. В терагерцовом диапазоне у графена проявляются свойства метаматериала. На сегодняшний день в лабораторных условиях получен транзистор с предельной частотой $f_{\text{пред}} = 155$ ГГц. Стоит отметить, что предельная частота работы транзистора остается практически неизменной при охлаждении до сверхнизких температур, что делает возможным использование графеновой микроэлектроники в космосе [19].

Использование свойств графена как метаматериала позволяет не только улучшать параметры элементов микросхем, но и создавать новые элементы с уникальными свойствами. Амбиполярность графена позволяет управлять типом основных носителей заряда, т.е. переключаться между электронами и дырками посредством соответствующего управляющего воздействия. Опи-

санное свойство дает начало развитию новой отрасли схемотехники, получившей название амби-полярная схемотехника.

Амбиполярный транспорт квазичастиц позволяет дозированно использовать как электронную, так и дырочную проводимость в рамках одного транзистора без изменения его конфигурации. В качестве примера рассмотрим МДП-усилитель на графеновом транзисторе (рис. 4).

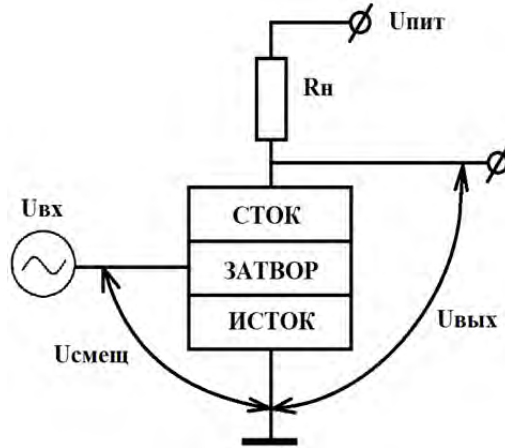


Рис. 4. Универсальная усилительная схема с графеновым МДП-транзистором

При изменении управляющего сигнала на затворе в цепи может быть сконфигурирован n -канальный транзистор, p -канальный транзистор, транзистор, использующий суперпозицию двух типов проводимости. На амбиполярной вольт-амперной характеристике выделяют три характерные рабочие точки: минимум ВАХ (точка с минимальной проводимостью), точка, в которой напряжение смещения больше минимального, точка, в которой напряжение смещения меньше минимального (рис. 5).

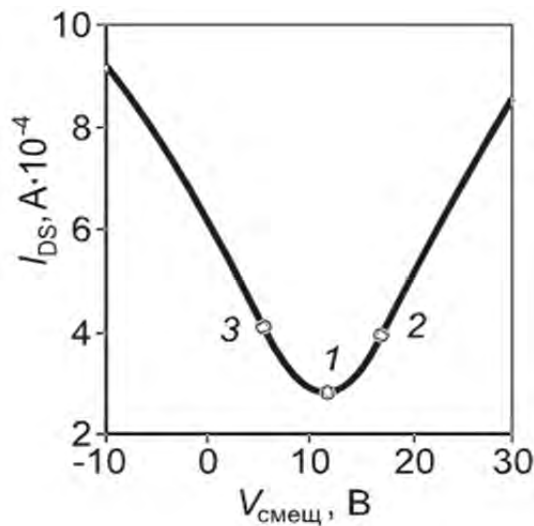


Рис. 5. ВАХ мемристора [1]

Устанавливая рабочую точку транзистора в одно из трех положений, можно получить три режима работы схемы только лишь путем изменения управляющего воздействия. В случае амби-полярного МДП-усилителя этими режимами будут режимы усилителя, инвертора и нелинейного преобразователя напряжения.

Амбиполярная структура может быть использована как для аналоговой, так и для цифровой схемотехники. Специализация структуры определяется симметричностью ВАХ относительно минимального значения напряжения (точки Дирака, в которой вклад электронов и дырок в перенос заряда одинаков). Специализация амбиполярной структуры производится путем сдвига точки

Дирака вдоль оси напряжения смещения. Следовательно, амбиполярный характер проводимости графена позволяет создавать универсальные сверхбыстрые транзисторы, что может существенно сократить габаритные размеры микросхем и повысить их частотные характеристики [19].

Уникальная кристаллическая структура графена позволила создавать новые элементы. Принципы реализации графенового гибкого сенсорного экрана с интегрированным аналого-цифровым преобразователем рассмотрены в [20]. Создаются новые сенсорные элементы с чувствительными элементами на основе графена [21, 22]. В 2008 г. появились работы по созданию пассивных элементов – мемристоров, теоретическое описание которого было дано профессором Леоном Чуа в 1974 г. Мемристор представляет собой двухполюсник с нелинейной ВАХ, обладающей гистерезисом. Мемристор устанавливает связь между зарядом и магнитным потоком. Наличие гистерезиса в ВАХ мемристора позволяет использовать данный схемный элемент в качестве ячейки памяти.

Мемристор может выступать в качестве универсального схемного элемента. Его сопротивление зависит от того, как долго по элементу протекал электрический ток. Теоретически мемристоры могут не только заменить собой транзисторы, но и увеличить их функциональные возможности.

Сверхвысокие частоты работы графеновых мемристоров позволяют использовать их вместо ячеек флеш-памяти. При отключении напряжения питания на мемристоре будет сохраняться последнее установленное значение электрического сопротивления. При этом состояние мемристора останется неизменным при протекании по нему коротких импульсов тока. Следовательно, использование мемристоров позволяет получить новый высоконадежный и сверхбыстрый тип энергонезависимой памяти.

Использование мемристоров позволяет многократно перепрограммировать готовую систему для расширения или даже полного изменения ее функциональных возможностей. Возможность полного изменения системы с помощью изменения управляющих воздействий может быть использована для эмуляции работы нейронов и создания на основе мемристоров нейросетей и гибких реконфигурируемых систем искусственного интеллекта [23].

Предложенный системный подход с применением визуальных семантических инструментов формализации знаний к решению задач генерационного синтеза элементной базы и технологических маршрутов микро- и наносистем на основе контекстной модели базисных типов сущностей предметной области технологий микро- и наносистем зарекомендовал себя эффективным и комплексным методом. Руководствуясь им, появляется уникальная возможность структуризации, комплексного анализа и обобщения знаний в виде онтологии комплекса научных, технических и технологических знаний по технологиям микро- и наносистем. Возможности системной каталогизации и обеспечения доступа к семантическим ресурсам по предметной области способствуют решению задач обеспечения качества синтеза новых технических решений в сфере технологий микро- и наносистем.

Библиографический список

1. Лаврушина, Е. Г. Теория систем и системный анализ / Е. Г. Лаврушина, Н. Л. Слугина. – Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2007. – 100 с.
2. Татарова, Г. Г. Методологическая травма социолога. К вопросу интеграции знания / Г. Г. Татарова // Социологические исследования. – 2006. – № 9. – С. 3–12.
3. Булатова, И. М. Графен: свойства, получение, перспективы применения в нанотехнологии и наноконпозициях / И. М. Булатова // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 10. – С. 76–81.
4. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666–669.
5. Fior, G. Lateral Graphene hBCN Heterostructures as a Platform for Fully Two-Dimensional Transistors / G. Fior, A. Betti, S. Bruzzone, G. Iannaccone // ASC Nano. – 2012 – Vol. 6, № 3. – P. 2642–2648.
6. NanoTCAD ViDES. – URL: <http://vides.nanotcad.com/vides> (дата обращения: 14.01.2017).
7. Novoselov, K. S. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, et al. // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666. DOI:10.1126/science.1102896
8. Novoselov, K. S. The electronic properties of grapheme / K. S. Novoselov, A. K. Geim ; Department of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester, M13 9PL. – United Kingdom, 2009. – 54 p.
9. Алексеенко, А. Г. Графен / А. Г. Алексеенко. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 168 с.

10. Адамова А. А. Применение инструментов когнитивной графики в преподавании конструкторско-технологических дисциплин / А. А. Адамова // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2016. – № 3 (163). – С. 79–85.
11. Шахнов, В. А. Онтология наноинженерии / В. А. Шахнов и др. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 12-1 (19). – С. 50–67.
12. Адамова, А. А. Визуальное моделирование адаптации подготовки производства к выпуску новой продукции / А. А. Адамова, А. И. Власов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2014. – № 2 (154). – С. 46–56.
13. Юрков, Н. К. Методология управления качеством сложных систем / Н. К. Юрков, А. К. Гришко, И. И. Кочегаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 377–379.
14. Адамова, А. А. Методика оценки технологичности электронных изделий на этапах проектирования и производства / А. А. Адамова, А. П. Адамов, В. А. Шахнов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 352–356.
15. Адамов, А. П. Дифференциальные коэффициенты оценки технологичности электронных средств и их применение при структурно-функциональном моделировании производственных систем / А. П. Адамов, А. А. Адамова, А. И. Власов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2015. – № 5 (104). – С. 109–123.
16. Адамова, А. А. Формирования технологичности электронных средств на этапах проектирования и производства / А. А. Адамова, А. П. Адамов // Евразийский союз ученых. – 2014. – № 6-3. – С. 6–8.
17. Адамова, А. А. Многоуровневая модель формирования технологичности электронных средств на этапах проектирования и производства / А. А. Адамова, А. П. Адамов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 11 (23). – С. 12.
18. Адамова, А. А. Проведение научных экспериментов в наноинженерии / А. А. Адамова, В. М. Башков, В. А. Шахнов и др. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 426 с.
19. Волкова, Я. Б. Транзисторные структуры на основе графена : автореф. дис. ... техн. наук / Волкова Я. Б. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. – 16 с.
20. Власов, А. И. Графеновый гибкий сенсорный экран с интегрированным аналого-цифровым преобразователем / А. И. Власов, Д. С. Терентьев, В. А. Шахнов // Микроэлектроника. – 2017. – Т. 46, № 3. – С. 1–9.
21. Власов, А. И. Анализ влияния формы мембраны на механическую прочность и стабильность параметров МЭМС-сенсоров давления / А. И. Власов, Т. А. Цивинская, В. А. Шахнов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2016. – № 4. – С. 65–70.
22. Прототип нейросети создан из пластиковых мемристоров. – URL: <http://www.nanonewsnet.ru/news/2016/prototyp-neiroseti-sozdan-iz-plastikovykh-memristorov>

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный технический
университет
(367006, Россия, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Пирамидальная, 49)
E-mail: info@iu4.bmstu.ru

Адамова Арина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии производства
электронной аппаратуры,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Аннотация. Данная статья посвящена перспективному направлению использования в семантическом анализе перспективных изделий микро- и наноэлектроники. Основное внимание уделено показателям качества и технологичности. Для оценки надежно-

Adamov Aleksandr Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(367006, 49 Piramidal'naya street, Mahachkala,
Dagestan, Russia)

Adamova Arina Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and production technology
of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, page 1, apartment 5, 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Abstract. His article is devoted to perspective direction of use in the semantic analysis of advanced products for micro-and nanoelectronics. Attention is paid to indicators of quality and technology. To assess the reliability of the system, choice of quality indicators to describe

сти системы, выбора показателей качества, описания связей системы и мета-системы используется системный анализ и системный подход. Проблема компактного визуального представления многофакторной и сложносвязанной информации является одной из основных в современных проектных процедурах. Рассмотрим методы и подходы визуального семантического анализа сложных систем и процессов на примерах перспективных объектов и процессов микро- и нанoeлектроники.

Ключевые слова: показатели качества, технологичность, нанoeлектроника, семантический анализ, надежность системы.

the connection of the system and meta-system used system analysis and system approach. Problem compact visual representation of multivariate information is one of the major in modern design procedures. Consider the methods and approaches of visual analysis of complex systems and processes examples of promising targets and processes for micro – and nanoelectronics.

Key words: indicators of quality, technology, nanoelectronics, semantic analysis, the reliability of the system.

УДК 658.52

Адамов, А. П.

Семантический анализ перспективных изделий микро- и нанoeлектроники с точки зрения увеличения ключевых показателей качества и технологичности / А. П. Адамов, А. А. Адамова // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 94–101. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-14.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОРОДСКОЙ МАРШРУТНОЙ СЕТИ**К. П. Андреев**

Городской пассажирский общественный транспорт является важнейшим элементом транспортной системы, который обеспечивает ежедневную транспортную подвижность двух третей населения России. Управление городским пассажирским транспортом с момента перехода к рыночной экономике претерпело существенные изменения, что оказало существенное влияние на финансовое состояние пассажирских предприятий и, как следствие, на уровень качества транспортного обслуживания населения [1]. Качество жизни населения современных больших городов (мегаполисов) существенно зависит от эффективности управления городским пассажирским транспортом. Все это приводит к стремительному увеличению спроса на передвижения и в количественном (объем транспортного потока) и в качественном отношении (комфортность, безопасность и надежность транспорта). Существующие объекты транспортной инфраструктуры и пассажирский транспорт не позволяют удовлетворить растущий спрос в полном объеме. Возникают трудности в последовательном планировании систем городского пассажирского транспорта и управлении ими, что является необходимым условием успешного решения существующих транспортных проблем [2].

Быстрые темпы развития автомобильного пассажирского транспорта обусловили определенные проблемы, для решения которых требуется научный подход и значительные материальные затраты. Основными из них являются увеличение пропускной способности улиц, строительство дорог и их благоустройство, оптимизация маршрутной сети, организация стоянок и гаражей, координация деятельности различных организаций, управление и контроль работы транспорта, управление движением транспортных потоков; повышение качества транспортного обслуживания населения и безопасности перевозок пассажиров; вопросы организации безопасности движения [3].

Развитие городского пассажирского транспорта выявляет ряд задач перед специалистами по организации дорожного движения и оказывает большое влияние на весь процесс дорожного движения. В последние годы специалистами в сфере организации и безопасности движения представляются обоснованные предложения по решению транспортной проблемы в центральных частях больших городов путем более масштабного и эффективного использования общественного транспорта. При организации и безопасности движения маршрутного пассажирского транспорта нужно учитывать, что одной из главных задач транспортного обслуживания городского населения является обеспечение приемлемых затрат времени на передвижение от мест проживания до работы [4].

Для развития и полноценного существования городского пассажирского общественного транспорта можно выделить основные пути решения. В первую очередь нужно постоянно проводить обследование пассажиропотоков на всех существующих маршрутах города, задачами которого являются:

- определение существующего пассажиропотока на маршрутах по направлению движения автобусов, по времени суток, в различные дни недели;
- определение показателей наполняемости по направлению движения автобусов, по времени суток, в различные дни недели;
- обработка результатов обследования пассажиропотока на маршруте;
- выработка дальнейших мероприятий по оптимизации маршрутной сети города.

Обследование пассажиропотоков на маршрутах проводится счетно-табличным методом, обеспечивающим на этапе статистической обработки полученных первичных данных из расчета достоверности результата оценки пассажиропотока по каждому маршруту не ниже 95 %.

Статистическая обработка материалов обследования пассажиропотока производится на основании данных первичного учета с использованием вычислительной техники и содержит следующие маршрутные характеристики:

- наименования остановочных пунктов;
- расстояние маршрута по участкам;

- коэффициент использования вместимости автобуса;
- пассажирооборот по часам суток на маршруте по каждому часу;
- пассажиропоток в прямом и обратном направлении на маршруте, транспортная работа в прямом и обратном направлении;
- суммарный пассажиропоток на маршруте;
- транспортная работа на маршруте в прямом и обратном направлении;
- количество ТС и оборотных рейсов на маршруте.

Полученные результаты позволят определить: объем перевозок и пассажирооборот по каждому маршруту и в целом по всей маршрутной сети; среднюю дальность поездки пассажиров по маршрутам; пассажиронаполнение автобусов по каждому маршруту и по перегонам; пассажирообмен остановочных пунктов; количество перевезенных пассажиров с оплаченным и неоплаченным проездом; доходы от эксплуатации автобусов по маршрутам [5, 6].

Следующим этапом является оптимизация действующей городской маршрутной сети путем изучения корреспонденций пассажиропотока и информационной модели транспортной системы города, схема которой представлена на рис. 1.

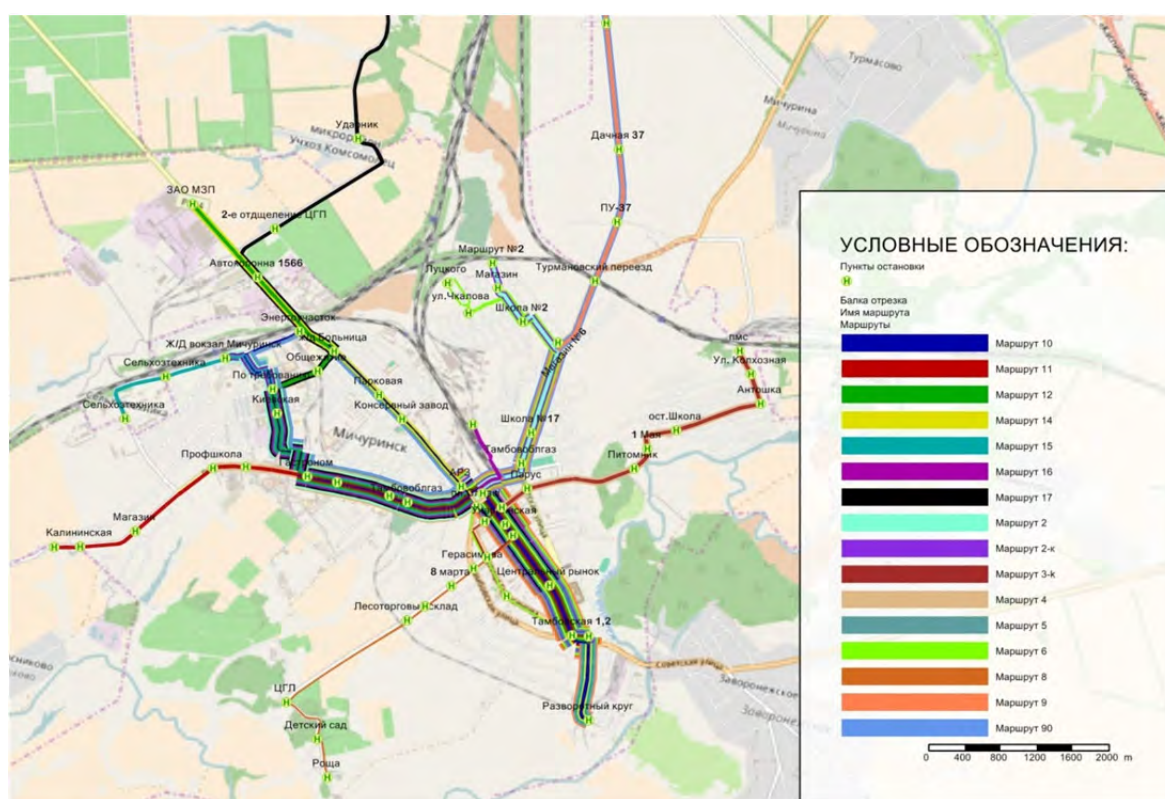


Рис. 1. Городская маршрутная сеть общественного транспорта

Для решения этих задач уже существуют ранее разработанные и эффективно применяемые на практике автоматизированные информационно-аналитические системы, представляющие собой программные комплексы для транспортного моделирования и планирования, транспортные макромодели города с использованием программного обеспечения. Все эти системы, а также данные по параметрам уличной дорожной сети города, пассажиропотоку в совокупности направлены на повышение эффективности транспортной системы на основе выбранных критериев оптимизации для работы – оценки существующей сети общественного транспорта и создания новой [7–9].

Проанализировав работу подвижного состава по существующей и предлагаемой схеме маршрутной сети общественного транспорта, из 16 существующих маршрутов были упразднены четыре и в четыре внесены изменения пути следования с организацией дополнительных остановочных пунктов и использованием улиц города, ранее не задействованных в транспортном обслуживании. Предложенная схема маршрутной сети общественного транспорта является оптимальной и не требует открытия новых маршрутов.

Также для более качественного предоставления услуг по обслуживанию населения необходимо заменить микроавтобусы на более вместительные автобусы средней и большой вместимости, которые будут оборудованы местами для перевозки маломобильных групп населения, и произвести внедрение в организацию пассажирских перевозок навигационной системы мониторинга ГЛОНАСС/GPS и Систему мониторинга безопасности и управления подвижными объектами (Locatrans).

В рамках внедрения навигационной системы мониторинга ГЛОНАСС/GPS необходимо:

- создать Центральную диспетчерскую службу по регулированию движения общественного транспорта, такую как Региональный навигационно-информационный центр (РНИЦ), целью которого является: информационно-навигационное обеспечение деятельности любого автомобильного транспорта, эффективное управление движением автотранспортных средств; повышение уровня безопасности перевозок пассажиров, специальных, опасных, тяжеловесных и крупногабаритных грузов; эффективная реализация контрольно-надзорных полномочий в транспортном комплексе. Данный центр будет заниматься сбором, хранением, обработкой и передачей мониторинговой информации транспорта различного назначения [10];
- на остановочных пунктах установить электронные информационные табло, показывающие в режиме реального времени прибытие пассажирского городского транспорта;
- оборудовать весь подвижной состав «тревожной кнопкой» для обеспечения дополнительной безопасности перевозок пассажиров;
- создать интернет-портал, на котором будут отображаться в режиме реального времени весь пассажирский транспорт, который работает на том или ином маршруте с возможностью определения их прибытия на определенный остановочный пункт;
- для более эффективной работы городского общественного транспорта координировать и установить систему контроля за регулярностью его передвижения по маршрутам, путем распределения количества подвижного состава на линии, что позволит производить контроль за выполнение планового объема рейсов и получать положительные отзывы граждан, пользующихся общественным транспортом ежедневно.

Следует отметить, что условиями достижения результатов являются:

- широкое информирование граждан о планируемых изменениях в СМИ;
- организация работы Центральной диспетчерской службы по регулированию движения общественного транспорта с целью обеспечения его достаточности и ритмичности работы;
- постоянный мониторинг состояния общественного транспорта с целью своевременной реакции на изменения транспортной ситуации и анализа возможных улучшений в системе общественного транспорта;
- наличие резервного подвижного состава различной вместимости, улучшение работы общественного транспорта в часы пик;
- работа по дальнейшему развитию транспортной маршрутной сети городского пассажирского общественного транспорта [11].

Система мониторинга безопасности и управления подвижными объектами (Locatrans) служит для обеспечения контроля и управления за всем подвижным составом, находящимся на предприятии. Система мониторинга (Locatrans) предназначена для того, чтобы:

- определять месторасположение объектов и отображать их на электронной карте в режиме реального времени;
- определять и отображать параметры движения объектов: скорость, направление движения, пройденный маршрут, места и продолжительность остановок;
- контролировать состояние датчиков, установленных на мобильном объекте; удаленно управлять исполнительными устройствами, установленными на мобильном объекте;
- контролировать маршрут движения; получать своевременное оповещение о входе или выходе из заданных географических зон;
- пользоваться встроенными стандартными отчетами;
- формировать отчеты по различным показателям за любой период времени; формировать архивы о перемещении объектов и происшедших с ними событиях.

Используя систему Locatrans на предприятиях, можно увеличить объем перевозок и количество предоставляемых услуг; снизить аварийность; продлить срок эксплуатации транспортных

средств; повысить дисциплину персонала; исключить нецелевое использование транспорта; оптимизировать расход топлива и ГСМ; уменьшить число холостых пробегов транспорта [12].

Предлагаемая замена подвижного состава и изменение действующих маршрутов позволяют сократить общее количество используемых транспортных средств на 16,5 %, тем самым улучшить не только пропускную способность улично-дорожной сети, но и вопросы экологии города. В результате проведенной работы было получено уменьшение количества маршрутов; существенное увеличение доли более вместительного транспорта в пассажирских перевозках; увеличение общей вместимости транспортных средств, примерно на 10 %; осуществление возможности беспересадочного проезда транспортом между активно корреспондирующими районами города; снижение загрузки УДС на треть и дублирования маршрутов в среднем на 15 %.

Подводя итоги исследования городского пассажирского общественного транспорта, можно сделать вывод о целесообразности проведения мероприятий по развитию и улучшению транспортной сети города, так как это повысит качество предоставляемых услуг по обслуживанию перевозок пассажиров.

Библиографический список

1. Андреев, К. П. Современные проблемы городского пассажирского транспорта / К. П. Андреев, В. В. Терентьев // Научный журнал: Научный альманах. – 2016. – № 11-2 (25). – С. 19–21.
2. Андреев, К. П. Информационное моделирование в проектировании транспортных сетей городов / К. П. Андреев, В. В. Терентьев // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. – 2016. – № 117-2. – С. 108–110.
3. Андреев, К. П. Мероприятия по улучшению улично-дорожной сети / К. П. Андреев, С. Н. Кулик, В. В. Терентьев // Новая наука: Проблемы и перспективы. – 2016. – № 115-2. – С. 156–159.
4. Андреев, К. П. Безопасность пассажирских автомобильных перевозок / К. П. Андреев // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – № 12-3 – С. 14–17.
5. Андреев, К. П. Обследование пассажиропотоков на городских автобусных маршрутах / К. П. Андреев, В. В. Терентьев, С. Н. Кулик // Новая наука: Проблемы и перспективы. – 2016. – № 115-2. – С. 159–161.
6. Андреев, К. П. Оптимизация городского маршрута в условиях МУП «Автоколонна» / К. П. Андреев, В. В. Терентьев // Теория и практика современной науки. – 2016. – № 12 (18). – С. 567–570.
7. Агуреев, И. Е. Моделирование загрузки улично-дорожной сети / И. Е. Агуреев, В. А. Пышный, В. И. Швецов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 6-2. – С. 127–139.
8. Агуреев, И. Е. Динамическая модель транспортной макросистемы / И. Е. Агуреев, А. Е. Богма, В. А. Пышный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 6-2. – С. 139–145.
9. Терентьев, В. В. Анализ методов оценки матриц корреспонденций / В. В. Терентьев // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – № 12-3. – С. 162–164.
10. Андреев, К. П. Исследование работы РНИЦ / К. П. Андреев // Новая наука: Проблемы и перспективы. – 2016. – № 121-3. – С. 144–145.
11. Андреев, К. П. Технологии ГЛОНАСС на городском пассажирском транспорте / К. П. Андреев, В. В. Терентьев // Наука и современное общество: взаимодействие и развитие. – 2016. – № 1 (2). – С. 118–120.
12. Андреев, К. П. Мероприятия по внедрению системы мониторинга автотранспорта на МУП «Автоколонна» / К. П. Андреев, В. В. Терентьев // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Тула : ТулГУ, 2017. – С. 248–251.

Андреев Константин Петрович
магистрант,
Тульский государственный университет
(300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)
E-mail: kosta066@yandex.ru

Andreev Konstantin Petrovich
master degree student,
Tula State University
(300012, 92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Аннотация. Проведено исследование маршрутной сети города, где рассмотрены транспортные проблемы и выявлены пути решения. Предлагается проведение и разработка мероприятий по оптимизации городской маршрутной сети пассажирского

Abstract. In this article a study of the route network, which considered transport problems and identified solutions. It is anticipated that the development of measures to optimize urban route network of passenger transport. In accordance with the selected optimization

транспорта. В соответствии с выбранными мероприятиями по оптимизации была разработана методика обследования пассажиропотоков, планирование оптимальной схемы маршрутной сети общественного транспорта города, а также внедрение в сфере пассажирских перевозок навигационной системы мониторинга ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS и Системы мониторинга безопасности и управления подвижными объектами (Locatrans). Также большое внимание уделялось обеспечению безопасности организации городских пассажирских перевозок и безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: транспорт, оптимизация, маршрутная сеть, пассажирские перевозки, мониторинг, ГЛОНАСС, макромодель, пассажиропотоки.

measures analyzed passenger surveys, planning the optimal scheme of the route network public transport city, as well as introduction in the field of passenger transport navigation monitoring system GLONASS or GLONASS/GPS and Monitoring of Security and control of mobile objects (Locatrans). Also, much attention was paid to ensuring the security of the organization of urban passenger transport and road safety.

Key words: transport, optimization of route network, passenger transport, monitoring, GLONASS, macro-model, passenger traffic.

УДК 656.051

Андреев, К. П.

Совершенствование городской маршрутной сети / К. П. Андреев // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 102–106. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-15.

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРОЦЕСС РУЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ

Д. А. Моисеев

Актуальность

Современный мир с каждым годом становится все технологичнее и технологичнее. Появляются новые информационные устройства, гаджеты, новые сервисы, программы и электроника. Прогресс в сфере информационных технологий шагает огромными шагами и все больше вещей в современном мире мы стараемся сделать, не выходя из дома, будь то покупка чего-либо, оплата коммунальных услуг, налогов и т.д. Технология же всех программ и сервисов становится все сложнее, и современного человека уже трудно удивить каким-то нововведением. И естественно, каждый человек хочет этим пользоваться, не боясь потерять свои деньги, он хочет, чтобы приложение работало правильно, чтобы оно было удобным и не вызывало у него никаких проблем. Но в нынешнее время сложность этих сервисов настолько большая, что зачастую выпустить продукт, в котором все работает корректно и не вызывает никаких нареканий, практически невозможно. Хотя каждый производитель максимально к этому стремится. Ведь в современном мире конкуренция настолько большая, что одна ошибка может заставить перейти пользователя к прямому конкуренту, что означает большие потери. Программисты, которые раньше отвечали не только за разработку конкретного приложения, но и за его качество, со временем из-за сложности систем не успевают не только разрабатывать, но и проверять приложения на качество. Однако качество при этом не должно страдать. Поэтому начал развиваться новый вид деятельности, а именно, тестирование программного обеспечения. На начальных этапах данная деятельность обозначала просто соответствие конечного результата тому, что должно было быть. Но с развитием программного обеспечения и его сложности активно развивалось и тестирование. Постепенно тестирование стало все сложнее и объемнее, поэтому окончательно отделилось от программирования и стало называться «Обеспечение качества ПО». Оно стало в себя включать не только тестирование, но и планирование, проектирование, поддержку, создание и выполнение тестов.

В наше время представить разработку хотя бы одного самого простого приложения, сайта или программы без обеспечения качества уже невозможно. Этот процесс начинается вместе с разработкой и является не менее важной частью в цикле разработки программного обеспечения. Потому что плохое обеспечение качества может привести к очень печальным последствиям, начиная от потери денег и заканчивая расшифровкой каких-либо личных, а иногда и государственных данных. Именно поэтому процесс обеспечения качества очень важен и должен проходить по всем правилам. К сожалению, многие заблуждаются, думая, что обеспечение качества заключается лишь в нахождении ошибок.

Все ручное тестирование делится на три группы:

- 1) функциональное;
- 2) нефункциональное;
- 3) связанное с изменениями.

Функциональное тестирование

Функциональное тестирование – это тестирование непосредственно функций и задач продукта. Оно происходит на всех уровнях тестирования: модульном, интеграционном, системном и приемочном [1].

На модульном уровне тестирования [1] проверяется корректная работа одного отдельного модуля внутри себя. Тесты для такого тестирования обычно пишутся еще до написания основного кода программы. Код модуля считается написанным успешно, когда он проходит на соответствие всем проверкам, которые были описаны до его написания. Обычно тестированием модульного уровня (или Unit-тестированием) занимается сам разработчик, который пишет этот код.

Интеграционный уровень тестирования делится на модульный интеграционный уровень и системный интеграционный уровень [1].

В модульном интеграционном уровне проверяется взаимодействие между модулями системы после проведения модульного тестирования. Все написанные модули объединяют и происходит проверка на соответствие корректной работы не одному модулю, а взаимодействия нескольких.

В системном интеграционном уровне [1] проверяется взаимодействие между разными системами после проведения системного тестирования. Это проверка на соответствие корректной работы разных приложений, программ, сайтов между собой.

На системном уровне [1] полностью проверяется работа всей системы, взаимодействия всех ее модулей и всех программ между собой. Это тестирование должно вестись на контуре, который максимально приближен к контуру, на котором будет реальный продукт. Это тестирование должно вестись как на базе требований (для каждого требования свой тестовый случай), так и на базе случаев использования (проверяются сценарии использования данного продукта, на каждый сценарий свой тест-кейс).

На приемочном уровне [1] тестирования продукт показывается непосредственному заказчику. Вместе с ним проходятся тестовые сценарии, и он выносит решение, либо пропускать продукт в промышленное использование, либо возвращать на доработку.

В функциональное тестирование также входит тестирование безопасности [2] (проверка системы на конфиденциальность, целостность и доступность данных), а также тестирование взаимодействия (проверка системы на возможность работы с другими системами и совместимость).

Нефункциональное тестирование

Нефункциональное тестирование [1] описывает тесты, необходимые для определения характеристик программного обеспечения, которые могут быть измерены различными величинами. В нефункциональное тестирование входят такие виды тестирования, как тестирование производительности, тестирование установки, тестирование удобства пользования, тестирование на отказ и восстановление, конфигурационное тестирование.

Тестирование производительности [3] должно выявить, насколько система корректна работает при одновременном использовании данного продукта многими пользователями. Не «упадет» ли твой продукт, не потеряются ли данные пользователи и т.д. Также оно позволяет определить максимальное число пользователей, которые могут одновременно пользоваться вашим продуктом.

Тестирование установки проверяет, корректно ли продукт устанавливается и удаляется на рабочую машину пользователя [3].

Тестирование удобства пользования [2] является одним из самых важных и сложных видов тестирования. Этот вид тестирования определяет, насколько удобно и приятно будет конечному пользователю пользоваться вашей программой. У каждого человека есть свое мнение, что где должно находиться, чтобы продуктом было удобно пользоваться. Однако есть некие негласные правила, которые соблюдаются почти всегда (например, то, что меню должно быть сверху). Тестирование удобства может проводить не только тестировщик, но и группа конечных пользователей в тестовых режимах продукта. Это помогает собрать нужную и общую информацию о том, как именно конечным клиентам будет удобно пользоваться вашим приложением.

Тестирование на отказ и восстановление [4] заключается в проверке конечного продукта на возможность восстановиться после какого-то сбоя (отключение электричества, отказ сети). Это очень специфический вид тестирования и надо предусмотреть все возможные виды отказа системы и адекватную реакцию на эти отказы.

Конфигурационное тестирование [4] должно определить набор конфигураций, которые будут достаточны для работы системы на конкретном устройстве (самый популярный пример такого тестирования – это минимальные и подходящие системные требования для игр).

Тестирование, связанное с изменениями

Эта группа является одной из наиболее часто используемых на практике. Оно проверяет систему после каких-либо внесенных изменений в ней (будь то исправление багов или разработка новых функциональных требований). На практике оно встречается чаще всего и именно это тестирование является ключевым в качестве обеспечения продукта. Ведь любое даже малейшее из-

менение в коде продукта может потянуть за собой ошибки, которых не было до изменений. Основными видами этого тестирования являются дымовое тестирование, регрессионное тестирование, тестирование сборки, санитарное тестирование.

Дымовое тестирование [4] проверяет, как после установки новой версии или сборки продукт запускает и выполняет свои основные функции. Обычно это тестирование происходит после выкладки кода в продуктивный контур (версию в промышленной эксплуатации) и проверяет корректность работы основного функционала продукта после обновления версии на реальных пользователях или данных.

Регрессионное тестирование – это полное тестирование продукта (как функциональными видами, так и не функциональными) для того, чтобы убедиться, что новые изменения не в коде не создали новых багов в других местах [3]. Обычно это самое длительное и трудозатратное тестирование, так как даже после исправления одного бага необходимо пройти все сценарии тестирования данного продукта. Обычно именно на этапе регрессионного тестирования находится большинство багов и несоответствий системы и технического задания. Еще одна трудность заключается в том, что если в самом конце тестирования нашелся баг, который является критичным или блокирующим, то после его исправления необходимо заново и полностью провести цикл регрессионного тестирования.

Тестирование сборки [3] очень напоминает дымовое тестирование. Однако если в дымовом тестировании проверяется только основной функционал, то при тестировании сборки есть возможность учитывать какие-то спецификации и пожелания на данном этапе тестирования.

Санитарное тестирование [4] является узконаправленным тестированием, проверяющим работу конкретной функции или блока. Является подвидом регрессионного тестирования и определяет работоспособность части продукта после изменения.

Очень многие путают понятия, говоря, что дымовое и санитарное тестирование является одним и тем же. Однако это неправильно. Это два совершенно разных вида тестирования. Если дымовое тестирование – это больше тестирование вширь, для проверок «вширь» основного функционала, то санитарное тестирование, это тестирование «вглубь» одной конкретной функции или модуля.

Модель идеального процесса ручного тестирования

Если говорить о какой-либо идеальной модели тестирования, то у разных тестировщиков в разных компаниях будет очень много споров, потому что идеальной модели нет. Ручное тестирование очень сильно зависит от конкретных задач, конкретных специалистов и конкретного приложения. Таким образом, необходимо создать модель тестирования.

Этапы тестирования

Этапами тестирования являются следующие:

- 1) написание тест-плана;
- 2) разработка тест-кейсов;
- 3) дымовое тестирование;
- 4) проверка дефектов;
- 5) регрессионное тестирование;
- 6) санитарное тестирование;
- 7) написание отчета о тестировании;
- 8) дымовое тестирование на продуктивном контуре.

Написание тест-плана. Многие думают, что тестирование начинается только после того, как какая-то часть программы уже написана. Это большое заблуждение. Тестирование начинается с момента первых упоминаний о возможном приложении. В этот момент команда тестирования должна начать обдумывать подходы и варианты тестирования данного приложения. Далее составляется один из ключевых артефактов тестирования – «Тест-план». В тест-плане тестировщики обязаны указать, что именно надо тестировать (приложение, программа), что будем тестировать (список функций), какими видами будет тестироваться приложение (интеграционное, регрессионное и т.д.), сроки тестирования, критерии начала и окончания тестирования. Это необ-

ходимая информация, которую надо указывать в тест-плане. Все остальное зависит от проекта. Например, в веб-приложениях можно указывать браузеры, в которых проводилось тестирование, список доработок и исправленных дефектов и т.д.

Разработка тест-кейсов. Одна из самых сложных и нелюбимых задач любого специалиста по обеспечению качества, однако при этом и самая важная. В момент, как только тестировщик получает первую документацию и техническое задание по системе, ему необходимо начинать писать тест-кейсы или тестовые случаи. Это необходимые шаги, которые должны привести к какому-либо ожидаемому результату. Эти шаги должны быть описаны максимально подробно и максимально опираться на документацию, чтобы не возникало споров о том или ином действии системы.

Дымовое тестирование. Это первое тестирование, которое проходит на новой вышедшей версии. Если проверка новой сборки на основные функции выявила какие-то несоответствия в работе, то сборка признается неуспешной и возвращается на доработку.

Проверка дефектов. Все дефекты, которые были выявлены в предыдущих версиях, а в новой версии находятся в статусе «Готово для тестирования», должны быть проверены в первую очередь. Потому что после их проверки может оказаться, что одно исправление задело другое и этот дефект необходимо возобновлять в новой версии. Если такие дефекты есть, то тестирование начинается с п. 3. Если же нет, то все дефекты закрываются.

Регрессионное тестирование. После того, как дымовое тестирование и проверка дефектов прошли успешно, необходимо начинать регрессионное тестирование. Именно для этого и нужны были тест-кейсы из п. 2. В регрессионном тестировании система полностью проверяется на наличие дефектов и новые найденные дефекты заводятся в следующую версию, если не являются стопперами в работе системы.

Если же дефект является критичным, то тестирование надо начинать с п. 3, в том числе и заново проходить все регрессионное тестирование. Хотя обычно в фазе «Дымовое тестирование» все критичные дефекты выявляются.

Санитарное тестирование. Санитарное тестирование проводится в случаях, когда стоппер удалось обнаружить слишком поздно и нет времени на полноценное регрессионное тестирование. В этом случае после исправления критичного дефекта проявляется вся функциональность, каким-либо образом связанная с функциональностью, которая использовалась в месте обнаружения дефекта.

После проведения п. 5 и при необходимости п. 6 пишется отчет о тестировании. В нем указывается: какие виды тестирования были проведены, какие новые дефекты были заведены, сроки выполнения тестирования, критические проблемы при тестировании и др. Но главное – в конце отчета должен быть вывод о результатах тестирования, готова ли текущая сборка уходить в промышленную эксплуатацию или не готова.

Дымовое тестирование на продуктивном контуре. Последний этап тестирования проводится уже в продуктивной версии. Этот этап тестирования выявляет, что приложение работает с реальными данными, пользователями без сбоев [5].

В целом этот процесс может сильно меняться от количества времени, проекта, количества людей и других факторов. Однако именно эта модель и последовательность, по мнению авторов, максимально подходит для эффективного определения качества продукта. Однако для того, чтобы все виды тестирования прошли успешно, необходимо соблюдать несколько основных принципов. Первое и одно из самых важных – это изолированность тестирования. Во время начала тестирования продукта программист не имеет права выкладывать что-либо на тестовый контур. Потому что любое, даже самое незначительное изменение в коде может привести к ошибкам в тех местах, которые уже были проверены. Поэтому после любого изменения тестового контура программистом необходимо заново начинать тестирование с п. 3. Во-вторых, это универсальность те-

стировщика. Каждый из команды тестирования данного проекта должен обладать полными знаниями по системе. Когда ты изо дня в день, из года в год выполняешь одни и те же тест-кейсы, твой взгляд начинает «замыливаться», и ты можешь пропустить часть дефектов. Для этого функционал, который проверяет каждый тестирующий, должен меняться, чтобы тестирование оставалось качественным. В-третьих, устраивающий всех жизненный цикл дефектов. Это позволит избежать конфликтов и уменьшить количество разговоров между программистом и тестирующим. В-четвертых, общий шаблон ведения баг-трекеров и дефектов. Это облегчит задачу по созданию, обновлению, понятию и исправлению дефектов.

Заключение

В этой статье описываются методологии тестирования и процесс тестирования, которые максимально приближены к идеалу. Тестирование, а если быть корректным, то оценка качества ПО является большой и обособленной работой для оценки качества продукта и удовлетворение конечных результатов клиента. Без тестирования нельзя представить ни одно серьезное приложение, сайт, технику или еще что-либо. Однако это профессия еще молода и ей есть куда расти.

Библиографический список

1. Лайза, Криспин. Гибкое тестирование: практическое руководство для тестирующих ПО и гибких команд / Лайза Криспин, Джанет Грегори. – М. : Вильямс, 2010. – 464 с. – (Addison-Wesley Signature Series).
2. Сеницын, С. В. Верификация программного обеспечения / С. В. Сеницын, Н. Ю. Налютин. – М. : БИНОМ, 2008. – 368 с
3. Канер, Кем. Тестирование программного обеспечения. Фундаментальные концепции менеджмента бизнес-приложений / Канер Кем, Фолк Джек, Нгуен Енг Кек. – Киев : ДиаСофт, 2001. – 544 с
4. Калбертсон, Роберт. Быстрое тестирование / Калбертсон Роберт, Браун Крис, Кобб Гэри. – М. : Вильямс, 2002. – 374 с.
5. Гленфорд, Майерс. Искусство тестирования программ / Гленфорд Майерс, Том Баджетт, Кори Сандлер. – М. : Диалектика, 2012. – 272 с.

Моисеев Даниил Александрович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: daniilmoiseev@mail.ru

Moiseev Daniil Aleksandrovich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обеспечение качества любого продукта в настоящее время невозможно переоценить. Для того, чтобы продукт полностью соответствовал всем ожиданиям пользователя, необходимо провести продукт через все стадии тестирования. Оценка качества продукта является задачей, к которой нужно подходить, соблюдая все стадии тестирования. *Материалы и методы.* Для качественного тестирования программного обеспечения необходимо использовать все накопленные знания и методологии тестирования, такие как функциональное тестирование, нефункциональное тестирование, тестирование, связанное с изменениями. *Результаты.* Предложенный процесс тестирования программного обеспечения является максимально близким к идеалу. Если пройти все этапы тестирования, которые описаны, то в качестве программного продукта можно будет не сомневаться. Адекватность данной схемы тестирования программного обеспечения проверена экспериментально.

Abstract. *Background.* Ensuring the quality of any product at present can not be overemphasized. In order for the product to fully meet all the expectations of the user, it is necessary to carry out the product through all the testing stages. Evaluation of product quality is a task that must be approached, observing all stages of testing. *Materials and methods.* For qualitative software testing, it is necessary to use all the accumulated knowledge and testing methodologies, such as functional testing, non-functional testing, testing related to changes. *Results.* The proposed process of software testing is the closest to the ideal. If you go through all the stages of testing that are described, then as a software product you can have no doubt. The adequacy of this software testing scheme has been verified experimentally. *Conclusions.* Proper testing of any product is a guarantee that the user or buyer will be satisfied with it. Improving product quality and quality testing is one of the most important tasks that now faces any manufacturer.

но. *Выводы.* Правильное тестирование любого продукта является гарантией того, что пользователь или покупатель останутся им довольны. Повышение качества продукции и качественного тестирования является одной из важнейших задач, которая сейчас стоит перед любым производителем.

Ключевые слова: функциональное тестирование; нефункциональное тестирование; тестирование, связанное с изменениями; этапы тестирования.

Key words: functional testing, non-functional testing, testing related to changes, testing stages.

УДК 797.561

Моисеев, Д. А.

Методология и процесс ручного тестирования / Д. А. Моисеев // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 107–112. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-16.