

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Фролов С. И., Горячев Н. В., Таньков Г. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ РЭС	3
Дедков В. К. О ПРОИСХОЖДЕНИИ НОВЫХ ЗВЕЗД И ПЛАНЕТ	9
Авакян А. А., Копненко М. В., Романенко Ю. А., Лоцманова Е. В. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РЕСУРС СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ.....	17
Гришко А. К. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ И РИСКОМ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ	26

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Гришко А. К., Лукин В. С., Юрков Н. К. СИНТЕЗ ТЕСТОВЫХ ОБРАЗОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ	32
Moldamurat K., Yergaliyev D. S., Moldamurat A., Tulkibay Sh. RADAR REMOTE-SENSING INSTRUMENTS OF THE EARTH	41
Горячев В. Я., Кисляков С. В., Бростилова Т. Ю. АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ.....	46
Михайлов В. С. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ, НЕ ДАВШИХ ОТКАЗЫ	56
Батищева О. М., Папшев В. А., Родимов Г. А. ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СБОРКЕ	61
Данилова Е. А., Кочегаров И. И., Трусов В. А. МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	68

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Трусов В. А., Вершинин Н. Н., Авдоница А. А., Вершинин А. Е. ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАГРУЗКИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИНДУКЦИОННУЮ ПЕЧЬ	77
---	----

Вершинин Н. Н., Шумилин А. Д., Волкова А. В., Авдоница Л. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДА АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ «ЕВРО-5» НА ВОЗДУШНЫЙ БАССЕЙН ГОРОДА.....	83
Терентьев В. В. БЕЗОПАСНОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ.....	90

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 621.396.69.01

DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-1

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ РЭС

С. И. Фролов, Н. В. Горячев, Г. В. Таньков,
И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков

Введение

В современной военной технике используется большое количество различных сложных радиоэлектронных средств (РЭС), к которым предъявляются высокие требования по надежности. Стоимость этих РЭС весьма высока. Например, доля стоимости бортовых РЭС истребителя составляет до 80 % от его общей стоимости [1].

Рост надежности применяемых в РЭС ЭРИ дает заметное снижение количества отказов РЭС, однако поток этих отказов остается пока на значительном уровне [2], что во многом связано с высокими темпами роста сложности аппаратуры и конструктивными недоработками.

Особое внимание приходится уделять обеспечению надежности бортовых РЭС, работающих в условиях воздействия внешних возмущающих факторов (ВВФ), наиболее опасными из которых являются тепловые и механические. Доля отказов от воздействия этих двух факторов составляет до 90 % [3]. Следует при этом отметить, что из механических воздействий наибольшую долю отказов дают вибрации, при которых в блоках РЭС возникают резонансные колебания, усиливающие механические нагрузки на элементы конструкции в десятки раз.

Зависимость показателей надежности РЭС от тепловых воздействий и вибрации

Рассмотрим, как зависят показатели надежности РЭС от внешнего теплового воздействия и вибрации по методике, приведенной в справочнике «Надежность электрорадиоизделий» [4].

Суммарная интенсивность отказов устройства определяется по формуле

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N \lambda_j,$$

где λ_j – интенсивность отказа j -го электрорадиоизделия (ЭРИ); $j = 1, \dots, N$; N – общее число ЭРИ.

Значения эксплуатационной интенсивности отказов большинства групп ЭРИ рассчитываются по математическим моделям, имеющим вид

$$\lambda_j = \lambda_{\text{б}} \cdot \text{ПК}_i \text{ или } \lambda_j = \lambda_{\text{б.с.г.}} \cdot \text{ПК}_i,$$

где $\lambda_{\text{б}}$ ($\lambda_{\text{б.с.г.}}$) – базовая интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ, рассчитанная по результатам испытаний ЭРИ на безотказность, долговечность, ресурс; K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов ($i = 1, \dots, n$); n – число учитываемых факторов.

Данные по λ_6 ($\lambda_{6,с.г.}$) и K_i приведены в вышеуказанном справочнике.

Нас будут интересовать коэффициенты влияния на интенсивность отказов от температуры окружающей среды K_t и от вибрации K_v . В нашем случае в первом приближении можно принять K_v равным жесткости условий эксплуатации K_3 , т.е. $K_v = K_3$.

Тогда, например, для интегральной схемы с количеством элементов от 100 до 1000 из таблицы № 7 [4] при $t = 55^\circ\text{C}$ следует, что $K_t = 2$, а из таблицы № 10 [4] для групп аппаратуры 3.3, 3.4 по ГОСТ РВ 20.39.304-98 $K_3 = 5$, т.е. совместно эти два параметра при температуре окружающей среды равной 55°C дают увеличение интенсивности отказов примерно в 10 раз.

Тепловые воздействия

Для бортовых РЭС доля отказов от тепловых воздействий составляет по данным [3] 42–55 % от всех отказов, вызванных внешними возмущающими факторами (ВВФ). Оценим эффективность некоторых конструктивных мер по обеспечению требуемой надежности РЭС при тепловых воздействиях.

Допустим, что разрабатываемый герметичный блок РЭС с горизонтальным шасси имеет удельную тепловую мощность рассеивания 200 Вт/м^2 . Тогда по графику 6–3 [5] перегрев внутри блока относительно температуры окружающей среды при естественном воздушном охлаждении составит около 50°C . При допустимой величине перегрева, например 40°C , надо принимать конструктивные меры по уменьшению перегрева. Оребрение поверхности блока может дать уменьшение удельной тепловой мощности до двух раз. В этом случае, как видно из того же графика, перегрев составит около 30°C и войдет в зону допустимых значений. На усмотрение конструктора есть и другие способы уменьшения перегрева блоков бортовой РЭС, обдув поверхностей воздухом, кондуктивный отвод тепла от ЭРИ и др.

Механические воздействия

Для обеспечения требуемой надежности вибронегруженной РЭС при разработке применяется ряд способов, основными из которых являются [6]:

- использование наиболее устойчивых к механическим воздействиям ЭРИ;
- защита РЭС от механических воздействий установкой амортизаторов (виброизоляция);
- устранение или уменьшение до допустимого уровня резонансных явлений в конструкциях РЭС выведением собственных частот колебаний за пределы диапазона частот возмущающих воздействий (отстройка от резонансов) или увеличением демпфирующих свойств (демпфирование).

С помощью вышеприведенных приемов и других мер на всех этапах жизненного цикла бортовых РЭС в идеале должно быть обеспечено снижение доли отказов от действия вибрации до уровня стационарной аппаратуры, т.е. менее 5 % всех отказов [7]. Однако реально для бортовых РЭС доля отказов от вибраций много больше и составляет по данным из разных источников: 17–28 % [3], 40–60 % [8], 30–50 % от всех отказов, а в авиации – до 80 % [9].

Анализ проблем надежности-ориентированного проектирования РЭС

Проблем надежности-ориентированного проектирования РЭС достаточно много – от методических до технических. Например, следующие:

1. Разброс вышеприведенных данных по отказам от тепловых воздействий и вибрации показывает, что до настоящего времени нет единых методик исследования причин отказов и достаточно глубокого анализа физических процессов, приводящих к отказам бортовой РЭС, что снижает сопоставимость и достоверность получаемых результатов, требуемых для принятия эффективных мер [2].

2. Низкая достоверность расчетов надежности при разработке бортовой РЭС при надежности-ориентированных методах проектирования [7] из-за устаревающих данных по надежности ЭРИ справочника от 2006 г. [4]. Положение усугубляется тем, что погрешность расчетов возрастает в разы при умножении на коэффициент эксплуатационной жесткости K_3 . Все это не может не сказываться негативно на качестве принимаемых решений при разработке бортовой РЭС, в результате чего характеристики надежности при эксплуатации оказываются хуже расчетных.

3. Использование при конструировании РЭС неудачного критерия, по которому уровень вибрационных перегрузок на ЭРИ должен быть не больше допустимых по ТУ. Дело в том, что нет корреляционной связи между перегрузками на ЭРИ и отказами РЭС в диапазоне частот возмущающих воздействий, так как сами ЭРИ практически не отказывают, а определяющими для надежности РЭС являются усталостные разрушения выводов ЭРИ и паяных соединений при изгибных колебаниях печатных плат на резонансных частотах [8]. Это подтверждается в работе [2], где приводятся данные, по которым в диапазоне частот возмущающих воздействий бортовой РЭС от 10 до 2000 Гц интегральные микросхемы и полупроводниковые приборы не имеют отказов до 200 г и отказы начинают появляться из-за обрыва внутренних выводов при перегрузках на этих частотах около 300 г.

4. В специальной литературе при конструировании РЭС рекомендуется обеспечивать отсутствие резонансных частот элементов конструкции в заданном диапазоне частот [10]. Однако действующая на сегодняшний день НТД допускает резонансные колебания конструкций бортовых РЭС в диапазоне возмущающих воздействий выше 40–60 Гц [11, 12]. Рекомендуемая там же защита конструкции РЭС виброизоляцией и демпфированием не устраняет полностью, а только уменьшает амплитуду изгибных колебаний печатных плат на резонансах, да и то не всегда, например, в условиях действия линейных перегрузок амортизаторы теряют свои свойства виброизоляции. Демпфирование часто не применимо, так как ухудшает тепловые режимы и ремонтно-пригодность РЭС.

5. На сегодня отсутствуют инженерные методики синтеза теплоустойчивых блоков РЭС и печатных узлов, не имеющих резонансов в заданном диапазоне частот возмущающих воздействий. На практике конструкторам проще поставить блок РЭС на амортизаторы и сделать ему обдув воздухом, чем искать оптимальные технические решения методом перебора вариантов даже с использованием существующих САПР.

6. В настоящее время в радиопромышленности конструкторами РЭС называют специалистов, выполняющих чертежи корпусов, каркасов, панелей и других элементов механической системы РЭС, чертежи для объемного и печатного электромонтажа РЭС по готовым электрическим схемам, разработанным инженерами-схемотехниками. Так называемые инженеры-конструкторы РЭС фактически выполняют работу чертежников и как максимум техников [13].

Выпускники вузов поступают на работу конструкторами не потому, что их увлекает романтика конструирования корпусов РЭС. Чаще всего они равнодушны к такому конструированию, быстро теряют полученные в вузе знания и становятся безынициативными чертежниками, которым не до внедрения перспективных методов надежно-ориентированного проектирования.

Выполнение конструкторских процедур с использованием существующих САПР мало меняет общую картину, поскольку САПР сейчас главным образом нацелены на выпуск чертежей. Кроме того, САПР довольно сложны в освоении и требуют от конструктора выполнения большого числа рутинных работ и особых знаний работы на ЭВМ. Поэтому часто конструкторские должности замещают программисты, которые не владеют навыками конструирования по определению.

Предложения по совершенствованию проектирования РЭС

На основе вышеизложенного можно предположить, что уровень доли отказов РЭС от действия вибраций порядка 30–50 % является пределом возможности методов виброизоляции и демпфирования, и нужно искать другие подходы, чтобы достигнуть снижения отказов бортовых РЭС до уровня стационарной аппаратуры.

Как следует из детального анализа причин отказов РЭС, решение этой задачи может быть достигнуто внедрением конструкций РЭС, у которых собственные частоты колебаний элементов конструкции выведены за пределы диапазона частот возмущающих воздействий, что исключает появление изгибных колебаний печатных узлов, являющихся основной причиной усталостного разрушения выводов ЭРИ и паяных соединений.

Такие печатные узлы, для простоты условно называемые «безрезонансными», не имея в процессе эксплуатации изгибных колебаний в диапазоне частот возмущающих воздействий бортовой РЭС, в плане надежности соответствуют стационарной аппаратуре. А это в соответ-

ствии с п. 3.4 [4] значит, что значение коэффициента эксплуатационной жесткости K , при прочих равных условиях равняется 1 для всех ЭРИ печатных узлов [14, 15]. В результате использование в РЭС безрезонансных печатных узлов позволяет уменьшить интенсивность их отказов в 5–10 раз.

В настоящее время направление создания безрезонансных конструкций РЭС начинает развиваться. В работах [16, 17] рассматривались вопросы создания безрезонансных конструкций для частных случаев крепления печатных плат и приведены некоторые данные о положительных результатах. Однако эти результаты не решают проблему. Необходимы серьезные усилия для создания инженерных методов и алгоритмов синтеза конструкций бортовых РЭС, надежно функционирующих в условиях жестких ВВФ.

Заключение

Все вышеназванные проблемы надо решать комплексно, вернув творческое начало в конструирование, подключив конструкторов на ранней стадии проектирования к разработке ТЗ, технического проектирования изделия, надежно-ориентированного проектирования узлов и блоков РЭС с поиском новых технических решений и т.п. Соответственно должны быть расширены и возможности САПР, в частности, для начала созданы возможности компоновки и синтеза конструкций тепло- и виброустойчивых печатных узлов на ранних стадиях проектирования РЭС.

Библиографический список

1. Остроменский, П. М. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов / П. М. Остроменский. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 256 с.
2. Бережной, В. П. Выявление причин отказов РЭА / В. П. Бережной, Л. Г. Дубицкий. – М. : Радио и связь, 1983. – 364 с.
3. Писарев, В. Система испытаний – основа обеспечения надежности РЭА / В. Писарев, М. Критенко, В. Постнов // Электроника – НТБ. – 2002. – № 5. – С. 24–27.
4. Надежность электрорадиоизделий : справочник 22 ЦНИИ МО. – М., 2006. – 264 с.
5. Гель, П. П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры / П. П. Гель, Н. К. Иванов-Есипрович. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 350 с.
6. Токарев, М. Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / М. Ф. Токарев, Е. Н. Талицкий, В. А. Фролов. – М. : Радио и связь, 1984. – 464 с.
7. Жаднов, В. В. Дифференцированная оценка влияния ВВФ при проектных исследованиях надежности электронных компонентов / В. В. Жаднов и др. // Электронные компоненты. – 2010. – № 3. – С. 16–23.
8. Уваров, Б. М. Определение показателей надежности электронной аппаратуры при частичных отказах / Б. М. Уваров, Ю. Ф. Зиньковский // НТ ПСЗСУ. – 2014. – № 2. – С. 15–19.
9. Ройзман, В. П. Надежность радиоэлектронной аппаратуры при работе на транспортных средствах / В. П. Ройзман и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 8. – С. 17–21.
10. Карпушин, В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / В. Б. Карпушин. – М. : Советское радио, 1971. – 256 с.
11. ГОСТ РВ 20.39.309–98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Конструктивно-технические требования. – М. : Госстандарт России, 1998. – 17 с.
12. ГОСТ РВ 20.39.304–98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним факторам. – М. : Госстандарт России, 1998. – 18 с.
13. Бобков, Н. М. Конструктор РЭС о конструировании РЭС / Н. М. Бобков. – URL: http://nntc.nnov.ru/sites/default/files/documets/00_konstr_RES_o_konstr_RES.pdf
14. 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.
15. Фролов, С. И. Вопросы автоматизации конструирования вибропрочных РЭС / С. И. Фролов, Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т 1. – С. 301–303.
16. Ухин, В. А. Автоматизация проектирования виброзащиты электронной аппаратуры методом частотной отстройки : дис. ... техн. наук / Ухин В. А. – Владимир, 2007. – 164 с.
17. Кутровский, П. В. Исследование и разработка виброзащиты радиотехнических устройств методом частотной отстройки : дис. ... канд. техн. наук / Кутровский П. В. – Владимир, 2009. – 187 с.

Фролов Сергей Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Таньков Георгий Васильевич

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

Кочегаров Игорь Иванович

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

Юрков Николай Кондратьевич

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

Аннотация. Рост требований к надежности бортовых радиоэлектронных средств (БРЭС) требует развития методов их проектирования. Как правило, БРЭС функционируют в жестких условиях эксплуатации и к ним предъявляются повышенные требования надежности, долговечности и живучести. В работе авторы проводят анализ проблем надежности-ориентированного проектирования БРЭС с учетом теплового воздействия и вибрации. В результате анализа выявлены проблемы существующего подхода к проектированию БРЭС и намечены пути совершенствования надежность-ориентированных САПР за счет автоматизации синтеза конструкций.

Ключевые слова: надежность, внешние воздействующие факторы, вибрация, тепловые воздействия, проектирования, радиоэлектронные средства, система автоматизированного проектирования.

Frolov Sergey Ivanovich

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

Goryachev Nikolay Vladimirovich

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

Tan'kov Georgiy Vasil'evich

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

Kochegarov Igor' Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
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. The growth of requirements for the reliability of on-board radio electronic means (BRES) requires the development of methods for their design. As a rule, BRES operate under harsh operating conditions and they are subject to increased requirements for reliability, durability and survivability. In the work, the authors analyze the problems of reliability-oriented design of the BRES taking into account the thermal impact and vibration. As a result of the analysis, problems of the existing approach to the design of the BRES are revealed and ways of improving reliability-oriented CAD are outlined by automating the synthesis of structures.

Key words: reliability, external factors, vibration, thermal effects, design, radioelectronic facilities, computer-aided design system.

УДК 621.396.69.01

О некоторых проблемах надёжностно-ориентированного проектирования бортовых РЭС /
С. И. Фролов, Н. В. Горячев, Г. В. Таньков, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 3–8. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-1.

О ПРОИСХОЖДЕНИИ НОВЫХ ЗВЕЗД И ПЛАНЕТ

В. К. Дедков

Введение

Существующие представления о происхождении конденсированной материи и ее преобразованиях не дают ответа на многие вопросы, связанные с происхождением и эволюцией звезд, планет и других материальных объектов, а главное – не позволяют прогнозировать их будущее. Одним из предназначений науки является разработка моделей, позволяющих прогнозировать эволюционные преобразования мира, в котором мы живем. Такое прогнозирование необходимо для выработки стратегии «выживания» и развития человечества в постоянно меняющейся социальной обстановке и интенсивно эволюционирующей среде обитания.

Какими же моделями о «мире, в котором мы живем» располагает современная наука?

Конечно, современная наука уже не пользуется моделью «Ноева ковчега», спасающего животный мир и человечество от «Всемирного потопа».

В «новые времена» наибольшей популярностью пользуется гипотеза о происхождении звезд и планет из пыли и газа, «научной» основой которой стал «Закон всемирного тяготения», сформулированный И. Ньютоном.

Эта гипотеза основывается на предположении И. Ньютона о «всемирном притяжении» (по-видимому, по аналогии с «Всемирным потопом») одними частицами материи других частиц, вследствие чего звезды и планеты формируются из газовой (диффузной) материи – той самой, которая в «изобилии» наблюдается в просторах Галактики. Предполагается, что в тех местах, где масса и плотность газовой материи достигают некоторой «критической» величины, начинают действовать силы «самогравитации», обеспечивающие сжатие и уплотнение газа, и преобразование диффузной материи в холодный газовый шар. В результате продолжительного сжатия температура газового шара начинает повышаться, и шар начинает отдавать тепловую энергию посредством излучения с поверхностных слоев. Предполагается, что процесс сжатия приводит к тому, что центральная область звезды разогревается до очень высокой температуры. Когда температура центральной области звезды достигнет нескольких миллионов градусов, в ней начинаются термоядерные реакции, сопровождающиеся выделением большого количества энергии. Главными из термоядерных реакций являются те реакции, которые обеспечивают превращение водорода в гелий.

После того, как в звездах-гигантах выгорает весь водород и они достигают стадии красного гиганта, сжатие их ядер, состоящих теперь уже из гелия, приводит к дальнейшему повышению температуры до значений, превышающих 100 миллионов градусов. Тогда начинает действовать новая термоядерная реакция – образование ядра атома углерода из трех ядер атомов гелия¹.

(В этой модели звезды нет места ни «холодным солнечным пятнам», покрывающим поверхности многих звезд, ни колебаниям токов и магнитных потоков, ни взрывам «новых» и «сверхновых» звезд).

Альтернативной приведенной выше гипотезе образования звезд и планет из холодного газа является гипотеза, выдвинутая академиком В. А. Амбарцумяном. Содержательный смысл его гипотезы состоит в том, что звезды образуются не из «газовых облаков», а из сверхплотного вещества. Эта гипотеза базируется на результатах наблюдений звездного неба, свидетельствующих о преобладании во Вселенной процессов распада над процессами соединения. Теоретического обоснования, к сожалению, эта гипотеза (так же, как и первая) не получила.

¹ По-видимому, нет смысла разяснять, насколько далека от реальности гипотеза об образовании звезд и планет из газа путем «самогравитации». Космические опыты, связанные с проверкой возможности притяжения тел астероидами, полностью развенчали ньютоновскую гипотезу о притяжении одного тела другим.

Как первая, так и вторая гипотеза образования звезд не дают ответа на вопросы, связанные с объяснением большой роли электромагнитных явлений в эволюционных преобразованиях галактик, звезд и планет. Не отвечают они также и на вопросы о причинах колебания светимости переменных звезд и причинах взрывов «новых» и «сверхновых» звезд.

Каковы характерные особенности звездного населения нашей Галактики, свидетельствующие о динамике формирования и эволюции звезд?

Одной из особенностей звездного населения Галактики является их расположение определенными группами. Самые маленькие коллективные члены Галактики – это двойные и кратные звезды. Так называются группы из двух, трех, четырех и т.д. до десяти звезд, в которых звезды удерживаются близко друг к другу благодаря взаимному «притяжению» [1].

Доля двойных и кратных звезд среди всех звезд значительна. Заметим, что кратность и ассоциативность отдельных групп звезд – это не случайность, а закономерность, обусловленная генетическим родством звезд в таких группах. Среди 30 ближайших к нам звезд 13 входят в состав двойных и тройных систем.

Более крупными коллективными членами Галактики, чем двойные и кратные звезды, являются рассеянные звездные скопления. Эти скопления содержат от нескольких десятков до нескольких сотен звезд, а самые крупные из них – до двух тысяч звезд.

Еще более крупными коллективными членами Галактики являются шаровые звездные скопления. Эти системы насчитывают сотни тысяч, а иногда и свыше миллиарда звезд.

Переменные звезды и резонанс токов

Человечество всегда склонно верить в «неизменность» звезд по сравнению с быстротекущей «изменчивостью» земной жизни. Даже ставшие «привычными» 11-летние (точнее – 22-летние) циклические изменения солнечной активности не поколебали «веры» человечества в незыблемость, неизменность и «вечность» существующей гармонии в мире звезд и нашей солнечно-планетной системы. Редчайшие по земным меркам вспышки «новых» и «сверхновых» звезд воспринимаются скорее как случайности, как исключения в устойчивом и «равномерном» расширении звездного мира после катастрофического «Большого взрыва», наводящего страх и ужас на астрофизиков, верящих в происхождение всего мироздания из массы, занимавшей объем, не превышающий объема «булавочной головки».

Большинство звезд, как и наше Солнце, несмотря на то, что на их поверхности происходят изменения, которые, с нашей точки зрения, можно считать грандиозными катастрофами, сохраняют относительное постоянство своих основных характеристик – спектра, температуры, цвета, светимости, размеров. Но у некоторой сравнительно небольшой части звезд размах происходящих явлений так велик, что их основные характеристики и, прежде всего, светимость претерпевают существенные, легко обнаруживаемые нами изменения.

Одной из особенностей небольшой части звездного населения Галактики является изменение их светимости. Такие звезды называются переменными. Солнце также является переменной звездой, однако изменения, происходящие на Солнце, не настолько велики, чтобы существенно влиять на его основные свойства.

Основной характеристикой переменной звезды является кривая блеска, показывающая, как изменяется видимая звездная величина звезды с течением времени. Наиболее распространенным типом переменных звезд являются цефеиды, называемые так потому, что их прототипом является звезда δ Цефея. Нарастание блеска у цефеид происходит быстрее, чем его спад. Наиболее разработанной считается теория, согласно которой цефеида пульсирует, сжимаясь и разжимаясь под действием противоборствующих сил – силы притяжения к центру звезды и силы давления газа, толкающей вещество наружу [2]. Наибольшую светимость звезда имеет в сжатом состоянии, а наименьшую – в расширенном. Это объясняется тем, что при сжатии потенциальная энергия гравитации переходит в тепловую энергию газа, температура которого растет. При этом излучение с одного квадратного сантиметра поверхности резко увеличивается, и это с избытком компенсирует уменьшение общей поверхности звезды при сжатии.

Таковы существующие взгляды на природу «переменности» физических характеристик звезд. Разнообразие признаков переменности звезд очень велико, и, конечно, нельзя объяснить все формы изменения блеска звезд одними и теми же причинами. На рис. 1 и 2 приведены характерные формы изменения светимости некоторых из переменных звезд.

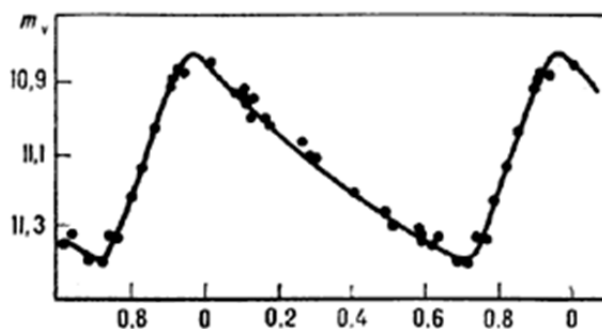


Рис. 1. Кривая блеска цефеиды CF Кассиопеи по данным американского астронома А. Сандиджа. По оси абсцисс отложено время в долях периода, отсчитываемое от момента максимума (фаза). Период $P = 4,88$ сут, m_v – визуальная звездная величина

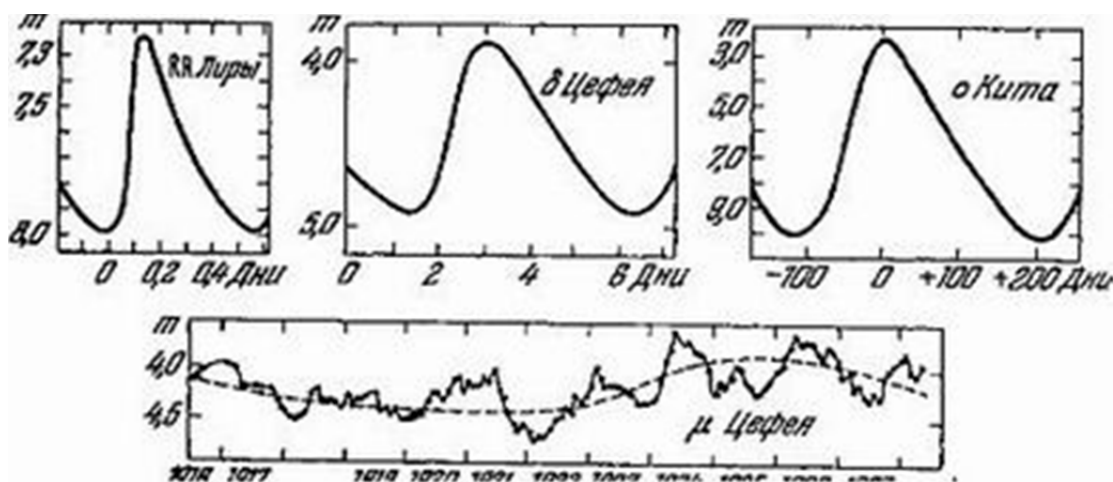


Рис. 2. Кривые изменения звездной величины m некоторых переменных звезд: RR Лир, δ Цефея, α Кита и μ Цефея

Главные характеристики Солнца – его светимость и температура – если и претерпевают изменения, то не настолько значительные, чтобы вызывать тревогу жителей Земли. Вместе с тем характер изменения звездной величины некоторых переменных звезд и характер изменения активности Солнца, определяемой по числу солнечных пятен, демонстрируют несомненное сходство.

Так, например, ветвь нарастания блеска цефеид и ветвь роста солнечной активности явно короче ветви спада блеска цефеид и, соответственно, ветви спада солнечной активности. Каковы возможные причины такой асимметрии?

Основная причина асимметрии кривой, характеризующей изменения солнечной активности, как уже отмечалось в работах автора, заключается в том, что «разряд конденсатора», т.е. полярных полусфер субъядерной зоны Солнца, происходит быстрее, чем его «заряд». В процессе эволюционных преобразований молодой звезды индуктивность L ее ядра медленно убывает, а емкость полярных полусфер C – интенсивно увеличивается. При этом собственная частота колебания токов, текущих через ядро и субъядерную зону звезды, уменьшается. (Период колебаний солнечной активности за последние 300 лет также имеет тенденцию к увеличению, хотя интенсивность таких изменений, по-видимому, еще не получила должной стохастической оценки).

Разнообразие переменных звезд очень велико. Различают короткопериодические и длиннопериодические переменные, а также полуправильные и неправильные долгопериодические переменные.

Наконец, важно то, что переменные звезды в большинстве своем – это звезды высоких светимостей, гиганты и сверхгиганты, видимые на огромных расстояниях.

Однако самая высокая степень переменности наблюдается у так называемых «новых» и «сверхновых» звезд. Эти звезды в отличие от других переменных звезд называют взрывными звездами.

Термин «новая звезда» вошел в употребление потому, что наблюдатели обнаруживали звезду там, где ее раньше, казалось, не было. На самом деле старые фотографии всегда показывают, что точно на месте появившейся яркой звезды раньше находилась слабенькая звездочка, так что речь должна идти не о возникновении звезды, которой раньше не было, а о сильной вспышке уже существующей звезды. При этом светимость звезды возрастает в сотни и более раз. По истечении 10–20 лет после вспышки звезда возвращается в свое исходное состояние.

Существующее объяснение вспышек новых звезд таково: «Вспышки новых звезд объясняются накоплением энергии в неглубоких слоях звезды и затем быстрым, сопровождаемым взрывом освобождением энергии». Масса газовой оболочки, выбрасываемой новой звездой, относительно невелика и составляет примерно сотысячную долю массы звезды. Этим и объясняется то, что по истечении 10–20 лет звезда снова возвращается к исходному состоянию.

Самая большая катастрофа, происходящая со звездой, это вспышка сверхновой. Светимость сверхновой в максимуме блеска равна светимости сотен или многих тысяч обычных новых в высшей точке блеска. Во время вспышки сверхновой светимость звезды возрастает в миллиарды раз. Взрыв зарождается на большой глубине, и выброшенная материя составляет значительную долю массы звезды, по крайней мере, несколько процентов. Энергию, равную энергии взрыва сверхновой, Солнце излучает за миллиарды лет. После того, как блеск самой звезды снова упадет до исходной величины, нельзя сказать, что все стало по-старому, так как огромные массы выброшенных газов образуют туманность, обладающую специфическими свойствами. Наиболее известная из таких туманностей – Крабовидная туманность, являющаяся результатом сравнительно недавней (1054 г.) вспышки сверхновой.

(Как отмечалось в статьях автора, явление резонанса токов за период, равный периоду эволюционного цикла звезды, может наступать неоднократно. Поэтому одна и та же звезда при определенных обстоятельствах может сначала оказаться в режиме «новой», а в последующем – «сверхновой»).

При каких обстоятельствах рождаются звезды-карлики и планеты

Зададимся вопросом: всегда ли звезды, испытывающие неустойчивое состояние, делятся на две примерно равные части и благодаря этому уходят от режима резонансных колебаний? Возможны ли деления ядер звезд при резонансных колебаниях в иной пропорции? Возможны ли иные пути ухода звезды с режима неустойчивости?

Как отмечалось выше, переходу звезды в неустойчивое состояние предшествует увеличение тока, текущего через ядро, разогрев субъядерной зоны; заполнение субъядерной зоны субисточниками, «оторванными» возросшими разрядно – зарядными токами от ядра; увеличение интенсивности звездного ветра и т.д. В результате этих преобразований активное сопротивление субъядерной зоны уменьшается, а индуктивное сопротивление становится равным емкостному, что означает, что резонансная частота колебаний близка или равна собственной частоте колебательного контура, образованного токопроводящими элементами звезды. При этих условиях переменный ток, текущий через ядро звезды, неограниченно увеличивается.

Уменьшение разности волновых сопротивлений ядра и субъядерной зоны приводит к увеличению силы тока, текущего через границу раздела ядра и субъядерной зоны звезды. Как известно, разность волновых сопротивлений сред, приводит к появлению отраженных токов на границах раздела этих сред и возникновению инерционных сил, направленных из среды с низким волновым сопротивлением к среде с высоким волновым сопротивлением.

По величине проводимости разогретая субъядерная зона звезды занимает промежуточное положение между сверхпроводящим ядром и переходной зоной. Поэтому при увеличении разности потенциалов между полярными полусферами субъядерной зоны звезды радиальные токи, текущие через ядро и субъядерную зону, увеличиваются. Возникает две зоны торможения радиальных нестационарных токов и два пояса сил, направленных от ядра звезды к периферии.

Первый пояс расположен на границе раздела ядра и субъядерной зоны (рис. 3). Здесь силы инерции, возникающие при пересечении токами границы раздела сред, направлены от ядра к субъядерной зоне. Эти силы стремятся отделить субъядерную зону от ядра. Второй пояс сил возникает на границе раздела субъядерной и переходной зоны, где силы инерции направлены от поверхности субъядерной зоны к переходной зоне (рис. 3).

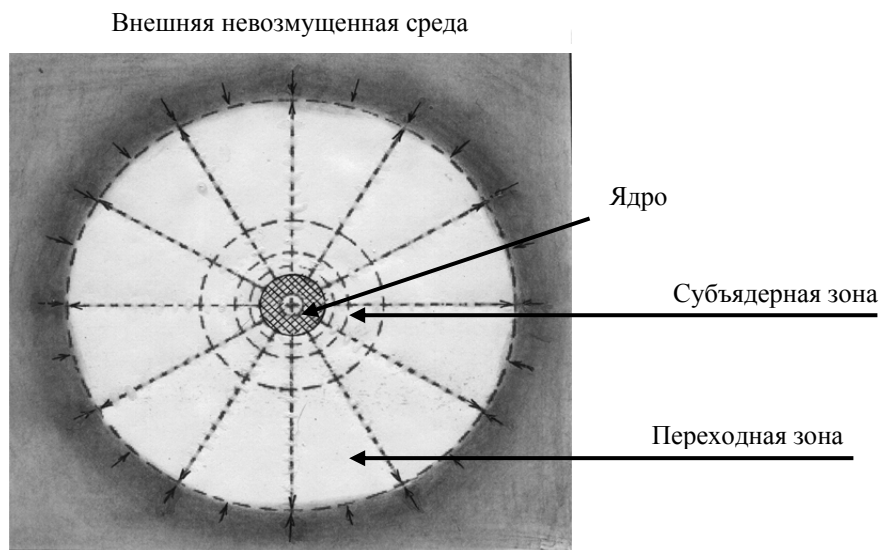


Рис. 3. Крупномасштабная структура источника поля звезды, расположенной в невозмущенной внешней среде

В этих условиях основной границей раздела сред с различными волновыми сопротивлениями становится граница раздела субъядерной и переходной зоны. Именно здесь, на внешней границе субъядерной зоны, силы инерции, создаваемые разрядно-зарядными токами в резонансном режиме, достигают наибольшей величины.

Когда емкостное сопротивление субъядерной зоны по порядку величины сравнивается с индуктивным сопротивлением ядра, тогда резонансная частота виртуальных колебаний токов, направленных вдоль полярной оси звезды, увеличивается до значения собственной частоты колебательного контура. При этом возникшие на границе раздела ядра и субъядерной зоны силы инерции, действующие на полярно противоположные полусферы субъядерной зоны, могут привести к отрыву ее от ядра.

Субъядерная зона неоднородна. Она включает как разуплотненную до различного состояния плазму, содержащую положительные и отрицательные микроисточники, так и частицы ядерного вещества значительных объемов, которые имеют возможность при определенных обстоятельствах образовывать ядра дочерних источников, «малых» по сравнению с ядром материнской звезды. При отделении субъядерной зоны от ядра легкие фракции плазмы подобно «плотному» звездному ветру движутся в радиальных направлениях, создавая радиальный нестационарный звездный ток.

Крупные фрагменты нейтронной жидкости, оторванные от ядра возросшими при резонансе индукционными токами, выносятся ими в переходную зону звезды. Как уже отмечалось в статьях автора, индукционные токи, прошедшие через ядро звезды и ее субъядерную зону, попадают в область высокого волнового сопротивления переходной зоны. Отражаясь от переходной зоны, они разворачиваются в направлении области низкого сопротивления, т.е. в направлении «входа» тока в ядро. Таким образом, нестационарные токи, текущие через ядро звезды, оказываются замкнутыми с «выхода» на «вход» через внешнюю непроводящую среду. Некоторые из «трубок» нестационарных токов, описав параболу в атмосфере звезды, подобно громадному протуберанцу, возвращаются снова к ядру. Вдоль этих парабол возвращается к поверхности субъядерной зоны и вынесенное этими токами вещество.

Однако токи большой мощности могут выносить в переходную зону большие фрагменты ядерного вещества, которое приобретает под действием этих токов первую космическую скорость, характерную для данной звезды. Начальные орбиты субисточников, вынесенных инерционными токами в неволновую зону звезды, как правило, имеют большие углы наклона к плоскости звездного экватора. Сами же токи, как было сказано выше, описав во внешней среде огромные дуги, замыкаются на вход в ядро через южную полярную область звезды.

Отрыв субъядерной зоны звезды от ядра в режиме резонанса переменных индукционных токов и вынос ее в неволновую зону приводит к вспышке звезды. Увеличение светимости звезды

связано с взрывоподобным адиабатическим расширением вещества ее субъядерной зоны (его аннигиляцией), при котором выделяется колоссальная энергия в виде широкого спектра излучений, с образованием микроисточников в форме ядер химических элементов и в наибольшем количестве – электронов. Продукты аннигиляции субъядерной зоны звезды образуют вокруг нее туманность, которая под действием радиальных токов звезды интенсивно расширяется.

Вспышка звезды, вызванная отделением от ядра субъядерной зоны и ее аннигиляцией (в результате резонанса нестационарных индукционных токов, текущих через ее ядро), при отсутствии деления ядра на две примерно равные части, классифицируется как вспышка новой звезды.

Большинство мелких субисточников, вынесенных токами в неволновую зону звезды, довольно быстро деградирует, превращаясь в потоки плазмы. Это происходит потому, что сильный радиальный ток создает в пространстве, окружающем ядро звезды, зону низкого давления, названную «внутренней сферической областью» (ВСО). Низкое давление окружающей среды и сильный ток, текущий через ядра субисточников, превращают их в облака горячей плазмы, подобные конденсациям солнечной короны.

Относительно крупные субисточники, оторвавшиеся от ядра звезды в период наибольшего роста амплитуды индукционного тока, т.е. в момент отрыва субъядерной зоны от ядра, образуют дочерние источники звезды.

В зависимости от массы ядра дочернего источника и силы тока, текущего через его ядро, источник может либо испытывать разогрев и становиться звездой-карликом, либо остывать и становиться очередной планетой данной звезды. Начальное состояние дочернего источника – это темный (или темно-коричневый) звездоподобный объект большой плотности. В любом случае дочерний источник связан со звездой конвективной силой инерции («силой тяжести»), удерживающей его на относительно небольшом расстоянии от породившей его звезды.

По мере разуплотнения поверхностного слоя ядра дочернего источника и увеличения его переходной зоны возникают как силы упругости, так и архимедовы силы, которые дочерний источник заставляет дрейфовать к периферии переходной зоны звезды. Можно показать, что параметры орбиты дочернего источника также претерпевают изменения, в результате которых угол ее наклона к экваториальной плоскости звезды уменьшается и дочерний источник занимает определенное место в плоскости, которая в Солнечной системе называется плоскостью эклиптики.

Образовавшаяся за счет расширения и разуплотнения субъядерной зоны звезды туманность уносится радиальным током (звездным ветром) к периферии переходной зоны звезды. На начальном этапе плотность туманности велика и радиальный ток, идущий от ядра, отражаясь от внутренней поверхности туманности, почти не выходит за ее пределы. Поэтому туманность, разогреваемая текущим от звезды током, светится собственным излучением.

Ядро новой звезды, лишенное субъядерной зоны, занимает относительно малый объем, но температура его поверхности высокая. Это обусловлено тем, что при отсутствии субъядерной зоны интенсивности токов как текущих из внешней среды к ядру, так и истекающих из поверхностного слоя ядра, велики. Токи, текущие из внешней среды через всю сферическую поверхность «обнаженного ядра», вызывают разогрев его поверхностного слоя, а отсутствие задерживающей излучения субъядерной зоны, обеспечивает высокую яркость короны, окружающей ядро.

Конечно, ввиду резко возросшего сопротивления на границе раздела ядра и внешней среды ток, текущий через ядро, испытывает почти полное внутреннее отражение. Отсутствие слоя, обеспечивающего накопление звездой электрической энергии (переходной зоны), лишает колебательный контур звезды важнейшего элемента, приводящего ее к неустойчивости и вспышке. Отсутствие развитой субъядерной зоны означает, что емкость полярных полусфер, окружающих ядро, равна нулю ($C = 0$).

При этом ток, текущий через ядро и отражающийся от поверхности его раздела с внешней средой, колеблется с высокой частотой. Таким образом, в результате «сброса» субъядерной зоны звезда выходит из состояния неустойчивости и снова становится на путь постепенных эволюционных преобразований.

При уходе с резонансной частоты изложенным выше способом масса звезды уменьшается незначительно. Ввиду отсутствия у звезды субъядерной зоны и низкого давления внешней среды, окружающей ядро, разность потенциалов между ядром и внешней средой после взрыва резко возрастает. Ток, отражающийся от поверхности раздела между ядром и внешней средой выносит силами инерции потоки разуплотненной среды в переходную зону и создает «звездный ветер». Тем-

пература поверхностного слоя, окружающего ядро звезды, высокая и звезда светится белым цветом. Ионно-газовая туманность, образованная расширяющимся облаком продуктов распада субъядерной зоны взорвавшейся звезды, удаляется от центра взрыва и открывает взорам наблюдателей неба бело-голубой остаток в форме «новой звезды».

Туманности, возникающие при взрыве новых звезд, названы планетарными туманностями. Конечно, это название лишь плод фантазии исследователей неба и никоим образом не связано с планетами.

Изложенный выше «способ» ухода звезд с режима неустойчивости, не связанный с радикальной перестройкой ядра, т.е. с его делением на две части, раскрывает содержание процессов, происходящих при рождении звезд-карликов или планет. По сути, планеты и звезды-карлики – это объекты одной и той же природы.

Все планеты Солнечной системы так же, как и звезды-карлики, «светятся», т.е. создают как излучения в различных диапазонах длин волн, так и радиальные токи. Чем больше масса ядра планеты, тем интенсивнее процессы деградации ядра, создающие тепловые и коротковолновые излучения и тем интенсивнее радиальные токи, создаваемые ядром в окружающем его пространстве. Примером звезды-карлика является планета Юпитер. При определенном увеличении массы ядра Юпитер, по-видимому, мог бы стать коричневым звездным карликом. Поэтому туманности, возникающие при взрывах новых звезд и нередко сопровождающие рождение звезд-карликов и планет, с полным основанием следует называть не только по форме, но и по содержанию «планетарными».

Библиографический список

1. Дедков, В. К. Гравитация и силы инерции / В. К. Дедков // Теоретические вопросы физики : сб. трудов. – Вып. 21. – Юбилейный : ПСТМ, 2012. – С. 35–46.
2. Агекян, Т. А. Звезды, галактики, метagalaktika / Т. А. Агекян. – М. : Наука, 1981. – 345 с.

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

Аннотация. В моделях окружающего нас мира, созданных наукой к началу двадцать первого века новой эры человечества, «не нашлось места» для объяснения многих физических явлений, представляющих интерес как для его нынешних поколений, так и для будущих. Так, например, нет объяснения появлению «холодных Солнечных пятен» в раскаленной атмосфере нашего Солнца и на поверхности многих звезд, нет объяснения колебаниям токов и магнитных потоков, пронизывающих галактики и звезды, неизвестны причины грандиозных взрывов «новых» и «сверхновых» звезд и многих иных явлений.

Ключевые слова: двойные и кратные звезды, рассеянные звездные скопления, шаровые звездные скопления, новые и сверхновые звезды, звезды карлики и планеты, планетарные туманности.

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)

Abstract. In models of the world surrounding us created by science by the beginning of the twenty first century of a new era of mankind «there was no place» for an explanation of many physical phenomena which are of interest both to his present generations, and to future. So, for example, there is no explanation for emergence «cold Solar spots» in the heated atmosphere of our Sun and on a surface of many stars, there is no explanation for fluctuations of the currents and magnetic fluxes penetrating galaxies and stars, the reasons of grandiose explosions of «new» and «supernew» stars, and many other phenomena are unknown.

Key words: double and multiple stars, scattered star clusters, spherical star clusters, new and supernew stars, stars dwarfs and planets, planetary fogs.

УДК 656.7

Дедков, В. К.

О происхождении новых звезд и планет / В. К. Дедков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 9–16. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-2.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РЕСУРС СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

А. А. Авакян, М. В. Копненко, Ю. А. Романенко, Е. В. Лоцманова

Эксплуатационные характеристики сложной электронной системы, в дальнейшем изделия электроники, формируются на стадиях разработки и создания [1], а проявляются на стадии эксплуатации всего жизненного цикла системы. Если разработчик не связан никакими экономическими обязательствами с заказчиком относительно расходов на техническую эксплуатацию изделия электроники, он, естественно, будет направлять свои усилия на разработку изделия с высокими функциональными характеристиками и оптимизацию расходов на его создание [2] и мало уделять внимания эксплуатационным характеристикам, которые будут проявляться в течение всего жизненного цикла изделия электроники.

В технических заданиях на изделия электроники, как правило, указывается некоторый гарантийный срок (чаще всего один год), в течение которого разработчик обязуется оценить вместе с заказчиком выполнение требований по надежности изделия электроники. Но такой подход проверки эксплуатационных характеристик изделия электроники страдает следующими недостатками.

Во-первых, на ранних стадиях эксплуатации не бывает больших парков изделий и потому на них не возникает достаточное количество отказов, чтобы получить достоверные характеристики надежности. Приходится применять метод доверительных интервалов и методы испытаний, учитывающих риск разработчика и риск заказчика, что в силу случайности процесса возникновения отказов позволяет создать иллюзорное представление о выполнении требований по надежности.

Во-вторых, для гарантированного выполнения требований по надежности разработчик может включить в требования по надежности заниженные требования, зная, что их он будет выполнять в течение только гарантийного периода, а не в течение периода массовой эксплуатации, когда возникнут условия для получения достоверных оценок надежности.

Кроме того, большинство отказов составных частей изделий электроники эксплуатирующие организации восстановить самостоятельно не могут и направляют разработчику или на завод-изготовитель для их восстановления. Эти работы оплачиваются эксплуатирующими организациями. Складывается порочная практика, когда чем больше отказывает техника, тем выгодней разработчику и изготовителю.

Для исключения этих недостатков и включения в технические задания на изделия электроники требований к экономическим характеристикам затрат на техническую эксплуатацию на протяжении всего жизненного цикла изделия электроники предлагается ввести во все технические задания на изделия электроники следующий критерий: **отношение стоимости изделия к среднегодовым затратам на техническую эксплуатацию изделия.**

Определим формулу этого критерия. Обозначим среднегодовые затраты на техническую эксплуатацию изделия через $Z_{\text{сг}}$, стоимость изделия через $C_{\text{и}}$, экономический критерий через $\Theta_{\text{к}}$, а экономический ресурс через $P_{\text{э}}$. Тогда формула расчета экономического критерия будет иметь следующий вид:

$$\Theta_{\text{к}} = \frac{C_{\text{и}}}{Z_{\text{сг}}} . \quad (1)$$

А формула расчета экономического ресурса будет иметь следующий вид:

$$P_{\text{э}} = T_{\text{э}} (\Theta_{\text{к}} = 1) , \quad (2)$$

где $T_{\text{э}}$ – период эксплуатации изделия, при котором заказчик тратит на техническую эксплуатацию еще одну стоимость изделия.

Эти характеристики можно задавать в ТЗ на изделие, если будет существовать ГОСТ, в котором будет стандартизирован метод расчета затрат на техническую эксплуатацию изделий электроники. В данной работе предлагается вариант такой методики.

Исходными данными для расчета затрат на техническую эксплуатацию будут:

- 1) организационная структура технической эксплуатации, включающая следующие данные:
 - места базирования и парки изделий в каждом месте базирования;
 - места проведения профилактических работ;
 - центры технического обслуживания и ремонта ТОиР;
 - заводы-изготовители изделий и его составляющих;
- 2) наработка (налет) изделия;
- 3) перечень минимального состава оборудования, без которого система не может функционировать;
- 4) количество центров ТОиР;
- 5) перечень заводов-изготовителей, где будут ремонтироваться отказавшие блоки, которые не смогут быть восстановлены в центрах ТОиР. Максимальные периоды (в днях) с момента снятия с борта отказавшего блока и до момента возвращения в ЗИП восстановленного блока;
- 6) количество персонала центров ТОиР и всех пунктов, на которых будет проходить процесс обслуживания изделий;
- 7) средняя зарплата по каждой категории персонала;
- 8) продолжительность жизненного цикла самолета;
- 9) стоимость блоков изделия;
- 10) стоимость технических средств технической эксплуатации изделия в центрах ТОиР и на всех пунктах обслуживания.

Расчет затрат на техническую эксплуатацию рассмотрим на примере комплексов бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) транспортной авиации [3]. При всем разнообразии различных структур наиболее рациональными для ТОиР самолетов транспортной авиации являются следующие элементы (уровни).

Первый уровень – ТО соответствует основным и промежуточным аэродромам, на которые могут садиться летательные аппараты (ЛА) для дозаправки, взятия пассажиров или грузов и т.п. В ряде случаев на таких аэродромах ТОиР может осуществляться на открытых площадках, поэтому на этих аэродромах возможна только замена конструктивно съемных единиц (КСЕ).

На этом уровне осуществляется непрерывный контроль исправного состояния комплекса средствами встроенного в БРЭО контроля (ВСК), диагностика неисправных состояний с локализацией отказов до КСЕ [4]. Неисправные КСЕ заменяются на исправные следующим образом:

- если отказавшее КСЕ входит в состав минимального оборудования, то оно заменяется на исправный, как на основном (базовом) аэродроме, так и на промежуточном (транзитном) аэродроме. Замены КСЕ, входящих в состав минимального комплекта, осуществляются из комплектов ЗИП (обменных фондов), хранящихся как на борту ЛА в виде технических аптечек, так и в хранилищах промежуточных аэродромов. Состав аптечек должен быть таким, чтобы вероятность готовности соответствовала заданным для самолетов данной категории требованиям регулярности полетов, а время оборачиваемости не превышало двух суток. За двое суток состав аптечек, как и состав хранилищ промежуточных аэродромов пополняется из состава ЗИП базового аэродрома;
- если отказ БРЭО произошел на полете к основному (базовому) аэродрому, то вне зависимости от принадлежности отказавшего КСЕ к минимальному или общему комплексу БРЭО КСЕ заменяется на исправное из состава ЗИП, которое хранится в аэродромно-технической базе (АТБ) или технико-эксплуатационной части (ТЭЧ) основного аэродрома. Состав ЗИП (обменного фонда) основного аэродрома должен быть таким, чтобы вероятность готовности соответствовала заданным для самолетов данной категории требованиям регулярности полетов, а время оборачиваемости не превышало четырнадцати суток. За период не более четырнадцати суток ЗИП (обменный фонд) основного аэродрома должен пополниться до полного состава за счет отремонтированных КСЕ либо в АТБ или ТЭЧ, либо КСЕ отремонтированных в центрах ТОиР.

На этом уровне также выполняются работы по подтверждению конфигурации комплекса, включая загрузку программного обеспечения, а также работы по калибровке, юстировке, настройке и других операций, необходимых для возвращения блока в эксплуатацию без замены основных частей.

Второй уровень – ТО соответствует основным (базовым) аэродромам, где приписан для базирования ЛА. На этих аэродромах размещаются авиационно-технические базы (АТБ), в условиях

которых может производиться ремонт КСЕ заменой схемно-съемная единица (ССЕ) с целью восстановления работоспособности демонтированного блока путем:

- локализации отказа до дефектной платы (ССЕ);
- замены отказавшей платы на исправную;
- возвращения блока в обменный фонд.

Третий уровень – ТО соответствует специализированным центрам ТОиР. В них производятся все виды ремонта ССЕ с целью восстановления работоспособности отказавшей платы в центрах ТОиР путем следующих процессов:

- локализации отказа в плате (ССЕ);
- восстановления платы путем замены отказавшей части (микросхемы, процессора и т.д.) на исправную;
- возврат восстановленной платы в обменный фонд плат АТБ.

Типовая организационная структура описанной выше системы ТОиР с учетом указанных уровней восстановления представлена на рис. 1

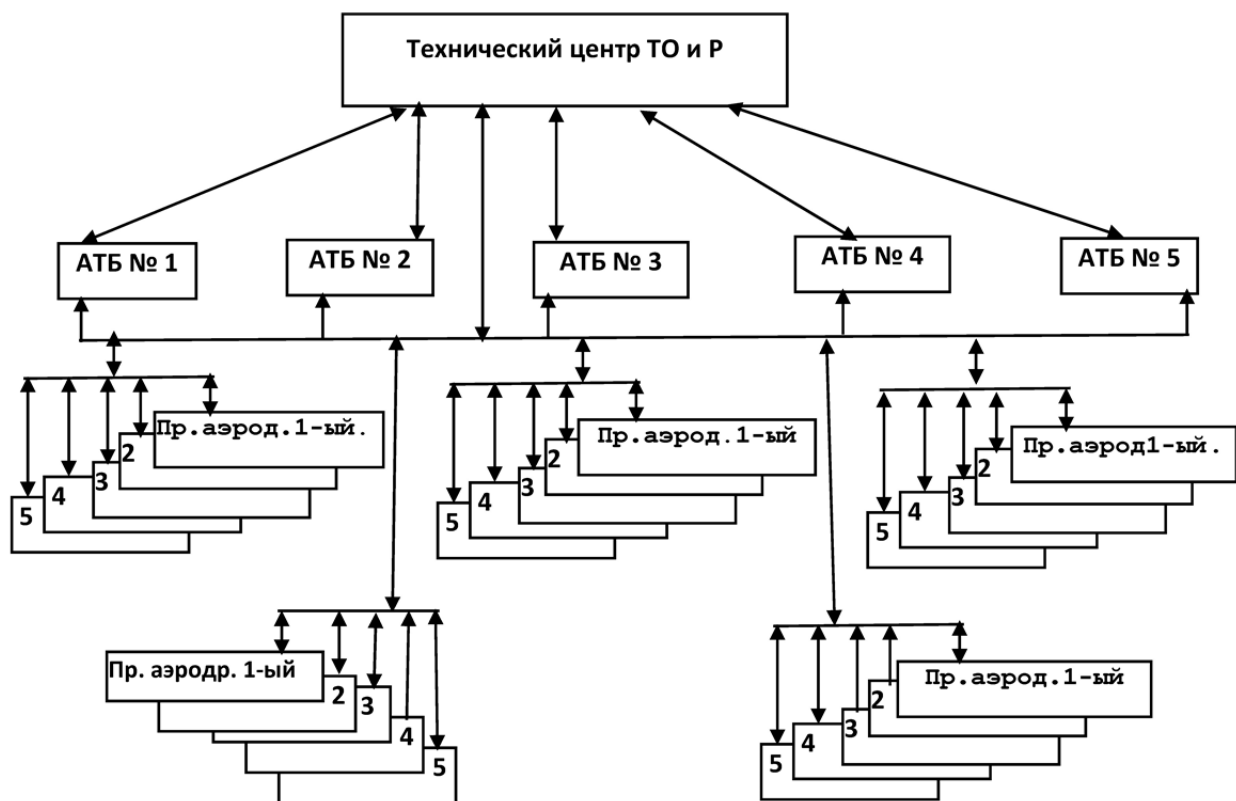


Рис. 1. Типовая структура системы ТОиР

В общие затраты на техническую эксплуатацию БРЭО в течение всего периода жизненного цикла самолета ($N_{ж}$), на котором установлено БРЭО, в разрабатываемой методике предлагается включить следующие затраты:

- на закупку устройств БРЭО, установленных на ЛА;
- на закупку обменного фонда КСЕ на основных и промежуточных аэродромах;
- на ремонт отказавших КСЕ заменой ССЕ в центре ТОиР;
- на закупку оснастки для АТБ основных аэродромов;
- на закупку оснастки для центров ТОиР;
- на содержание обслуживающего персонала на основных и промежуточных аэродромах и центрах ТО и Р.

Остальные затраты, включая затраты на контрольно-проверочные работы, не включаются в состав затрат, поскольку предполетная и послеполетная подготовки БРЭО не требуют специального оборудования и осуществляются в основном посредством осмотров с использованием

средств встроенного контроля. При проведении профилактических работ на основных аэродромах используется оборудование, стоимость которого включалась в стоимость оснастки для АТБ и центров ТОиР.

Особенность расчета затрат на техническую эксплуатацию заключается в том, что все затраты, кроме затрат на ремонт и содержание персонала, делаются единовременно при покупке оборудования на весь жизненный цикл, а затраты на ремонт и содержание персонала планируются на каждый год. Для получения оценок по общим затратам оценки затрат на закупку блоков комплексов, оснастки АТБ и центров ТОиР, а также затраты на закупку обменных фондов делятся на период жизненного цикла (величину $N_{ж}$), в результате чего получаются среднегодовые затраты, которые могут быть суммированы с затратами на ремонт и содержание персонала. Для получения оценок общих затрат на техническую эксплуатацию суммарные среднегодовые затраты умножаются на период жизненного цикла.

Расчет среднегодовых затрат на закупку комплексов

Стоимость (C_k) БРЭО, установленных на ЛА, рассчитывается по следующей формуле:

$$C_k = \frac{P_c}{N_{ж}} \sum_{j=1}^S C_{jkce}, \quad (3)$$

где P_c – парк (количество) самолетов; $N_{ж}$ – количество лет жизненного цикла самолета; S – число КСЕ в комплексе.

Расчет затрат на закупку обменных фондов

Как показано в [5], поток отказов бортового оборудования летательных аппаратов является пуассоновским. Это обстоятельство позволяет связать количество обменного фонда $d_i(T)$ конкретной i -й КСЕ, функционирующей в течение времени T , с вероятностью задержки вылета из-за отсутствия в обменном фонде данной КСЕ посредством следующей формулы Пуассона [5]:

$$1 - \sum_{K=0}^{d_{pi}(T)} \frac{(\lambda_{kceoi} T_{об})^K}{K!} e^{-\lambda_{kceoi} T_{об}} \leq P_{звoи}, \quad (4)$$

где λ_{kceoi} – интенсивность отказов группы i -х КСЕ; $T_{об}$ – среднее время оборачиваемости обменного фонда (доставка и ремонт одной отказавшей КСЕ, как правило, в центре ТО и Р); $P_{звoи}$ – вероятность задержки вылета из-за отсутствия i -й КСЕ в обменном фонде.

Интенсивность отказов группы i -х КСЕ равна

$$\lambda_{kceoi} = ((n_{kcei} + n_{ai})P_c + d_{цi})\lambda_{kcei},$$

где n_{kcei} – количество однотипных КСЕ i -го типа в БРЭО; n_{ai} – количество однотипных КСЕ i -го типа в технической аптечке; P_c – парк самолетов, обслуживаемых центром ТОиР; $d_{цi}$ – число КСЕ i -го типа в обменном фонде центра ТОиР; λ_{kcei} – интенсивность отказов i -го типа КСЕ.

Левая часть неравенства (4) имеет физический смысл вероятности возникновения в потоке мгновенно восстанавливаемых отказов, возникающих с интенсивностью λ_{kceo} за интервал времени $T_{об}$ более $d_{цi}$ отказов.

При эксплуатации БРЭО гражданских самолетов восстановление отказавших БРЭО происходит не мгновенно, а за конечный небольшой интервал времени $T_{зн}$. В документе [6] определены нормы регулярности полетов, касающиеся восстановления отказов БРЭО. Согласно «нормам» это время не должно превышать 15 мин ($T_{зн} \leq 15$), вероятность задержки вылета (восстановления отказа за время, превышающее 15 мин) должна быть не более величины $P_{зв} \leq 0,002$.

На основании опыта эксплуатации среднемагистральных самолетов гражданской авиации период оборачиваемости ремонта КСЕ может быть принят равным 14 дням, если предположить, что ремонт отказавших КСЕ будет производиться в основном заменой отказавших КСЕ в центре ТОиР и в редких случаях на заводах-изготовителях. Следовательно, временем доставки КСЕ можно пренебречь.

Учитывая, что среднесуточный налет среднемагистрального самолета равен 10 ч, то среднее время оборачиваемости обменного фонда $T_{об}$ в часах налета равно 140 л.ч. Поскольку $T_{зн} = 0,25$ ч существенно меньше $T_{об} = 140$ ч, то можно считать, что восстановление БРЭО происходит мгновенно и, следовательно, для этого случая формула (4) справедлива.

При расчете количества обменного фонда (ЗИП) необходимо учесть влияние на процесс отказов и восстановлений рекомендаций «Главного перечня минимального оборудования», т.е. учесть категории интервала восстановления и сами интервалы восстановления t_b , в течение которых самолет может летать с отказавшим КСЕ. Если отказавшее КСЕ не резервировано, то за время t_b новых отказов возникнуть практически не может.

После завершения интервала восстановления или ранее, если самолет окажется на основном аэродроме, отказавшее КСЕ будет снято с борта и отправлено в ремонт. За время оборачиваемости ремонта оно может вновь отказать и может летать с отказом в течение времени t_b без новых отказов. Следовательно, для этого времени в ЗИП можно не делать запасов и рассчитывать запас обменного фонда $d_{ц}$ необходимо только на время $T_{об}-t_b$. Когда $T_{об} \leq t_b$ запас КСЕ $d_{ц} = 1$, так как одна КСЕ всегда (исправная или неисправная) будет на борту, а другая в составе обменного фонда (в ремонте или в запасе). Левая часть формулы (4), вероятность задержки вылета будет равна нулю, поскольку $T_{об}-t_b = 0$, а $d_{ц} = 1$. Тогда неравенство (4) для этого случая будет иметь следующий вид:

$$1 - \sum_{K=0}^{d_{ц}(T)} \frac{(\lambda_{кceo i} (T_{об} - t_b))^K}{K!} e^{-\lambda_{кceo i} (T_{об} - t_b)} \leq P_{збо i}. \quad (5)$$

Поскольку вероятность задержки вылета БРЭО в целом $P_{збо}$ равна вероятности задержки вылета из-за отказа хотя бы одной КСЕ, то эта вероятность будет равна сумме вероятностей задержки вылета из-за отказа всех КСЕ, входящих в БРЭО, т.е.

$$P_{збо} = \sum_{i=1}^{N_{КСЕ}} P_{збо i},$$

где $N_{КСЕ}$ – число КСЕ в БРЭО.

Из теории вероятностей [2, 4] известно, что сумма вероятностей из m членов P_S вычисляется по формуле

$$P_S = \sum_{i=1}^m P_{si} - \left(\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m P_{si} P_{sj} - \left(\sum_{i=1}^{m-2} \sum_{j=i+1}^{m-1} \sum_{k=i+2}^m P_{si} P_{sj} P_{sk} - \dots \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\sum_{i=1}^{m-(n-1)} \sum_{j=i+1}^{m-(n-2)} \sum_{k=i+2}^{m-(n-3)} P_{si} P_{sj} P_{sk} \dots \sum_{l=i+n}^m P_{si} P_{sj} P_{sk} \dots P_{sl} - \dots - (P_{s1} P_{s2} \dots P_{sm}) \right) \dots \right) \right). \quad (6)$$

Сумма вероятности задержки вылета из-за отказа любой КСЕ существенно меньше единицы, следовательно, в формуле (6) можно пренебречь членами, являющимися произведением вероятностей отдельных КСЕ. С учетом этого приближения вероятность того, что задержка вылета из-за отказа хотя бы одной КСЕ по причине отсутствия в обменном фонде исправной КСЕ данного типа $P_{звкбо}$ будет иметь следующий вид:

$$P_{звкбо}(d_{ц1}, d_{ц2}, \dots, d_{цN_{КСЕ}}) = \sum_{i=1}^{N_{КСЕ}} \left(1 - \sum_{K=0}^{d_{цi}} \frac{(\lambda_{кceo i} T_{об})^K}{K!} e^{-\lambda_{кceo i} T_{об}} \right). \quad (7)$$

В нормативной документации [6] задаются допустимые нормы на вероятность задержки вылета $P_{дзвкбо}$. Тогда уравнение в виде неравенства, ограничивающего вероятность задержки вылета из-за недостатка обменного фонда, будет иметь следующий вид:

$$P_{дзвкбо} \geq \sum_{i=1}^{N_{КСЕ}} \left(1 - \sum_{K=0}^{d_{цi}} \frac{(\lambda_{кceo i} T_{об})^K}{K!} e^{-\lambda_{кceo i} T_{об}} \right). \quad (8)$$

С учетом интервала восстановления формула (8) примет вид

$$P_{\text{дзвкбо}} \geq \sum_{i=1}^{N_{\text{КСЕ}}} \left(1 - \sum_{K=0}^{d_{\text{Ци}}} \frac{(\lambda_{\text{КСЕои}} (T_{\text{об}} - t_{\text{В}}))^K}{K!} e^{-\lambda_{\text{КСЕои}} (T_{\text{об}} - t_{\text{В}})} \right).$$

Комплектов обменных фондов, удовлетворяющих условию (8), может быть множество. Среди них необходимо выбрать тот, у которого стоимость комплекта минимальна, т.е. выполняется условие (7). Тогда оптимизационная задача комплектации БРЭО обменными фондами сводится к минимизации стоимости обменного фонда БРЭО:

$$C_{\text{ОФКБО}} = \min \sum_{i=1}^{N_{\text{КСЕ}}} C_{\text{КСЕои}} d_{\text{Ци}}(T_{\text{об}}), \quad (9)$$

где $C_{\text{ОФКБО}}$ – стоимость обменного фонда всего оборудования при ограничении области всевозможных значений выполнением условия (6); $C_{\text{КСЕи}}$ – стоимость i -й КСЕ; $d_{\text{Ци}}(T_{\text{об}})$ – количество обменного фонда в центре ТОиР.

Метод решения этой оптимизационной задачи приведен в [7]. В основе метода лежит доказанная в [7] теорема о том, что «Множество точек $U(d_{\text{НЦи}}, \lambda_i, T)$, где $i = 1, 2, \dots, N_{\text{КСЕ}}$, полученных в результате решения уравнения (6) при возрастании $N_{\text{КСЕ}}$ стремится к выпуклому множеству». В теории математического программирования [1] доказано, что однозначное решение оптимизационных задач находится в области выпуклых множеств, ограничивающих область возможных значений переменных, подлежащих оптимизации. Используя эти доказательства, был разработан метод решения оптимизационной задачи с оптимизационным функционалом (9). Метод решения сводится к следующей последовательности операций:

- определяются оптимальные значения в непрерывной области, для чего дискретные выражения, находящиеся под суммой выражения (8), аппроксимируются непрерывными функциями;
- на основе дифференцирования выражений аппроксимированной (8) и (9) составляется система дифференциальных уравнений оптимизации, в результате решения которой отыскивается локальный непрерывный оптимум;
- посредством перебора конечных дискретных значений количеств обменных фондов по каждой КСЕ в области локального оптимума методом перебора отыскивается глобальный оптимальный комплект обменных фондов.

Расчет годовых затрат на ремонт отказавших КСЕ заменой ССЕ

Расчет производится в следующей последовательности:

- производится оценка ожидаемого количества отказов j -й ССЕ i -й КСЕ ($I_{i,j}$) за год;
- оценивается средняя стоимость ремонта i -й КСЕ заменой j -й ССЕ ($C_{i,j}$);
- оцениваются среднегодовые затраты на текущий ремонт комплекса по следующей формуле:

$$C_{\text{РГ}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{КСЕ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{КСЕ}}} I_{i,j} C_{i,j}. \quad (10)$$

Поскольку на стадии эскизного проектирования отсутствуют сведения о ССЕ подавляющего количества КСЕ, принималось, что стоимость ремонта одного КСЕ составляет 10 % от стоимости КСЕ (C_i). Для этого случая расчет годовых затрат на ремонт производится в следующей последовательности:

- производится оценка ожидаемого количества отказов i -й КСЕ (I_i) за год;
- оценивается средняя стоимость ремонта i -й КСЕ $C_{pi} = 0,1 C_i$;
- оцениваются среднегодовые затраты на текущий ремонт комплекса.

Оценка ожидаемого количества отказов i -й КСЕ (I_i) за год производится по следующей формуле:

$$I_i = (1 - e^{-\lambda_{\text{КСЕи}} H}) \Pi_c,$$

где I_i – количество отказов i -го типа КСЕ; $\lambda_{\text{КСЕР}i}$ – интенсивность отказов i -го типа КСЕ подлежащих ремонту; H – среднегодовой налет самолета; P_c – парк самолетов, обслуживаемых центром ТОиР.

Интенсивность отказов i -го типа КСЕ подлежащих ремонту равна

$$\lambda_{\text{КСЕР}i} = (n_{\text{КСЕР}i} + n_{\text{AI}}) \cdot \lambda_{\text{КСЕР}i}.$$

На основании изложенного выше среднегодовые затраты на ремонт БРЭО равны

$$C_{\text{РГ}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{КСЕ}}} I_i \cdot 0,1 \cdot C_i. \quad (11)$$

Расчет затрат на закупку оснастки для АТБ и центров ТОиР

Оборудование АТБ и центров ТОиР должно позволять проведение входного контроля и контроля при хранении изделий, восстанавливаемых на основном и промежуточных аэродромах, а также проведение работ по ремонту КСЕ заменой ССЕ.

Поскольку большинство изделий комплекса имеют в своем составе вычислители, то основным устройством этого оборудования будет эксплуатационно-ремонтная система, состоящая:

- из устройства, позволяющего подсоединить и включить в работу любое другое устройство комплекса, с возможностью одновременной работы не менее трех устройств;
- устройства, вырабатывающего и подающего в изделия стимулирующие сигналы;
- локальной компьютерной сети, позволяющей загружать в изделия комплекса тесты входного и диагностического контроля и анализировать результаты прохождения стимулирующих сигналов и тестов.

Основным методом контроля такой системы должен быть контроль посредством тестов без параметрических измерений.

Для радиотехнических систем, некоторые устройства которых нельзя проверить описанной выше системой, целесообразно изделия обменного фонда объединить в стенды, позволяющие имитировать функции этих изделий. Для анализа результатов функционирования, а также диагностики отказов эти стенды должны быть подключены к описанной выше вычислительной сети.

Наконец, для контроля и диагностики устройств, в принципе требующих измерения параметров, должна быть предусмотрена контрольно-поверочная аппаратура. Кроме того, это оборудование должно включать в свой состав технические средства восстановления отказавших устройств.

Предварительная оценка показала, что стоимость описанного выше оборудования составит:

- для восстановления (ремонта) КСЕ заменой ССЕ в технических центрах ТОиР стоимость оснастки центров $C_{\text{ОЦ}}$ принимается равной стоимости одного комплекса $C_{\text{КБО}}$, если в год в среднем происходит 50 отказов. В общем случае $C_{\text{ОЦ}}$ рассчитывается по формуле

$$C_{\text{ОЦ}} = \frac{I_{\text{КБО}}}{50} C_{\text{КБО}}, \quad (12)$$

где общее количество отказов БРЭО $I_{\text{КБО}}$ равно сумме количества отказов каждого КСЕ и вычисляется по следующей формуле:

$$I_{\text{КБО}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{КСЕ}}} I_i. \quad (13)$$

Среднегодовые затраты на оснастку центра ТОиР ($C_{\text{ОЦСГ}}$) рассчитываются по формуле

$$C_{\text{ОЦСГ}} = \frac{C_{\text{СГ}}}{N_{\text{ж}}}. \quad (14)$$

Расчет затрат на содержание персонала в центрах ТОиР

На основании консультаций со специалистами по системам и отдельным КСЕ комплексов и имитации ряда работ по замене и ремонту КСЕ были сформированы следующие исходные данные для расчета затрат на содержание персонала в центрах ТОиР:

- количество персонала в центре ТОиР ($K_{ц}$) – 5 чел.;
- среднемесячная зарплата одного сотрудника 40 тыс. руб.;
- суммарная зарплата всех сотрудников составляет 20 % от годового фонда затрат на обеспечение работы персонала.

Среднегодовые затраты на содержание персонала центров ТОиР равны $З_{ц} = K_{ц} \cdot 40\,000 \cdot 12$ и составляют 20 % от годового фонда затрат на обеспечение работы персонала:

$$\Phi_{ГЗ} = \frac{З_{ц}}{0,2}. \quad (15)$$

Расчет суммарных среднегодовых затрат на техническую эксплуатацию комплекса

Среднегодовые затраты на техническую эксплуатацию, включая среднегодовые затраты на закупку БРЭО $C_{ЭКБОГ}$, вычисляются как сумма среднегодовых затрат на закупку КСЕ $C_{КБОГ}$, на закупку обменных фондов центров ТО и Р $C_{ОФКБО}$, на ремонт КБО $C_{РКБОГ}$, на оснастку центров ТО и Р $C_{ОЦСТ}$ и на содержание персонала $\Phi_{ГЗ}$ по следующей формуле:

$$C_{ЭКБОГ} = C_{КБОГ} + C_{ОФКБО} + C_{РГ} + C_{ОЦСТ} + \Phi_{ГЗ}. \quad (16)$$

Заключение

Поскольку основные эксплуатационные характеристики закладываются в сложную электронную систему на стадии разработки, то считаем важным введение экономического критерия, касающегося эксплуатационных характеристик сложной электронной системы на всем жизненном цикле изделия. Авторы надеются, что поднятая в статье проблема, устраняющая недостаток в оценке эксплуатационных характеристик после гарантийного периода эксплуатации, позволит создавать сложные электронные системы, обладающие высокой надежностью на всем протяжении жизненного цикла изделия.

Библиографический список

1. Авакян, А. А. Синтез отказоустойчивых комплексов бортового оборудования летательных аппаратов / А. А. Авакян // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 6–10.
2. Лапшин, Э. В. Разработка моделей анализа экономических показателей сложной промышленной системы / Э. В. Лапшин, А. М. Корнеев, Т. В. Мирошниченко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 22.
3. Авакян, А. А. Методика расчета одиночного и группового комплексов ЗИП составных частей системы автоматического управления полетом и тягой (СУПТ-112В) для применения в составе ПрНПК-112В / А. А. Авакян, М. В. Копненко. – Жуковский, 2010.
4. Авакян, А. А. Мониторинг рабочего состояния отказоустойчивой платформы / А. А. Авакян, М. В. Копненко, А. К. Максимов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 67.
5. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
6. Авакян, А. А. Синтез сложных многофункциональных отказоустойчивых систем электроники : моногр. / А. А. Авакян, В. В. Ключев. – М. : Спектр, 2014. – 104 с.
7. Беишев, Г. А. Элементарное введение в геометрическое программирование / Г. А. Беишев, М. И. Кратко. – М. : Физматгиз, 1980. – 144 с.

Авакян Александр Анушаванович

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
авиационного оборудования
(Россия, 140180, Московская обл., г. Жуковский,
ул. Туполева, 18)
E-mail: avakyan@niiio.com

Avakyan Aleksandr Anushavanovich

doctor of technical science, main scientific worker,
Institute of Aircraft Equipment
(140180, 18 Tupolev street, Zhukovskiy,
Moscow region, Russia)

Копненко Марина Владимировна

инженер,
Научно-исследовательский институт
авиационного оборудования
(Россия, 140185, Московская обл., г. Жуковский,
ул. Туполева, 18)
E-mail: avakyan@niiio.com

Романенко Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
Военная академия ракетных войск стратегического
назначения имени Петра Великого (филиал)
(142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов,
ул. Бригадная, 17)
E-mail: romanenko-55@inbox.ru

Лоцманова Елена Владимировна

кандидат технических наук,
советник председателя
Комитета по ценам и тарифам Московской области,
(Россия, 143407, Московская обл., г. Красногорск,
Бульвар строителей, 1)
E-mail: losmanova@mail.ru

Аннотация. Рассматривается экономический критерий отношения стоимости изделия к среднегодовым затратам на техническую эксплуатацию изделия, характеризующий затраты на техническую эксплуатацию сложных систем электроники, в дальнейшем – изделий электроники в течение жизненного цикла изделия. Предлагается также ввести понятие «экономический ресурс», равный периоду, когда экономический критерий становится равным единице. Необходимость включения в технические задания требования по экономическому критерию и ресурсу обяжет разработчиков на стадии разработки и создания изделия закладывать в него такие эксплуатационные характеристики, которые минимизируют затраты на техническую эксплуатацию изделий электроники в течение всего жизненного цикла изделия. В настоящее время в технические задания включаются требования к эксплуатационным характеристикам только на гарантийный период эксплуатации.

Ключевые слова: техническая эксплуатация, среднегодовые затраты, экономический ресурс, жизненный цикл.

Kopnenkova Marina Vladimirovna

engineer,
Institute of Aircraft Equipment
(140185, 18 Tupolev street, Zhukovskiy,
Moscow region, Russia)

Romanenko Yuriy Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
Honoured Worker of Science of Russian Federation,
Military Academy of Strategic Missile Forces
named after Peter the Great (branch)
(142210, 17 Brigadnaya street, Serpukhov,
Moscow region, Russia)

Lotsmanova Elena Vladimirovna

candidate of technical sciences,
advisor to the chairman of the Committee on prices
and tariffs of the Moscow region,
(143407, 1 Bulvar stroiteley, Krasnogorsk,
Moscow region, Russia)

Abstract. The article deals with the economic criterion of cost ratio to the average annual cost of maintenance products, describing the cost of maintenance of complex systems of electronic in future electronics products throughout the life cycle of products. It is also proposed to introduce the concept of an economic re-source equal to the period, when the economic criterion becomes equal to 1. The need to include in the terms of reference of the economic criteria and requirements resource will oblige developers under development and creation of products to appoint such performance characteristics that minimize the cost of maintenance of electronics products during the whole product life cycle. Currently, this includes technical tasks are performance requirements only on the warranty period of maintenance.

Key words: maintenance, annual expenditures, economic resource life cycle.

УДК 623.1.7

Авакян, А. А.

Экономический ресурс сложной электронной системы / А. А. Авакян, М. В. Копненко, Ю. А. Романенко, Е. В. Лоцманова // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 17–25. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-3.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ И РИСКОМ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

А. К. Гришко

Введение и постановка задачи

В приборостроении процессы управления надежностью на этапах жизненного цикла сложных технических систем (СТС) включают в себя анализ и оценку надежности, а также меры по ее повышению. Управлять надежностью необходимо на всех этапах: проектирования, производства, эксплуатации и технического обслуживания, модернизации, прекращения эксплуатации и демонтажа [1–3].

На этапах проектирования и производства необходимо выявить источники отказов; оценить надежность конструкции СТС в целом; определить и оценить возможные меры по повышению надежности, закладываемые в конструкцию СТС; оценить возможность возникновения потенциально опасных ситуаций, которые приводят к снижению надежности; проанализировать альтернативные конструктивные решения с позиции надежности.

На этапе, который включает в себя монтаж, эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования, необходимо решить следующие задачи: проконтролировать и оценить эксплуатационные данные для сопоставления фактических показателей, которые характеризуют надежность оборудования и определяют требования к ее уровню; проанализировать статистическую информацию об основных источниках, снижающих надежность; проанализировать данные об интенсивности отказов для оперативного принятия решений; определить степень влияния изменений в структуре производства, техпроцессах и изменений в структуре проектируемой системы на надежность.

На этапе жизненного цикла, предполагающего прекращение эксплуатации СТС, необходимо проанализировать возможность дальнейшего обеспечения надежности с целью продления срока эксплуатации.

Надежность СТС характеризуют три необходимых условия:

- наличие неопределенности;
- необходимость выбора альтернативного варианта (отказ от выбора – разновидность выбора);
- возможность оценить вероятность реализации выбираемых альтернативных вариантов ее повышения.

Вероятность появления отказов СТС рассчитывается на основе применения статистического подхода. Обработка результатов расчетов этих вероятностей позволяет определить параметр ω_j^* потока отказов для каждого временного интервала с момента монтажа элементов СТС [3–5]:

$$\omega_j^* = \frac{m_j}{\Delta t},$$

где m_j – количество отказов j -го элемента СТС в течение интервала времени Δt .

Функция надежности (ФН) для каждого параметра потока отказов будет выглядеть следующим образом:

$$N_j(t) = e^{-\omega_j t},$$

где ω_j – среднее значение ω_j^* .

У вероятности отказа элементов СТС $P_j(t)$ и ФН имеется [6–9] следующая зависимость:

$$P_j(t) = 1 - N_j(t).$$

Эта зависимость позволяет производить ее оценку с течением времени.

Методика выбора оптимальной стратегии управления

Поскольку выбор оптимальной стратегии действий, сохраняющих параметры надежности СТС в заданных пределах, – важная и первостепенная задача, для анализа этих стратегий необходимо сделать следующее [10–12]:

- устранить нежелательные события;
- оценить любые последствия, являющиеся результатом нежелательных событий;
- учесть существующие меры, смягчающие последствия, вместе со всеми соответствующими условиями, которые влияют на эти последствия;
- сформировать критерии, которые используются для полной идентификации последствий;
- учесть как немедленные последствия, так возможные с течением времени;
- учесть вторичные последствия, влияние которых распространяется на смежные СТС и оборудование.

На рис. 1 показаны возможные варианты реализации четырех стратегий, начиная с некоторого момента времени 1 и до некоторого момента времени 5. При этом имеется возможность принятия одного из четырех решений $\varphi_1, \dots, \varphi_4$, в результате которых будут определены соответствующие стратегии $S_1, \dots, S_4$.

Ось ординат на рисунке служит для отображения количественных значений надежности (наработка на отказ в часах) при решениях $f_1, \dots, f_4$ для каждого момента времени в условных единицах, откладываемого по оси абсцисс.

При этом если выбрана стратегия S_1 , то риск достигнет уровня f_1 лишь в том случае, если имеются наиболее благоприятные внешние условия θ_1 для реализации этой стратегии. Причем если внешние условия сложились благоприятно для стратегии $S_4(\theta_4)$, а сделан выбор стратегии S_1 , то уровень надежности СТС становится выше.

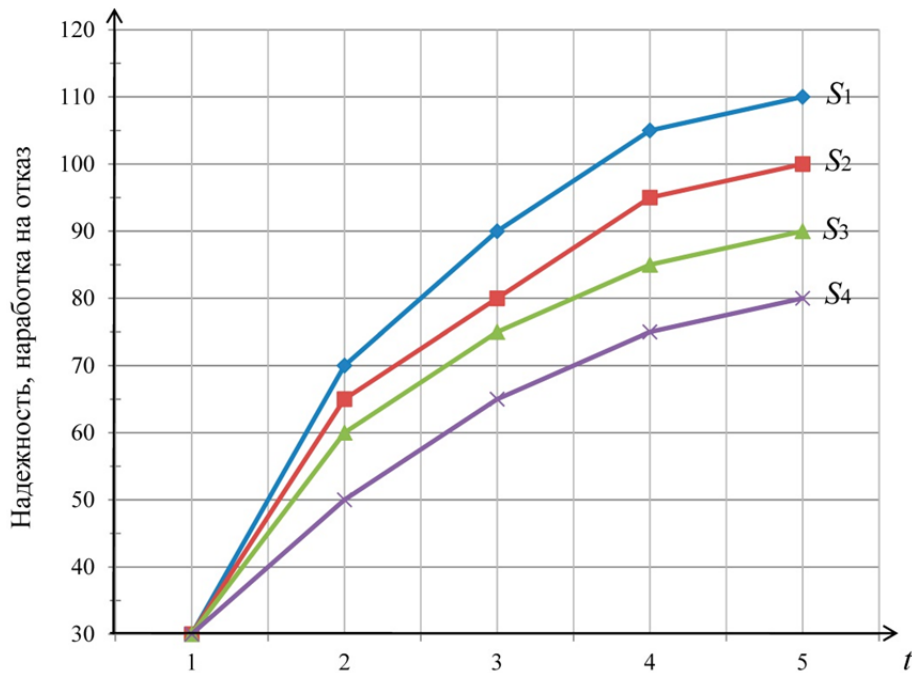


Рис. 1. Реализация стратегий управления надежностью

Для дальнейшего изложения материала вводим понятие оценочного функционала $F = \{f_Q\}$, который определяет ситуацию принятия решений в виде оценочной матрицы [13–15]. Она состоит из элементов f_Q , являющихся количественными оценками принятого решения $\varphi_Q \in \hat{O}$ при условии нахождения внешней среды в состоянии $\theta_j = \Theta$:

$$F = \begin{matrix} & \varphi_1 & \dots & \varphi_Q & \dots & \varphi_M \\ \begin{matrix} \varphi_1 & \dots & \varphi_{1Q} & \dots & \varphi_{1M} & \theta_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{J1} & \dots & \varphi_{JQ} & \dots & \varphi_{JM} & \theta_J \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{N1} & \dots & \varphi_{NQ} & \dots & \varphi_{NM} & \theta_N \end{matrix} \end{matrix}.$$

Здесь $\{\varphi_1, \dots, \varphi_M\}$ – множество решений, которые определяют выбор соответствующих стратегий управления $\{S_1, \dots, S_M\}$; $\{\theta_1, \dots, \theta_N\}$ – множество состояний внешней среды, которая может находиться в одном из них $\theta_j = \Theta$; f_Q – множество количественных оценок принятого решения (уровень надежности СТС), если выбрана стратегия Q при условии нахождения внешней среды в состоянии J .

Формирование вероятностно-статистических критериев надежности

Наилучшую стратегию, оптимизирующую управление надежностью СТС, можно определить, оценивая матрицу (1) с помощью вероятностно-статистических критериев.

Оценку распределения вероятностей $P_j = P\{\theta_j\}$ на множестве состояний $\theta_j = \Theta$, которые заданными множествами $\hat{O} = \{\varphi_1, \dots, \varphi_M\}$ и $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_N\}$, будем проводить на основе применения критерия Байеса.

Суть байесовского подхода заключается в минимизации математического ожидания оценочного функционала и подразумевает преобразование выражений априорных вероятностей в апостериорные. В соответствии с этим критерием оптимальным решением $\varphi_{\hat{E}_0} \in \hat{O}$ будет считаться то, для которого минимум математического ожидания надежности достигает своего максимального значения [16–18]:

$$B(P, \varphi_{Q0}) = \min_{\varphi_Q \in \Phi} B(P, \varphi_Q) = \min_{\varphi_Q \in \Phi} \left[\sum_{J=1}^N P_J f_{JK} \right] = \sum P_J f_{JK0},$$

$$B(P, \varphi_Q) = \sum_{J=1}^N P_J f_{JK}.$$

Величина B будет являться байесовым значением оценочного функционала, позволяющего найти решение $\varphi_{\hat{E}} \in \hat{O}$.

В том случае если лицу, принимающему решение, необходимо в первую очередь учитывать наихудшие условия, то рекомендуется выбирать как основную ту стратегию, при которой уровень надежности в наихудших условиях будет максимальным. Применяемый в таких случаях критерий Вальда будет обеспечивать принятие решения $\varphi_{\hat{E}_0}$, которое удовлетворяет условию

$$\tilde{f}_{Q0} = \min_{\varphi_Q \in \Phi} \max_{\theta_j \in \Theta} f_{JK}.$$

В соответствии с критерием Вальда оптимальным решением будет $\varphi_{\hat{E}_0} \in \hat{O}$, для которого выполняется

$$\tilde{f}_{Q0} = \min_{\varphi_Q \in \Phi} \max_{\theta_j \in \Theta} \{f_{JK}\} = \min_{\varphi_Q \in \Phi} \{\tilde{f}_K\}$$

при условии $B(P^0, \varphi_{Q0}) \geq B_0$, где B_0 и P^0 будут заданы соответствующими требованиями.

Каждый из критериев выбирается с учетом конкретной ситуации.

Анализ рисков СТС, определяющих их надежность, в соответствии с источниками [1–3] будет представлять собой некоторый структурированный процесс. Цель процесса заключается в определении вероятности и количественной оценки неблагоприятных последствий исследуемых действий, объектов или систем. Таким образом, анализ рисков позволяет:

- идентифицировать опасность;
- проанализировать вероятность (частоту) отказов;
- проанализировать последствия этого события.

Для того, чтобы оценить технический риск R , учитывая экономический ущерб, необходимо применить следующее выражение [4]:

$$R = A \cdot P,$$

где A – величина экономического ущерба от рискованного события; P – значение вероятности возникновения рискованного события.

Величину P можно определить по выражению условной вероятности:

$$P = P_0 \cdot P_A,$$

где P_0 – значение вероятности отказа элемента (узла) СТС; P_A – значение вероятности возникновения рискованного события вследствие этого отказа.

Построение «дерева отказов»

Для того, чтобы определить вероятности P_A , необходимо выявить причинно-следственные связи между рискованными событиями. Для этого используют логико-графические методы анализа «деревьев отказов». Это позволяет выявить комбинации отказов СТС, ошибок персонала и нештатных внешних воздействий техногенного или природного характера, которые приводят к головному событию.

Построение «дерева отказов», описывающего причины возникновения нештатных ситуаций, будет включать несколько головных (рисковых) событий, каждое характеризующееся соответствующим экономическим ущербом A_i , $i = 1 \dots L$, где L – количество этих событий, соединенное с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), которые образуют причинные цепи, называемые сценариями. Связь между событиями в «узлах» деревьев определяется знаками «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий. Вычисление вероятности вышестоящего события в этом узле производится путем перемножения вероятностей нижестоящих событий. Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Для каждого риска (вид аварии или нарушение техпроцесса) будут определяться события, при одновременном возникновении которых они появляются. Оценивается вероятность $P_{A_{ij}}$ того, что i -я авария возникнет из-за отказа j -го элемента СТС ($j = 1 \dots M$, где M – количество блоков, узлов СТС).

Чтобы определить количественную оценку технического риска R_{ij} в течение заданного периода времени t , воспользуемся следующим выражением:

$$R_{ij} = A_i P_j(t) P_{ij}.$$

И, соответственно, риск, который связан с отказом i -го элемента СТС, будет определяться

$$R_j = \sum_{i=1}^L R_{ij} = P_j(t) \sum_{i=1}^L A_i P_{ij}.$$

Заключение

Результаты оценки рисков СТС из-за отказов их элементов ранжируются с целью выявления «слабых мест». Эта процедура позволит снизить риски, например, путем уменьшения P_{ij}

(введение контроля со стороны оператора) или $P_j(t)$ (применение более надежных элементов СТС) или уменьшения временного интервала t (организация и проведение более частых планово-предупредительных ремонтных работ).

Библиографический список

1. Садыхов, Г. С. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, Н. И. Сидняев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 502 с.
2. ГОСТ Р 51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М. : Госстандарт России, 2002. – 26 с.
3. Гришко, А. К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-4.
4. Гришко, А. К. Анализ надежности структурных элементов сложной системы с учетом интенсивности отказов и параметрической девиации / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 3 (19). – С. 130–137.
5. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
6. Гришко, А. К. Анализ надежности сложной системы на основе динамики вероятности отказов подсистем и девиации параметров / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6 (34). – С. 116–121.
7. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
8. Гришко, А. К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 51–57.
9. Гришко, А. К. Анизотропная модель системы измерения и анализа температурных полей радиоэлектронных модулей / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 82–88.
10. Гришко, А. К. Оптимальное управление частотным ресурсом радиотехнических систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта / А. К. Гришко // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 57. – С. 21–28. DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28.
11. Гришко, А. К. Математическое моделирование системы обеспечения тепловых режимов конструктивно-функциональных модулей радиоэлектронных комплексов / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. – 2015. – № 3. – С. 27–31.
12. Гришко, А. К. Управление электромагнитной устойчивостью радиоэлектронных систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта / А. К. Гришко, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 66–75.
13. Гришко, А. К. Алгоритм оптимального управления в сложных технических системах с учетом ограничений / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1 (21). – С. 117–123.
14. Grishko, A. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016 (February 23–26). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. DOI:10.1109/TCSET.2016.7452017.
15. Grishko, A. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict / A. Grishko // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, Russia, 2016. – Vol. 2. – P. 107–111. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
16. Grishko, A. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
17. Application of the Model of the Printed Circuit Board with Regard to the Topology of External Conductive Layers for Calculation of the Thermal Conditions of the Printed Circuit Board / I. Rybakov, N. Goryachev, I. Kochegarov, A. Grishko, S. Brostilov and N. Yurkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 803, № 1. – P. 1–6. DOI:10.1088/1742-6596/803/1/012130.

18. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.

Гришко Алексей Константинович

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Конструкции радиоэлектронных средств различного назначения классифицируются как сложные системы и характеризуются многоуровневой иерархической структурой в виде отдельных узлов, блоков, модулей. Проектирование и производство высоконадежных систем бортовой радиоаппаратуры с длительным сроком функционирования – задача еще более сложная и актуальная, поскольку достаточно затруднительно управлять надежностью таких систем на всех этапах жизненного цикла. Целью данной статьи является разработка методики, позволяющей обеспечить требования надежности системы с учетом интенсивности отказов проектируемой системы в процессе эксплуатации. В качестве накладываемых ограничений выступает требование обеспечения минимума затрат для заданного уровня надежности системы на каждом этапе своего жизненного цикла. *Методы.* В статье используются методы теории управления, теории надежности сложных систем и вероятностно-статистические методы принятия решений, учитывающие динамику интенсивности отказов и процессы изменения параметров в процессе эксплуатации. Для оценки уровня надежности и степени риска применен байесовский подход. *Результаты.* Получена методика управления надежностью и риском на этапах проектирования, производства и эксплуатации сложных технических систем, позволяющая минимизировать экономические затраты. *Выводы.* Разработанную методику предлагается применять для выбора оптимальной стратегии управления надежностью на всех стадиях жизненного цикла сложных систем, когда отсутствие необходимой информации делает невозможным обеспечение минимальных общих затрат на каждом из его этапов.

Ключевые слова: надежность, риск, жизненный цикл, система.

Grishko Aleksey Konstantinovich

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

Abstract. *Background.* Design of radio-electronic means for various purposes are classified as a complex system and are characterized by a multilevel hierarchical structure in the form of separate units, blocks, modules. Design and manufacture highly reliable on-Board radio equipment with long life operation of the task is more complex because it is difficult to control the reliability of such systems in all stages of the life cycle. The purpose of this paper is to develop techniques that allow to provide requirements of system reliability subject to the failure rate of the designed system in use. As the imposed restrictions is the requirement to ensure minimum cost for a given level of system reliability at each stage of its life cycle. The purpose of this paper is to develop techniques that allow to provide requirements of system reliability subject to the failure rate of the designed system in use. As the imposed restrictions is the requirement to ensure minimum cost for a given level of system reliability at each stage of its life cycle. *Materials and methods.* The article uses the techniques of control theory, reliability theory of complex systems and probabilistic-statistical methods of decision making that takes into account the dynamics of the failure rate and the process parameters change in the process of operation. To assess the level of reliability and risk applied Bayesian approach. *Results.* Received management methods and reliability and risk in designing, production and operation of complex technical systems that minimize economic costs. *Conclusions.* The developed methodology is proposed to apply to select the optimal management strategy reliability at all stages of the life cycle of complex systems where the lack of adequate information makes it impossible to ensure a minimum total cost of each of its stages.

Key words: reliability, risk, life cycle, system.

УДК 621.396: 519.718

Гришко, А. К.

Выбор оптимальной стратегии управления надежностью и риском на этапах жизненного цикла сложной системы / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 26–31. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-4.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 004.056; 51-76

DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-5

СИНТЕЗ ТЕСТОВЫХ ОБРАЗОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

А. К. Гришко, В. С. Лукин, Н. К. Юрков

Введение

Благодаря высоким оперативно-техническим характеристикам биометрические средства защиты информации уже более 20 лет пользуются заслуженным вниманием специалистов.

Развитие современных нейросетевых преобразователей биометрия-код характеризуется значительным увеличением их сложности [1–4]. Оценка их стойкости является одной из важнейших задач, стоящих перед разработчиками данного вида аппаратуры. Оценка производится тестированием с помощью биометрических образов [5–7]. Так как для тестирования требуется большое количество образов, их нецелесообразно вводить вручную, потому что данный метод создания образов занимает слишком много времени и является малоэффективным. Чтобы процесс создания тестовых образов был автоматизирован, необходимо разработать модель, которая бы по заданным параметрам и требованиям выполняла эти действия в автоматическом режиме.

Определение и анализ статистических параметров образов

Генерация случайных векторов не может быть применена в решении задачи построения баз образов, так как для создания нужно повторять статистические характеристики рукописных образов для более точной оценки работы биометрических программ. Если использовать стандартные функции генерации случайных чисел, можно получить вектора, чьи параметры заведомо будут выходить из области определения образов «все чужие», что в свою очередь на этапе тестирования будут давать ложную информацию и занижать ошибку второго рода [7–10].

На начальном этапе уточняется количество желаемых векторов, которые будут получены на выходе программы. Производится анализ статистических данных образов «СВОЙ». Подсчет математического ожидания и дисперсии осуществляется по каждому параметрам векторов «СВОЙ». Реализован алгоритм создания корреляционной матрицы по всем параметрам размерностью 480 на 480. Далее вычисляется средний коэффициент корреляции по модулю для дальнейшего его применения в алгоритме генерации тестовых биометрических рукописных образов «Чужие».

Одна из наиболее распространенных задач статистического исследования состоит в изучении связи между выборками. Обычно связь между выборками носит не функциональный, а вероятностный (или стохастический) характер. В этом случае нет строгой, однозначной зависимости между величинами [11–13]. При изучении стохастических зависимостей различают корреляцию и регрессию.

Корреляционный анализ состоит в определении степени связи между двумя случайными величинами X и Y . В качестве меры такой связи используется коэффициент корреляции [14–17].

Коэффициент корреляции оценивается по выборке объема n связанных пар наблюдений (x_i, y_i) из совместной генеральной совокупности X и Y . Существует несколько типов коэффициентов корреляции, применение которых зависит от измерения (способа шкалирования) величин X и Y .

Для оценки степени взаимосвязи величин X и Y , измеренных в количественных шкалах, используется коэффициент линейной корреляции (коэффициент Пирсона), предполагающий, что выборки X и Y распределены по нормальному закону. На рис. 1 представлен пример двух образов «СВОЙ».

Коэффициент корреляции – параметр, который характеризует степень линейной взаимосвязи между двумя выборками, рассчитывается по формуле

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 * \sum (y_i - \bar{y})^2}}.$$

Коэффициент корреляции изменяется от -1 (строгая обратная линейная зависимость) до 1 (строгая прямая пропорциональная зависимость). При значении 0 линейной зависимости между двумя выборками нет.

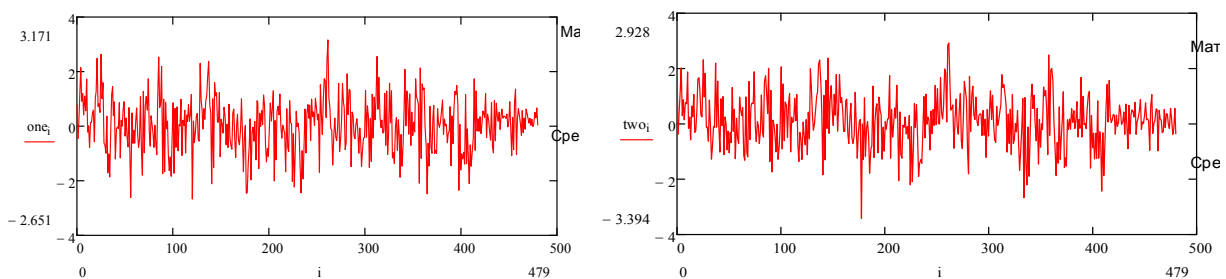


Рис. 1. Пример двух образов «СВОЙ»

На рис. 2 изображен пример распределения двух образов «СВОЙ».

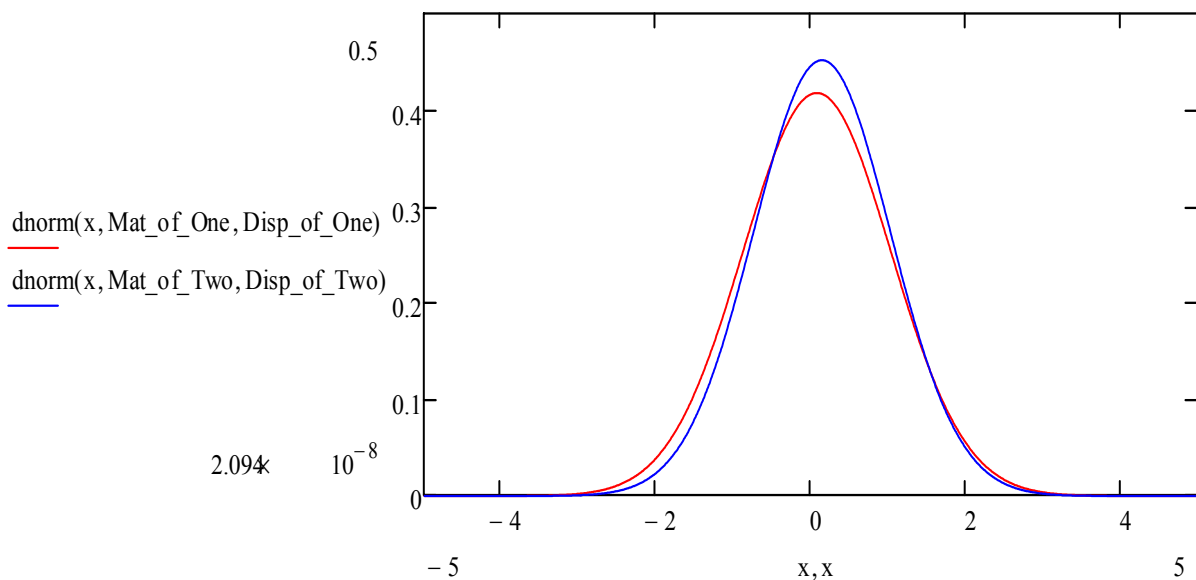


Рис. 2. Пример распределения двух образов «СВОЙ»

На вход подается таблица параметров образов «СВОЙ» размерностью k на 480, где k – количество своих образов. На выходе получается матрица размерностью 480 на 480. На рис. 3 представлена блок-схема получения статистических параметров.



Рис. 3. Вычисление статистических параметров

После первого этапа получения статистических параметров были построены и проанализированы графики, изображенные на рис. 4 и 5.

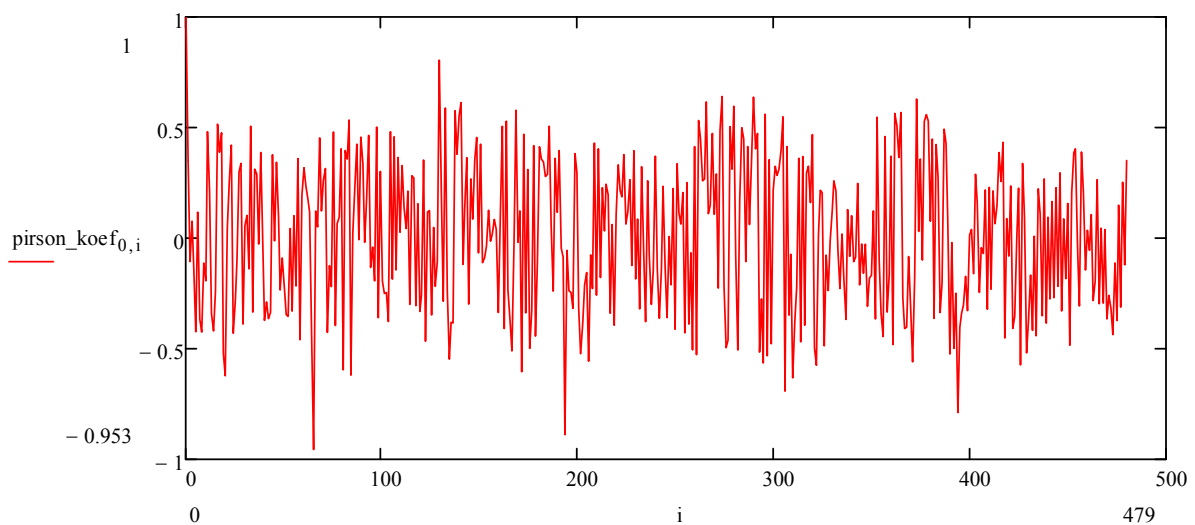


Рис. 4. График корреляционных связей первого параметра

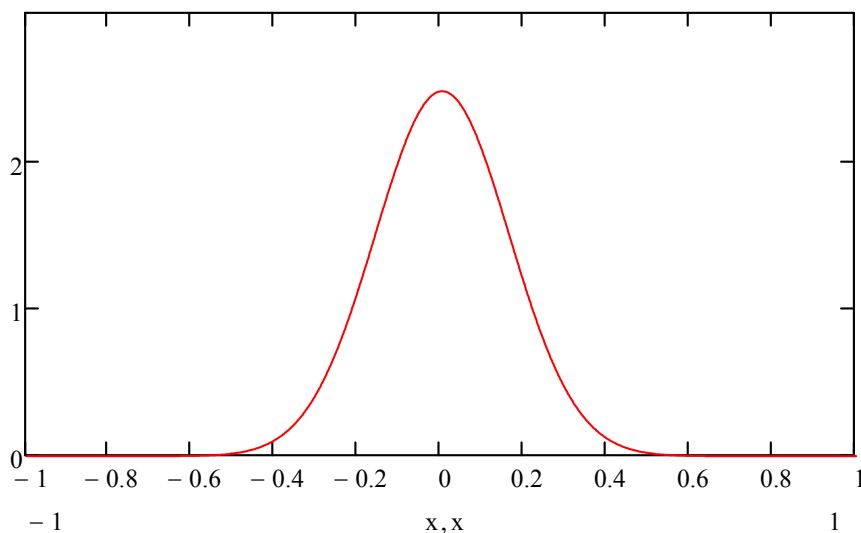


Рис. 5. Распределение корреляционных связей первого параметра

Как видно из рис. 5, вектор имеет нормальное распределение.

Алгоритм синтеза модели тестовых биометрических рукописных образов «Чужие»

После определения вышеописанных параметров совершается реализация самого генератора тестовых биометрических рукописных образов «Чужие».

На рис. 6 изображена блок-схема алгоритма синтеза моделей тестовых образов. Для первоначальной генерации использована стандартная функция системы Mathcad – «gnorm». «gnorm(M, μ, σ)» – вектор M независимых случайных чисел, каждое из которых имеет нормальное распределение:

- μ – математическое ожидание;
- σ – среднеквадратичное отклонение.

Генерация применяется для двух векторов x_0 и z из формулы

$$xx_0^i = \frac{(a * x_0^i + z^i)}{\sqrt{1 + a^2}}.$$

Данная формула в свою очередь служит функцией для подбора коэффициента a . Подбор коэффициента осуществляется итерационно, на каждом шаге вычисляется средний коэффициент корреляции и сравнивается с исходным. При достижении максимально похожего коэффициента корреляции цикл прекращается, вектор xx_0 фиксируется при данном значении коэффициента a .

Нормируются выходные данные (xx_0) относительно дисперсии и математического ожидания образов «СВОЙ». Для нормировки генерируется вектор дисперсий функцией «rchisq» – возвращает вектор случайных чисел, имеющих хи-квадрат распределение. Каждый элемент выборки умножается на соответствующее значение дисперсии и к этому же значению прибавляется математическое ожидание образов «СВОЙ». Нормированные векторы отправляются в файл с расширением «txt».

На каждом этапе реализации алгоритма в системе Mathcad встроены графики, выведенные на экран для зрительного восприятия поведения функций.

При построении модели тестовых образов необходима проверка распределения и гistogramм функций.

Использованы основные функции Mathcad для вывода результатов на экран: «dnorm(x, m, s)» – возвращает плотность вероятности нормального распределения, в котором m и s есть среднее значение и среднеквадратичное отклонение, а s больше 0:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right].$$

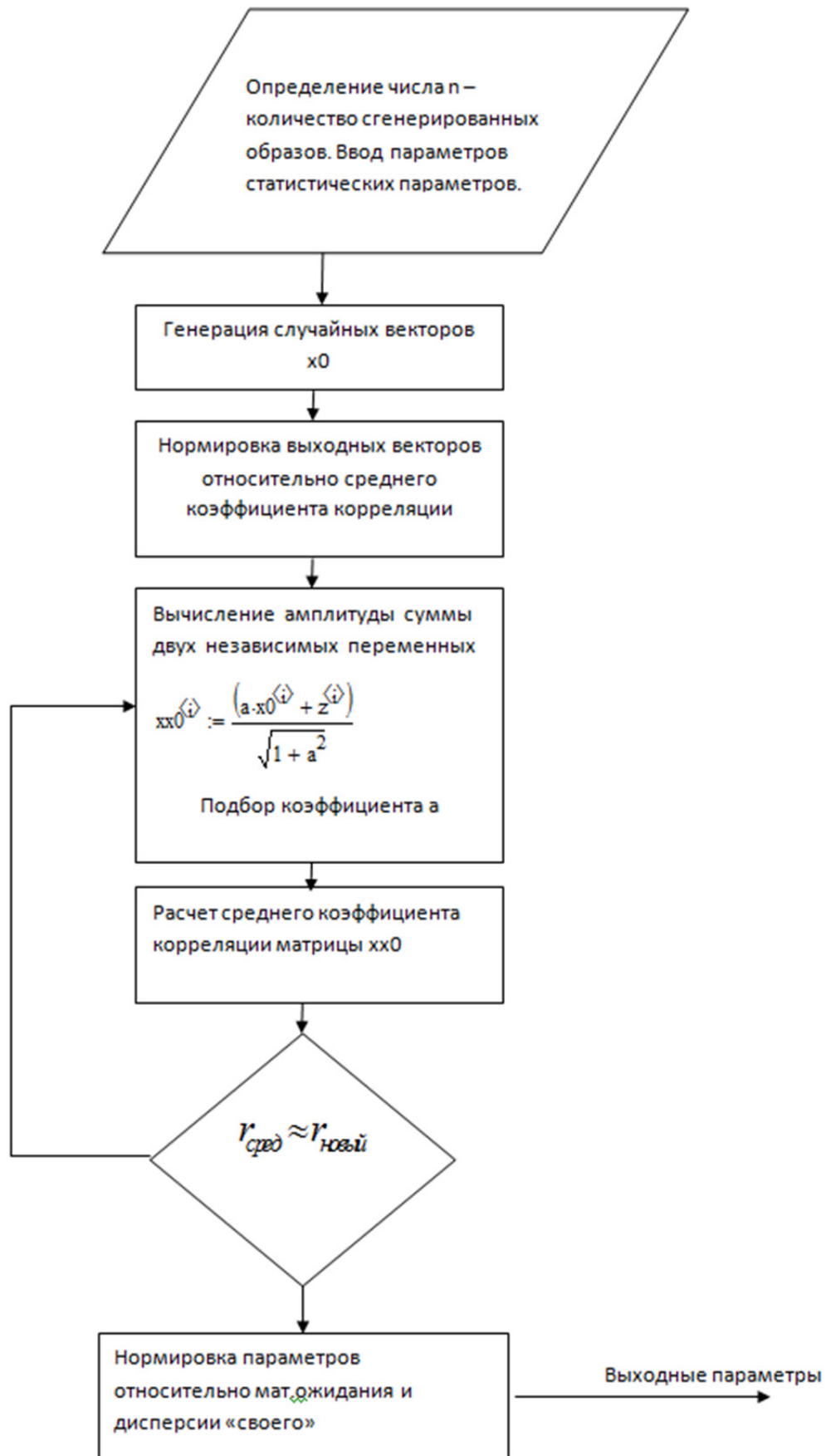


Рис. 6. Синтез модели тестовых рукописных биометрических образов «Чужие»

Сравнение полученных образов «Чужие» с образами «Свои»

В качестве оценки результата работы программы полученные вектора можно посмотреть на графике, оценить их распределение. Так, на рис. 7 представлены два выходных вектора, имеющие амплитудное различие между собой.

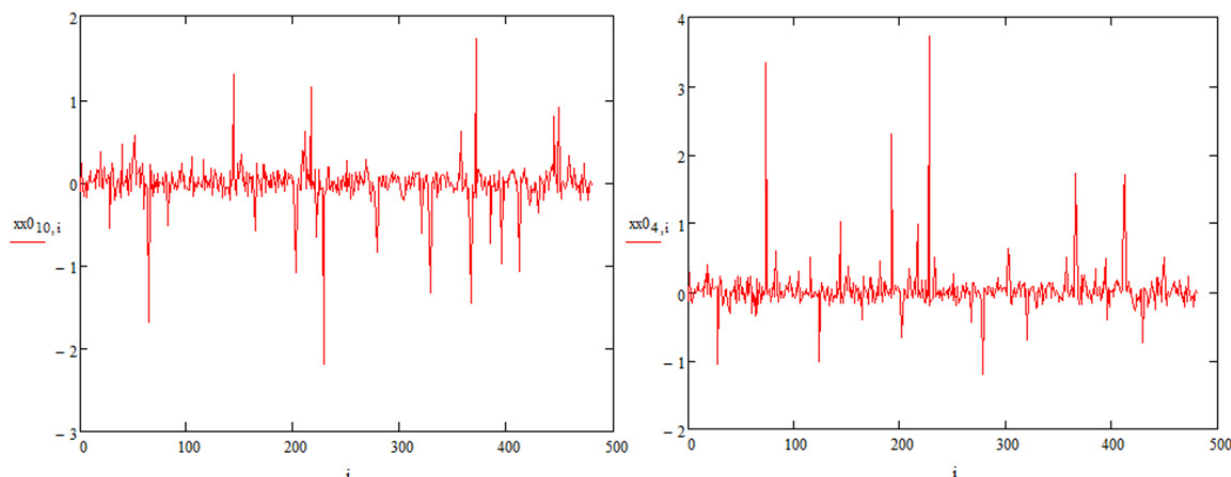


Рис. 7. Вариация из двух выходных векторов

На рис. 8 представлено распределение пяти образов. Из распределения видно, что параметры у векторов имеют существенное различие, тем не менее сохранены статистические параметры образов «СВОЙ». Из этого можно сделать вывод, что получившиеся образы в результате синтеза по своим статистическим свойствам похожи на входные образы «СВОЙ».

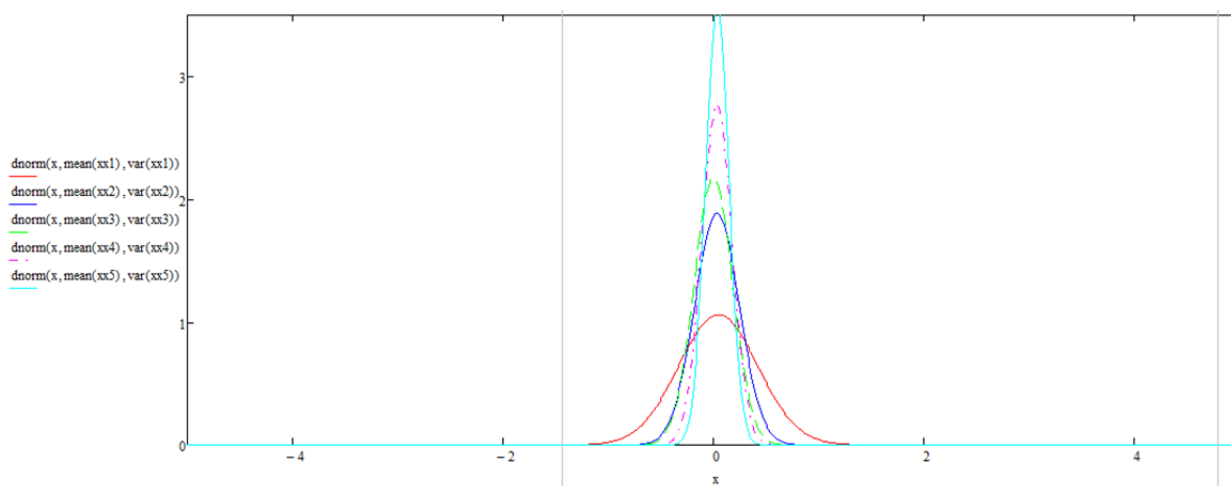


Рис. 8. Распределение пяти входных образов

Анализ и обобщение результатов применения полученных образов при оценке стойкости нейросетевых преобразователей биометрия-код

Полученные образы интегрируются в «.txt» файл, который в дальнейшем может быть использован сотрудниками лаборатории для проведения тестовых испытаний оценки стойкости нейросетевых преобразователей.

Полученный образ интегрируется в систему «БиоНейроАвтограф» для прохода на проверку результата тестирования и подсчета меры Хемминга. Пример тестового испытания представлен на рис. 9.

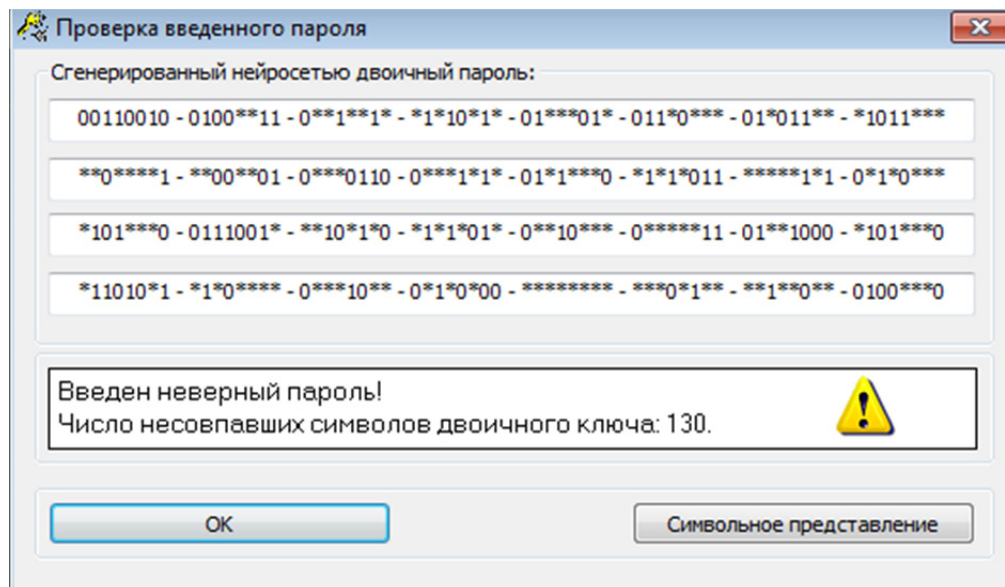


Рис. 9. Пример тестового испытания

Для получения образов в системе Mathcad пользователю достаточно ввести число выходных образов n .

После ввода количества образов необходимо нажать клавиши «ctrl + F9». Спустя определенное количество времени произойдет вывод тестовых образов в файл «Выходные_образы.dat», находящийся в той же папке, где находится сам файл программы. Также в конце файла можно посмотреть распределение получившихся образов.

Заключение

Разработанная модель на основе входных образов синтезирует случайные рукописные биометрические образы, статистические характеристики которых повторяют статистические характеристики входных образов. Синтезируется любое количество образов в зависимости от запроса пользователя.

Произведена проверка получившихся образов, сравнение их с исходными образами. Тестовые биометрические образы в дальнейшем могут быть использованы для оценки стойкости нейросетевых преобразователей биометрия-код.

Библиографический список

1. Руководство по биометрии / Р. М. Болл, Дж. Х. Коннен, Ш. Панканти, Н. К. Ратха, Э. У. Сеньор. – М. : Техносфера, 2007. – 368 с.
2. Глотов, Н. В. Биометрия / Н. В. Глотов, Л. А. Животовский, Н. В. Хованов, Н. Н. Хромов-Борисов. – Л. : ЛГУ, 1982. – 236 с.
3. Лукин, В. С. Обзор основных параметров и методов оценки стойкости нейросетевых биометрических преобразователей / В. С. Лукин, А. К. Гришко, Н. В. Горячев // Современные информационные технологии. – 2015. – Вып. 22. – С. 33–37.
4. Иванов, А. И. Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции : моногр. / А. И. Иванов. – Пенза : Изд-во АО «ПНИЭИ», 2016. – 133 с.
5. Малыгин, А. Ю. Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / А. Ю. Малыгин, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 161 с.
6. Гришко, А. К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-4.
7. ГОСТ Р 52633.0–2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. – М. : Стандартинформ, 2007. – 19 с.

8. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
9. Зудов, А. Б. Интерфейсы на естественном языке как связь нейронных сетей с экспертными системами / А. Б. Зудов, А. К. Гришко // В мире научных открытий. – 2010. – № 5-1. – С. 119–122.
10. Гришко, А. К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 51–57.
11. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
12. Гришко, А. К. Анализ надежности сложной системы на основе динамики вероятности отказов подсистем и девиации параметров / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6 (34). – С. 116–121.
13. Лукин, В. С. Помехоустойчивое кодирование информации в системах хранения и восстановления данных / В. С. Лукин, А. П. Иванов, М. В. Бойцова // МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ 21 ВЕКА : сб. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2015. – С. 38–44.
14. Гришко, А. К. Алгоритм оптимального управления в сложных технических системах с учетом ограничений / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1 (21). – С. 117–123.
15. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.
16. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostillov, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine. – 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
17. Grishko, A. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict / A. Grishko // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, Russia, 2016. – Vol. 2. – P. 107–111. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806423.

Гришко Алексей Константинович

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

Лукин Виталий Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Kipra@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

Аннотация. Актуальность и цели. Современное общество предполагает активное использование интернет-ресурсов. Существующая практика парольной защиты доступа к личным кабинетам обладает существенной уязвимостью. Для усиления защиты

Grishko Aleksey Konstantinovich

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

Lukin Vitaliy Sergeevich

postgraduate 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)

Abstract. Background. Modern society assumes active use of Internet resources. The current practice of password protecting access to personal offices has a significant vulnerability. To strengthen the protection of access to electronic resources of state agencies and offices

доступа к электронным ресурсам госструктур и личным кабинетам пользователей необходимы технологии биометрической аутентификации личности путем преобразования личных биометрических данных человека в его криптографический ключ или длинный пароль доступа. Для реализации поставленной цели используются специальные преобразователи на основе нейронных сетей. В этом случае информационная безопасность напрямую зависит от стойкости нейросетевых преобразователей и генерации для процедуры ее оценки тестовых биометрических образов. Целью является разработка тестовых биометрических рукописных образов для оценки стойкости нейросетевых преобразователей биометрия-код с помощью программы. *Материалы и методы.* В статье использованы методы имитационного моделирования и теория нейронных сетей. Используются среда моделирования Mathcad и среда БиоНейроАвтограф. *Результаты.* Синтезирована модель тестовых биометрических рукописных образов. Произведено сравнение статистических данных полученных образов с исходными. Модель протестирована в среде БиоНейроАвтограф. *Выводы.* С помощью данной модели можно производить оценку стойкости нейросетевых преобразователей биометрия-код. Модель позволяет пользоваться ограниченной исходной информацией и существенно сократить время на создание образов. Это приведет к уменьшению временных, физических и экономических затрат на оценку стойкости нейросетевых преобразователей.

Ключевые слова: нейронная сеть, биометрия, биометрический образ, стойкость, модель.

to personal users the necessary technology for biometric authentication of the individual by the transformation of personal biometric data of a person in his cryptographic key or a long password. To achieve this goal using special converters based on neural networks. In this case, information security depends on the strength of the neural network converters and generating the procedure of its evaluation test of biometric images. The purpose is to develop biometric handwritten test images for evaluating the resistance of neural network converters biometrics code when using the program. *Materials and methods.* The article uses methods of simulation and theory of neural networks. Used simulation environment and the Mathcad environment Bioneurological. *Results.* The synthesized model test biometric handwritten images. A comparison of statistics obtained from the source images. The model is tested in the environment of Bioneurological. *Conclusions.* Using this model it is possible to assess the resistance of neural network converters biometrics code. The model allows to use a limited source of information and significantly reduce the time to create images. This will lead to amnesia temporary, physical and economic costs of the assessment of persistence of neural network converters.

Key words: neural network, biometrics, biometric image, durability, model.

УДК 004.056; 51-76

Гришко, А. К.

Синтез тестовых образов для оценки стойкости нейросетевых преобразователей в системах биометрической идентификации / А. К. Гришко, В. С. Лукин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 32–40. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-5.

RADAR REMOTE-SENSING INSTRUMENTS OF THE EARTH

K. Moldamurat, D. S. Yergaliyev, A. Moldamurat, Sh. Tulkibay

Introduction

Radar remote-sensing instruments of the earth one of the directions of development of domestic space-rocket branch is remote sensing of Earth. Considering potential opportunities of the Republic of Kazakhstan, it is possible to mark that certain success in this direction was in recent years achieved. In Kazakhstan there is a row of the programs directed to mastering of the space sphere. The plant on production of small spacecraft's is built. It will allow to launch into Earth orbit own satellites of different function in the near future. One of assignments of these satellites is remote sensing of the Earth's surface [1].

The main scopes of satellite remote sensing – obtaining information on state of environment and land-use, a study of vegetable communities, an assessment of a harvest of crops, an assessment of consequences of natural disasters: floods, earthquakes, eruptions of volcanoes, wildfires. Remote-sensing instruments are effective in case of a study of pollution of the soil and reservoirs, ices on the land and on water, in oceanology. These means allow to receive data on an atmosphere status, including on a global scale [2].

This sounding arrives in the form of images, as a rule, in the digital form, processing is carried on a computer therefore the perspective of remote sensing is tightly connected to digital image processing. The central problem of the modern environmental monitoring is obtaining the objective information about the environment. Such information is given by artificial Earth satellites [3].

Reliability of the information which is contained in satellite images in many respects is defined by quality of the pictures received from Space. In turn quality of the pictures received from Space depends on many reasons. Very important point is the method of photography of the Earth's surface. There are two main methods of receiving pictures from Space. It is an electron-optical method and a radar method [4].

Each of these methods has the advantages and shortcomings. Of course there is a row of problems which need to be solved. Radar methods don't allow to receive pictures in color. Therefore the question of enhancement of radar methods of sounding in respect of improvement of quality of original pictures of the Earth's surface is very important [5].

In article basic reasons of deterioration and reliability of pictures of the Earth's surface were probed by us. A special role is played at the same time by the processes of electrization of a surface of KA causing electric discharges on the surface of units and cable systems. Electrostatic discharges (ESR) arising owing to gymnastics of KA are sources of electromagnetic interferences (EMP). These EMP influence separate elements and devices and onboard systems in general [6].

Main problems of remote sensing of Earth

The main problem restricting technical characteristics of locators is the low power of the accepted signal. At the same time the power of the accepted signal decreases as the fourth level of range, that is to increase range of action of a locator by 10 times it is necessary to increase transmitter power by 10000 times! Naturally on this way quickly came to limits which weren't simple to be overcome. Already at the very beginning of development the fact that not the power of the accepted signal, and its visibility against the background of receiver noises matters was conscious. Lowering of receiver noises was also restricted to natural noise of elements of the receiver, for example thermal. Danny Deadlock was overcome on the way of complication of methods of processing of the accepted signal and the complication of the form of the applied signals connected to it. Broad application of satellite radar data began in 1991 with start of the ERS-1 satellite (European Space Agency) with the radar onboard. The original purpose of start of this

first civil satellite radar was defined quite narrowly and was restricted to the decision of sea tasks (monitoring of an ice situation, icebergs, navigation, currents, oil slicks, etc.). However after passing by the satellite of the first ten full strokes of repetition of an orbit it was clarified that this radar has a high potential and for execution of different tasks on the land [7].

Monitoring of offsets of the land surface by results of differential interferometric processing became one more important practical application of satellite radars. If to consider that the ERS-2 satellite is in an orbit and executes shooting still, it is clear that on the considerable part of the globe there are multipass interferometric chains of pictures from 1991 for 2010 so, for example, many European cities were removed every month since 1995 (and since 1991 – till 5–10 once a year). I.e., are available 100-or now 200-flow chains of radar pictures which in case of sufficient coherence can be processed by all possible differential interferometric techniques, with receiving on an output of cards of offsets of the land surface and deformations of buildings and constructions for the period to 20 years [8].

Differences of radar systems from other types of sounding. Shortcomings and advantages

The main distinctive features of radar satellites of new generation is their spatial resolution (to 1 m), a possibility of shooting with different polarization and the subsequent interferometric processing for receiving high-precision TsMR and detection of adjustments of the land surface with the highest accuracy, independence of shooting of cloudiness.

To shortcomings of a radar method to belong receiving the image in the form of a black-and-white picture [9].

The vast majority of operating systems of remote sensing of Earth – system of optical-electronic observation. However, the leading spacefaring nations plan in the next years to enter into composition of national space groups the satellites equipped with RSA. Radar-tracking systems of observation in comparison with optical means have a row of advantages:

- independence of weather conditions and time of day,
- a combination of broad band of the review at big ranges and high resolution capability,
- the multilimitation and flexibility of control of operation of RSA allowing to change quickly situation and the sizes of a zone of the review, resolution capability and data representation forms
- high efficiency of data acquisition regardless of weather conditions and lighting,
- a possibility of observation of the objects hidden by vegetation and located in a near-surface layer of the earth or in a coastal zone of reservoirs (the buried pipelines, communication lines, electricity transmissions, etc.) (table 1).

Table 1

Scopes of microwave radio-frequency ranges

Field of application	Range
Air radar-tracking systems	Ka, K, Ku
Air space and radar-tracking systems	X, C, L
Space radar-tracking systems	S, P

Radar remote sensing of Earth is carried out with lengths of waves from 1 mm to 1 m and frequencies from 0,3 to 300 GHz corresponding to them.

For radiolocation use microwave radio-frequency ranges which parameters are specified in Shooting with radar-tracking systems significantly differs from shooting in systems in optical band as it is executed in case of the considerable deviation from a nadir. Forradardata the coordinate system of a picture looks as follows: an azimuth – the direction, parallel paths, and range – oblique distance from the radar to a surface. Values of angles of shooting change depending on type of the radar and the modes of shooting and can reach from 8 ° to 60 °. Such geometry of shooting causes a row of geometrical distortions in pictures (Fig. 1): distortion of oblique range (non-uniformity of permission of a picture on range), effect of a tuck, resuperimposing and radar shadows. Elimination of these effects is executed in case of orthotransformation of pictures on exact TsMR [10].

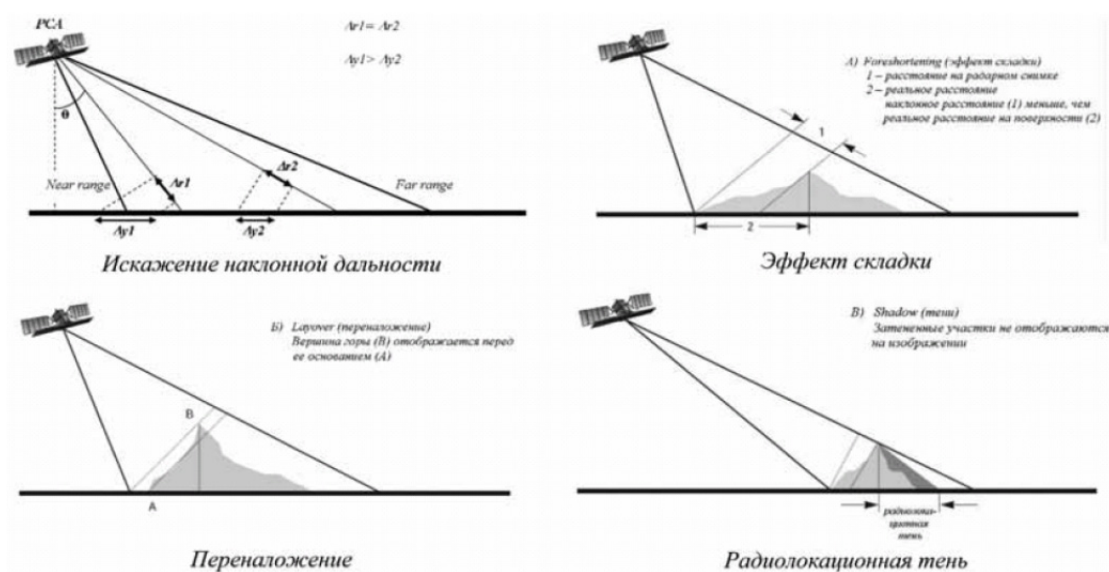


Fig. 1. The effects arising in radar pictures, caused by geometry of shooting and a land relief

Two images which are visually showing the considerable differences in shooting geometry between radar data and data in an optical zone of a range are given in a figure 2.

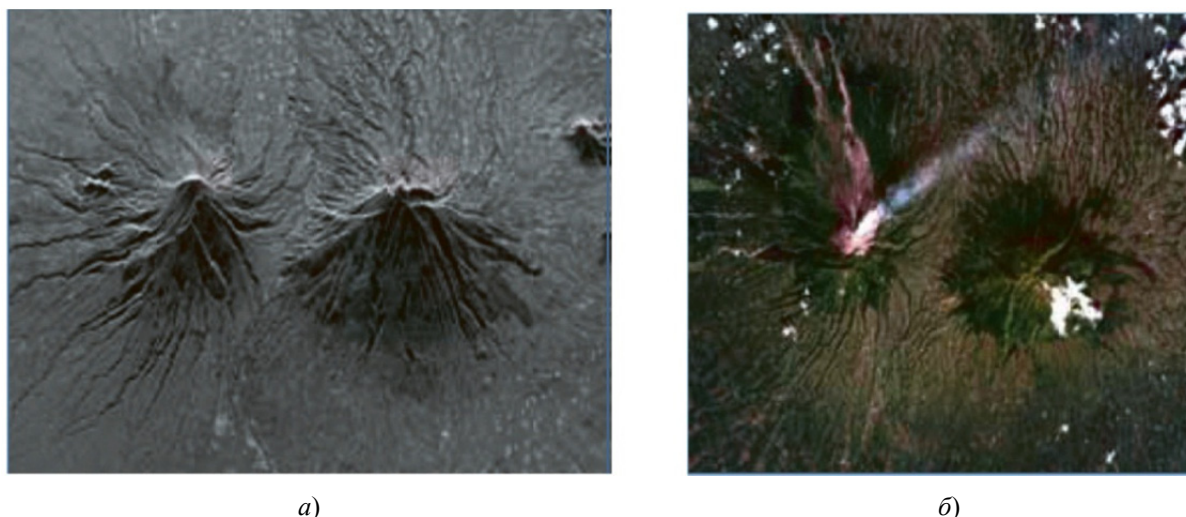


Fig. 2. Comparing of a radar picture and picture in an optical zone of a range:
 a – TerraSAR-X (the SCANSAR mode, spatial resolution is 16 m);
 b – Landsat-7 (combination of channels: 3-2-1, spatial resolution is 30 m)

Radar images have a row of radiometric features: in pictures even for a uniform surface the considerable variations of the brightness level between adjacent pixels are shown, creating a granular texture. It is a speckle noise which arises because resultant value of specific pixel turns out as a result of addition of the set of the values fixed by system in case of different provisions of the receiving antenna KA, moving on an orbit. In case of image acquisition the principle of RSA is used.

All modern space radar-tracking systems are RSA-systems, and at all radar images there is a speckle noise. Use of RSA-systems is caused by the fact that in case of the small sizes of real antennas of radar-tracking systems it is impossible to get high spatial resolution.

When using of the synthesized aperture when the small onboard antenna sequentially creates an antenna grid on rather big section of an orbit, it is possible to reach high spatial resolution. The speckle noise is a multiplicative distortion, i.e., the signal is stronger, the distortion is stronger. For elimination a speckle noise different types of filtering are used. Along with a speckle noise, at the image there are radiometric distortions caused by shooting geometry. As shooting is carried out under different angles for

different points of a picture, non-uniformity of brightness across the field of a picture appears: in case of a small angle – is brighter, than in case of a bigger angle of shooting [11–12].

Conclusion

This distortion is eliminated by introduction of different gain amounts of the antenna across the field of a picture. One more group of distortions is called by geometry of shooting and a relief of a surface: these are areas of shading and resuperimposing, they treat geometrical distortions, but also influence radiometry. Many of the modern radar-tracking DZZ satellite systems (ALOS PALSAR, TerraSAR, Radarsat 2, etc.) allow to receive images in case of different polarization of radiation. Polarization is defined by orientation of a vector of an electromagnetic induction, in case of interaction with an object polarization changes and bears in itself information on an object.

References

1. Kantemirov, Yu. I. The review of the modern radar data DZZ and techniques of their processing with use the PC SARscape / Yu. I. Kantemirov // *Geomatika Log.* – 2010. – № 3. – P 42–46.
2. Schowengerdt, R. A. Bases of remote sensing of Earth / R. A. Schowengerdt // *Remote sensing. Methods and models of image processing.* – New York : Academic Press, 2007. – P. 17–19.
3. Nikolsky, D. B. Comparative review of the modern radar-tracking systems / D. B. Nikolsky // *Geomatika Log.* – 2008. – № 1. – P. 11–17.
4. Egorov, V. V. Physical bases of remote sensing; Earth from space / V. V. Egorov, V. I. Tarnopolsky // *Materials of the international educational seminar of the UN on application: remote sensing.* – Baku : Elm Publishing house, 1977. – P. 21–37.
5. Balter, B. M. Methods and possibilities of remote sensing / B. M. Balter, V. V. Egorov // *Totals; science and technology; It is gray. Research of space; spaces.* – M. : VINITI, 1981. – T. 16. – P. 191s.
6. Physical bases, methods and means of researches of Earth from space / under. edition Ya. L. Ziman's // *Totals of science and technology. It is gray. Earth research from space.* – M. : VINITI, 1987. – T. 1. – P. 196s.
7. Ziman, Ya. L. About further development of methods of a research of Earth from space / Ya. L. Ziman // *Is-sled. Lands from space.* – 1980. – № 1. – P. 125–133.
8. Novel, N. Radar methods of sounding of the earth / N. Novel, X. Moldamurat // *Science and education – the student and young scientists of 2014 a name IX of the international scientific conference.* – Astana, 2014. – P. 3210 – 3213.
9. Razyapov, A. Z. Monitoring of atmospheric pollution of the urbanized territories (course of lectures) / A. Z. Razyapov, I. V. Kudrin, D. A. Shapovalov, A. M. Stepanov. – M. : МИСиС, 2001. – 54 p.
10. Perspective; domestic; satellite radars with the synthesized aperture / N. A. Armande, A. M. Volkov, A. I. Zakharov, I. S. Neumann; G. M. Chernyavsky, A. V. Shishanov, A. S. Shmalenok // *Radio engineering and electronics.* – 1999. – T. 44, № 4. – P. 442–447.
11. Шепель, В. И. Сравнительный анализ глобальных навигационных спутниковых систем / В. И. Шепель, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулегулов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество.* – 2012. – Т. 1. – С. 469–471.
12. Тулегулов, А. Д. The importance of researching the satellittes with the purpose of solving problems / А. Д. Тулегулов, Д. С. Ергалиев, А. Онгаркызы, К. С. Артыкбаев // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество.* – 2013. – Т. 1. – С. 135–138.

Молдамурат Хуралай

кандидат технических наук, доцент,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(010000, Казахстан, г. Астана, ул Сатпаева, 2)
E-mail: moldamurat@yandex.ru

Ергалиев Дастан Сырымович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой космической техники
и технологий,
Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(010000, Казахстан, г. Астана, ул Сатпаева, 2)
E-mail: DES-67@yandex.kz

Moldamurat Khuralay

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of space engineering and technology,
Eurasian National University
named after L. N. Gumilyov
(010000 2 Satpaeva street, Astana, Kazakhstan)

Ergaliev Dastan Syrymovich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of space engineering
and technology,
Eurasian National University
named after L. N. Gumilyov
(010000 2 Satpaeva street, Astana, Kazakhstan)

Молдамурат Акмарал

магистрант,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(010000, Казахстан, г. Астана, ул Сатпаева, 2)
E-mail: akonia.89@mail.ru

Тулкибай Шерхан

магистрант,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(010000, Казахстан, г. Астана, ул Сатпаева, 2)
E-mail: sherkhan-92@bk.ru

Аннотация. Показано, что одним из основных путей развития отечественной ракетно-космической отрасли является дистанционное зондирование Земли. Учитывая потенциальные возможности Республики Казахстан, можно отметить, что за последние годы были достигнуты определенные успехи в этом направлении. В Казахстане существует ряд программ, направленных на освоение космической сферы. Строится завод по производству малых космических аппаратов. Это позволит в ближайшем будущем запускать на околоземную орбиту собственные спутники различного назначения. Одним из назначений этих спутников является дистанционное зондирование поверхности Земли. Основные области применения спутникового дистанционного зондирования – получение информации о состоянии окружающей среды и землепользовании, изучение растительных сообществ, оценка урожая сельскохозяйственных культур, оценка последствий стихийных бедствий: наводнений, землетрясений, извержений вулканов, лесных пожаров. Средства дистанционного зондирования эффективны при изучении загрязнения почвы и водоемов, льдов на суше и на воде, в океанологии. Эти средства позволяют получать сведения о состоянии атмосферы, в том числе в глобальном масштабе.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, системы автоматического управления, спутниковое дистанционное зондирование, способ фотографирования поверхности Земли, электростатические разряды (ЭСР), дифференциальные интерферометрические методики.

Moldamurat Akmaral

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

Tulkibay Sherkhan

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

Abstract. The real operation of development of domestic space-rocket branch is remote sensing of Earth. Consider in potential opportunities of the Republic of Kazakhstan, it is possible to mark that certain success in this direction was in recent years achieved. In Kazakhstan there is a row of the programs directed to mastering of the space sphere. The plant on production of small spacecrafts is built. It will allow to launch into Earth orbit own satellites of different function in the near future. One of assignments of these satellites is remote sensing of the Earth's surface. The main scopes of satellite remote sensing – obtaining information on state of environment and land-use, a study of vegetable communities, an assessment of a harvest of crops, an assessment of consequences of natural disasters: floods, earthquakes, eruptions of volcanoes, wildfires. Remote-sensing instruments are effective in case of a study of pollution of the soil and reservoirs, ices on the land and on water, in oceanology. These means allow to receive data on an atmosphere status, including on a global scale.

Key words: remote sensing of Earth, system of automatic control, satellite remote sensing, method of photography of the Earth's surface, electrostatic discharges (ESR), differential interferometric techniques.

УДК 629.7.054.07

Moldamurat, K.

Radar remote-sensing instruments of the Earth / K. Moldamurat, D. S. Yergaliyev, A. Moldamurat, Sh. Tulkibay // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 41–45. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-6.

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ

В. Я. Горячев, С. В. Кисляков, Т. Ю. Бростилова

Введение

Проблема измерения параметров линейных и угловых перемещений, необходимость разработки новых физических принципов измерения механических величин всегда являлась актуальной. Для измерения механических моментов, развиваемых различного рода двигателями, существует ряд простых технических решений. Однако практически отсутствуют информационно-измерительные системы как статических механических моментов, так и механических моментов вращающихся валов. Рассмотренная ниже информационно-измерительная система отвечает этим требованиям. В основе системы лежит использование фазовращателей с бегущей электромагнитной волной и электромагнитной редукцией [1].

В фазовращателях с электромагнитной редукцией и бегущим магнитным полем используется неоднородность магнитопровода. Под неоднородностью понимается изменение удельной магнитной проводимости магнитопровода вдоль воздушного зазора. Использование распределенной удельной магнитной проводимости позволило разработать датчики для измерения малых угловых перемещений. Датчики малых угловых перемещений используются в ИИС механических моментов, в которой валы двигателя и приемника механической энергии связаны упругим элементом. Назначение упругого элемента заключается в преобразовании механического момента в угловое смещение одного вала относительно другого на угол, пропорциональный механическому моменту.

Информационно-измерительная система механических крутящих моментов

Блок-схема информационно-измерительной системы механического момента двигателя представлена на рис. 1.

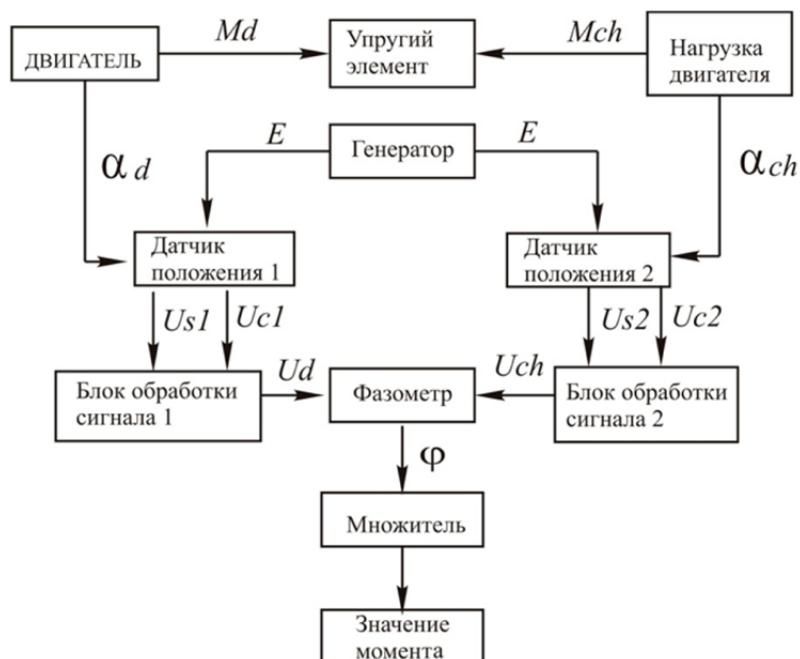


Рис. 1. Блок-схема ИИС механического момента двигателя

Двигатель соединен с нагрузкой динамометрической муфтой, допускающей смещение валов генератора и нагрузки на угол, пропорциональный механическому моменту, развиваемому

двигателем Md . Положение вала ротора двигателя в любой момент времени α_d определяется «Датчиком положения ротора 1». Положение вала нагрузки α_{ch} в любой момент времени определяется «Датчиком положения ротора 2». В качестве датчиков положения используется фазовращатель с бегущим магнитным полем с электромагнитной редукцией. Особенность датчика заключается в том, что вместе с блоком обработки информации они обеспечивают на выходе напряжение с частотой выше частоты питающего напряжения генератора в количество раз, равное коэффициенту редукции датчика. При этом фазовый сдвиг выходных напряжений блоков обработки информации 1 и 2 пропорционален углу взаимного смещения валов двигателя и нагрузки. Умножив фазовый сдвиг на коэффициент пропорциональности, информационно-измерительная система обеспечивает на своем выходе значение механического момента с определенной погрешностью.

Конструкция датчика положения

Конструкция магнитопровода редукционного датчика угловых перемещений (положения) представлена на рис. 2. Датчик состоит из статора 1, ротора 2, обмоток датчика 3. На рисунке представлена конструкция датчика с 12 зубцами на статоре и 13 зубцами на роторе. При повороте ротора на $1/12$ оборота начальная фаза выходного напряжения изменится на 2π радиан. Коэффициент редукции в этом случае будет равен 12.

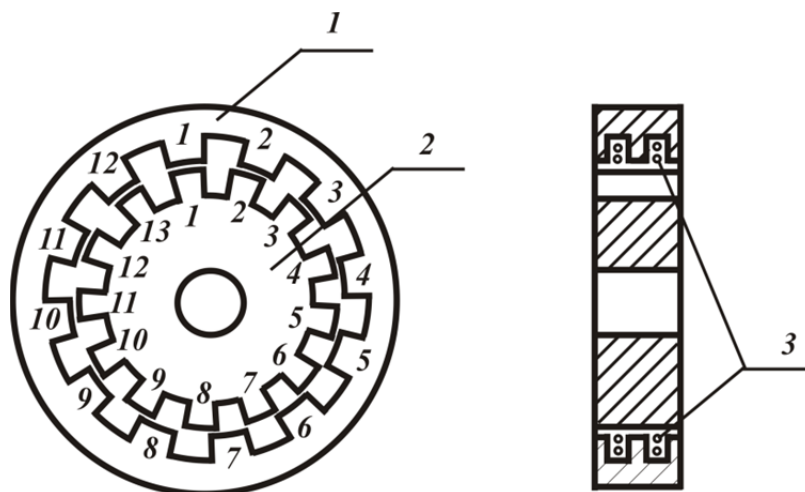


Рис. 2. Конструкция датчика с электромагнитной редукцией

В пазы статора укладываются три обмотки, количество витков которых распределены по воздушному зазору по синусному, косинусному и равномерному закону в функции пространственного угла. В случае работы датчика в однофазном режиме к генератору синусоидальных колебаний подключается равномерная обмотка. Выходные напряжения синусной и косинусной обмотки подаются на блок обработки сигналов, где фаза одного из напряжений поворачивается на 90° и суммируется с другим напряжением (см. рис. 1). В результате суммирования напряжений получается сигнал с неизменной амплитудой и с фазой, пропорциональной положению ротора в пространстве.

Число витков синусной обмотки зависит от порядкового номера зубца и определяется по формуле

$$W_{sk} = W_m \sin\left(\frac{360}{N}(k - 0,5)\right),$$

где W_{sk} – число витков синусной обмотки на k -ом зубце; W_m – максимальное количество витков; N – количество зубцов статора; k – порядковый номер зубца, изменяющийся от 1 до N .

Число витков косинусной обмотки изменяется по косинусному закону в зависимости от порядкового номера зубца и определяется по формуле

$$W_{ck} = W_m \cos\left(\frac{360}{N}(k - 0,5)\right),$$

где $k = 1; 2; \dots N$, W_{ck} – количество витков косинусной обмотки на k -м зубце.

Равномерно распределенная обмотка имеет одинаковое число активных проводников на всех зубцах магнитопровода информационной линейки равное W_r .

Электрические параметры датчиков положения и функция преобразования

Для определения электрических параметров фазовращателя и последующего получения функции преобразования предлагается заменить дискретное распределение удельной проводимости по воздушному зазору на линейное распределение. Предположение о непрерывном распределении витков синусной, косинусной и равномерной обмотки позволяет получить достаточно точное аналитическое выражение для определения полных собственных и взаимных индуктивностей обмоток датчика. Электромагнитная система фазовращателя с бегущим магнитным полем характеризуется четырьмя зонами, отличающимися удельными проводимостями:

$$Y_{m01} = \frac{\mu_0 h}{\frac{1}{\mu}(l_{cp} - l_{zs} - l_{zr} - \delta) + l_{zs} + l_{zr} + \delta}, \quad Y_{m02} = \frac{\mu_0 h}{\frac{1}{\mu}(l_{cp} - l_{zr} - \delta) + l_{zr} + \delta},$$

$$Y_{m03} = \frac{\mu_0 h}{\frac{1}{\mu}(l_{cp} - \delta) + \delta}, \quad Y_{m04} = \frac{\mu_0 h}{\frac{1}{\mu}(l_{cp} - l_{zs} - \delta) + l_{zs} + \delta}.$$

В приведенных формулах: $Y_{m01}, Y_{m02}, Y_{m03}, Y_{m04}$ – удельные магнитные проводимости зон магнитопровода фазовращателя, h – толщина магнитопровода, l_{cp}, l_{zs}, δ – длина средней магнитной линии, высота зубца и длина зазора магнитопровода соответственно.

Индуктивность синусной обмотки определится из уравнения

$$L_s = \frac{1}{4} \pi R W_m^2 (Y_{m01} + Y_{m02} + Y_{m03} + Y_{m04}),$$

где R – радиус средней линии воздушного зазора; W_m – максимальное число витков синусной обмотки.

Индуктивность косинусной обмотки определится выражением

$$L_c = \frac{1}{4} \pi R W_m^2 (Y_{m01} + Y_{m02} + Y_{m03} + Y_{m04}).$$

Таким образом, индуктивность косинусной обмотки не зависит от угла поворота ротора и является постоянной величиной.

Индуктивность равномерно-распределенной обмотки

$$L_r = \frac{\pi}{2} R W_r^2 (Y_{m01} + Y_{m02} + Y_{m03} + Y_{m04}),$$

где W_r – число витков равномерной обмотки.

Вид уравнения говорит о том, что индуктивность равномерной обмотки является постоянной величиной и не зависит от перемещения ротора датчика.

Особый интерес представляют уравнения для определения взаимных индуктивностей обмоток.

Взаимная индуктивность равномерной и синусной обмоток будет описываться выражением

$$M_{rs} = \frac{2}{\pi} W_r W_m \sin \beta (Y_{m01} + Y_{m02} + Y_{m03} + Y_{m04}),$$

где $\beta = n\alpha$ и α – пространственный угол, изменяющийся от 0° до 360° .

Взаимная индуктивность равномерной и косинусной обмоток определяется выражением

$$M_{rc} = \frac{2}{\pi} W_r W_m \cos \beta (Y_{m01} + Y_{m02} + Y_{m03} + Y_{m04}).$$

Взаимная индукция синусной и косинусной обмоток будет равна нулю:

$$M_{sc} = \frac{1}{2} W_m^2 (Y_{m01} + Y_{m02} + Y_{m03} + Y_{m04}) = 0.$$

Обобщенная система уравнений для вычисления токов приемников при наличии источников во всех ветвях схемы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{rr} \underline{I}_r + p \underline{M}_{rs} \underline{I}_s + p \underline{M}_{rc} \underline{I}_c = \underline{E}_r, \\ p \underline{M}_{rs} \underline{I}_r + \underline{Z}_{ss} \underline{I}_s + p \underline{M}_{sc} \underline{I}_c = \underline{E}_s, \\ p \underline{M}_{rc} \underline{I}_r + p \underline{M}_{sc} \underline{I}_s + \underline{Z}_{cc} \underline{I}_c = \underline{E}_c, \end{cases}$$

где $\underline{Z}_{rr}, \underline{Z}_{ss}, \underline{Z}_{cc}$ – полные сопротивления контуров цепей соответствующих обмоток; $\underline{M}_{rs}, \underline{M}_{rc}, \underline{M}_{sc}$ – взаимные индуктивности соответствующих обмоток; $\underline{I}_r, \underline{I}_s, \underline{I}_c$ – токи обмоток; $\underline{E}_s, \underline{E}_c, \underline{E}_r$ – электродвижущие силы источников контуров обмоток.

Если датчик работает в однофазном режиме ($\underline{E}_s, \underline{E}_c = 0$), то функция преобразования, определяющая зависимость фазы выходного тока от измеряемого перемещения, запишется в следующей неявной форме:

$$\underline{I}_d = \underline{E}_r \frac{p \underline{M}_{rsm}}{p^2 \underline{M}_{rsm}^2 - \underline{Z}_{rr} (\underline{Z}'_s + p \underline{L}_{sm})} e^{-j(n\alpha)},$$

где $\underline{I}_d$ – обобщенный выходной ток измерительной системы; $\underline{M}_{rsm}$ – максимальное значение взаимной индуктивности равномерной и синусной обмотки; $\underline{L}_{sm}$ – максимальное значение индуктивности синусной обмотки.

Если принять начальную фазу опорного напряжения равной нулю, то функция преобразования измерительной системы будет представлена простейшим уравнением $\varphi = n\alpha$, где φ – фазовый сдвиг выходного тока относительно опорного напряжения; n – коэффициент редукции датчика; α – измеряемое угловое перемещение.

Анализ амплитудной погрешности ИИС с датчиками положения, работающими в однофазном режиме

Погрешность информационно-измерительной системы механического момента на валу двигателя зависит от ряда влияющих факторов, среди которых конструктивные особенности датчика и параметры элементов, обеспечивающих функционирование датчиков, являются определяющими.

При однофазном питании датчика для получения напряжения, начальная фаза которого пропорциональна перемещению ротора, необходима дополнительная обработка выходных напряжений обмоток датчика. Фаза одного из напряжений, пропорциональных выходным токам, изменяется с помощью фазовращателя на 90° и суммируется с напряжением, пропорциональным второму выходному току.

Выходными величинами фазового датчика являются напряжения синусной и косинусной обмоток. В идеальном случае напряжения пропорциональны синусу и косинусу угла поворота ротора β .

Токи синусной и косинусной обмоток датчика, работающего в однофазном режиме, определяются уравнениями

$$\underline{I}_s = \underline{E}_r \frac{-j\omega W_r W_m \frac{2}{\pi} (Y_{m01} + Y_{m02} + Y_{m03} + Y_{m04}) \underline{Z}_{s\Sigma} \sin \beta}{\underline{Z}_{r\Sigma} + \underline{Z}_{s\Sigma} \left[2 + \omega^2 W_r^2 W_m^2 \frac{4}{\pi^2} (Y_{m01} + Y_{m02} + Y_{m03} + Y_{m04})^2 \right]}$$

$$\text{и } \underline{I}_c = \underline{E}_r \frac{-j\omega W_r W_m \frac{2}{\pi} (\underline{Y}_{m01} + \underline{Y}_{m02} + \underline{Y}_{m03} + \underline{Y}_{m04}) \underline{Z}_{s\Sigma} \cos \beta}{\underline{Z}_{r\Sigma} + \underline{Z}_{s\Sigma} \left[2 + \omega^2 W_r^2 W_m^2 \frac{4}{\pi^2} (\underline{Y}_{m01} + \underline{Y}_{m02} + \underline{Y}_{m03} + \underline{Y}_{m04})^2 \right]}.$$

В идеальном случае максимальные значения токов синусной и косинусной обмоток одинаковы. Реальные токи не равны между собой. Пусть отклонение имеет ток синусной обмотки. Тогда вектор выходного тока с учетом того, что ток косинусной обмотки повернут на 90° , будет выражен уравнением

$$\underline{I} = I \cos \varphi + j(I + \Delta I) \sin \varphi,$$

где ΔI – отклонение действующего значения тока синусной обмотки от тока косинусной.
Если

$$I e^{j(\varphi + \Delta \varphi)} = I \cos \varphi + jI \sin \varphi + j\Delta I \sin \varphi,$$

то

$$\begin{aligned} e^{j\Delta \varphi} &= \frac{I e^{j\varphi} + \Delta I e^{j90^\circ} \cdot \sin \varphi}{I e^{j\varphi}} = 1 + \frac{\Delta I}{I} \sin \varphi e^{j(90^\circ - \varphi)} = \\ &= 1 + \frac{\Delta I}{I} \sin \varphi \cos(90^\circ - \varphi) + j \frac{\Delta I}{I} \sin \varphi \sin(90^\circ - \varphi). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\Delta \varphi = \arctg \frac{\rho \sin \varphi \cos \varphi}{1 + \rho \sin^2 \varphi};$$

$$\tg \Delta \varphi = \frac{\rho \sin 2\varphi}{2 + \rho - \rho \cos 2\varphi}.$$

В полученных формулах $\rho = \frac{\Delta I}{I}$.

Для нахождения максимального отклонения определим производную от уравнения $\Delta \varphi(\varphi)$ и приравняем ее к нулю:

$$2\rho \cos 2\varphi (2 + \rho - \rho \cos 2\varphi) + \rho \sin 2\varphi \cdot 2\rho \sin 2\varphi = 0.$$

Уравнение может быть записано в следующем виде:

$$2\rho(2 + \rho) \cos 2\varphi - 2\rho^2 \cos 4\varphi = 0.$$

Угол φ , при котором отклонение будет иметь максимальное значение, определится из уравнения

$$\frac{\cos 4\varphi}{\cos 2\varphi} = 1 + \frac{2}{\rho}.$$

В реальных условиях $\rho \ll 0,05$, поэтому $\frac{2}{\rho} \gg 1$ или $\frac{\cos 4\varphi}{\cos 2\varphi} \approx \frac{2}{\rho}$, откуда

$$\cos 2\varphi = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \sqrt{\frac{1}{\rho^2} + 2} \right).$$

Следовательно, $\varphi = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{1}{2\rho} - \sqrt{\frac{1}{4\rho^2} + \frac{1}{2}} \right)$.

При малых значениях углов $\Delta\varphi_{\max} \approx \operatorname{tg} \Delta\varphi_{\max}$, и тогда $\Delta\varphi_{\max} = \frac{\rho}{2}$.

Следовательно, относительная погрешность неравенства максимальных значений выходных токов приводит к появлению абсолютного отклонения фазы выходного тока. Абсолютное отклонение угла равно половине относительного неравенства максимальных значений токов.

Анализ фазовой погрешности ИИС с датчиками положения, работающими в однофазном режиме

Если датчик положения с электромагнитной редукцией работает в режиме однофазного питания, операция поворота фазы одного из выходных напряжений на 90° производится непосредственно перед их сложением для получения выходного напряжения.

Ток синусной обмотки изменяется при повороте ротора по следующему закону в зависимости от β :

$$I_s = \underline{E}_r \frac{-j\omega W_r W_m \frac{2}{\pi} (\underline{Y}_{m01} + \underline{Y}_{m02} + \underline{Y}_{m03} + \underline{Y}_{m04}) \underline{Z}_{c\Sigma} \sin\beta}{\underline{Z}_{r\Sigma} + \underline{Z}_{s\Sigma} \left[2 + \omega^2 W_r^2 W_m^2 \frac{4}{\pi^2} (\underline{Y}_{m01} + \underline{Y}_{m02} + \underline{Y}_{m03} + \underline{Y}_{m04})^2 \right]}.$$

Ток косинусной обмотки изменяется по косинусному закону в зависимости от угла поворота ротора:

$$I_c = \underline{E}_r \frac{-j\omega W_r W_m \frac{2}{\pi} (\underline{Y}_{m01} + \underline{Y}_{m02} + \underline{Y}_{m03} + \underline{Y}_{m04}) \underline{Z}_{s\Sigma} \cos\beta}{\underline{Z}_{r\Sigma} + \underline{Z}_{s\Sigma} \left[2 + \omega^2 W_r^2 W_m^2 \frac{4}{\pi^2} (\underline{Y}_{m01} + \underline{Y}_{m02} + \underline{Y}_{m03} + \underline{Y}_{m04})^2 \right]}.$$

Выходной эквивалентный ток $\underline{I}_{\text{вых1}}$ в идеальном случае равен векторной сумме двух токов $\underline{I}_{\text{вых1}} = \underline{I}_c + \underline{I}_s e^{-j90^\circ}$.

Если фазовый сдвиг между токами установлен с абсолютной погрешностью σ , то выражение для определения выходного тока можно записать в следующем виде:

$$\underline{I}_{\text{вых1}} = \underline{I}_c e^{-j\alpha} + \underline{I}_s e^{-j90^\circ} e^{j\alpha},$$

где $\alpha = \frac{\sigma}{2}$.

Подставляя вместо $\underline{I}_s$ и $\underline{I}_c$ их значения, получим уравнение

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{вых1}} &= K_1 \underline{Z}_{s\Sigma} \cos\beta \cdot e^{-j\alpha} - jK_1 \underline{Z}_{c\Sigma} \sin\beta \cdot e^{j\alpha} = \\ &= K_1 (\underline{Z}_{s\Sigma} \cos\beta \cdot (\cos\alpha - j\sin\alpha) - j\underline{Z}_{c\Sigma} \sin\beta \cdot (\cos\alpha + j\sin\alpha)), \end{aligned}$$

где коэффициент

$$K_1 = \underline{E}_r \frac{-j\omega W_r W_m \frac{2}{\pi} (\underline{Y}_{m01} + \underline{Y}_{m02} + \underline{Y}_{m03} + \underline{Y}_{m04})}{\underline{Z}_{r\Sigma} + \underline{Z}_{s\Sigma} \left[2 + \omega^2 W_r^2 W_m^2 \frac{4}{\pi^2} (\underline{Y}_{m01} + \underline{Y}_{m02} + \underline{Y}_{m03} + \underline{Y}_{m04})^2 \right]}.$$

После некоторых преобразований получим

$$\underline{I}_{\text{вых1}} = K_1 \cos\alpha (\underline{Z}_{s\Sigma} \cos\beta - j\underline{Z}_{c\Sigma} \sin\beta) K_2,$$

где коэффициент равен $K_2 = 1 + j \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\underline{Z}_{c\Sigma} \sin\beta - j\underline{Z}_{s\Sigma} \cos\beta}{\underline{Z}_{s\Sigma} \cos\beta - j\underline{Z}_{c\Sigma} \sin\beta}$.

После несложных преобразований, проведенных над коэффициентом K_2 , получим следующее уравнение:

$$K_2 = 1 - j \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\underline{Z}_{s\Sigma} \cos \beta + j \underline{Z}_{c\Sigma} \sin \beta}{\underline{Z}_{s\Sigma} \cos \beta - j \underline{Z}_{c\Sigma} \sin \beta}.$$

В этом уравнении числитель дроби является числом, сопряженным со знаменателем дроби. Обозначим $\underline{P} = P e^{j\varphi_1}$.

Модуль этого числа

$$P = \sqrt{\underline{Z}_{s\Sigma}^2 \cos^2 \beta + \underline{Z}_{c\Sigma}^2 \sin^2 \beta},$$

а аргумент

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\underline{Z}_{c\Sigma} \sin \beta}{\underline{Z}_{s\Sigma} \cos \beta}.$$

Тогда $\underline{K}_2 = 1 - j e^{j \cdot 2\varphi_1} \operatorname{tg} \alpha$. Отклонение фазы выходного тока от линейного закона определяется аргументом $\underline{K}_2$:

$$\underline{K}_2 = 1 - j \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(2\varphi_1) + \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin(2\varphi_1).$$

Ошибку отображения фазы выходного тока, обусловленную неполной ортогональностью двух напряжений на входе сумматора, можно вычислить с помощью уравнения

$$\Delta\varphi = \operatorname{arctg} \frac{-\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(2\varphi_1)}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin(2\varphi_1)}.$$

При малых значениях α вторым слагаемым в знаменателе можно пренебречь. В этом случае $\Delta\varphi = \operatorname{arctg}(-\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(2\varphi_1))$.

Максимальное отклонение фазы будет иметь место при

$$\cos(2\varphi_1) = \pm 1, \Delta\varphi_{\max} = \alpha.$$

Влияние дискретности распределения количества витков на погрешность отображения фазы

Количество витков секций обмоток датчика с электромагнитной редукцией является целым числом. Однако расчетное количество витков секций чаще всего получается дробным. Если равномерная обмотка может иметь произвольное количество витков, то соотношение числа витков синусной и косинусной обмоток на каждом участке поверхности ротора должно подчиняться соответствующим законам распределения:

$$W_{sk} = W_m \sin\left(\frac{2\pi}{n}(k-0,5)\right) \text{ и } W_{ck} = W_m \cos\left(\frac{2\pi}{n}(k-0,5)\right), \quad k=1, 2, 3, \dots, n,$$

где W_{sk} – количество витков синусной обмотки на k -м участке поверхности ротора; W_{ck} – количество витков косинусной обмотки на k -м участке поверхности ротора; W_m – максимальное расчетное количество витков; n – количество зубцов статора; k – номер зубца.

В общем случае и максимальное количество витков W_m и значения синуса, косинуса не являются целыми числами. С другой стороны, количество витков не может быть дробным числом. Округление расчетного числа витков для получения целого значения приводит к появлению погрешности округления.

В настоящем разделе рассматривается влияние округления расчетного количества витков на результирующее значение намагничивающей силы зубца и погрешность датчика.

Количество витков каждой секции и каждого зубца синусной и косинусной обмоток определяется уравнениями

$$W_s = W_m \sin \alpha_1 \text{ и } W_c = W_m \cos \alpha_1,$$

где α_1 – угол, определяющий положение оси зубца на поверхности ротора. Расчетное количество витков всегда число дробное, поэтому реальное количество витков получают путем округления расчетного значения до ближайшего целого числа:

$$W_s = W_m \sin \alpha_1 + \Delta W_s, \quad W_c = W_m \cos \alpha_1 + \Delta W_c.$$

Дополнения ΔW_s и ΔW_c могут иметь и отрицательные значения, но значения их модулей всегда меньше единицы.

По синусной и косинусной обмоткам протекают токи, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону. Они сдвинуты по фазе на 90° . В комплексной форме они могут быть записаны следующим образом:

$$\underline{I}_s = I e^{j90^\circ} \text{ и } \underline{I}_c = I e^{j0^\circ}.$$

Вектор результирующей намагничивающей силы определится векторной суммой

$$\begin{aligned} \underline{I} \cdot \underline{W} &= I e^{j90^\circ} W_m \sin \alpha_1 + I e^{j90^\circ} \Delta W_s + I W_m \cos \alpha_1 + I \Delta W_c = I W_m \cos \alpha_1 + \\ &+ j I W_m \sin \alpha_1 + I \Delta W_c + j I \Delta W_s = I W_m e^{j\alpha_1} + I \sqrt{(\Delta W_c)^2 + (\Delta W_s)^2} e^{j\varphi}, \end{aligned}$$

где $\varphi = \arctg \frac{\Delta W_s}{\Delta W_c}$.

Таким образом, ошибка округления расчетного количества витков выражается в появлении дополнительного вектора, длина которого равна гипотенузе треугольника, образованного значениями округления витков синусной и косинусной обмоток. Аргумент дополнительного вектора φ определяется арктангенсом отношения ошибок округления. Вычислим прежде всего длину результирующего вектора намагничивающей силы:

$$IW = I W_m \pm I \sqrt{\Delta W_c^2 + \Delta W_s^2} = I W_m \left(1 \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta W_c}{W_m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta W_s}{W_m} \right)^2} \right).$$

Так как речь идет об округлении до целого числа, то ΔW_s и ΔW_c не могут быть больше 0,5, а при их равенстве

$$IW = I W_m \left(1 + \frac{0,5}{W_m} \sqrt{2} \right) = I W_m \left(1 \pm 0,707 \frac{1}{W_m} \right).$$

Таким образом, максимальная ошибка зависит только от выбора максимального количества витков и при отсутствии возможности машинного подбора количества витков обмоток, эту операцию можно осуществить по полученной формуле.

Аргумент результирующей намагничивающей силы при его несовпадении с расчетным идеализированным значением α_1 является прямым источником погрешности датчика:

$$(\alpha_1 + \Delta \varphi_m) = \arctg \frac{W_m \sin \alpha_1 + \Delta W_s}{W_m \cos \alpha_1 + \Delta W_c} = \arctg \left(\frac{\sin \alpha_1 + \frac{\Delta W_s}{W_m}}{\cos \alpha_1 + \frac{\Delta W_c}{W_m}} \right).$$

Практика расчетов количества витков показывает, что при количестве зубцов, кратных 4, ошибки округления можно анализировать только при углах α , меньших 45° , так как расчетные значения количества витков повторяются. Тогда $\cos \alpha_1$ всегда меньше $\sqrt{2}/2$. Относительная

ошибка округления $\frac{\Delta W_s}{W_m}$ или $\frac{\Delta W_c}{W_m}$ имеет реальные значения не более 0,02. Таким образом, вторым слагаемым в знаменателе можно пренебречь, и тогда

$$\alpha_1 + \Delta\varphi_m = \arctg\left(\frac{\sin \alpha_1}{\cos \alpha_1} + \frac{\Delta W_s}{W_m \cos \alpha_1}\right).$$

Можно допустить, что

$$\operatorname{tg}(\alpha_1 + \Delta\varphi_m) = \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{\Delta W_s}{W_m \cos \alpha_1}, \text{ или } \Delta\varphi_m = \frac{\Delta W_s}{W_m \cos \alpha_1}.$$

Максимальное значение α_1 , при котором $\cos \alpha_1$ будет иметь минимальное значение, $\alpha_1 = 45^\circ$:

$$\varphi_{\max} = \frac{\Delta W_s}{W_m \cos \alpha_1} = \frac{\Delta W_s}{W_m} \sqrt{2} = 0,707 \frac{\Delta W_s}{W_m},$$

$$\varphi_{\max} = 0,35 \frac{1}{W_m} \text{ (рад)}.$$

В практике проектирования датчиков анализ намагничивающих сил зубцов производится индивидуально, поэтому полученная формула может быть использована как ориентировочная. Последнее объясняется тем, что даже при числе зубцов на статоре, равном 36, анализ намагничивающих сил производится лишь для пяти или четырех зубцов, что не составляет особого труда. Однако при общем анализе погрешностей всего датчика полученная формула просто необходима.

Отклонение фазы намагничивающей силы от идеального значения на каждом участке индивидуально и изменяется по периодическому закону в зависимости от расстояния между началом отсчета и серединой рассматриваемого участка с периодом, равным четверти длины зубчатой поверхности.

Заключение

В заключение необходимо отметить, что отклонение количества витков от идеального значения приводит к отклонению амплитуды от идеального значения. Величина отклонения амплитуд изменяется по периодическому закону при перемещении шунта. Закон изменения отклонения амплитуды имеет высшие гармонические составляющие с периодами, кратными четверти длины зубчатой поверхности ротора. Округление расчетного количества витков приводит к фазовой погрешности, которая изменяется также по периодическому закону при перемещении шунта с периодом, равным четверти длины линейки. Наряду с основной гармонической составляющей кривая фазовых отклонений имеет вторую гармонику. Очевидно то, что для другого количества зубцов ротора кривая будет иметь другие гармонические составляющие, определяемые количеством зубцов на поверхности ротора.

Библиографический список

1. Осадчий, Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
2. Конюхов, Н. Е. Электромагнитные датчики механических величин / Н. Е. Конюхов, Ф. М. Медников, М. Л. Нечаевский. – М. : Машиностроение, 1987. – 256 с.
3. Горячев, В. Я. Фазовые датчики механических величин с бегущим магнитным полем : моногр. / В. Я. Горячев. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 308 с.
4. Горячев, В. Я. Анализ систематической погрешности информационно-измерительной системы на основе датчика биений с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, О. В. Гаврина, Ю. К. Чапчиков, Ю. А. Шатова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 46–57.
5. Горячев, В. Я. Редукционные датчики угловых перемещений с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, В. И. Волчихин, Ю. А. Шатова // Новые промышленные технологии. – 2007. – Вып. 2. – С. 45–50.

Горячев Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gorvlad1@yandex.ru

Кисляков Сергей Вячеславович

инженер,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sergey_kuz3ws@mail.ru

Бростилова Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tat-krupkina@yandex.ru

Аннотация. Доказана актуальность создания информационно-измерительных систем (ИИС) механических крутящих моментов, измерения параметров линейных и угловых перемещений в которых происходят на основе новых принципов. Дана конструкция датчика положения, определены параметры этих датчиков и их функции преобразования. Представлена блок-схема информационно-измерительной системы механических моментов на валу двигателя, отличающаяся тем, что измерение момента производится как в статическом режиме, так и при вращении вала с одинаковой погрешностью. Дана конструкция датчика и его электрические параметры. Определены источники погрешности измерительной системы, дан анализ амплитудной и фазовой погрешностей датчика положения, работающего в однофазном режиме. Установлено влияние дискретности распределения количества витков на погрешность отображения фазы – отклонение количества витков от идеального значения приводит к отклонению амплитуды от идеального значения. Показано, что закон изменения отклонения амплитуды имеет высшие гармоники с периодами, кратными четверти длины зубчатой поверхности ротора. Это дает возможность подбора параметров ИИС.

Ключевые слова: механический момент, датчик, фазовращатель, блок обработки сигнала.

Goryachev Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of power and electrical engineering,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kislyakov Sergey Vyacheslavovich

engineer,
sub-department of power and electrical engineering,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Brostilova Tat'yana Yur'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of power and electrical engineering,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. The urgency of creation of information-measuring systems (IIS) of mechanical torques is proved, measurements of parameters of linear and angular displacements in which occurs on the basis of new principles. The design of the position sensor is given, the parameters of these sensors and their conversion functions are defined. A block diagram of the information-measuring system of mechanical moments on the motor shaft is presented, differing in that the torque is measured both in the static mode and with the rotation of the shaft with the same error. The sensor design and its electrical parameters are given. The sources of the error of the measuring system are determined, and the amplitude and phase errors of the position sensor operating in the single-phase mode are analyzed. The influence of the discrete distribution of the number of turns on the error of the phase display is established – the deviation of the number of turns from the ideal value leads to a deviation of the amplitude from the ideal value. It is shown that the law of variation of the amplitude deviation has higher harmonics with periods that are multiples of a quarter of the length of the toothed surface of the rotor. This makes it possible to select the parameters of IIS.

Key words: mechanical moment, the sensor, the phase shifter, the signal-processing block.

УДК 621.314.25

Горячев, В. Я.

Анализ информационно-измерительной системы механических моментов / В. Я. Горячев, С. В. Кисляков, Т. Ю. Бростилова // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 46–55. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-7.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ, НЕ ДАВШИХ ОТКАЗЫ

В. С. Михайлов

В современном производстве высоконадежных, уникальных, сложных изделий стала обычной ситуация, в которой необходимо получить оценку вероятности безотказной работы (ВБР) на основе испытаний, не давших отказов. При этом обычно используют план испытаний типа NBT , где N – число испытываемых однотипных изделий; T – наработка (одинаковая для каждого изделия); B – характеристика плана, означающая, что работоспособность изделия после каждого отказа в течение срока испытаний восстанавливается [1]. При условии подчинения наработки до отказа экспоненциальному закону распределения с параметром T_0 (средняя наработка до отказа), расчетное значение ВБР (далее – $P_0(t)$) за заданное время (t) будет определяться равенством

$$P_0(t) = e^{\left(-\frac{t}{T_0}\right)}. \quad (1)$$

В качестве оценки ВБР за заданное время t (далее – $P(t)$) плана испытаний NBT можно выбрать несмещенную оценку [1], а именно:

$$P(t) = \left(1 - \frac{t}{NT}\right)^r, \text{ при } \frac{t}{NT} < 1; P(t) = 0, \text{ при } \frac{t}{NT} \geq 1, \quad (2)$$

где r – число отказов.

Для случая, когда $r = 0$, формула (2) дает результат равный единице. Такое событие называют достоверным. Однако этот результат противоречит здравому смыслу. Таким образом, формула (2) не позволяет оценивать ВБР по результатам испытаний, не давших отказы.

Естественно, что в качестве оценки ВБР следует рассматривать и оценки, получаемые из формулы (1), если в качестве параметра T_0 подставить его эффективную оценку, построенную на достаточно широком классе смещенных оценок. В этом случае для плана испытаний типа NBT в качестве оценки параметра T_0 (средней наработки до отказа) следует использовать эффективную оценку T_{01} из [2], построенную для экспоненциального распределения. Для безотказных испытаний оценку T_{01} можно применять и для плана типа NBT . Представим эту составную оценку T_{01} в виде

$$T_{01} = 2NT, \text{ при } r = 0 \text{ и } T_{01} = \frac{NT}{r+1}, \text{ при } r > 0.$$

Тогда предлагаемая оценка ВБР для плана испытаний типа NBT (далее – $R(t)$) после подстановки T_{01} в формулу (1) выразится в виде

$$R(t) = e^{(-t/2NT)}, \text{ при } r = 0 \text{ и } R(t) = e^{(-t(r+1)/2NT)}, \text{ при } r > 0. \quad (3)$$

Вполне естественным будет, если в качестве оценки параметра T_0 воспользоваться традиционной оценкой средней наработки до отказа, построенной для экспоненциального распределения [1, 2]:

$$T_{02} = \frac{NT}{r}, \text{ при } r > 0.$$

Доопределим оценку T_{02} для случая $r = 0$ величиной « $2NT$ », тогда оценка ВБР примет вид

$$F(t) = e^{(-t/2NT)}, \text{ при } r = 0 \text{ и } F(t) = e^{(-t \times r/2NT)}, \text{ при } r > 0. \quad (4)$$

Таким образом, все предлагаемые оценки, выражаемые формулами (2)–(4), могут быть сравнимы и в случае, когда $r = 0$.

В случае безотказных испытаний становится весьма соблазнительным использование оценок (3) и (4), так как эти оценки дают возможность характеризовать ВБР величиной отличной от нуля и единицы.

Целью статьи является нахождение инструмента, который позволит объективно судить (с точки зрения эффективности предложенных оценок) предложенные возможности оценивать ВБР величиной отличной от нуля и единицы по результатам испытаний, не давших отказы.

Заметим, что представленные формулами (2)–(4) оценки обладают свойством состоятельности, т.е. с ростом числа отказов эти оценки достаточно быстро (асимптотически) сходятся к $P_0(t)$. Поэтому при $r > 3$ эффективность оценок, представленных формулами (2)–(4), практически одинакова.

В качестве инструмента для нахождения эффективной оценки будем использовать интегральные характеристики [3]. Аналогично [3] построим функционал (далее – $A(f)$), в основе которого лежит суммарный квадрат отклонения ожидаемой реализации оценки ВБР ($f(t, NT, r): P(t, NT, r), R(t, NT, r), F(t, NT, r)$) для всех возможных значений T_0 , t и NT :

$$A(f) = \int_0^\infty \int \int \{Ef(t, z, r) - P_0(t, T_0)\}^2 \partial \Delta \partial z \partial t, \quad (5)$$

где $Ef(t, z, r)$ – математическое ожидание предложенной оценки. Переменная z принимает все возможные значения NT , через Δ обозначен пуассоновский поток отказов с параметром NT/T_0 [1], $T_0 = NT/\Delta$. Воспользовавшись свойствами пуассоновского потока с параметром Δ [1], найдем

$$Ef(t, z, r) = \sum_{k=0}^{\infty} f(t, z, k) e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!}. \quad (6)$$

Эффективная оценка ВБР из трех предложенных должна обладать минимальной величиной функционала $A(f)$.

Заметим, что в теории реализация несмещенной оценки ВБР $P(t, z, r)$ на функционале $A(P(t, z, r))$ дает величину равную нулю. Этот факт следует непосредственно после подстановки несмещенной оценки $P(t, z, r)$ в функционал.

Также заметим, что реализация оценок $R(t, NT, r)$ и $F(t, NT, r)$ на функционале $A(f)$ дает величину равную бесконечности.

Переопределим функционал $A(f)$ таким образом, чтобы его реализация после подстановок, предложенных оценок давала конечную величину. Для этого формулу (5) представим в виде

$$A(f) = \sum_{t=100}^{1E+05} \frac{1}{\text{КолШаг}(t)} \left\{ \sum_{z=1000}^{1E+16} \frac{1}{\text{КолШаг}(z)} \left(\int_0^{60} \{Ef(t, z, r) - P_0(t, T_0)\}^2 \partial \Delta \right) \right\}. \quad (7)$$

Первые два интеграла заменены на усредненные значения слагаемых величин, что гарантирует получение конечной величины реализации функционала. Количество шагов (КолШаг(t), КолШаг(z)) суммирования зависит от пределов и шага суммирования.

Следует заметить, что расчет $Ef(t, z, r)$ (см. формулу (6)) является чрезвычайно коварным и ограничен представлением вещественной переменной в вычислительной машине (числом зна-

ков после запятой). Это объясняется тем, что приходится умножать и делить числа, значительно превышающие $1E + 15$, $1E + 30$, $1E + 300$. Расчет проводился при следующих ограничениях:

- величина t варьировалась от 100 до 100 000 ч с шагом 1000;
- величина Δ варьировалась от 0 до 60 (исключаем числа значительно превышающие $1E + 15$) ч с переменным шагом;
- величина NT варьировалась от 1000 до $1E + 16$ ч с переменным шагом;
- максимальная величина индекса k ограничивалась условием $f(t, z, k)e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} < 1E - 12$;
- величины $t/NT > 0,99999999$ исключались из расчета для адекватного сравнения оценок (далее – с ограничением), так как это ограничение следует непосредственно из формулы (2).

Сами ограничения соответствовали жизненным ситуациям. О точности вычисления можно судить по реализации оценки $P(t, z, r)$ на функционале $A(f)$, которая всегда должна быть равной нулю. Изменение ограничений в сторону их увеличения приводит к изменению результата функционала, но не меняет сути вещей. Оценка точности вычисления внутреннего интеграла $\left(\int_0^{60} \{Ef(t, z, r) - P_0(t, T_0)\}^2 \partial \Delta \right)$ производилась по контрольному варианту с заранее известной величиной и соответствовала четвертому знаку после запятой.

Результаты расчета функционала $A(f)$ для различных оценок ($P(t, NT, r)$, $R(t, NT, r)$, $F(t, NT, r)$) сведены в табл. 1.

Таблица 1

Δ	$A(P(t))$ – с ограничением	$A(R(t))$ – с ограничением	$A(F(t))$ – с ограничением	$A(R(t))$	$A(F(t))$
$\Delta < 61$	7,8E-30	0,0066	0,0036	0,0440	0,0410
$1,1 < \Delta < 61$	7,7E-30	0,0034	0,0022	0,0049	0,0037
$0,9 < \Delta \leq 1,1$	6,7E-33	0,00033	8,8E-06	0,0013	0,0012
$\Delta \leq 0,9$	9,0E-32	0,0028	0,0014	0,0376	0,0362

Из табл. 1 следует, что самой эффективной оценкой ВБР является не смещенная оценка $P(t)$, для всех возможных значений параметров T_0 , t и NT – как и следовало ожидать. Из табл. 1 также следует, что для всех тех вариантов плана испытаний NBT , которые не позволяют воспользоваться оценкой $P(t)$ (из-за ограничения $t/NT > 0,99999999$), в качестве оценки ВБР следует пользоваться оценкой $F(t)$.

Когда для испытаний, не давших отказы, появляется необходимость характеризовать ВБР величиной отличной от нуля и единицы, то эффективной оценкой в этом случае служит построенная оценка $F(t)$.

Пример 1. По результатам безотказных испытаний 100 изделий в течение 1000 ч необходимо сделать оценку ВБР за $t = 1000$ ч и сравнить полученные результаты с теоритической оценкой для различных вариантов параметра T_0 : $T_0 = 1E + 4$, $T_0 = 1E + 5$, $T_0 = 1E + 6$, $T_0 = 1E + 7$, $T_0 = 1E + 8$, $T_0 = 1E + 9$. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

t/NT	$P(t)$	$F(t)$	$P_0(t, T_0)$, $T_0 = 1E + 4$	$P_0(t, T_0)$, $T_0 = 1E + 5$	$P_0(t, T_0)$, $T_0 = 1E + 6$	$P_0(t, T_0)$, $T_0 = 1E + 7$	$P_0(t, T_0)$, $T_0 = 1E + 8$	$P_0(t, T_0)$, $T_0 = 1E + 9$
0,01	1	0,995	0,9048	0,99005	0,999	0,9999	0,99999	0,999999

Пример 2. По результатам безотказных испытаний 10 изделий в течение 1000 ч необходимо сделать оценку ВБР за $t = 1000$ ч и сравнить полученные результаты с теоритической оценкой для

различных вариантов параметра T_0 : $T_0 = 1\text{E} + 4$, $T_0 = 1\text{E} + 5$, $T_0 = 1\text{E} + 6$, $T_0 = 1\text{E} + 7$, $T_0 = 1\text{E} + 8$, $T_0 = 1\text{E} + 9$. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 3

t/NT	$P(t)$	$F(t)$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 4$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 5$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 6$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 7$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 8$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 9$
0,1	1	0,9512	0,9048	0,99005	0,999	0,9999	0,99999	0,999999

Пример 3. По результатам безотказных испытаний двух изделий в течение 1000 ч необходимо сделать оценку ВБР за $t = 1000$ ч и сравнить полученные результаты с теоритической оценкой для различных вариантов параметра T_0 : $T_0 = 1\text{E} + 4$, $T_0 = 1\text{E} + 5$, $T_0 = 1\text{E} + 6$, $T_0 = 1\text{E} + 7$, $T_0 = 1\text{E} + 8$, $T_0 = 1\text{E} + 9$. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4

t/NT	$P(t)$	$F(t)$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 4$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 5$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 6$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 7$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 8$	$P_0(t, T_0),$ $T_0 = 1\text{E} + 9$
0,5	1	0,7788	0,9048	0,99005	0,999	0,9999	0,99999	0,999999

Из табл. 2–4 следует, что для высоконадежных современных изделий, которые были подвергнуты испытаниям, не давшим отказы, оценка ВБР – $P(t)$, равная единице, является предпочтительней $F(t)$, так как находится ближе к истинному значению, чем результат оценки $F(t)$.

Выводы

1. Для всех вариантов плана испытаний NBT , которые не позволяют воспользоваться оценкой $P(t)$ (из-за ограничения $t/NT > 0,99999999$), в качестве оценки ВБР следует пользоваться оценкой $F(t)$.

2. Когда для испытаний, не давших отказы, появляется необходимость характеризовать ВБР величиной отличной от нуля и единицы, то эффективной оценкой в этом случае служит построенная оценка $F(t)$. Однако для высоконадежных современных изделий, которые были подвергнуты испытаниям, не давшим отказы, оценка ВБР – $P(t)$, равная единице ($1 = 0,999...9...$), является предпочтительней $F(t)$, так как находится ближе к истинному значению, чем результат оценки $F(t)$.

Библиографический список

- Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
- ГОСТ Р 50779.26–2007. Статистические методы. Точечные оценки, доверительные, предикционные и толерантные интервалы для экспоненциального распределения.
- Михайлов, В. С. Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ / В. С. Михайлов // Надежность. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 40–42.

Михайлов Виктор Сергеевич

ведущий инженер,
Центральный научно-исследовательский институт
химии и механики им. Д. И. Менделеева
(115487, Россия, г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16а)
E-mail: Mvs1956@list.ru

Mikhaylov Viktor Sergeevich

lead engineer,
Central Research Institute of Chemistry and Mechanics
named after D. I. Mendeleev
(115487, 16a Nagatinskaya street, Moscow, Russia)

Аннотация. В современном производстве высоконадежных, уникальных, сложных изделий стала обычной ситуация, в которой необходимо получить оценку вероятности безотказной работы (ВБР) на основе испытаний, не давших отказов. При этом обычно используют план испытаний типа *NBT*, где N – число испытываемых однотипных изделий; T – наработка (одинаковая для каждого изделия); B – характеристика плана, означающая, что работоспособность изделия после каждого отказа в течение срока испытаний восстанавливается. При условии подчинения наработки до отказа экспоненциальному закону распределения с параметром T_0 (средняя наработка до отказа) расчетное значение ВБР за заданное время (t) будет определяться равенством $P_0(t, T_0) = \exp(-t/T_0)$. Целью статьи является нахождение инструмента, который позволит объективно судить (с точки зрения эффективности предложенных оценок) предложенные возможности оценивать ВБР величиной отличной от нуля и единицы по результатам испытаний, не давших отказы. **Методы.** Для нахождения эффективной оценки использовались интегральные характеристики, а именно: суммарный квадрат отклонения ожидаемой реализации некоторого варианта оценки от всевозможных значений $P_0(t, T_0)$ по различным потокам отказов совокупности испытываемых изделий. **Результаты и выводы.** 1. Для всех вариантов плана испытаний *NBT*, которые не позволяют воспользоваться оценкой $P(t)$ (из-за ограничения $t/NT > 0,99999999$), в качестве оценки ВБР следует пользоваться оценкой $F(t)$. 2. Когда для испытаний, не давших отказы, появляется необходимость характеризовать ВБР величиной отличной от нуля и единицы, то эффективной оценкой в этом случае служит построенная оценка $F(t)$. Однако для высоконадежных современных изделий, которые были подвергнуты испытаниям, не давшим отказы, оценка ВБР – $P(t)$, равная единице ($1 = 0,999...9...$), является предпочтительней $F(t)$, так как находится ближе к истинному значению, чем результат оценки $F(t)$.

Ключевые слова: средняя наработка до отказа, вероятность безотказной работы, экспоненциальное распределение, план испытаний, точечная оценка.

Abstract. In the modern production of highly reliable, unique, complex products, the usual situation in which it is necessary to obtain an estimate of the probability of failure-free operation (PFO) based on tests that did not give failures has become. In this case, a test plan of type *NBT* is usually used, where N is the number of subjects of the same type; T – operating time (the same for each product); B – the characteristic of the plan, meaning that the working capacity of the product after each failure during the test period is restored. If the operating time is obeyed to the exponential distribution law with the parameter T_0 (mean time to failure), the calculated value of the PFO for a given time (t) will be determined by the equality $P_0(t, T_0) = \exp(-t/T_0)$. The purpose of the article is to find a tool that will objectively judge (from the point of view of the effectiveness of the proposed evaluations) the proposed possibilities to estimate the PFO value different from zero and one by the results of tests that did not fail. **Methods.** To find an effective estimate, we used integral characteristics, namely, the total square of the deviation of the expected realization of a certain valuation variant from all possible values of $P_0(t, T_0)$ for different failure flows of the set of products tested. **Results and conclusions.** For all variants of the *NBT* test plan, which do not allow the use of the $P(t)$ estimate (due to the restriction $t/NT > 0.99999999$), an estimate of $F(t)$ should be used to estimate PFO. When it becomes necessary to characterize PFO by a value different from zero and one by the results of non-failure tests, then the estimate $F(t)$ in this case is an effective estimate. However, for highly reliable modern products that have been subjected to trouble-free testing, an PFO estimate of $P(t)$ equal to one ($1 = 0.999...9...$) is preferable to $F(t)$, because it is closer to the true value than the result of the estimate of $F(t)$.

Key words: mean operating time to failure, probability of failure-free operation, exponential distribution, test plan, point estimates.

УДК 621.382.029.6

Михайлов, В. С.

Оценка вероятности безотказной работы по результатам испытаний, не давших отказы / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 56–60. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-8.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СБОРКЕ

О. М. Батищева, В. А. Папшев, Г. А. Родимов

Введение

Анализ результатов исследований ультразвуковой сборки показывает, что при определенном сочетании параметров ультразвуковых колебаний можно повысить прочность соединений за счет образования мостиков схватывания между поверхностями в сопряжении аналогично тому, как при ультразвуковой сварке. Образующиеся в процессе контактного взаимодействия мостики схватывания существенно повышают функциональные параметры соединения, в частности прочность на сдвиг и на кручение. Общие закономерности, лежащие в основе ультразвуковой сварки и образования мостиков схватывания при ультразвуковой сборке, позволяют рационально использовать явления, сопровождающие эти процессы [1–4].

Анализ факторов, способствующих повышению прочности

Рассматривая механизм образования сварного соединения в твердой фазе, отметим, что поверхность любого, даже тщательно отполированного, твердого тела всегда имеет волнистость и шероховатость. При сближении таких поверхностей их начальное соприкосновение происходит лишь отдельными точками, расположенными на гребнях волнистостей. Контакт поэтому имеет дискретный характер. Обычно различают:

- номинальную площадь соприкосновения, очерченную внешними границами соприкасающихся поверхностей;
- контурную площадь соприкосновения, представляющую собой сумму площадок, расположенных на гребнях волнистостей; по контурной площади происходит объемное смятие при нагружении контактирующих поверхностей, и контакт имеет смешанный упругопластический характер;
- фактическую площадь контакта, представляющую собой совокупность элементарных площадок касания, вошедших во взаимодействие микровыступов.

Несмотря на то, что число одновременно контактирующих микровыступов может быть весьма значительным, суммарная фактическая площадь касания сопряженных поверхностей во много раз меньше номинальной поверхности контакта. Если на ней возникнут силы взаимодействия между сопряженными телами, т.е. если появятся первые очаги схватывания поверхностей и даже если локальная прочность этих очагов будет весьма высокой, то прочность такого соединения в целом окажется намного меньшей, чем прочность исходного материала деталей. Поэтому единичное схватывание следует рассматривать как элементарный процесс, лежащий в основе образования сварного соединения, но последнее можно получить лишь при условии распространения единичных схватываний на всю номинальную поверхность или на большую ее часть [3].

Можно рассматривать процесс образования сварного соединения в твердой фазе как процесс, состоящий из двух стадий, протекающих последовательно во времени:

А. Образование и развитие физического контакта между поверхностями. Когда в результате смятия микровыступов и шероховатостей число мостиков схватывания между поверхностями возрастает, суммарная площадь физического контакта увеличивается, стремясь к своему пределу – номинальной площади;

В. Возникновение между сближенными поверхностями прочных связей, имеющих химическую природу.

Стадии **А** – преимущественному образованию физического контакта свойственно лишь максимальное сближение поверхностей и очищение их от окисных и адсорбированных пленок.

Стадии **В** – свойственно преимущественно образование химических связей, обуславливающих прочность соединения.

В обеих стадиях процесса главную роль играет пластическое деформирование металла, его ползучесть под действием приложенной извне нагрузки и в условиях существующих температур: благодаря ползучести в стадии *A* происходит сближение поверхностей и увеличение площади физического контакта; благодаря ползучести и микродеформированию приповерхностных слоев металла в стадии *B* провоцируется химическая активация металла, выход на поверхность дислокаций и образование на ней активных узлов (мостиков схватывания). Многие авторы отмечают, что разграничение стадий особенно ярко выражено при соединении разноименных материалов, в то время как при соединении одноименных материалов стадии физической подготовки контакта и химической активации соединяемых поверхностей обычно совпадают во времени [3].

Анализ физических особенностей ультразвуковой сборки позволяет говорить о том, что этот процесс обеспечивает выполнение трех условий осуществления сварки в твердой фазе двух тел:

- обязательная очистка сопрягаемых поверхностей от адсорбированных веществ и окисных пленок и обеспечение контакта между чистыми поверхностями;
- максимальное увеличение площади фактического контакта сопряженных поверхностей (в пределе до величины номинального контакта);
- обеспечение пластического течения металла в контакте.

Так, в результате активного ультразвукового воздействия при относительном перемещении деталей в процессе сборки происходит очистка поверхностей от адсорбированных веществ и окисных пленок, создаются условия для контакта ювенильных поверхностей. Увеличение фактической площади контакта и температуры, а также снижение сопротивления пластической деформации создают предпосылки для образования мостиков схватывания [5, 6]. Прочность соединений значительно повышается, когда при достижении втулкой требуемой координаты взаимного положения относительно вала подаются продольные ультразвуковые колебания на обе детали с суммарной амплитудой, достаточной для образования мостиков схватывания в твердой фазе трением поверхностей друг о друга [1]. Отметим, что механизм образования мостиков схватывания в условиях ультразвукового воздействия недостаточно изучен и требует дальнейшего детального изучения. Вместе с тем для реализации предложенного способа с достаточной для практики точностью параметры ультразвуковых колебаний могут быть определены из следующих соображений.

Известно, что мощность тепловыделения при трении определяется зависимостью

$$N = PV, \quad (1)$$

где P – сила, действующая в контакте:

$$P = \mu \pi P_0 dl. \quad (2)$$

Здесь μ – коэффициент трения; l, d – длина и посадочный диаметр втулки, мм; P_0 – удельное давление в контакте, МПа; V – скорость относительного перемещения поверхностей под воздействием ультразвука, м/с:

$$V = 2\pi f \xi. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1) и определяя удельную мощность тепловыделения при трении на единицу контактирующей поверхности $F = \pi dl$, получим

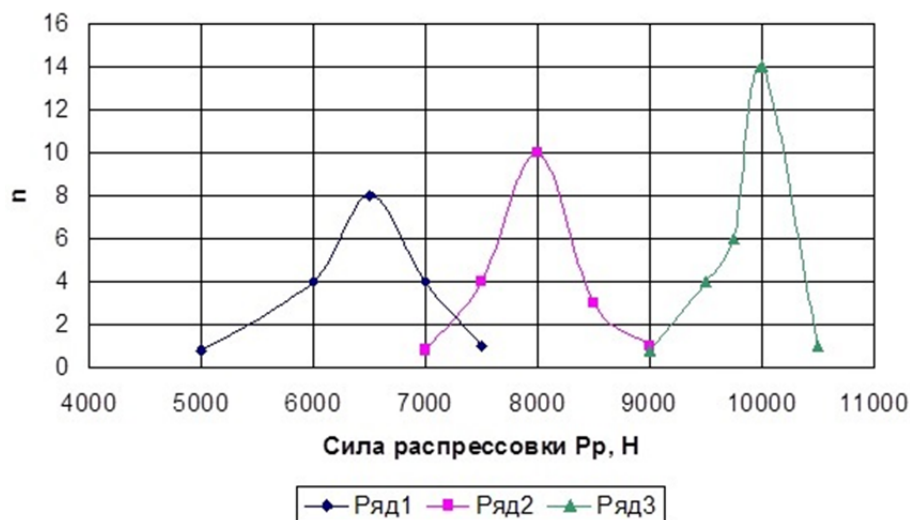
$$[N]_{yd} = 2\pi \mu P_0 f \xi. \quad (4)$$

Отсюда суммарная амплитуда, достаточная для образования мостиков схватывания в твердой фазе трением поверхностей:

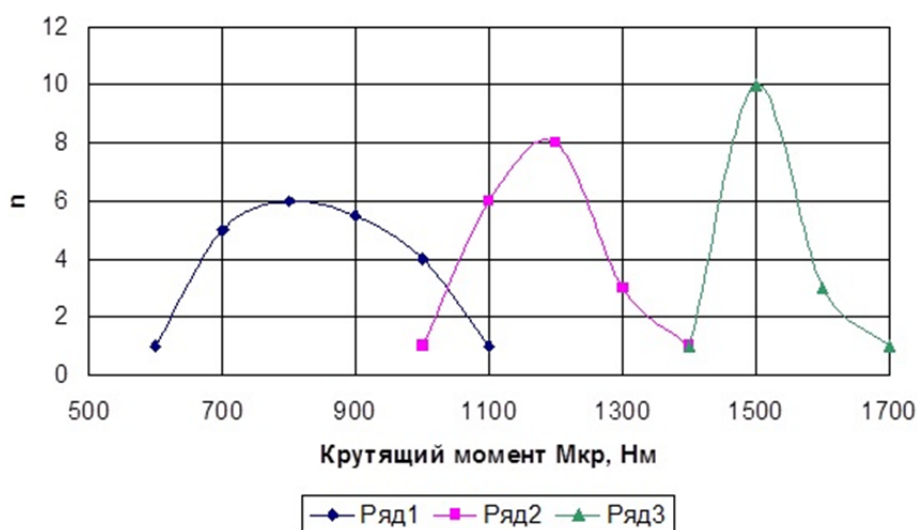
$$\xi = \frac{[N]_{yd}}{2\pi \mu_{yz} P_0 f}, \quad (5)$$

где μ_{yz} – коэффициент трения между поверхностями деталей при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями. Для исследуемых фрикционных пар μ_{yz} выбирался индивидуально; $[N]_{yd}$ – необходимая для образования мостиков схватывания удельная мощность тепловыделения. Выбирается для различных пар материалов индивидуально.

На рис. 1 приведены данные распределения прочности соединений на сдвиг и кручение, собранных с различными натягами и амплитудами ультразвуковых колебаний, рассчитанными по зависимости (5). Проведенный анализ данных показывает, что P_p соединений с натягами $\delta = 0,005$ мм и $0,02$ мм отличается между собой не столь значительно, как при сборке без дополнительного воздействия.



а)



б)

Рис. 1. Распределение прочности на сдвиг (а) и кручение (б) в зависимости от натяга и амплитуды УЗК:
 1 – $\delta = 0,005$ мм; $\xi = 30$ мкм; 2 – $\delta = 0,010$ мм; $\xi = 15$ мкм; 3 – $\delta = 0,020$ мм; $\xi = 7$ мкм

При этом повышение прочности соединений в первом случае составило 90 %, а во втором – 54 %. В то же время разброс значений P_p и $M_{кр}$ в партии из 20 шт. при $\delta = 0,020$ мм значительно ниже, чем у соединений, собранных с $\delta = 0,005$ мм, что может быть объяснено разрывом контакта в соединении в связи с изменением диаметральных размеров деталей и происходящим частичным разрушением мостиков схватывания. Данное предположение подтверждено при сборке деталей из сталей 45 и ШХ15СГ, где при $\delta = 0,010$ мм необходимо сообщать деталям колебания с суммарной амплитудой 42 мкм, а при $\delta = 0,020$ мм – $\xi_{сум} = 21$ мкм.

Проведенными исследованиями было установлено, что время, необходимое для образования мостиков схватывания, составляет от 4 до 6 с (рис. 2). Отметим, что увеличение времени ультразвукового воздействия не оказывает существенного влияния на прочность соединений.

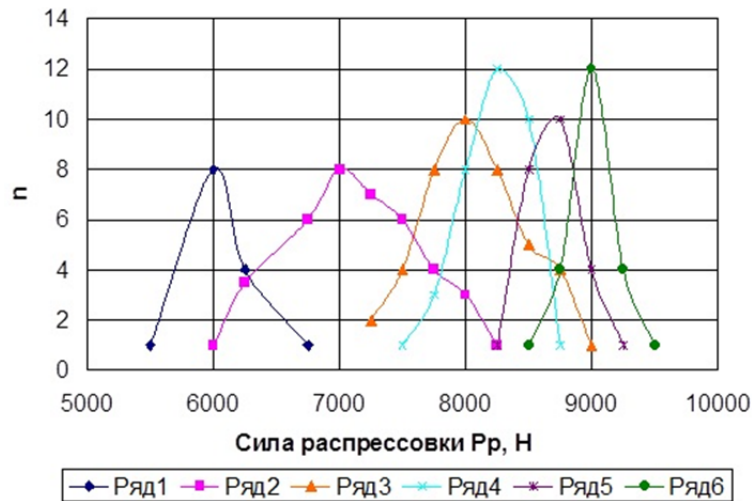


Рис. 2. Распределение прочности на сдвиг при разном времени УЗ воздействия (t):
1 – 0; 2 – 2 с; 3 – 4 с; 4 – 6 с; 5 – 8 с; 6 – 10 с

Рассмотрим влияние ультразвука на характер контактного взаимодействия при сборке. Исследования поведения металлов в контактной зоне соединений проводились на тонких срезах, толщиной 4–5 мм, выполненных перпендикулярно продольной оси. Известны данные, что при сближении поверхностей твердых тел на расстояние порядка 0,1–0,2 мкм возникают молекулярные связи на основе ван-дер-ваальсовых сил притяжения. В связи с этим под схватыванием в соединении с натягом понимают те области контакта, ширина контактных линий которых не более 0,1–0,2 мкм. Все остальные участки контактной зоны относят к зазору.

Также были выполнены металлографические исследования и измерение микротвердости. Изучалась полная длина контактной зоны на различных участках диаметральных сечений соединений при кратности увеличения от 100 до 1000, определяя при этом величину зоны пластической деформации, наличие зон схватывания и плотного контакта. Оценка соединений производилась

по суммарной длине зон схватывания и плотного контакта $\sum_{i=1}^{\pi d} l_{ic}$ и зазоров $\sum_{i=1}^{\pi d} l_{iz}$ на всей длине

окружности (здесь l_{ic} – длина i -й зоны схватывания и плотного контакта; l_{iz} – длина i -й зоны зазора). Графическая обработка результатов измерений позволила установить зависимость суммарной длины зон схватывания и плотного контакта в соединениях с натягом от величины p контактного давления (рис. 3).

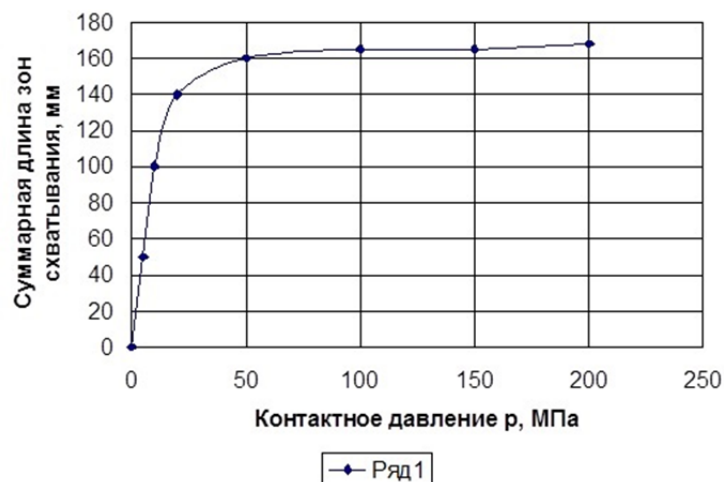


Рис. 3. Зависимость суммарной длины зон плотного контакта и схватывания $\sum_{i=1}^{\pi d} l_{ic}$
от величины p контактного давления

Физическую сущность явлений, протекающих в контактной зоне, можно объяснить с помощью кривой зависимости ширины Δ_T зоны пластически деформированного металла от величины p контактного давления (рис. 4). Полученная посредством измерения микротвердости кривая состоит из трех участков.

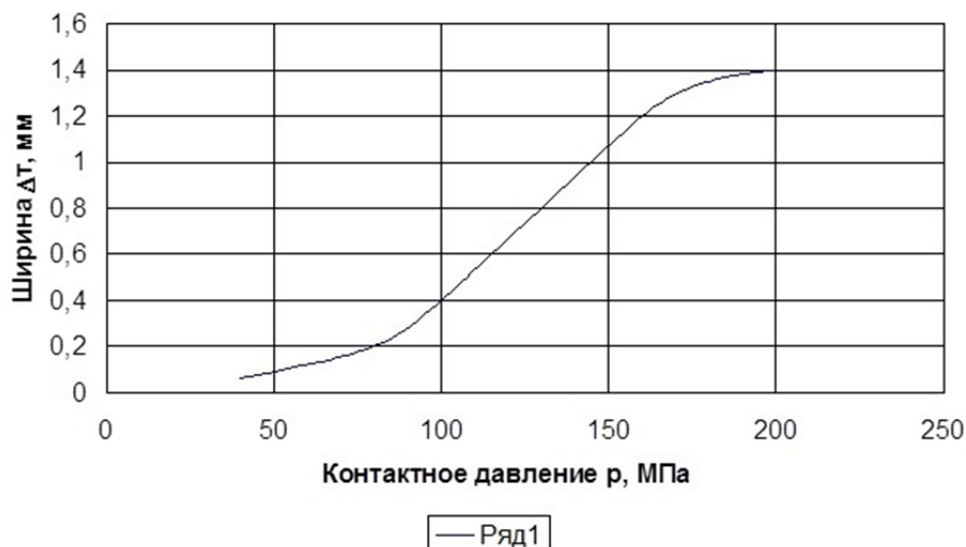


Рис. 4. Зависимость ширины Δ_T зоны пластически деформированного металла в соединениях с натягом от величины p контактного давления

Первый участок характеризует процесс контактирования в диапазоне $20 \leq p \leq 80$ МПа, где происходит упругопластическая деформация поверхностных слоев контактирующих деталей. При этом образуются зоны плотного контакта и частично зоны схватывания. Второй участок, отображающий процесс контактирования в диапазоне $80 \leq p \leq 160$ МПа, характеризуется интенсивной пластической деформацией микронеровностей и образованием основного количества зон схватывания. На третьем участке при $p \geq 160$ МПа в контакт вступает уже волнистость, которая деформируется упруго. Формирование фактической площади контакта здесь происходит за счет образования зон плотного контакта.

Анализ результатов исследований на рис. 3 и 4 показывает, что наибольшая пластическая деформация поверхностных слоев контактирующих деталей происходит в диапазоне $80 \leq p \leq 160$ МПа. При этом возникает наибольшее число зон схватывания и образуется наибольшая фактическая площадь контакта.

Таким образом, можно сделать вывод, что повышение прочности соединений за счет «мостиков схватывания» может быть гарантировано в диапазоне $80 \leq p \leq 160$ МПа.

Заключение

Установлено, что при определенном сочетании параметров ультразвуковых колебаний можно повысить прочность соединений за счет образования мостиков схватывания между поверхностями в сопряжении аналогично тому, как это осуществляется при ультразвуковой сварке.

Библиографический список

1. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Блехман, И. И. О теории схватывания металлов / И. И. Блехман // Теория трения и износа. – М. : Наука, 1965. – С. 58–61.
4. Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов / А. И. Марков. – М. : Машиностроение, 1980. – 237 с.

5. Батищева, О. М. К проблеме технологического обеспечения надежности и качества сборки машин / О. М. Батищева, В. А. Папшев, Г. А. Родимов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3 (11). – С. 65–68.
6. Батищева, О. М. Исследование теплофизической ситуации в зонах контакта при ультразвуковой сборке / О. М. Батищева, В. А. Папшев, Г. А. Родимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 132–133.

Батищева Оксана Михайловна

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный технический университет
(443100, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: omb@list.ru

Папшев Валерий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный технический университет
(443100, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: pva_samara@mail.ru

Родимов Геннадий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный технический университет
(443100, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: rgasamara@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Анализ технологических методов повышения качества соединений при ультразвуковой сборке показывает, что при определенном сочетании параметров ультразвуковых колебаний можно повысить прочность соединений. В этой связи в статье рассматриваются вопросы выявления факторов, способствующих повышению прочности соединений. *Материалы и методы.* На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований реализован комплекс технических решений и практических рекомендаций, направленных на повышение эффективности процесса ультразвуковой сборки. *Результаты.* Определены оптимальные параметры ультразвуковых колебаний, при которых достигается максимальная прочность на сдвиг и кручение. Результаты представлены в виде графиков. *Выводы.* Установлена возможность повышения прочности и функциональных параметров соединений за счет образования в зоне контакта мостиков схватывания между поверхностями в процессе сборки.

Ключевые слова: поверхности сопряжения, прочность, ультразвуковая сварка.

Batishcheva Oksana Mikhaylovna

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of transport processes
and technological complexes,
Samara State Technical University
(443100, 244 Molodogvardeiskaja street,
Samara, Russia)

Papshev Valeriy Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of transport processes
and technological complexes,
Samara State Technical University
(443100, 244 Molodogvardeiskaja street,
Samara, Russia)

Rodimov Gennadiy Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of transport processes
and technological complexes,
Samara State Technical University
(443100, 244 Molodogvardeiskaja street,
Samara, Russia)

Abstract. Background. The analysis of technological methods to improve joint quality during ultrasonic assembly shows that one can improve joint durability by combining a certain parameters of ultrasonic vibrations. In this regard, the article deals with the identification of factors conducive to increase joint durability. *Materials and methods.* Based on the theoretical and experimental researches, a system of technical solutions and practical recommendations aimed at improving the efficiency of the ultrasonic assembly process have been implemented. *Results.* Optimal parameters of ultrasonic vibrations have been determined. Their application gives the maximum joint durability for shear and torsion. The results are shown as graphs. *Conclusions.* The possibility to increase the durability and functional parameters of joints, due to formation of welding bridges between the surfaces in a zone of contact during the assembly, is determined.

Key words: joining surfaces, durability, ultrasonic welding.

УДК 621.787

Батищева, О. М.

Повышение прочности соединений при ультразвуковой сборке / О. М. Батищева, В. А. Папшев, Г. А. Родимов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 61–67. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-9.

МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Е. А. Данилова, И. И. Кочегаров, В. А. Трусков

Введение

Современные электронные изделия создаются на основе печатного монтажа, представляющего многослойную структуру, состоящую из диэлектрического основания и проводящего рисунка. Условия эксплуатации электронных средств (ЭС) различны и зависят от области их применения, но неизменно к ЭС предъявляются высокие требования по надежности. Максимальные требования по надежности ЭС устанавливают космическая, авиационная и военная отрасли, где ЭС рассчитаны на длительный период эксплуатации в условиях жестких внешних воздействий.

Известно, что на 30–40 % отказов ЭС происходит за счет дефектов печатных плат (ПП), причина возникновения которых кроется в несовершенстве или в несоблюдении технологии их производства.

Для эффективного обнаружения и локализации технологических дефектов традиционно используют информационно-измерительные системы (ИИС), позволяющие проводить активный контроль и диагностирование изделия на всех технологических этапах его производства. Задачей любой ИИС контроля ЭС является выявление критических дефектов, которые приводят к отказу. На сегодняшний день в производстве печатных узлов (ПУ) применяют оптический, электрический, рентгеновский, тепловой и другие виды контроля. При этом процедура контроля должна быть произведена за минимальное время и с наименьшими затратами. Этим условиям вполне соответствует оптический метод контроля, с помощью которого возможен контроль как ПУ, так и печатных плат. Надежность ЭС во многом определяется качеством ПП, основным элементом которых является проводящий рисунок.

При визуальном оптическом контроле проводящего рисунка печатных плат высока вероятность пропуска дефектов из-за субъективности контроля. Поэтому актуальной является задача снижения роли человеческого фактора на основе автоматизированного анализа дефектов.

Некоторые технологические дефекты печатных плат, успешно прошедшие процедуру контроля, потенциально могут перерасти в критические дефекты при наличии внешних и (или) внутренних воздействий различного вида. Сложность процессов развития дефектов, приводящих к отказам печатных плат, настоятельно требует создания и совершенствования ИИС не только обнаружения, но и прогнозирования развития дефектов печатных плат с учетом внешних воздействий.

Для решения этой задачи необходимо провести анализ моделей развития технологических дефектов, позволяющих прогнозировать развитие дефекта и подготовить математические модели для их исследования.

Модель концентрации напряжений

Существуют факторы, которые снижают предел прочности элементов: концентрация напряжений, качество поверхности, размерный фактор и др. В качестве существенного фактора, определяющего прочность и долговечность элементов ПП, выделяем концентрацию напряжений. Многочисленные эксперименты показывают, что в областях резкого изменения формы элемента (технологические дефекты – раковины, вырывы, трещины) возникают повышенные напряжения. Например, при растяжении проводника с отверстием закон равномерного распределения напряжений вблизи отверстия нарушается. Возникает напряженно-деформированное состояние, а у края отверстия появляется пик напряжения [1].

В качестве примера рассмотрим элемент с отверстием круглой формы (раковина) (рис. 1).

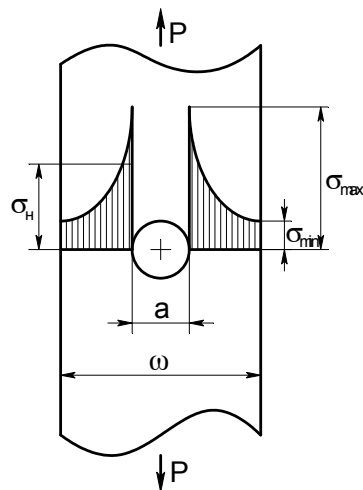


Рис. 1. Элемент, ослабленный отверстием круглой формы

Увеличение местных напряжений в элементе, ослабленном дефектом, определяются коэффициентом концентрации напряжений

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\max}$ – наибольшее местное напряжение; $\sigma_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, которое определяется без учета концентрации напряжений.

В зависимости от материала и характера напряжения концентрация напряжения оказывает различное влияние на прочность элемента конструкции. Поэтому вводится понятие эффективного коэффициента концентрации напряжений, значение которого при циклически изменяющихся напряжениях (при $R = -1$) определяется по формуле

$$K = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma'_{-1}}, \quad (2)$$

где σ_{-1} – предел усталости (выносливости) для элемента, а σ'_{-1} – предел усталости (выносливости), рассчитанный по номинальным напряжениям для элемента, имеющего концентрацию напряжений.

Значения эффективного коэффициента концентрации напряжений можно получить экспериментальным путем. Однако на сегодняшний день накоплен достаточный опыт для установления взаимосвязи между теоретическим и эффективным коэффициентами концентрации напряжений в виде

$$K = 1 + q(K_t - 1), \quad (3)$$

где q – коэффициент чувствительности материала к местным напряжениям. Его величина главным образом определяется свойствами материала. В некоторой степени на изменение q влияют геометрические размеры элемента.

Для определения значения коэффициента чувствительности материала можно воспользоваться подходом, изложенным в работе [2]. В некоторых случаях в виду отсутствия данных для коэффициента чувствительности материала, в частности для новых видов фольг ПП, предлагается использование теоретического коэффициента концентрации K_t . Следует отметить, что когда не учитывается коэффициент чувствительности материала ($q = 1$), ошибка идет в запас прочности: $K = K_t$.

Значения теоретического коэффициента концентрации напряжений K_t практически не зависят от уровня номинальных напряжений и физико-механических свойств материала, а опреде-

ляются геометрией рассматриваемого элемента, способом нагружения и относительными размерами зон концентрации.

Значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений для некоторых типов дефектов определяются через точные аналитические формулы или через графики его зависимости от геометрических параметров элемента и самого дефекта определяемыми экспериментально методами: фотоупругости, голографической интерферометрии, тензометрии, муаровых полос и др. Эти зависимости для различных типов конструктивных элементов содержатся в справочниках по концентрации напряжений, нормах, технических условиях на проектирование конструкций и в других источниках.

За счет влияния коэффициента концентрации напряжений кривые, соответствующие пределу выносливости (рис. 2, 3 тонкие линии), меняют свое положение (рис. 2, 3 утолщенные линии), следовательно, снижают величину числа циклов до разрушения, запас прочности и время до разрушения.

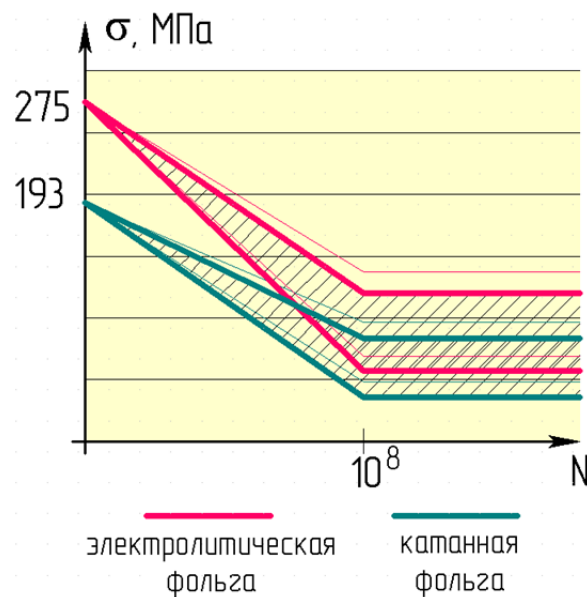


Рис. 2. Кривая усталости

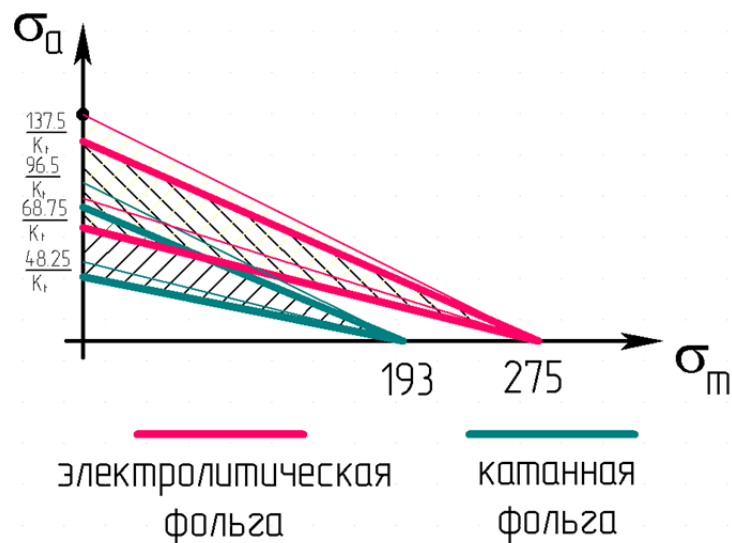


Рис. 3. Диаграмма предельных амплитуд

Таким образом, коэффициент запаса усталостной прочности при наличии концентрации напряжений рассчитываем по формулам:

– при симметричном цикле

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K \sigma_{\max}}; \quad (4)$$

– при несимметричных циклах

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K \sigma_a - \psi \sigma_m}. \quad (5)$$

В книге [2] обобщены данные о теоретических коэффициентах концентрации напряжений для различных видов дефектов. Эти данные послужили основой для сопоставления типов технологических дефектов и моделей в виде эмпирических формул либо зависимостей, полученных аппроксимацией данных экспериментальных графиков.

Для подбора вида зависимости, более точно приближенной к данным, приведенным в виде графиков, осуществляем аппроксимацию зависимости следующими моделями:

- линейная;
- квадратичная;
- кубическая;
- степенная функция;
- показательная;
- логарифмическая;
- гиперболическая аппроксимация;
- экспоненциальная аппроксимация.

При оценке подобранных моделей для окончательного выбора использовались следующие показатели качества моделей:

- коэффициент корреляции;
- коэффициент детерминации;
- средняя ошибка аппроксимации.

Коэффициент корреляции – это величина, которая характеризует силу связи между параметрами. Он может варьировать в пределах от +1 до –1. Значение по модулю близкое к 1, то это означает наличие сильной связи, а если ближе к 0 – связь отсутствует или является существенно нелинейной:

$$r = \frac{\sum (K_t - \overline{K_t})(\hat{K}_t - \overline{\hat{K}_t})}{\sqrt{\sum (K_t - \overline{K_t})^2 \sum (\hat{K}_t - \overline{\hat{K}_t})^2}}, \quad (6)$$

где K_t – значения теоретического коэффициента концентрации напряжений, получаемые по экспериментальным кривым; $\overline{K_t}$ – среднее значение теоретического коэффициента концентрации напряжений для значений, получаемых по экспериментальным кривым; $\hat{K}_t$ – значения теоретического коэффициента концентрации напряжений, получаемые по подобранным зависимостям; $\overline{\hat{K}_t}$ – среднее значение теоретического коэффициента концентрации напряжений для значений, получаемых по подобранным зависимостям.

Коэффициент детерминации – основной показатель, отражающий меру качества регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели. Чем ближе R^2 к 1, тем выше качество модели. А при равенстве R^2 единице линия регрессии точно соответствует всем наблюдениям:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (K_t - \hat{K}_t)^2}{\sum (K_t - \overline{K_t})^2}. \quad (7)$$

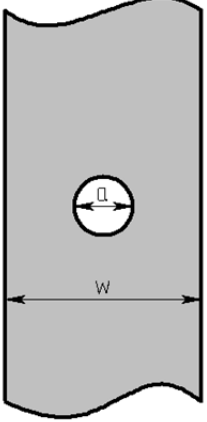
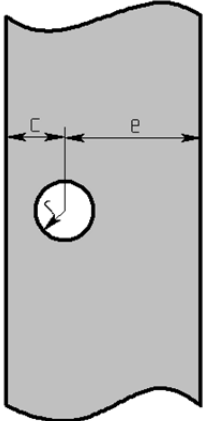
Средняя ошибка аппроксимации представляет собой величину отклонений фактических и расчетных значений результативного признака по каждому наблюдению. Значение ошибки аппроксимации в пределах 5–7 % свидетельствует о хорошем подборе модели к исходным данным:

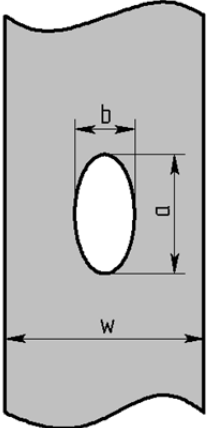
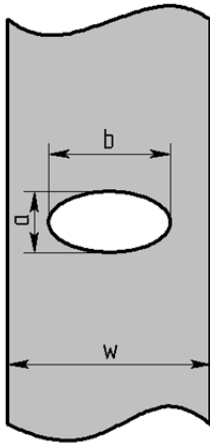
$$A = \frac{100}{K_t} \sqrt{\frac{\sum (K_t - \hat{K}_t)^2}{n}}, \quad (8)$$

где n – количество значений теоретического коэффициента концентрации напряжений.

Модели для определения теоретического коэффициента концентрации напряжений

Далее приводятся модели определения теоретического коэффициента концентрации напряжений нескольких видов распространенных дефектов, которые учитывают снижение прочности элементов ПП. Для каждой модели приведена оценка показателей, определяющих ее качество. Таким образом, выбранные модели для определения значений коэффициента концентрации напряжений можно использовать в качестве базы данных для обнаружения дефектов печатных плат [3].

Дефект: раковина в виде отверстия круглой формы в центре проводника 	Формула Хейвуда (справедлива для всего диапазона изменения $\frac{a}{w}$): $K_t = 2 + \left(1 - \frac{a}{w}\right)^3,$ где a – диаметр отверстия; w – ширина проводника. Формула Хауленда (Howland) $K_t = 2 + 0,284\left(1 - \frac{a}{w}\right) - 0,600\left(1 - \frac{a}{w}\right)^2 + 1,32\left(1 - \frac{a}{w}\right)^3.$ По графику Хауленда (Howland) $K_t = 3,1981 + 4,6976\left(\frac{a}{w}\right) - 0,0392\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 0,0001\left(\frac{a}{w}\right)^3;$ $r = 0,8165;$ $R^2 = 0,666;$ $A = 2,02 \%$
Дефект: раковина в виде отверстия круглой формы, смещенная относительно центра проводника 	Вариант 1 По аналитическим результатам Шестрема: 1) при $\frac{e}{c} = 1$ ($0 \leq \frac{r}{c} \leq 0,5$): $K_t = -4,1495\left(\frac{r}{c}\right)^3 + 5,5080\left(\frac{r}{c}\right)^2 - 3,4046\left(\frac{r}{c}\right) + 3,0028;$ $r = 0,9999;$ $R^2 = 0,9998;$ $A = 0,12 \%;$ 2) при $\frac{e}{c} = 2,4$ ($0 \leq \frac{r}{c} \leq 0,5$): $K_t = -4,0213\left(\frac{r}{c}\right)^3 + 5,6807\left(\frac{r}{c}\right)^2 - 3,3973\left(\frac{r}{c}\right) + 3,0018;$ $r = 0,9999;$ $R^2 = 0,998;$ $A = 0,12 \%;$

	3) при $\frac{e}{c} = \infty$ ($0 \leq \frac{r}{c} \leq 0,5$) для любого соотношения смещений: $K_t = -3,4024 \left(\frac{r}{c} \right)^3 + 4,8480 \left(\frac{r}{c} \right)^2 - 3,3292 \left(\frac{r}{c} \right) + 3,0018;$ $r = 0,9999;$ $R^2 = 0,998;$ $A = 0,11 \%.$ <i>Вариант 2</i> По эмпирической формуле: $K_t = C_1 + C_2 \left(\frac{r}{c} \right) + C_3 \left(\frac{r}{c} \right)^2,$ где C_i – коэффициенты, определяемые по формулам: $C_1 = 2,989 - 0,0064 \left(\frac{c}{e} \right);$ $C_2 = -2,872 + 0,095 \left(\frac{c}{e} \right);$ $C_3 = 2,348 + 0,196 \left(\frac{c}{e} \right)$
Дефект: Раковина в виде горизонтального отверстия эллиптической формы в центре (вдоль длины проводника)	
	График Исиды. при $\frac{b}{a} = \frac{1}{2}$ ($0 \leq \frac{b}{w} \leq 1$): $K_t = -0,3952 \left(\frac{b}{w} \right)^3 + 1,6764 \left(\frac{b}{w} \right)^2 - 1,2862 \left(\frac{b}{w} \right) + 1,9619;$ $r = 0,9691;$ $R^2 = 0,9391;$ $A = 1,07 \%$
Дефект: Раковина в виде вертикального отверстия эллиптической формы в центре (поперек длины проводника)	
	<i>Вариант 1</i> График Исиды 1) при $\frac{b}{a} = 2$ ($0 \leq \frac{b}{w} \leq 1$): $K_t = -2,6592 \left(\frac{b}{w} \right)^3 + 5,0896 \left(\frac{b}{w} \right)^2 - 5,4076 \left(\frac{b}{w} \right) + 5,0243;$ $r = 0,9997;$ $R^2 = 0,995;$ $A = 0,5 \%;$

	2) при $\frac{b}{a} = 4$ ($0 \leq \frac{b}{w} \leq 1$): $K_t = -7,6713 \left(\frac{b}{w} \right)^3 + 11,4737 \left(\frac{b}{w} \right)^2 - 10,7167 \left(\frac{b}{w} \right) + 9,0281;$ $r = 0,9983;$ $R^2 = 0,9965;$ $A = 1,46 \%;$ 3) при $\frac{b}{a} = 8$ ($0 \leq \frac{b}{w} \leq 1$): $K_t = 17,0771 - 20,2945 \left(\frac{b}{w} \right) + 22,2799 \left(\frac{b}{w} \right)^2 - 16,6097 \left(\frac{b}{w} \right)^3;$ $r = 0,9993;$ $R^2 = 0,9986;$ $A = 2,36 \%;$ <i>Вариант 2</i> по аналитической формуле при $1,0 \leq \frac{b}{a} \leq 8,0$ $K_t = C_1 + C_2 \left(\frac{b}{w} \right) + C_3 \left(\frac{b}{w} \right)^2 + C_4 \left(\frac{b}{w} \right)^3,$ где C_i – коэффициенты, определяемые по формулам: $C_1 = 1,109 - 0,188 \sqrt{\frac{b}{a}} + 2,086 \frac{b}{a};$ $C_2 = -0,486 + 0,213 \sqrt{\frac{b}{a}} - 2,588 \frac{b}{a};$ $C_3 = 3,816 - 5,510 \sqrt{\frac{b}{a}} + 4,638 \frac{b}{a};$ $C_4 = -2,438 + 5,485 \sqrt{\frac{b}{a}} - 4,126 \frac{b}{a}$
--	--

Полученная база может дополняться по мере накопления статистики по наиболее часто встречающимся дефектам и подбором соответствующих моделей.

Выводы

Технологические дефекты проводящего рисунка ПП являются концентраторами напряжений, приводящими к снижению прочности в процессе эксплуатации. Приведены формулы, связывающие геометрические размеры дефектов и коэффициент концентрации напряжений, соответствующие четырем видам дефектов, необходимые при определении числа циклов до разрушения, коэффициента усталостной прочности и времени до разрушения.

Реальные дефекты проводящего рисунка ПП имеют разнообразную форму и размеры. На практике невозможно охватить все встречающиеся виды реальных дефектов. Приведена формализация видов дефектов, которая позволяет свести их к ограниченному количеству, что позволяет автоматизировать процесс прогнозирования их развития.

Библиографический список

1. Данилова, Е. А. Построение информационно-измерительной системы обнаружения дефектов проводящего рисунка печатных плат / Е. А. Данилова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 69–78.
2. Peterson, R. E. Stress Concentration Factors / R. E. Peterson. – New York : Wiley, 2008. – 560 p.

3. Григорьев, А. В. Автоматизированная система для подсчета заужений проводящего рисунка печатной платы, обусловленных и не обусловленных наличием раковин / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. Н. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10) – С. 27–33.

Данилова Евгения Анатольевна

старший преподаватель,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: siori@list.ru

Кочегаров Игорь Иванович

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

Трусов Василий Анатольевич

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

Danilova Evgeniya Anatol'evna

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

Kochegarov Igor' Ivanovich

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

Trusov Vasily Anatol'evich

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Некоторые технологические дефекты печатных плат, успешно прошедшие процедуру контроля, потенциально могут перерасти в критические дефекты при наличии внешних и (или) внутренних воздействий различного вида. Сложность процессов развития дефектов, приводящих к отказам печатных плат, настоятельно требует создания и совершенствования ИИС не только обнаружения, но и прогнозирования развития дефектов печатных плат с учетом внешних воздействий. Для решения этой задачи необходимо провести анализ моделей развития технологических дефектов, позволяющих прогнозировать развитие дефекта и подготовить математические модели для их исследования. *Материалы и методы.* В статье использованы методы системного анализа, теории математического и имитационного моделирования, анализа технологических систем. *Результаты.* В работе приводятся четыре модели определения теоретического коэффициента концентрации напряжений нескольких видов распространенных дефектов, которые учитывают снижение прочности элементов ПП. Для каждой модели приведена оценка показателей, определяющих ее качество. *Выводы.* Технологические дефекты проводящего рисунка ПП являются концентраторами напряжений, приводящими к снижению прочности в процессе эксплуатации. Приведены формулы, связывающие геометрические размеры дефектов и коэффициент концентрации напряжений, соответствующие четы-

Abstract. *Background.* Some technological defects of printed circuit boards, successfully passed the control procedure, can potentially develop into critical defects in the presence of external and (or) internal influences of a different kind. The complexity of defect development processes leading to PCB failures urgently requires the creation and improvement of information-measuring systems not only detection, but also prediction of the development of PCB defects, taking into account external influences. To solve this problem, it is necessary to analyze the models of the development of technological defects that allow predicting the development of a defect and to prepare mathematical models for their investigation. *Materials and methods.* The methods of system analysis, the theory of mathematical and simulation modeling, the analysis of technological systems are used in the article. *Results.* The paper presents four models for determining the theoretical stress concentration factor of several types of common defects that take into account the decrease in the strength of the elements of the PP. For each model, an estimate of the indicators determining its quality is given. *Conclusions.* Technological defects of the conductive PP pattern are stress concentrators, leading to a decrease in strength during operation. Formulas relating the geometric dimensions of the defects and the stress concentration coefficient corresponding to the 4 types of defects necessary for determining the number of cycles before failure, the fatigue strength factor, and the time to failure are given. The selected models for determining the values

рем видам дефектов, необходимые при определении числа циклов до разрушения, коэффициента усталостной прочности и времени до разрушения. Выбранные модели для определения значений коэффициента концентрации напряжений можно использовать в качестве базы данных для обнаружения дефектов печатных плат.

Ключевые слова: печатная плата, печатный проводник, технологический дефект, математическая модель, механические напряжения.

of the stress concentration factor can be used as a database for detecting defects in printed circuit boards.

Key words: printed circuit board, printed conductor, technological defect, mathematical model, mechanical stresses.

УДК.396; 621.8

Данилова, Е. А.

Модели технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат / Е. А. Данилова, И. И. Кочегаров, В. А. Трусов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 68–76. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-10.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 66.933.6

DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-11

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАГРУЗКИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИНДУКЦИОННУЮ ПЕЧЬ

В. А. Трусов, Н. Н. Вершинин, Л. А. Авдоница, А. Е. Вершинин

Введение

Как правило, современные промышленные предприятия приобретают для плавки черных и цветных металлов и их сплавов индукционные плавильные комплексы в составе двух индукционных печей. Как было отмечено в статье [1], качество выплавляемого металла или сплава зависит от множества факторов и в первую очередь наличия в шихте посторонних включений, пыли, грязи, окалины, ржавчины и т.д. Вследствие этого авторы поставили задачу ввести в конструкцию установки для загрузки шихты в индукционную печь устройство для удаления пыли из шихты в процессе ее загрузки в печь.

Виброзагрузочная машина для загрузки шихты в печь

Процесс загрузки любой металлургической печи, в частности индукционной, включает в себя следующие операции: подбор компонентов шихты на складе, загрузка их в тару, взвешивание, доставка тары на обслуживаемую площадку печи и загрузка шихты в печь [2]. Наиболее трудоемкой операцией является загрузка шихты в печь. Для доставки шихты к печи и загрузки шихты в печь авторами разработана виброзагрузочная машина. Подбор компонентов шихты, загрузка их в тару, взвешивание, доставка на обслуживаемую площадку производится на складе. В данной работе эти операции и оборудование для выполнения перечисленных выше операций не рассматриваются.

Передвижная виброзагрузочная машина 1 имеет сварную раму 2 на четырех колесах 3, перемещающуюся по рельсовому пути 4, на которой закреплены четыре опоры 5, имеющие фланцы 6 с отверстиями, на которых крепится 16 болтами 7, 16 гайками 8 и 16 пружинными шайбами 9, загрузочный бункер 10, находящийся над загрузочным лотком 11 (рис. 1, 2).

Загрузочный бункер 10 сварен из листовой стали толщиной 4 мм и имеет в боковых стенках четыре приваренных кронштейна 12 с фланцами 13, в каждом из которых имеется четыре отверстия для крепления загрузочного бункера на опорах 5. На передней части загрузочного бункера 10 установлена ось 14, вращающаяся в двух подшипниках 15, причем к оси приварена заслонка 16, которая ограничивает объем загружаемой в загрузочный бункер 10 шихты, а также слой шихты скользящей по загрузочному лотку 11 (рис. 2, 3). С левой стороны оси 14 приварен рычаг 17 (рис. 4). Размеры загрузочного бункера 10: длина – 4550 мм; ширина – 1600 мм; высота – 850 мм. Четыре опоры стальные, имеют коробчатую форму и внешние размеры в сечении 100×120 мм.

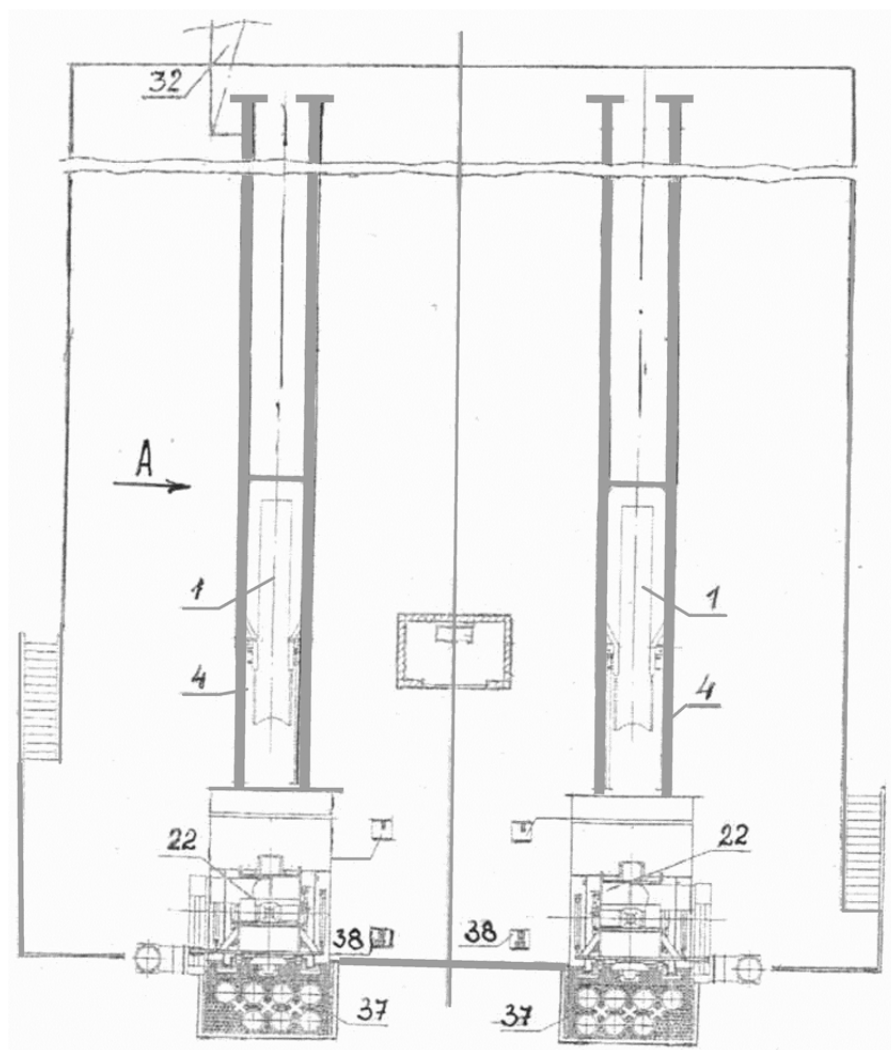


Рис. 1. Вид в плане установки для загрузки шихты в индукционную печь

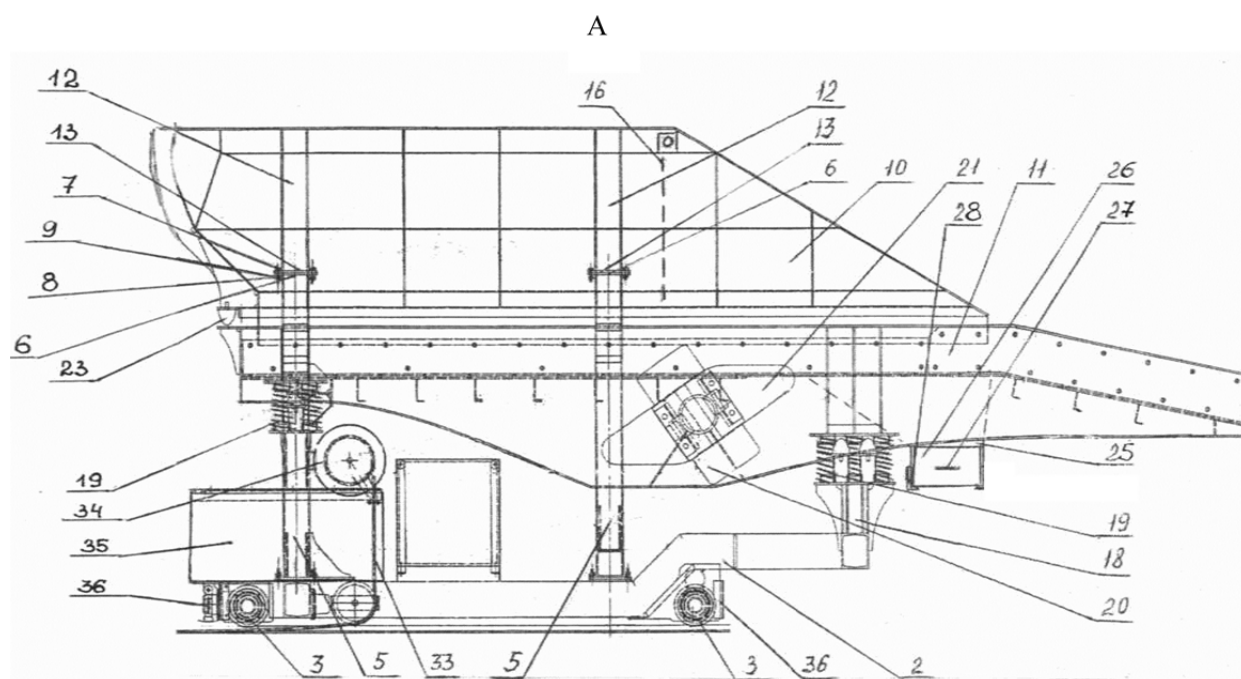


Рис. 2. Вид А виброзагрузочной машины

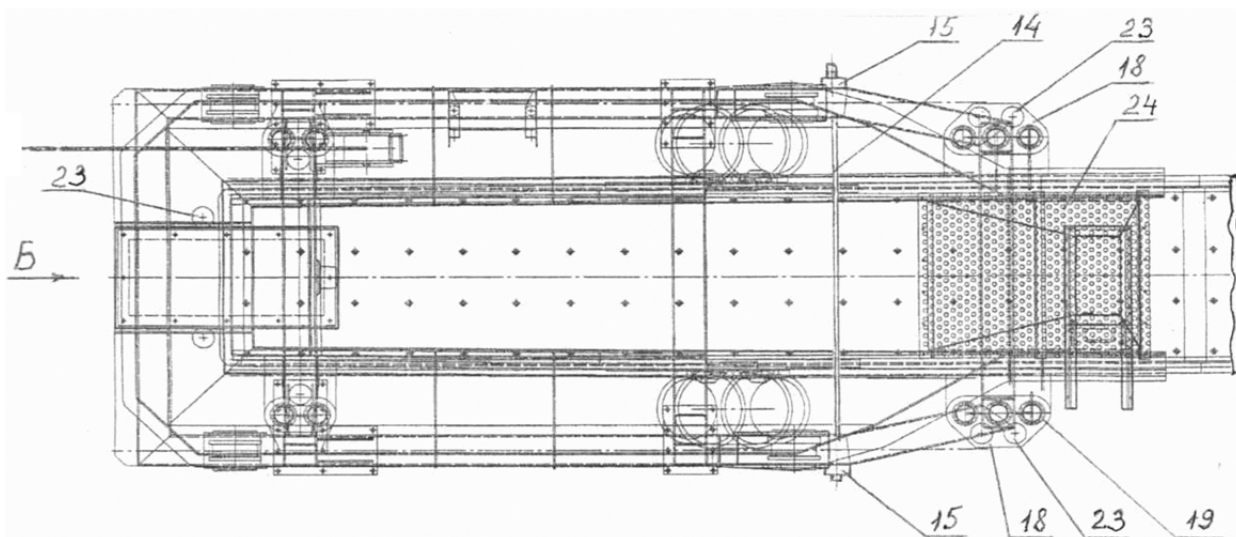


Рис. 3. Вид Б в плане виброзагрузочной машины

Следует отметить, что входящий в состав установки для загрузки шихты загрузочный лоток 11, имеющий заднюю и две боковые стенки, сварен из листовой стали, установлен на четырех опорах 18 с 10 пружинами 19 на сварной раме 2 виброзагрузочной машины 1 (см. рис. 2–4). С обеих сторон загрузочного лотка на его боковых стенках закреплен надежный вибрационный механизм, состоящий: из двух дебалансных центробежных вибраторов 20, которые крепятся восемью болтами, восемью гайками и восемью пружинными шайбами на двух пластинах-кронштейнах 21, приваренных к стенкам загрузочного лотка 11. Дебалансный центробежный вибратор представляет собой электродвигатель с установленными на концах вала ротора дебалансами, которые, вращаясь с валом ротора, создают центробежную силу, вынуждающую вибрировать загрузочный лоток 11 и при этом перемещать загруженную шихту по загрузочному лотку 11 в индукционную печь 22. В качестве дебалансного центробежного вибратора используется, как показала практика эксплуатации, надежный в работе вибратор типа ИВ-105-2.2Э, имеющий следующие характеристики:

- частота колебаний, Гц (кол./мин) – 50(3000);
- мощность, кВт – 2,7;
- номинальное напряжение, В – 380;
- номинальный ток, А – 5;
- максимальная вынуждающая сила, кН – 88,8.

На четырех опорах 18 загрузочного лотка 11 закреплены шесть резиновых упоров-амортизаторов 23, также два резиновых упора-амортизатора 23 закреплены в задней части загрузочного бункера 10 (см. рис. 2, 3).

Устройство в виброзагрузочной машине для удаления пыли из шихты

Кроме того, в установку для загрузки шихты входит устройство для удаления пыли из шихты в процессе загрузки шихты, смонтированное на загрузочном лотке 11 и состоящее: из решетки 24 с отверстиями, бункера 25, короба 26 с ручкой 27, двух направляющих 28 и двух фиксаторов (не показано), крепящих короб 26 к направляющим 28. Устройство для удаления пыли из шихты в процессе загрузки размещено в средней части загрузочного лотка и не позволяет загрязнять выплавляемый металл пылью, окалиной, грязью, ржавчиной, так как шихта скользит по загрузочному лотку 11, а пыль, окалина, ржавчина, грязь проваливаются через отверстия решетки и накапливаются в бункере 25 и коробе 26. Таким образом, шихта, загружаемая в печь, имеет намного меньше пыли, окислы, ржавчины, грязи, вследствие чего уменьшаются угар металла и количество образовавшегося при плавке шлака.

Привод перемещения виброзагрузочной машины

Существенно отметить, что в состав установки для загрузки шихты в индукционную печь входит привод перемещения виброзагрузочной машины по рельсам, состоящий: из мотор-редуктора 29 со встроенным тормозом, зубчатой передачи 30 и колесной пары 31 (см. рис. 4). Для загрузки виброзагрузочной машины шихтой ее необходимо подать по рельсовому пути 4 к мостовому крану 32 и с его помощью загружать загрузочный бункер 10 шихтой и доставлять ее к печи 22. Подвод электроэнергии к приводу виброзагрузочной машины 1 осуществляется с помощью гибкого кабеля 33, который при движении виброзагрузочной машины 1 влево сматывается с барабана 34, а при движении вправо наматывается на него. Для случайного возможного подъема задней пары колес виброзагрузочной машины в процессе загрузки печи 22 предусмотрен противовес 35, который закреплен на сварной раме 2. Сзади и спереди рамы 2 установлены концевые выключатели 36 (см. рис. 2, 4).

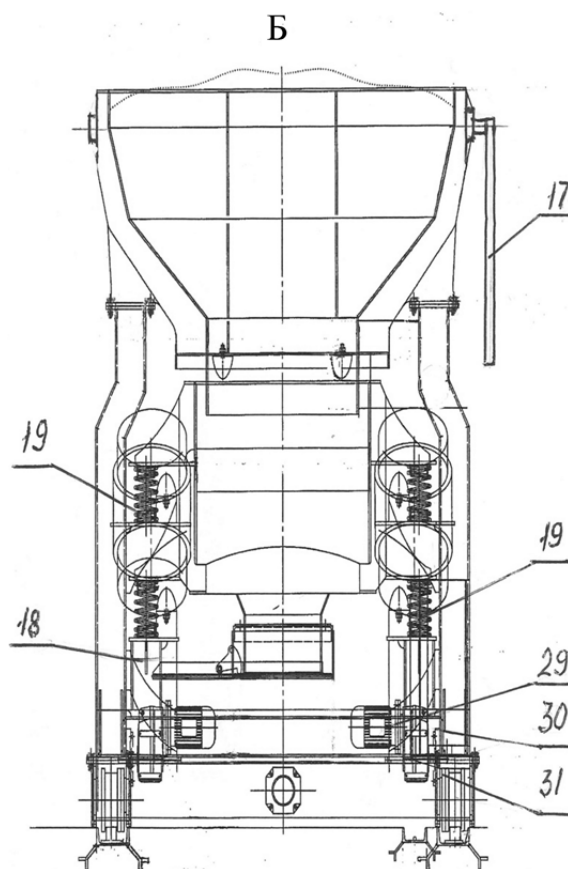


Рис. 4. Вид Б виброзагрузочной машины

Габаритные размеры виброзагрузочной машины: длина – 5800 мм; ширина – 1800 мм; высота 2700 мм. Вес виброзагрузочной машины – 2240 кг.

Работа установки для загрузки шихты

Работа установки для загрузки шихты происходит следующим образом, шихтовщик в соответствии с расчетом шихты подбирает компоненты шихты на складе, взвешивает их на электронных весах, загружает в тару и подает краном 32 в загрузочный бункер 10 виброзагрузочной машины 1.

Плавильщик включает привод виброзагрузочной машины 1, и она перемещается по рельсовому пути 4 к индукционной плавильной печи 22 до момента срабатывания концевого выключателя 36 (в конце рельсового пути 4 имеется упор).

Плавильщик включает вибрационный механизм, шихта за счет вибрации скользит по загрузочному лотку 11 и заполняет тигель индукционной печи 22. Включается печь, плавится металл.

При большой емкости печи загружают по мере расплавления нескольких порций. После расплавления металла в приямок 37 устанавливается ковш (не показан), с пульта 38 включается механизм наклона печи 22, печь 22 наклоняется и металл из тигля сливается в ковш, а затем печь 22 возвращается в вертикальное положение. Далее процесс повторяется.

Заключение

Предложенная конструкция установки для загрузки шихты является надежной, так как в ней используются надежные и стабильные в работе основные механизмы и узлы, отличается высокой степенью механизации, позволяет удалять пыль из шихты в процессе загрузки шихты, при этом уменьшается количество образующегося при плавке шлака и увеличивается выход годного литья.

Библиографический список

1. Трусов, В. А. Флюсы для получения качественных алюминиевых сплавов / В. А. Трусов, Н. Н. Вершинин и др. // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – 510 с.
2. Трусов, В. А. Конструкция надежной высокопроизводительной шахтно-отражательной печи для переплава металла / В. А. Трусов, Н. Н. Вершинин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – 510 с.
3. Вершинин, Н. Н. Дискретное математическое моделирование комплексного вредного воздействия химических веществ на работников гальванического производства / Н. Н. Вершинин, В. В. Костиневич, Н. В. Камардина // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 170–172.
4. Шумилин, А. Д. Исследование транспортного шума на улицах города Пензы / А. Д. Шумилин, Н. Н. Вершинин, Л. А. Авдонина // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 97–103.
5. Шумилин, А. Д. Мониторинг и прогнозирование влияния автомобильного транспорта на воздушный бассейн города Пенза / А. Д. Шумилин, Н. Н. Вершинин, Л. А. Авдонина // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 97–103.

Трусов Владимир Александрович

кандидат технических наук,
заместитель главного инженера
ООО «Сервисный МеталлоЦентр»
(440052, Россия, г. Пенза, проезд Аустрина, 3)
E-mail: trusov1985@list.ru

Вершинин Николай Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nversinin@yandex.ru

Авдонина Любовь Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: laviks@yandex.ru

Вершинин Алексей Евгеньевич

магистрант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexevershinin@yandex.ru

Trusov Vladimir Aleksandrovich

candidate of technical sciences,
Deputy chief engineer of JSC
«Metal Service Center»,
(440052, 3 Austrina travel, Penza, Russia)

Vershinin Nikolay Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of technospheric safety,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Avdonina Lyubov' Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of technospheric safety,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Vershinin Aleksey Evgen'evich

master degree student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Аннотация. Разработана надежная инновационная установка для загрузки шихтовых материалов в индукционную печь. В конструкцию установки входит передвижная виброзагрузочная машина с установленным на ней загрузочным бункером, находящимся над загрузочным лотком, привод перемещения виброзагрузочной машины по рельсам, вибрационный механизм, устройство для удаления пыли из шихты во время загрузки. Приведены технические характеристики виброзагрузочной машины.

Ключевые слова: печь, виброзагрузочная машина, шихта, загрузочный бункер, вибрационный механизм, устройство, машина, весы, лоток, загрузка.

Abstract. Developed reliable and innovative installation for loading charge materials into the induction furnace. In the design of plant includes mobile fibrosarcoma machine with the hopper located above the loading tray, the actuator moving fibrosarcomas machine on the rails, vibrating mechanism, a device for removing dust from the charge while downloading. These specifications fibrosarcomas machine.

Key words: oven, fibrosarcoma machine, furnace charge hopper, vibrating mechanism, device, machine, scales, tray, download.

УДК 66.933.6

Трусов, В. А.

Повышение безопасности установки для загрузки шихтовых материалов в индукционную печь /
В. А. Трусов, Н. Н. Вершинин, Л. А. Авдоница, А. Е. Вершинин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 77–82. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-11.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДА АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ «ЕВРО-5» НА ВОЗДУШНЫЙ БАСЕЙН ГОРОДА

Н. Н. Вершинин, А. Д. Шумилин, А. В. Волкова, Л. А. Авдоница

Введение

Одним из условий сохранения экологической безопасности государства является «обеспечение благоприятного состояния окружающей среды как необходимого условия улучшения качества жизни и здоровья населения» [1].

Автомобильный транспорт – один из наиболее неблагоприятных экологических факторов в охране здоровья населения и природной среды. Фактически в наше время он стал конкурентом человека за жизненное пространство. Актуальной задачей в решении эколого-транспортных проблем является сохранение и развитие системы защиты воздушного бассейна. Усовершенствование экологической системы страны, соблюдение международных стандартов качественных характеристик топлива и норм выброса токсичных веществ – это те шаги, которые способны положительно повлиять на экологию воздушного пространства.

Причины отрицательного воздействия транспортной отрасли на окружающую среду

К основным причинам отрицательного воздействия транспортной отрасли на окружающую среду, в частности на воздушный бассейн, относятся:

- недостаток конкретики экологических целей в области обеспечения работы автомобильного транспорта и его развития;
- недостаточные экологические характеристики изготавливаемой транспортной техники в стране;
- неудовлетворительный уровень технического содержания парка автомобилей;
- низкое качество дорог [2].

Автомобильный транспорт – мощнейший источник загрязнения воздушного бассейна, основной источник шума в городах и причина значительного повышения теплового загрязнения среды [3]. Каждый год автомобильным транспортом в России выбрасывается более 12 млн тонн вредных канцерогенных веществ, которые наносят существенный вред здоровью людей и всей окружающей среде [4]. Для сравнения объем мировых загрязняющих веществ составляет около 26 млн тонн, т.е. загрязняющие выбросы автомобильного транспорта России составляют почти половину общемирового загрязнения автотранспортом. Причина этого не только в большом количестве автомобилей (более 40 млн) в стране, но и в низких экологических стандартах машин, в некачественном загрязняющем атмосферу топливе.

Основным административно-контрольным механизмом снижения техногенной нагрузки на воздушный бассейн является экологическая сертификация транспортных средств, которой подлежат все выпускаемые и импортируемые в Россию автотранспортные средства (АТС). Требования к выбросам загрязняющих веществ определяются в соответствии с экологическим классом автомобиля – присваиваемым в итоге экологической сертификации классификационным кодом, который характеризует токсичность двигателя АТС. Чем выше класс, тем строже экологические требования. Определяются технические требования к автомобильной технике и установленным на ней двигателям внутреннего сгорания.

Причина введения экологических автомобильных стандартов в постоянном росте продаж автомобилей, что сделало автотранспорт главным загрязнителем воздуха, значительно опередив промышленность. На его загрязняющие выбросы приходится в среднем 70–80 % атмосферных загрязнений.

**Регулирование содержания вредных веществ
в выхлопных газах автотранспорта экологическим стандартом «Евро»**

С 1 июля 2016 г. все ввозимые в РФ автомобили должны отвечать экологическому классу «Евро-5», т.е. концентрации вредных веществ в отработавших газах не должны превышать установленных для этого экологического класса уровней (табл. 1) [5].

Таблица 1

Технические нормы экологических стандартов Евро 1–5						
Экостандарт	Оксид углерода (II) CO	Угледорудород	Летучие орг. вещ-ва	Оксид азота (NOx)	HC+NOx	Взвешенные частицы (PM)
Для дизельного двигателя						
Евро 1	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97 (1,13)	0,14 (0,18)
Евро 2	1,0	-	-	-	0,7	0,08
Евро 3	0,64	-	-	0,50	0,56	0,05
Евро 4	0,50	-	-	0,25	0,30	0,025
Евро 5	0,500	-	-	0,180	0,230	0,005
Евро 6	0,500	-	-	0,080	0,170	0,005
Для бензинового двигателя						
Евро 1	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97 (1,13)	-
Евро 2	2,2	-	-	-	0,5	-
Евро 3	2,3	0,20	-	0,15	-	-
Евро 4	1,0	0,10	-	0,08	-	-
Евро 5	1,000	0,100	0,068	0,060	-	0,005
Евро 6	1,000	0,100	0,068	0,060	-	0,005

Экологическим стандартам «Евро», регулирующим содержание вредных веществ в выхлопных газах автотранспорта, уже больше 25 лет. Чтобы снизить выбросы, автопроизводители усовершенствуют двигатели, топливные и выхлопные системы, в том числе за счет дополнительной фильтрации. Нефтеперерабатывающим же предприятиям необходимо повышать качество бензина и дизтоплива, снижая в них содержание различных загрязняющих веществ (например, серы).

Первый базовый стандарт был введен в 1988 г. и позже получил название «Евро-0». С тех пор нормативы повышались почти каждые три-пять лет, и с сентября 2016 г. в Европе действует «Евро-6» (правда, этот стандарт повышает экологичность только дизтоплива, а бензин оставляет на уровне «Евро-5»). В России же полгода назад был введен стандарт «Евро-5».

Основная проблема на сегодняшний день заключается даже не в самих автомобилях, а в качестве топлива. На данный момент большинство российских нефтезаводов стали производить топливо стандарта «Евро-5». По данным Минэнерго, только по итогам 2016 г. из всего произведенного в России топлива более 75 % пришлось на «Евро-5» [6].

Топливо стандарта «Евро-5» имеет высокое октановое число, за счет которого при сгорании снижается вероятность детонации и понижается вибрация и шум. При использовании топлива, соответствующего стандарту «Евро-5», износ двигателя автомобиля значительно уменьшается. У систем нейтрализации, отвечающих за очистку отработанных газов, увеличивается срок эксплуатации при более полном сгорании топливовоздушной смеси.

Кроме очевидного экологического эффекта, качественное топливо «Евро-5» повышает и эксплуатационные качества двигателей. Такое топливо значительно замедляет процесс старения моторного масла и замедляет процессы образования нагара в среднем на 60 % в течение 15 тыс. км пробега.

Экологические проблемы автомобильного рынка

Введение стандарта «Евро-5» спровоцировало и некоторые проблемы. К примеру, уходят с рынка машины китайского производства. Многие из них, которые были «подогнаны» к стандартным требованиям «Евро-4», больше не могут продолжать гнаться за усовершенствованием с учетом условий европейского стандарта.

Второй проблемой является то, что автопроизводители заявляют иногда один уровень выбросов, а на практике автомобили показывают другие. Самый известная афера была опубликована с концерном Volkswagen – в сентябре 2015 г. в США выяснилось, что более 11 млн дизельных автомобилей Volkswagen по всему миру были оснащены программным обеспечением, которое во время проведения тестов в десятки раз занижало количество вредных газов, в частности, оксидов азота, выбрасываемых в воздух [7].

Под стандарт «Евро-5» не попадают изношенные модели, т.е. не запрещается путешествовать на старых автомобилях, приобретенных раньше, чем были приняты запрещающие меры на территории страны. Однако обычный гражданин России, теперь не сможет покупать и пригонять из Европы автомобили, ранее использованные по хорошим дорогам и проводимым техническим осмотром с обслуживанием на оборудованных станциях высокого класса. Таким образом, данным стандартом создается значительный толчок для разработчиков отечественного автомобилестроения.

Преимущества экологического стандарта «Евро-5»

Загрязнение окружающей среды от дорожного движения зависит, в частности от интенсивности движения, скорости движения, наличия разгонов и торможений, состава движения, прямолинейности дороги и естественных условий вдоль дороги [8].

Значительное изменение загрязнения окружающей среды достигается за счет перехода к более высоким экологическим стандартам используемых топлив. Переход к стандарту «Евро-5» гарантирует уменьшение выбросов. Уменьшение выбросов обеспечивается двумя факторами – повышением экологичности двигателя и использованием системы нейтрализации отработавших газов. Применение топлива стандарта «Евро-5» уменьшает «дымность» отработанных газов автомобиля, снижает выброс продуктов сгорания (твердых частиц, оксидов азота, окиси углерода, несгорающих углеводородов).

Кроме этого, топливо данного стандарта имеет следующие выявленные выше преимущества:

- улучшает процесс сгорания топлива;
- снижает степень коррозии;
- предотвращает детонацию;
- уменьшает расход топлива;
- облегчает запуск двигателя;
- снижает уровень шума и вибрации;
- продлевает срок службы оборудования.

Экологический стандарт «Евро-5» задает требования к токсичности выбрасываемых в воздух веществ и утверждает нормы по содержанию в газах выхлопных опасных веществ:

- CO – до 0,8 г/км;
- CH – до 0,05 г/км;
- NO_x – до 0,06 г/км.

Легковые автомобили составляют более 75 % автомобильного парка России. Аналитическое агентство «Автостат» [9] провело исследование, которое охватывало российский парк транспортных средств по сегментам и нормам токсичности. В табл. 2 представлена структура парка легковых автомобилей страны по нормам токсичности.

Таблица 2

Структура парка легковых автомобилей России по нормам токсичности [9]

Стандарты бензина	01.01.2015		01.01.2016	
	тыс. шт.	%	тыс. шт.	%
<EURO-2	15931	39,0 %	14695,3	36,0 %
EURO-2	5298,9	13,0 %	5136,2	12,6 %
EURO-3	6081,3	14,9 %	6146,3	15,0 %
EURO-4	11387,7	27,9 %	11562,5	28,3 %
EURO-5	2151,8	5,3 %	3311,9	8,1 %
	40850,7		40852,2	

Согласно исследованию по состоянию на 01.01.2016 в России насчитывалось 40,85 млн легковых автомобилей. Из этого объема 36 % не удовлетворяют нормам токсичности «Евро-2». Нормам «Евро-4» и выше соответствуют 36,4 % парка. По сравнению с предыдущим годом процент легковых автомобилей, соответствующих «Евро-5», вырос на 2,8 % или в количественном выражении на 1160,1 тыс. автомобилей.

Влияние стандарта «Евро-5» на воздушный бассейн г. Пенза

Исследуя положительное влияние введения стандарта «Евро-5» на воздушный бассейн, рассмотрим г. Пензу и ее автомобильный парк (табл. 3). Согласно данным аналитического агентства «Автостат» [9], Пенза находится на 7-м месте по количеству автомобилей на душу населения (297 автомобилей на 1000 жителей).

Таблица 3

Количество зарегистрированных транспортных средств в г. Пензе [9]

Транспортные средства	01.01.2012	01.01.2013	01.01.2014	01.01.2015	01.01.2016	01.01.2017
Мото	1806	1814	1796	1811	1849	1831
Легковые	125 172	133 878	142 780	149 003	155 526	162 883
Грузовые	9962	9915	9953	9917	9929	9942
Автобусы	2676	2781	2802	2786	2762	2753
Итого	139 616	148 388	157 331	163 517	170 066	177 409

Как видно из таблицы, в отличие от остальных транспортных средств, количество которых практически неизменно, значительным образом растет количество легковых автомобилей города. За 5 лет оно выросло на 37 711. Динамика роста количества легковых автомобилей на территории города Пензы приведена в графике (рис. 1).

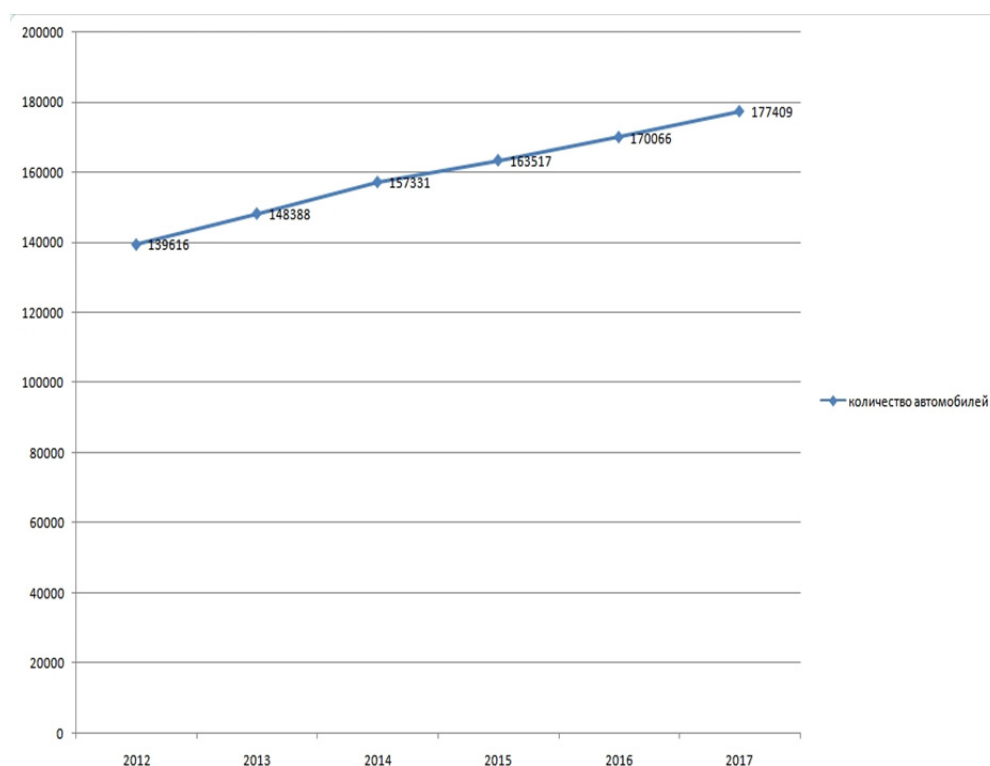


Рис. 1. Динамика количества легковых автомобилей в г. Пенза

Из графика видно, что количество легковых автомобилей из года в год устойчиво растет. Увеличение количества легковых автомобилей на начало 2017 г. по сравнению с началом 2012 г.

составило 32 % (треть). Судя по всему, количество легковых автомобилей города Пензы имеет устойчивую тенденцию к увеличению.

В настоящее время количество легковых автомобилей на основных магистралях Пензы приближается к 90 % от общего объема транспортных средств [10]. Поэтому именно этот вид транспорта и, в большей степени, его резко возросшее в последнее время количество определяют скорость движения всего потока в пиковое время. На сегодняшний момент в Пензе сложилась ситуация, при которой наблюдается ежегодное увеличение автотранспортного парка, сопровождающееся резким увеличением интенсивности движения на городских улицах. Транспортные заторы в г. Пензе стали повседневным явлением, с каждым годом их число и продолжительность неуклонно увеличиваются.

Проблему загрязнения атмосферы города Пензы по-прежнему определяют главным образом высокие концентрации веществ, присутствующих в выбросах автотранспорта (табл. 4).

Таблица 4

Объем выбросов автомобильного транспорта г. Пенза за 2012–2016 гг.

Годы	2012	2013	2014	2015	2016
Среднегодовое количество легковых автомобилей, тыс.	129,5	138,3	145,9	152,2	159,2
Объем выбросов автомобильного транспорта, тыс. тонн	24,5	26,7	27,2	27,2	26,8

Как видим, объем загрязняющих выбросов автомобильного транспорта города с 2012 по 2014 г. увеличивался. После 2014 г. рост выбросов прекратился, а в 2016 г. он даже уменьшился на 0,4 тыс. тонны, при том, что количество автомобилей все пять лет имеет стойкую тенденцию к росту, т.е., несмотря на то, что в Пензе количество автотранспорта с каждым годом растет, динамика последних лет показывает, что состояние атмосферного воздуха в городе улучшается (табл. 4, рис. 2).

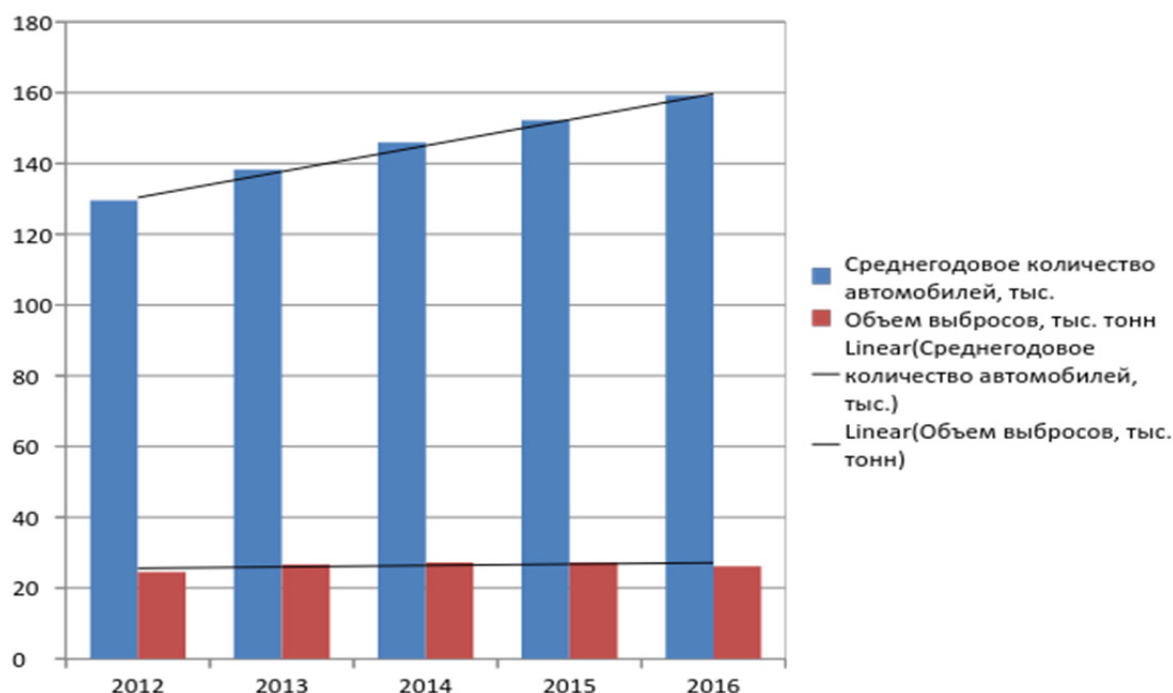


Рис. 2. Динамика количества легковых автомобилей и автомобильных выбросов в г. Пенза, 2012–2016 гг.

Одна из причин заключается в том, что в структуре парка автотранспортных средств города с каждым годом растет количество автомобилей с более высокими экологическими стандартами, от чего напрямую зависит выброс в атмосферу. Высокие экологические стандарты автомобиля позволяют значительно снизить содержание углеводородов, оксидов азота и серы, угарного газа и твердых частиц в выхлопе работающего автомобиля.

В Пензе на улицах с интенсивным движением автотранспорта в зоне жилой застройки проводится мониторинг состояния атмосферного воздуха. За последние четыре года – с 2013 по 2016 г. отмечается тенденция снижения удельного веса проб атмосферного воздуха, не отвечающих гигиеническим нормативам на улицах с интенсивным движением автотранспорта с 1,1 % в 2013 г. до 0,05 % в 2016 г. (было проведено 240 исследований). Это связано со значительным обновлением автопарка за последние годы, оказывающим положительное влияние на воздушный бассейн города [10].

Заключение

Итак, для формирования эффективной системы экологического менеджмента на уровне регионов необходимо совершенствование существующих экологических стандартов эмиссии токсичных и канцерогенных веществ автотранспортом. Нормативы токсичности выбросов автомобилей должны базироваться на показателях качества процесса работы двигателя транспортного средства (например, интегральный показатель LK [11]), отражающих количественное содержание продуктов неполного сгорания топлива в единице объема отработавших газов. Подобный подход позволит мотивировать инновационную деятельность производителей автомобилей.

Безусловно, экологический стандарт «Евро-5» благоприятно влияет на воздушный бассейн городов. В то же время необходимо обратить внимание на то, что ужесточения требований «Евро» достигли некоторого технологического предела. Рассматривая нормы, представленные в табл. 1 данной статьи, можно обратить внимание, что, начиная с «Евро-5», требования по снижению выбросов всех вредных веществ ужесточаются крайне мало. Считаем, что дальнейшее уменьшение количества и качества вредных выбросов невозможно без революционных прорывов в области нейтрализации выбросов.

Библиографический список

1. Экологическая доктрина Российской Федерации : [одобр. распоряжением Правительства РФ от 31.08.2002 № 1225-р]. – М., 2002.
2. Графкина, М. В. Охрана труда и основы экологической безопасности / М. В. Графкина // Автомобильный транспорт : учеб. – М., 2013. – 192 с.
3. Шумилин, А. Д. Исследование транспортного шума на улицах города Пензы / А. Д. Шумилин, Н. Н. Вершинин, Л. А. Авдоница // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 97–103.
4. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <http://www.gks.ru/> (Дата обращения: 9.01.2017).
5. Вайсблум, М. Е. Развитие требований ЕЭК ООН в отношении экологических показателей АТС и двигателей / М. Е. Вайсблум // Журнал автомобильных инженеров. – URL: <http://www.aepress.ru/j0056/art007.htm> (дата обращения: 15.01.2017).
6. Министерство энергетики Российской Федерации. – URL: <http://minenergo.gov.ru> (Дата обращения: 15.01.2017).
7. Бибина, Н. В. Государственные стратегии энергоэффективности: российский и зарубежный опыт / Н. В. Бибина // Студенческий научный форум. – 2016 : материалы VIII Междунар. студ. электрон. науч. конф. (г. Москва, 15 февраля – 31 марта 2016 г.). – URL: <http://www.scienceforum.ru/2016/1652/21655> (Дата обращения: 15.01.2017).
8. Шумилин, А. Д. Мониторинг и прогнозирование влияния автомобильного транспорта на воздушный бассейн города Пенза / А. Д. Шумилин, Н. Н. Вершинин, Л. А. Авдоница // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 97–103.
9. Аналитическое агентство Автостат. Инфографика. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/> (Дата обращения: 10.02.2017).
10. Об утверждении программы комплексного развития транспортной инфраструктуры муниципального образования – город Пенза на 2017 – 2026 годы. – URL: <http://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc&base=RLAW021&n=110139&dst=100012#0> (Дата обращения: 10.02.2017).
11. Бадалян, Л. Х. Концептуальные основы нормирования эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух автотранспортными средствами / Л. Х. Бадалян, В. Н. Курдюков, А. М. Алейникова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2011. – № 4 (10). – С. 35–41.
12. Вершинин, Н. Н. Дискретное математическое моделирование комплексного вредного воздействия химических веществ на работников гальванического производства / Н. Н. Вершинин, В. В. Костиневич, Н. В. Камардина // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 170–172.

Вершинин Николай Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nversinin@yandex.ru

Шумилин Алексей Дмитриевич

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

Волкова Алиса Владимировна

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

Авдониная Любовь Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: laviks@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность.* Одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха является автомобильный транспорт. Снижение его вредного воздействия на воздушный бассейн может быть достигнуто за счет перехода на использование транспортных средств и топлива экологических стандартов «Евро-5». *Материалы и методы.* В статье рассматриваются технические нормы стандартов «Евро», структура парка легковых автомобилей России по нормам токсичности. *Результаты.* На примере г. Пенза проведено исследование влияния перехода автомобильного транспорта на экологический стандарт «Евро-5» на воздушный бассейн города Пенза.

Ключевые слова: автотранспортные средства, экологическая сертификация, экологический стандарт, «Евро-5», отработавшие газы, объем загрязняющих веществ, воздушный бассейн.

Vershinin Nikolay Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of technospheric safety,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Shumilin Aleksey Dmitrievich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Volkova Alisa Vladimirovna

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Avdonina Lyubov' Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of technospheric safety,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. *Background.* One of the main sources of air pollution is road transport. Reducing its harmful effects on the air can be achieved by switching to the use of vehicles and fuel environmental standards «Euro-5». *Materials and methods.* The article discusses the technical provisions of the standards «Euro», the structure of Park of passenger cars of Russia to norms of toxicity. *Results.* For example, Penza investigated the effect of transition of road transport on the ecological standard «Euro-5» the air basin of the city of Penza.

Key words: motor vehicles, environmental certification, an environmental standard, «Euro-5», the exhaust gases, pollutant volume air.

УДК 656.13

Вершинин, Н. Н.

Исследование влияния перехода автомобильного транспорта на экологический стандарт «Евро-5» на воздушный бассейн города / Н. Н. Вершинин, А. Д. Шумилин, А. С. Волкова, Л. А. Авдониная // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 83–89. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-12.

БЕЗОПАСНОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В. В. Терентьев

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам безопасности дорожного движения. Обеспечение безопасности дорожного движения является одной из важных социально-экономических и демографических задач Российской Федерации. Аварийность на автомобильном транспорте наносит огромный материальный и моральный ущерб как обществу в целом, так и отдельным гражданам [1, с. 150]. В марте 2016 г. состоялось заседание президиума Государственного совета, посвященное вопросам безопасности дорожного движения в Российской Федерации, на котором Президент России Владимир Путин заявил: «Сохранение жизни, здоровья тысяч граждан нашей страны – важнейшее направление государственной политики. Уровень безопасности дорожного движения напрямую влияет на устойчивость социально-экономического развития, на эффективную работу всей транспортной инфраструктуры России».

Сложившаяся обстановка с аварийностью на дорогах характеризуется следующими причинами:

- постоянно возрастающая мобильность населения;
- уменьшение перевозок общественным транспортом и увеличение перевозок личным транспортом;
- несоответствие между увеличением количества автомобилей и транспортно-эксплуатационным состоянием улично-дорожной сети (УДС), не рассчитанной на современный состав и интенсивность транспортных потоков.

Современный уровень приобретения автомобилей в городах России уже превысил 200 единиц на 1 тыс. жителей, в то время как дорожно-транспортная инфраструктура рассчитана на 60–100 единиц на 1 тыс. жителей. Такое увеличение автотранспорта на дорогах негативно отражается на безопасности дорожного движения, так как существует большой временной интервал между увеличением транспортных единиц и реконструкцией имеющейся сети дорог, строительством новых дорог, отвечающих современным транспортно-эксплуатационным характеристикам [2, с. 304].

В результате образовавшейся ситуации происходит ухудшение условий дорожного движения, увеличение количества заторов, нарушение экологической обстановки, расхода топлива, а также рост количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

Анализ дорожно-транспортного травматизма показывает, что происходит постепенный рост количества ДТП, в результате которых пострадавшие получают травмы, характеризующиеся различной степенью тяжести. Неэффективная организация работы по оказанию медицинской помощи лицам, пострадавшим в результате ДТП, является одной из основных причин высокой смертности. Около 60 % летальных исходов при совершении дорожно-транспортных происшествий приходится на догоспитальный период, что явно указывает на необходимость скорейшего прибытия скорой помощи на место аварии и незамедлительного перемещения пострадавшего в больницу [3, с. 27].

Актуальность вопросов безопасности дорожного движения растет с каждым годом, что является закономерностью, связанной с ростом количества автомобильного транспорта и увеличением интенсивности коммерческих перевозок. Одним из важных факторов, влияющих на вышеуказанную безопасность, является степень профессиональной подготовки водителя, его водительского стажа работы, психоэмоционального состояния и скорость реакции водителя на изменение ситуации на дороге, зависящей от соблюдения режима труда и отдыха [4, с. 18].

Как показывает анализ, причиной подавляющего большинства происшествий при перевозках пассажиров и грузов является «человеческий фактор»:

- низкая квалификация водительского состава;
- игнорирование правил дорожного движения и правил перевозки пассажиров и грузов;
- отсутствие внутрихозяйственного контроля за соблюдением режима труда и отдыха водителей, их физическим состоянием, технической исправностью подвижного состава.

На сегодняшний день из более 300 тысяч хозяйствующих субъектов, осуществляющих перевозки пассажиров и грузов, 35 тысяч имеют лицензии на перевозки пассажиров автобусами, 9 тысяч – удостоверения допуска к осуществлению международных автоперевозок, 23 тысячи – осуществляют заказные перевозки пассажиров по уведомлениям. Таким образом, регулирующую транспортную деятельность осуществляют всего 67 тысяч перевозчиков, что составляет около 22 % от общего числа хозяйствующих субъектов. Доля автобусов и грузовых автомобилей, принадлежащих физическим лицам, составляет почти 47 %. Соответственно, около половины автобусов и грузовых автомобилей не попадает под нормы законодательства, предъявляемые к юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям. Во многих предприятиях сокращены службы и инженерно-технические работники по безопасности дорожного движения, не выполняются предрейсовые и послерейсовые медицинские осмотры, не ведется работа по повышению профессиональной подготовки водителей и технического персонала, не проводится работа по техническому обслуживанию и ремонту транспортных средств, не проводится проверка технического состояния подвижного состава юридических лиц при выпуске их на линию [5, с. 259].

Как результат – из 11 091 ДТП по причине нарушения Правил дорожного движения водителями грузовых автомобилей, произошедших в 2015 г., 7759 совершены по вине водителей грузовых транспортных средств, находящихся в собственности физических лиц.

Рассматривая причины аварий на транспорте, можно прийти к выводу, что сложившаяся практика обусловлена существующими в обществе стереотипами, когда при наличии нескольких аварийных факторов, как правило, имеющих место при развитии неблагоприятной ситуации, причиной аварии обычно считаются действия водителя. Таким образом, водитель отвечает за аварию практически всегда, а прочие обстоятельства, на фоне которых произошел наезд, опрокидывание или столкновение транспортных средств, не получают должной оценки, и лица, ответственные за «попутные» аварийные факторы, в абсолютном большинстве случаев к ответственности не привлекаются. Однако очевидно, что немалое количество аварий на автотранспорте обусловлено плачевным состоянием техники. Причем, по нашему мнению, действующее транспортное законодательство не вполне обеспечивает надлежащий контроль как за состоянием автомобилей, так и за качеством используемых запчастей [6, с. 30].

В целях обеспечения безопасности дорожного движения при перевозке пассажиров и грузов представляется необходимым установление единых требований для юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и физических лиц, эксплуатирующих автобусы или грузовые автомобили вне зависимости от организационно-правовой формы и видов перевозок (регулярные, по заказу, для собственных нужд).

В частности, необходимо законодательное закрепление обязанности физических лиц, имеющих на праве собственности или ином законном основании автобусы или грузовые автомобили:

- обеспечивать соответствие технического состояния транспортных средств требованиям законодательства о безопасности дорожного движения и о техническом регулировании и не допускать транспортные средства к эксплуатации при наличии у них неисправностей, угрожающих безопасности дорожного движения;
- обеспечивать исполнение установленной обязанности по страхованию гражданской ответственности владельцев транспортных средств;
- оснащать транспортные средства тахографами;
- соблюдать нормы времени непрерывного управления автобусом или грузовым автомобилем и перерывов в таком управлении, установленные Правилами дорожного движения Российской Федерации;
- соблюдать требования по размещению и креплению грузов, предусмотренные правилами обеспечения безопасности перевозок пассажиров и грузов автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом.

Кроме того, необходимо ввести дополнительные требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям и физическим лицам, эксплуатирующим автобусы или грузовые автомобили, осуществлять стоянку транспортных средств на время ежедневного (междусменного) отдыха водителей, а также на время иного их простоя продолжительностью более восьми часов только на разрешенных или специализированных парковках. Данная норма позволит обязать субъектов транспортной деятельности обеспечивать стоянку транспортных средств в разрешенных местах.

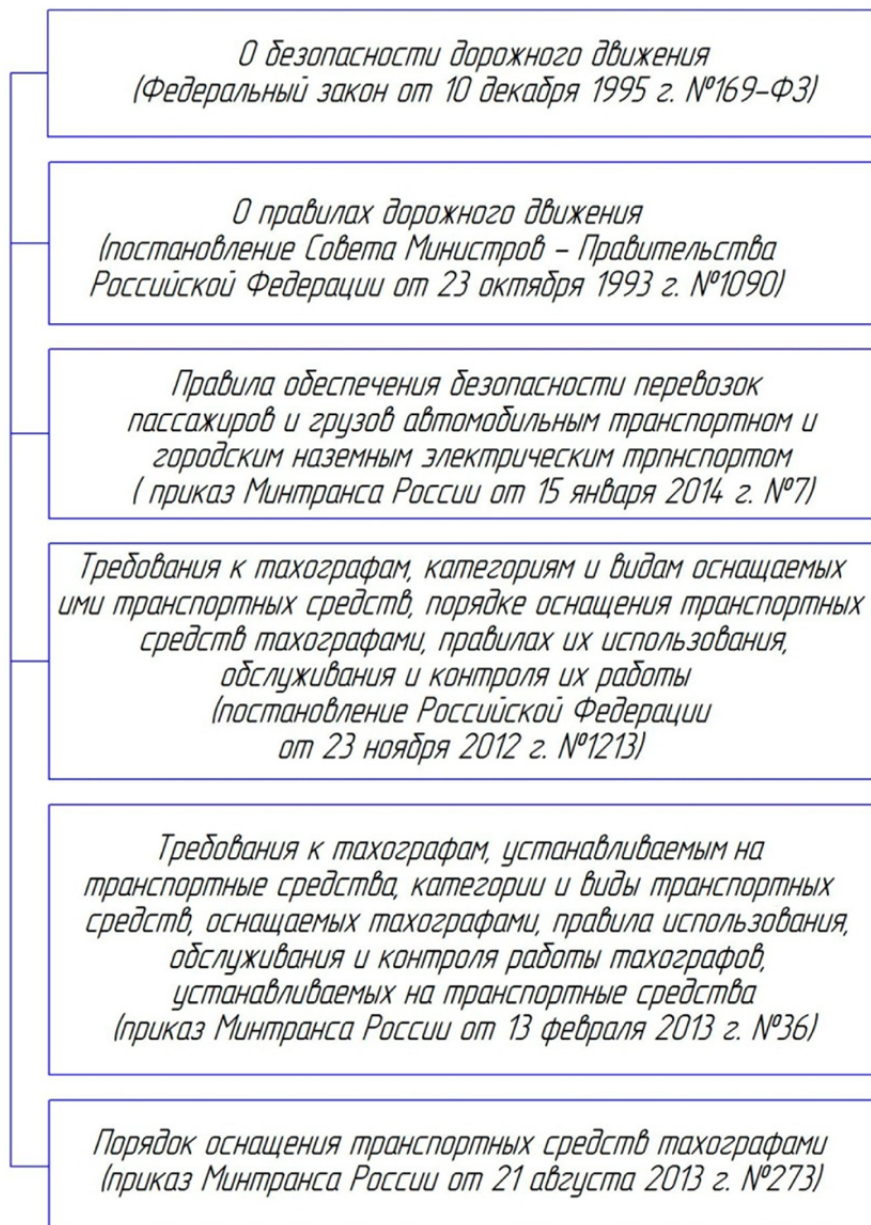


Рис. 1. Законодательное обеспечение в сфере организации перевозок грузов автомобильным транспортом

Действенным механизмом понуждения к соблюдению требований законодательства при осуществлении перевозок является тахографический контроль – контроль режимов труда и отдыха водителей и скоростных режимов движения при осуществлении национальных и международных перевозок. Цель такого контроля – снизить риски, связанные с возникновением происшествий по причине утомления водителей, снижения внимания и его наиболее критического проявления – засыпания за рулем.

В Российской Федерации создана система тахографического контроля. Как показывает практика, инспекторы контрольно-надзорных органов могут осуществлять контроль не более 10 % от общего количества транспортных средств, подлежащих оснащению тахографами. Кроме того, состояние дел, связанных с дорожно-транспортными происшествиями, повлекшими наступление тяжких последствий для здоровья или смерть из-за несоблюдения режима труда и отдыха водителями, свидетельствуют о недостаточности мер административной ответственности:

– за несоблюдение режима труда и отдыха несет административную ответственность водитель автотранспортного средства, а не работодатель (юридическое лицо, индивидуальный предприниматель), нанявший данного работника. Однако очевидна зависимость работника от работодателя при привлечении к сверхурочной работе;

– действующее административное законодательство не предусматривает ответственности в отношении руководителей автотранспортных предприятий и индивидуальных предпринимателей за нарушение режима труда и отдыха водителей транспортных средств. Вместе с тем обязанность по обеспечению безопасной эксплуатации машин, механизмов, режима труда и отдыха работников лежит именно на работодателе;

– не налажен учет рабочего времени водителей, управляющих автотранспортным средством, при осуществлении перевозок пассажиров по заказу либо для обеспечения собственных нужд юридического лица или индивидуального предпринимателя.

Кроме того, в целях реализации комплексной системы контроля за безопасностью дорожного движения целесообразно установить обязанность предоставления информации из тахографов, допущенных к установке и эксплуатации на территории Российской Федерации, и технических средств, осуществляющих регистрацию и хранение в некорректируемом виде координат и параметров движения транспортных средств по сигналам системы ГЛОНАСС или ГЛОНАСС совместно с другими действующими глобальными навигационными спутниковыми системами в специализированные центры приема и обработки данных с использованием инфраструктуры федеральной государственной автоматизированной информационной системы в случае передачи данных в автоматизированном режиме. Информация о нарушениях норм, связанных с управлением транспортным средством, в том числе информация о текущем непрерывном времени управления транспортным средством, скорости движения и координатах транспортного средства, должна передаваться в центры автоматизированной фиксации административных правонарушений в области дорожного движения ГИБДД МВД России, а также заинтересованным федеральным органам исполнительной власти.

Реализация указанной меры с установлением периодичности предоставления информации о нахождении транспортного средства позволит контролировать деятельность водителей, налагать штрафные санкции (в том числе и за нарушение скоростного режима). В дальнейшем возможен переход к передаче информации в надзорные органы и владельцам транспортных средств в режиме реального времени.

Библиографический список

1. Оверин, Ю. В. Влияние квалификации водителя на безопасность дорожного движения / Ю. В. Оверин // Наука и современность – 2013. – № 20. – С. 150–154.
2. Дорохин, С. В. Профилактика безопасности дорожного движения как мера снижения чрезвычайных ситуаций на дорогах. / С. В. Дорохин // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – Т. 1. – С. 303–307.
3. Степченков, А. В. Анализ основных факторов, влияющих на безопасность дорожного движения / А. В. Степченков // Наука без границ. – 2016. – № 3 – С. 24–28.
4. Моисеев, Ю. И. Перспективы применения тахографов с ГЛОНАСС в Российской Федерации / Ю. И. Моисеев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 18–20.
5. Зольников, И. В. Профилактическая работа в воинской части по организации безопасности дорожного движения / И. В. Зольников, Д. А. Евдокимов, В. А. Кудряшов // Образование и наука в современных условиях – 2016. – № 1 (6). – С. 258–262.
6. Позднышов, А. Н. Анализ основных факторов, влияющих на безопасность дорожного движения / А. Н. Позднышов, Е. С. Смирнова // ЮРИСТЪ – ПРАВОВЕДЪ. – 2012. – № 2 (51). – С. 28–33.

Терентьев Вячеслав Викторович

магистрант,
Тульский государственный университет
(300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)
E-mail: vvt62tyazan@yandex.ru

Terent'ev Vyacheslav Viktorovich

master degree student,
Tula State University
(300012, 92 Lenina avenue, Tula, Russia)

Аннотация. Рассмотрены вопросы повышения безопасности дорожного движения на автомобильном транспорте. Отсутствие должного контроля за выполнением законодательства о безопасности дорожного движения влечет за собой несоблюдение тре-

Abstract. The article considers the issues of improving road safety in road transport. Lack of proper control over the implementation of the legislation on road safety entails not complying with the requirement for the technical condition of rolling stock, as well as violations of

бования к техническому состоянию подвижного состава, а также нарушение режима труда и отдыха водителей транспортных средств. Эти обстоятельства являются одними из основных причин дорожно-транспортных происшествий, влекущих за собой тяжелые последствия. В целях обеспечения безопасности дорожного движения при перевозке пассажиров и грузов представляется необходимым установление единых требований для юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и физических лиц, эксплуатирующих автобусы или грузовые автомобили вне зависимости от организационно-правовой формы и видов перевозок. Использование навигационных спутниковых систем в целях обеспечения контроля на автомобильном транспорте также позволит повысить безопасность дорожного движения.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, автомобильный транспорт, дорожно-транспортное происшествие, тахограф.

the working and rest regime of drivers of vehicles. These circumstances are one of the main causes of road traffic accidents, which lead to serious consequences. In order to ensure the safety of traffic in the transport of passengers and goods, it seems necessary to establish uniform requirements for legal entities, individual entrepreneurs and individuals operating buses or trucks, regardless of the organizational and legal form and types of transportation. The use of navigation satellite systems to provide control on road transport will also improve road safety.

Key words: road safety, road transport, road traffic accident, tachograph.

УДК 656.13

Терентьев, В. В.

Безопасность автомобильных перевозок: проблемы и решения / В. В. Терентьев // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 90–94. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-13.