ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 3 (23) 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Мартынов В. В., Мартынов П. В. Метод обработки и анализа выборочных данных 3

Зенов А. Ю., Мясникова Н. В. Применение нейросетевых алгоритмов в системах охраны периметра 15

Захарикова Е. Б., Макарычев П. П. Имитационное моделирование систем и сетей массового обслуживания средствами приложения к пакету Mathcad..... 25

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Шаблицкий А. Ю., Доля В. К. Метрологический самоконтроль в интеллектуальном акустическом пьезоэлектрическом датчике 36

Федотов В. Н., Ашанин С. Е., Федотов А. В., Беженцев А. Ю. Экспериментальная оценка влияния непреднамеренных помех на эффективность многоканальных систем управления оружием 46

Ординарцева Н. П., Фурман О. В. Формирование результата измерения в условиях неопределенности 55

Галий С. Н., Доля В. К. Оптимизация резонансного высокочастотного пьезоэлектрического элемента антенной решетки для задач неразрушающего контроля 62

Бойков И. В. Приближенное решение задачи рассеяния излучений на малых телах произвольной формы 71

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Артемов И. И., Генералова А. А., Артемова Н. Е. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя поршневых колец на основе оценки его характеристик с применением теории фракталов..... 85

Марков А. И., Кушников В. А. Задача оперативного диагностирования дефектов фюзеляжа вертолета МИ-8 при проведении предварительной оценки его ремонтопригодности.....95

Кирпичев В. А., Букатый А. С., Чирков А. В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных гладких деталей.....102

Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д., Земсков Р. А. Совершенствование систем обеспечения пассивной безопасности легковых автомобилей на основе компьютерного моделирования процессов функционирования пиротехнических элементов 110

Соломонидина С. И., Дурина Т. А. Газовые плавильные агрегаты на водородном топливе для плавки литейных сплавов.....120

Зиновьев Р. С., Савицкий В. Я. Технологическая реализация метода направленной разориентации армирующего наполнителя при изготовлении втулок из полимерных композиционных материалов 127

Грабовский А. А. Определение и оценка крутящего момента в двигателях внутреннего сгорания с различными схемами кривошипно-шатунного механизма.....139

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.23

В. В. Мартынов, П. В. Мартынов

МЕТОД ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ВЫБОРОЧНЫХ ДАННЫХ

Аннотация. Представлены результаты разработки метода установления закона распределения выборочных данных.

Ключевые слова: выборка, закон распределения, метод, энтропия, количество информации, коэффициент избыточности.

Abstract. The article introduces the results of the development of a method of establishing the law of distribution of sample data.

Key words: sample, distribution law, method, entropy, amount of information, redundancy factor.

Введение

Одной из задач, часто возникающих в практической деятельности, является обработка экспериментальных данных, представляющих собой часть членов некоторой достаточно большой совокупности (называемой генеральной), отобранных из нее для получения сведений обо всей совокупности. Обработкой этих данных занимается раздел математической статистики, называемый теорией выборок.

Основная цель выравнивания выборочных данных состоит в установлении закона их распределения. Это позволяет решать разнообразные практические задачи, в том числе прогнозировать вероятность появления различных событий. Существующие методы [1–5] не всегда позволяют установить вид закона распределения однозначно. Это связано в том числе и с тем, что распределения имеют близкие статистические свойства, в частности, широко используемые в различных приложениях гамма-распределение, логарифмически нормальное и Вейбулла. Кроме этого, при определенных значениях параметра, характеризующего форму, гамма-распределение и распределение Вейбулла приближаются к нормальному распределению. В связи с этим актуальной является разработка метода, в основе которого лежат критерии, учитывающие специфические свойства распределений.

Теоретическая основа

Пусть по выборке x, содержащей информацию о законе распределения ее данных $x_1, \ldots, x_n$, требуется отдать предпочтение одной из конкурирующих гипотез G_j, $j = 1, \ldots, k$, если известны распределения данных для каждой из них, т.е. $p(x/G_j)$. Если согласиться с утверждением о том, что никакая обра-

ботка не может увеличить количество содержащейся в выборке информации, то тогда наилучшим образом отдать предпочтение можно, вычислив количество информации для каждой из гипотез, т.е. поставив в соответствие каждому распределению некоторое число. Последующее сравнение чисел между собой либо с каким-то эталоном позволит выбрать распределение, воспроизводящее максимум исходной информации или (что то же самое) обеспечивающее ее минимальные потери.

Из теории информации известно, что основной информационной числовой характеристикой случайной величины является энтропия (H), которую можно трактовать и как меру рассеяния случайной величины; в этом смысле она подобна дисперсии. Но если дисперсия является адекватной мерой рассеяния лишь для специальных распределений вероятностей случайных величин, то энтропия не зависит от типа распределения, поэтому может использоваться и в качестве его количественной характеристики.

Меру уменьшения энтропии (в нашем случае выборки x) определяет количество информации (I). Из этого следует, что количество информации и энтропия характеризуют одну и ту же ситуацию, но с качественно противоположенных сторон: величина I – это количество информации, которое требуется для снятия неопределенности H. Если неопределенность снимается полностью, то количество полученной информации равно изначально существовавшей неопределенности. При частичном снятии неопределенности ее исходное значение представляет собой сумму полученного количества информации I_t и оставшейся неснятой неопределенности H_t, т.е. потерь информации

$$H = I_t + H_t. \tag{1}$$

Таким образом, задача выбора закона распределения сводится к вычислению величины $I_{t,\,j}$ для каждой из гипотез, поэтому требует определенного представления данных выборки x. В теории информации для этого обычно выполняется процедура их квантования по уровню и по времени с последующим вычислением вероятностей $p(x_i)$ появления любого из m уровней при снятии любого из n отсчетов при условии, что одни и те же уровни могут появляться неоднократно, т.е. a_i раз. Тогда вероятности появления квантованных уровней определятся как

$$p\left(x_i\right) \approx \frac{a_i}{n} \quad i = 1, ..., m\,, \tag{2}$$

а выражение для I_t при условиях, что $\sum_{i=1}^{m} p(x_i) = 1$ и отсчеты являются независимыми, будет иметь следующий вид [6]:

$$I_t\left(x\right) = -n\sum_{i=1}^{m} p(x_i) \times \log p(x_i)\,. \tag{3}$$

Поскольку все $p(x_i) \neq 0$, функция I_t всегда определена. В тех же случаях, когда необходимо включить в рассмотрение значения $p(x_i) = 0$, принимается, что соответствующее произведение $p(x_i) \times \log p(x_i) = 0$.

Основание логарифма в (2) выбирается произвольно. В теории информации, например, для этого используется число 2.

Рассматривая изложенное применительно к решаемой задаче, заметим, что процедура квантования практически полностью совпадет с применяемой в статистике процедурой построения эмпирического распределения данных на основе подсчета частот их попадания в интервалы, число которых зависит от объема выборки, а цена одного интервала определяется отношением диапазона варьирования данных к числу интервалов. Значения частот попадания данных в каждый интервал и есть эмпирическая кривая распределения выборки x.

Сопоставление процедур показывает, что частоты попадания данных выборки в интервалы есть не что иное, как величина a_i, число интервалов – число уровней их квантования m, цена интервала – шаг квантования по уровню Δx, а количество отсчетов – объем выборки n. Это делает корректным представление эмпирического распределения данных в терминах теории информации (рис. 1) и позволяет использовать выражение (3) для определения количества содержащейся в них информации.

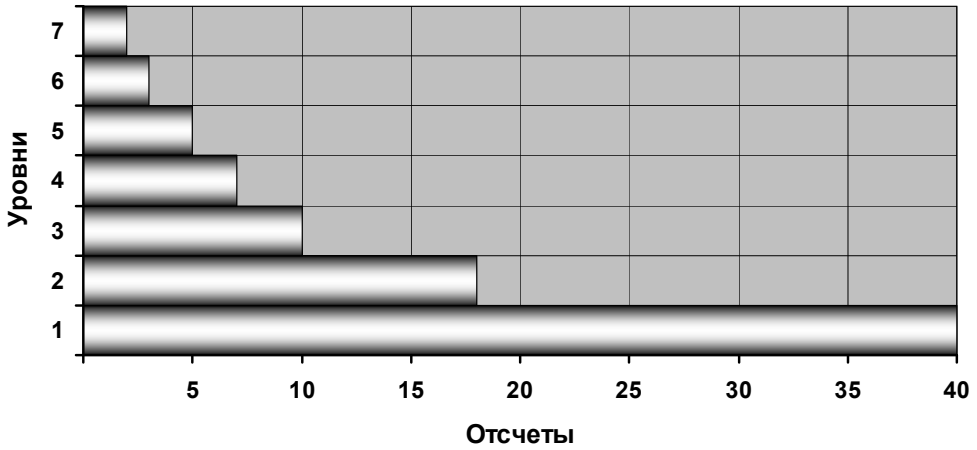


Рис. 1. Информационное представление эмпирического распределения выборочных данных

Для определения значений I_t данных, относящихся к каждой из гипотез G_j, необходимо определить значения вероятностей $p_j(x_i)$. Это можно сделать, используя значения плотностей вероятностей $f_j(x_i)$ каждого из распределений, вычисленные для среднего значения $x_{c,\,i}$ каждого из m уровней, т.е.

$$p_j(x_{c,\,i}) = f_i(x_{c,\,i}) \times \Delta x. \tag{4}$$

Если затем сопоставить значения $I_{t,\,j}$ со значением $I_t(x)$, являющимся максимальным в силу того, максимальным количеством информации обладает сама выборка x, то на основании фундаментальной леммы Неймана – Пирсона [7] распределение, для которого отклонение $I_{t,\,j}$ от $I_t(x)$, называемое коэффициентом избыточности:

$$k_{t,\,j} = \frac{I_t(x) - I_{t,\,j}}{I_t(x)}, \tag{5}$$

окажется минимальным и будет искомым как наиболее правдоподобное, имеющее наибольшую «плотность информации», т.е. количество информации, приходящееся на один отсчет, равно

$$i_{t,j} = \frac{I_t}{n} = -\sum_{i=1}^{m} p(x_i) \times \log p(x_i)\,, \qquad (6)$$

и потому снимающее неопределенность о содержащихся в выборке данных в наибольшей степени. В связи с этим назовем разработанный метод методом информационного критерия.

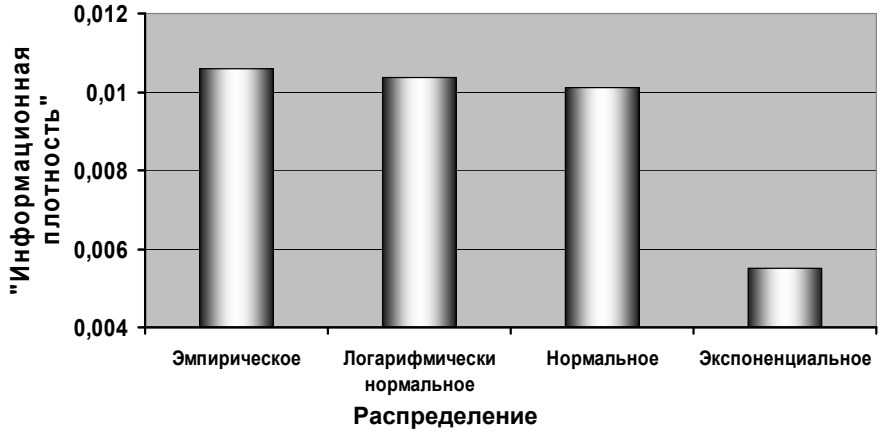
Практическая реализация

Практическую реализацию метода вначале рассмотрим на данных, имеющих наиболее часто используемые в различных технических приложениях распределения: логарифмически нормальное, гамма, Вейбулла, экспоненциальное. Данные получены методом генерации на ЭВМ и с целью внесения искажений, имитирующих помехи, округлены до целочисленных значений.

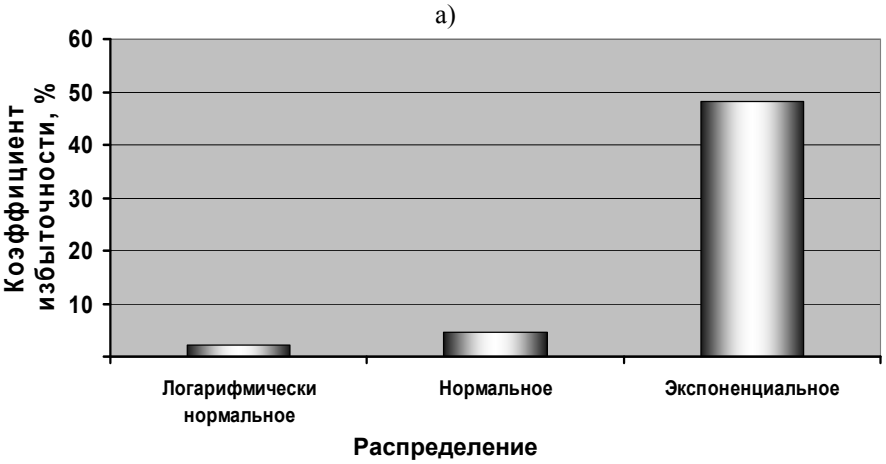
Типичные примеры полученных результатов представлены на рис. 2–5 и убедительно свидетельствуют о том, что применение метода, даже при наличии помех, позволяет найти именно то распределение, которое было использовано для получения исходных данных.

Вместе с тем анализ результатов позволил установить, что эффективность метода в значительной степени зависит от того, насколько вычисленные по выборочным данным оценки параметров распределений соответствуют их истинным значениям, т.е. параметрам распределения генеральной совокупности, или, говоря иначе, в какой степени они обладают свойствами состоятельности, несмещенности и эффективности. Широко применяемый на практике метод моментов, основанный на представлении параметров распределений через моменты низких порядков (обычно первых трех), замене их оценками моментов, найденных с использованием выборочных данных, и решении полученных уравнений, дает приемлемые результаты только при значительном объеме выборочных данных. В противном случае погрешность оценок параметров будет большой, а иногда оценки могут оказаться вне допустимой области. Кроме этого, оценки, найденные по методу моментов, не всегда извлекают из данных всю имеющуюся в них информацию, поэтому более целесообразным является использование метода максимального правдоподобия, поскольку известно, что если несмещенные эффективные оценки параметров существуют, то уравнения правдоподобия имеют единственное решение и позволяют найти оценки параметров, которые имеют бóльшую вероятность оказаться ближе к их истинным значениям и делают данные, содержащихся в выборке, более близкими к реальным.

Заметим, что для некоторых распределений, например нормального и экспоненциального, оценки параметров, найденные с помощью метода моментов, совпадают с соответствующими оценками максимального правдоподобия. В связи с этим оценки, полученные методом моментов, могут быть использованы как первое приближение для метода максимального правдоподобия.



а)

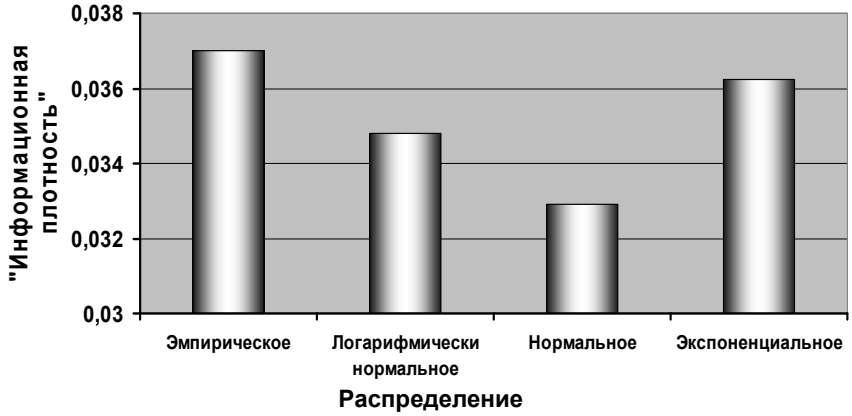


б)

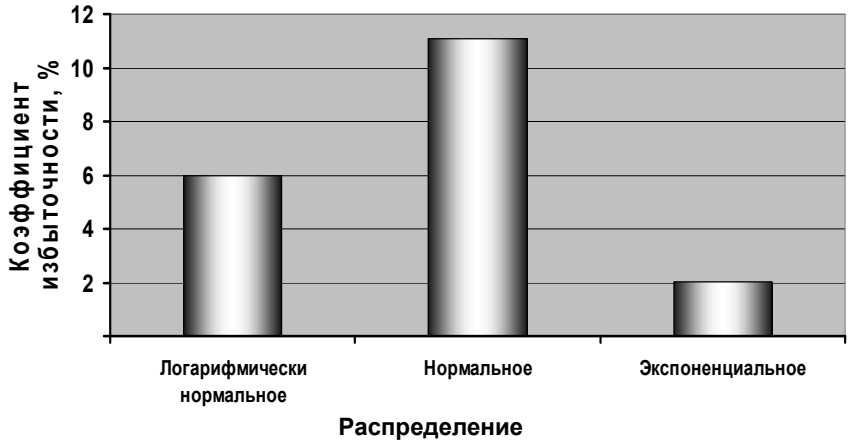
Рис. 2. Пример результатов применения метода к обработке данных, имеющих логарифмически нормальное распределение

Рассмотрим применение метода к обработке данных, полученных в ОАО «Тантал» г. Саратова по результатам проведения статистических исследований надежности автоматических токарных станков ТПАРМ-100 с целью оценки значимости изменения их состояния при эксплуатации в условиях автоматизированного многономенклатурного производства. Считается, что, поскольку такое оборудование относится к классу сложных управляемых объектов, объединяющих большое число различных по физической природе элементов, каждый из которых в отдельности не оказывает большого влияния на вероятность возникновения отказов объекта в целом, то статистической моделью времени его безотказной работы должно быть экспоненциальное распределение [1, 4, 8]. Если гипотеза окажется достоверной, то это означает, что отказы являются следствием не значимых изменений состояния объекта, а лишь неблагоприятного сочетания внешних и внутренних факторов, т.е. носят чисто случайный (внезапный) характер и не влияют на его эксплуатационные свойства.

Результаты обработки представлены на рис. 6 и позволяют констатировать следующее.

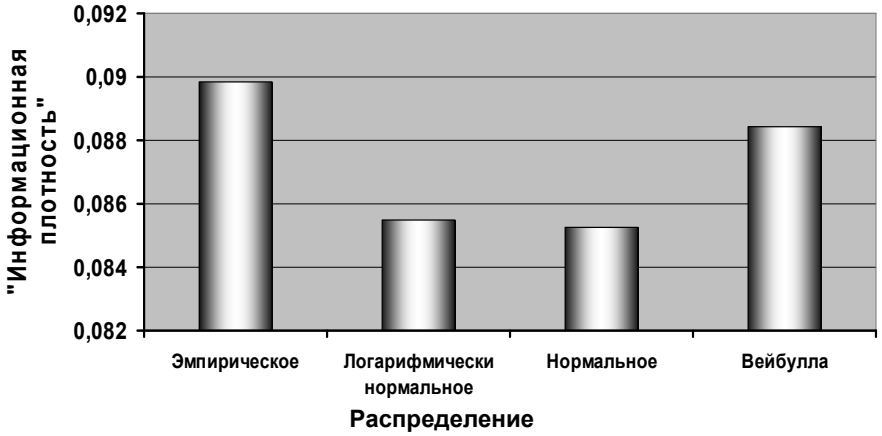


а)



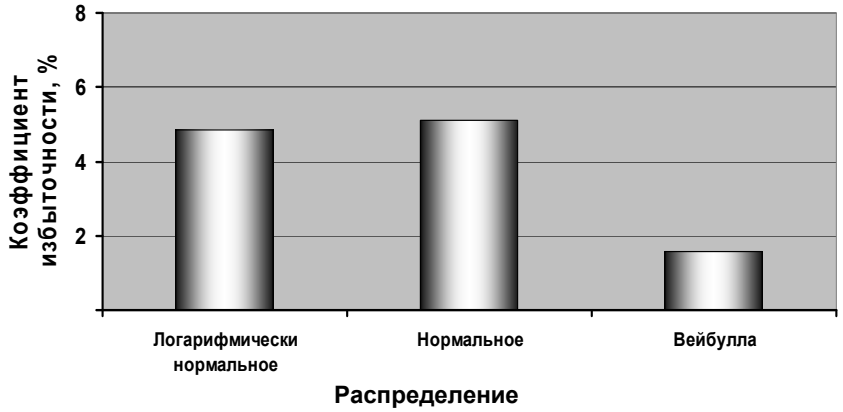
б)

Рис. 3. Пример результатов применения метода к обработке данных, имеющих экспоненциальное распределение



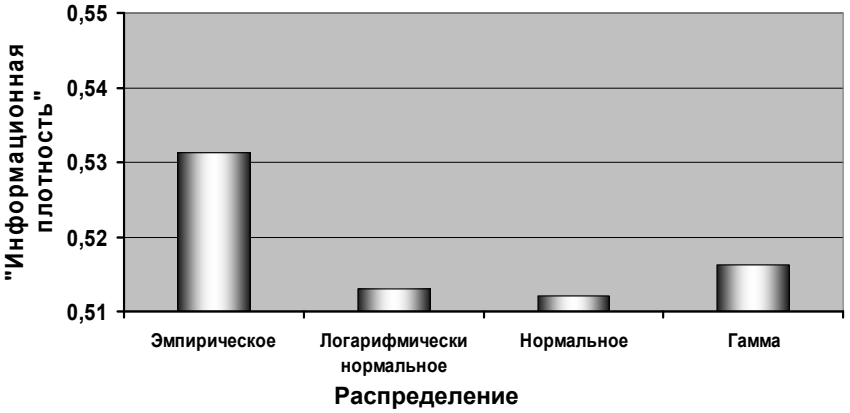
а)

Рис. 4. Пример результатов применения метода к обработке данных, имеющих распределение Вейбулла

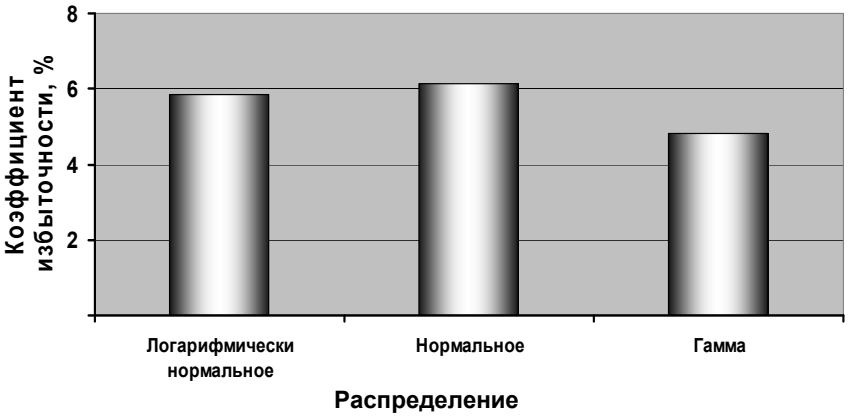


б)

Рис. 4. Окончание



а)

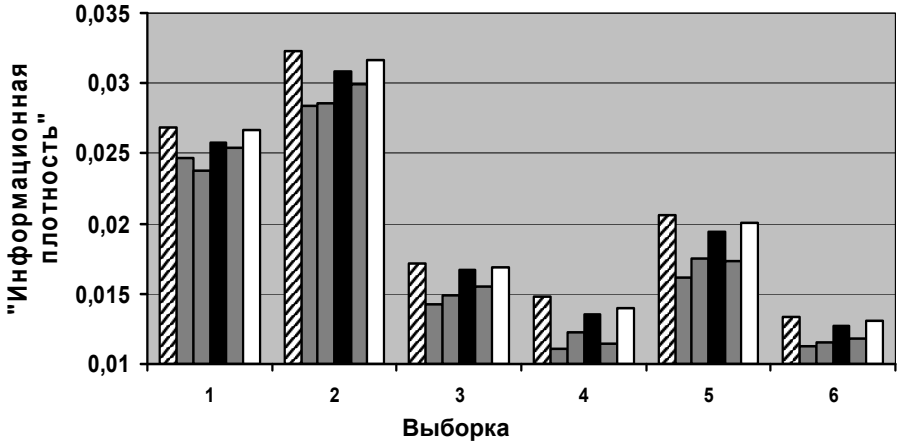


б)

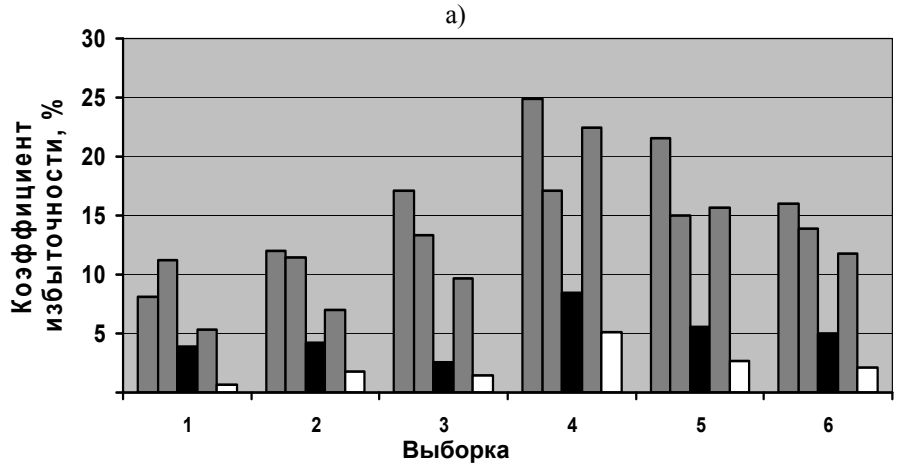
Рис. 5. Пример результатов применения метода к обработке данных, имеющих гамма-распределение

1. Статистической моделью данных во всех случаях является распределение Вейбулла с параметром, характеризующим форму, меньше 1. Это означает, что интенсивность отказов является монотонно убывающей и объясня-

ется присутствием в данных отказов, возникновение которых связано, во-первых, с неоптимальностью алгоритмов анализа системой управления информации от датчиков обратной связи при управлении рабочими органами станков; во-вторых, с несовершенством конструкции подсистемы подачи технологической жидкости в зону резания. Наработки станков на эти отказы имели небольшие значения, а их количество в общей совокупности в большинстве случаев было преобладающим, что и привело к распределению, в котором наибольшая частота попаданий пришлась на первый интервал (рис. 7).



а)



б)

▨ – эмпирическое распределение; □ – распределение Вейбулла;
■ – экспоненциальное распределение; ■ – другие распределения

Рис.6. Результаты применения метода к данным об отказах станков ТПРАМ-100

2. Экспоненциальное распределение обеспечивает представление данных с погрешностью, в среднем всего на 2,7 % большей, чем распределение Вейбулла. С учетом изложенного в п. 1, а также того, что распределения, которые в теории надежности используются в качестве статистических моделей времени безотказной работы в условиях возникновения постепенных отказов, вызванных процессами износа и старения (логарифмически нормальное и нормальное), имели наименьшую «информационную ценность», использова-

ние экспоненциального распределения в качестве статистической модели времени безотказной работы сложных управляемых объектов является вполне корректным. Причем это касается не только решения простых задач, связанных с вычислением показателей надежности и эффективности их использования в составе станочных комплексов, но и задач управления самими комплексами на организационно-технологическом уровне (оперативно-производственное планирование) и уровне оперативно-диспетчерского регулирования хода производственного процесса (выполнение плановых заданий).

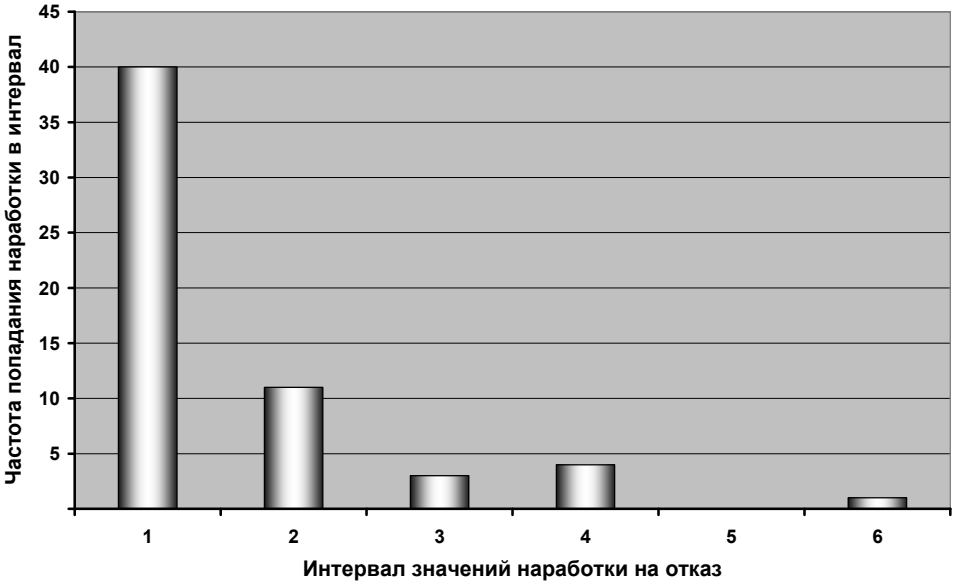


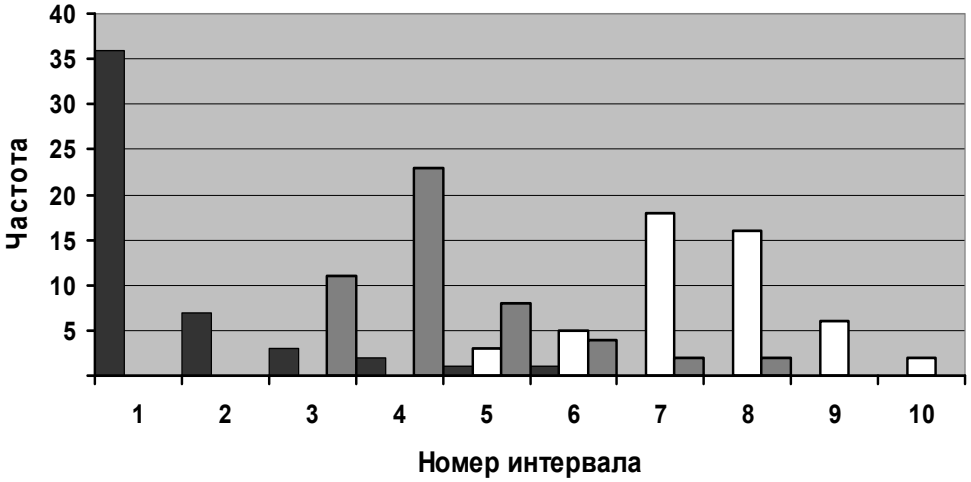
Рис. 7. Типичная гистограмма распределения отказов станков ТПРАМ-100

Заключение

Материалы выполненных исследований позволяют сделать вывод о том, какие специфические свойства распределений позволяют учесть метод информационного критерия. Эти свойства связаны с адекватным количественным отображением степени отклонения (т.е. деформации) кривой эмпирического распределения выборочных данных от идеального распределения абсолютно случайных величин, которым в соответствии с центральной предельной теоремой математической статистики является нормальное распределение, т.е. от симметричного унимодального распределения к распределению монотонно убывающего вида (рис. 8) [4, 9]. Это означает, что метод позволяет дать объективную количественную оценку способности распределений отображать содержащуюся в выборке информацию о физическом механизме, лежащем в основе процесса деформации. Прежде всего это касается распределений, имеющих близкие статистические свойства: логарифмически нормального, гамма и Вейбулла (рис. 9).

Логарифмически нормальное распределение применяется для отображения процессов, в которых наблюдаемое значение случайной величины со-

ставляет случайную долю ее предыдущего значения и является результатом умножения большого числа небольших ошибок.



□, ■ – симметричное и асимметричное унимодальные, ■ – монотонное

Рис. 8. Специфика распределений, отображаемая методом информационного критерия

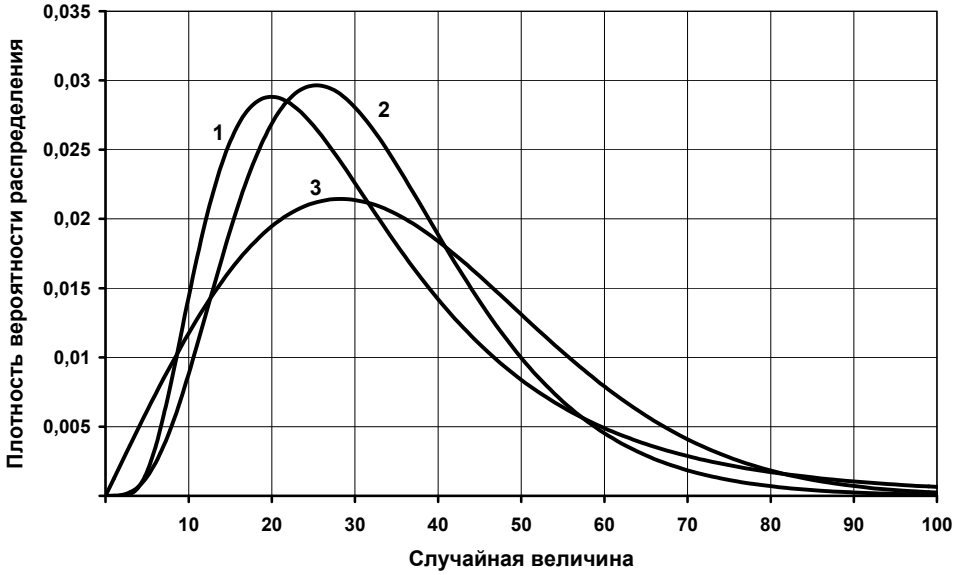


Рис. 9. Плотности логарифмически нормального распределения (1), гамма-распределения (2) и распределения Вейбулла (3)

Гамма-распределение хорошо отображает процессы, в которых появление случайной величины есть результат n независимых событий, происходящих с постоянной интенсивностью.

Распределение Вейбулла является предельной моделью отображения распределения минимальных значений n случайных величин (при $n \to \infty$), имеющих различные исходные распределения, ограниченные слева.

Изложенное означает, что степень деформации у каждого из распределений будет различной и соответственно при выравнивании выборочных данных каждым из них будет различной степень искажения содержащейся в данных информации. Из этого следует, что имеется возможность дальнейшего развития предложенного метода в направлении поиска показателя, отображающего степень искажения содержащейся в выборке информации количественно. Найденный показатель может быть положен в основу конструирования критерия, позволяющего проводить проверку принадлежности выборочных данных к распределению конкретного вида.

Список литературы

1. **Баублис, А. Б.** Статистические модели в АСУ машиностроительного предприятия / А. Б. Баублис. – М. : Машиностроение, 1984. – 245 с.
2. **Солонин, И. С.** Математическая статистика в технологии машиностроения / И. С. Солонин. – М. : Машиностроение, 1972. – 208 с.
3. **Кокс, Д. Г.** Анализ данных типа времени жизни / Д. Г. Кокс, Д. Оукс ; пер. с англ. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 191 с.
4. **Хан, Г.** Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро; пер. с англ. – М. : Мир, 1968. – 396 с.
5. **Герцбах, И. Б.** Модели отказов / И. Б. Герцбах, Х. Б. Кордонский ; под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Советское радио, 1966. – 166 с.
6. Вероятностные методы в вычислительной технике / А. В. Крайников, Б. А. Курдиков, А. Н. Лебедев и др. ; под ред. А. Н. Лебедева и Е. А. Чернявского. – М. : Высш. шк., 1986. – 312 с.
7. **Ван Трис, Г.** Теория обнаружения, оценок и модуляции / Г. Ван Трис. – М. : Советское радио, 1972. – Т. 1. – 744 с.
8. **Хазов, Б.Ф.** Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б. Ф. Хазов, Б. А. Дидусев. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
9. **Кармадонов, А. Ф.** Деформация кривых плотности распределения наработки изделий в зависимости от режимов загружения и качества изготовления / А. Ф. Кармадонов, В. М. Ляховецкий // Надежность и контроль качества. – 1976. – № 1. – С. 69–75.

Мартынов Владимир Васильевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и компьютерного моделирования
технологического оборудования
в машино- и приборостроении,
Саратовский государственный
технический университет имени
Ю. А. Гагарина

E-mail: v_martynov@mail.ru

Martynov Vladimir Vasilyevich
Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of processing equipment
design and computer simulation
in mechanical and instrument engineering,
Saratov State Technical University
named after Y. A. Gagarin

Мартынов Павел Владимирович
аспирант, Саратовский государственный
технический университет имени
Ю. А. Гагарина

E-mail: mpv1990@mail.ru

Martynov Pavel Vladimirovich
Postgraduate student, Saratov State
Technical University named
after Y. A. Gagarin

УДК 519.23

Мартынов, В. В.

Метод обработки и анализа выборочных данных / В. В. Мартынов, П. В. Мартынов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 3–14.

УДК 681.3.01

А. Ю. Зенов, Н. В. Мясникова

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ В СИСТЕМАХ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА

Аннотация. Рассмотрены принципы построения систем охраны периметра и обработки сигналов с выдачей сигнала тревоги в случае вторжения нарушителя. В системах, построенных с применением нейросетевых алгоритмов, становится возможным определять не только факт нарушения периметральной границы объекта, но и классифицировать нарушителя при минимальном уровне ложных срабатываний.

Ключевые слова: охрана периметра, объект, нейронная сеть, обнаружение, классификация, нарушитель.

Abstract. The article considers the principles of construction of systems of perimeter protection and signal processing that trigger an alarm in case of intrusion of the offender. In the systems, built by using neural network algorithms, it is possible to determine the fact of violations of the border perimeter of an object, as well as to classify the offender at the minimum level of false positives.

Key words: protection of the object perimeter, neural network, detection, classification, violator.

Введение

В настоящее время из-за роста масштабов криминально-террористических угроз правительством Российской Федерации принимаются меры по усилению охраны территорий важных и особо важных объектов, в том числе и государственной границы. Эти меры, в конечном счете, направлены на ужесточение требований, предъявляемых к системам охраны периметра, которые призваны обеспечить безопасность охраняемого объекта. Системы охранной сигнализации предназначены для обнаружения вторжения нарушителей. Они, как правило, стационарно располагаются по периметру охраняемого объекта и обеспечивают «раннюю» выработку сигнала тревоги, необходимую для своевременной и эффективной реакции сил охраны на вторжение [1].

Практически все современные охранные системы, вне зависимости от физического принципа действия, основываются на одном общем подходе. Блок обработки сигнала определяет текущий уровень сигнала, генерируемого датчиком, и отслеживает изменения этого уровня. Если сигнал окажется выше или ниже установленных порогов, то процессор генерирует сигнал тревоги, который, вероятно, вызван появлением нарушителя на охраняемом периметре.

В реальных условиях работа системы охраны периметра сопровождается влиянием помех, вызванных природно-климатическими или индустриальными факторами. Наличие шумов и помех приводит к флуктуациям «базового» уровня сигнала и маскирует полезный сигнал, создаваемый реальным нарушителем, это увеличивает количество ошибок первого и второго рода.

Если говорить о методах уменьшения влияния помеховых факторов, то все они сводятся к трем: качественный монтаж, регулярные технические осмотры и применение алгоритмических методов (фильтрация сигналов).

Нейронные сети – это адаптивные системы для обработки и анализа данных, которые представляют собой математическую структуру, имитирующую некоторые аспекты работы человеческого мозга и демонстрирующие такие его возможности, как способность к неформальному обучению, способность к обобщению и кластеризации неклассифицированной информации, способность самостоятельно строить прогнозы на основе уже предъявленных временных рядов. Возможность обучения является одним из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять обобщения. Это означает, что в случае успешного обучения сеть сможет создать верный результат на основании данных, которые или отсутствовали в обучающей выборке, или были неполными, зашумленными и частично искаженными. Главным их отличием от других методов является то, что нейросети в принципе не нуждаются в заранее известной модели, а строят ее сами только на основе предъявляемой информации. Именно поэтому нейронные сети и генетические алгоритмы вошли в практику всюду, где нужно решать задачи прогнозирования, классификации, управления, иными словами, в области человеческой деятельности, где есть плохо алгоритмизуемые задачи, для решения которых необходимы либо постоянная работа группы квалифицированных экспертов, либо адаптивные системы автоматизации, каковыми и являются нейронные сети.

1. Типовая структура блока обработки сигналов с использованием нейросетевого анализатора

Рассмотрим алгоритм обнаружения нарушителя, который включает в себя регистрацию данных и их обработку с выработкой сигнала тревоги в случае проникновения нарушителя на охраняемую территорию.

Сигнал с датчика поступает в блок обработки сигналов (БОС). Обработка исходного сигнала в общем случае состоит из нескольких этапов. Типовая схема блока обработки сигналов с применением нейросетевого анализатора приведена на рис. 1. Схема, как правило, включает адаптивный к сигналу фильтр, блок цифровой обработки (DSP – digital signal processor), а нейросетевой анализатор – это блок принятия решения (вторжение и его тип).

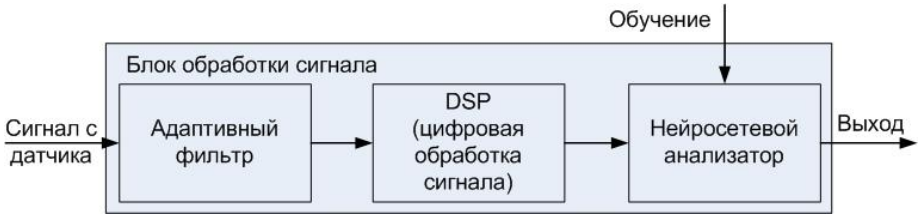


Рис. 1. Схема блока обработки сигналов

2. Универсальная модель для сейсмических сигналов и вибрационных процессов. Выбор метода обработки

Сейсмические сигналы и вибрационные процессы могут быть описаны универсальной моделью: процесс представляет собой комбинацию узкопо-

лосных составляющих аддитивно смешанных с широкополосным шумом. Параметры составляющих полностью характеризуют процесс. При изменении сигнала меняются амплитуды (мощности) и частоты составляющих, а также их количество.

Для выделения узкополосных составляющих возможными алгоритмами обработки сигнала на первом этапе могут быть: метод разложения на эмпирические моды (Empirical mode decomposition, или EMD) или более простой метод экстремальной фильтрации, дающий близкие результаты [2]. Метод разложения на эмпирические моды включает выделение экстремумов сигнала, построение огибающих, вычисление среднего, извлечения деталей, применение процедуры к остаткам. Метод экстремальной фильтрации включает выделение экстремумов сигнала, разделение на знакопеременные составляющие экстремальным фильтром, вычисление параметров этих составляющих (например, средней частоты и дисперсии в скользящем окне), применение процедуры к остаткам, образующимся при удалении очередной знакопеременной составляющей.

Сами составляющие и (или) их параметры позволяют судить о процессе, получить оценки спектральных характеристик, выделить свободные и вынужденные колебания, сформировать диагностические признаки, существенно упростить параметрический анализ и уменьшить его трудоемкость, применяя его не непосредственно к сигналу, а к выделенным составляющим.

С учетом временных ограничений для выделения информативных составляющих и принятия решения предпочтение отдано более быстродействующему методу экстремальной фильтрации. Упрощение алгоритма и снижение трудоемкости достигается за счет отсутствия в алгоритме сплайн-интерполяции при выделении огибающих сигнала и упрощенного вычисления текущего значения частоты по расстоянию между экстремумами.

3. Фильтрация и формирование диагностических признаков

Рассмотрим метод экстремальной фильтрации более подробно.

Знакопеременную составляющую можно выделить путем центрирования относительно скользящего среднего. Наиболее простым является метод, в котором используются лишь экстремальные значения $x_{эi}$, где $i = 1, 2, ..., m$. Сглаживание производится оператором вида

$$x_{ci} = 0,25x_{эi-1} + 0,5x_{эi} + 0,25x_{эi+1}, \quad (1)$$

который соответствует пропусканию данных через цифровой фильтр нижних частот.

Первая, высокочастотная, составляющая определяется из соотношения

$$x_{pi} = x_{эi} - x_{ci}. \quad (2)$$

Составляющая может быть выделена непосредственно из экстремумов следующим образом:

$$x_{pi} = -0,25x_{эi-1} + 0,5x_{эi} - 0,25x_{эi+1}. \quad (3)$$

Далее преобразования вида (1), (3) повторяются над составляющей x_{pi}.

Затем происходит вычисление параметров для всех составляющих p (амплитуды A_i, частоты $f_i = \dfrac{n_i}{2\Delta tN} = \dfrac{n_i}{2T}$, i = 1, .., .p), которые позволяют сформировать первичные диагностические признаки.

Рассмотрим предложенный подход к экспресс-анализу вибросигналов в системах охранной сигнализации. Основные принципы экспресс-анализа изложены в работах [3, 4].

На рис. 2 показан сигнал на выходе вибродатчика, а на рис. 3 – выделенные знакопеременные составляющие, представленные своими экстремумами для одного из анализируемых участков.

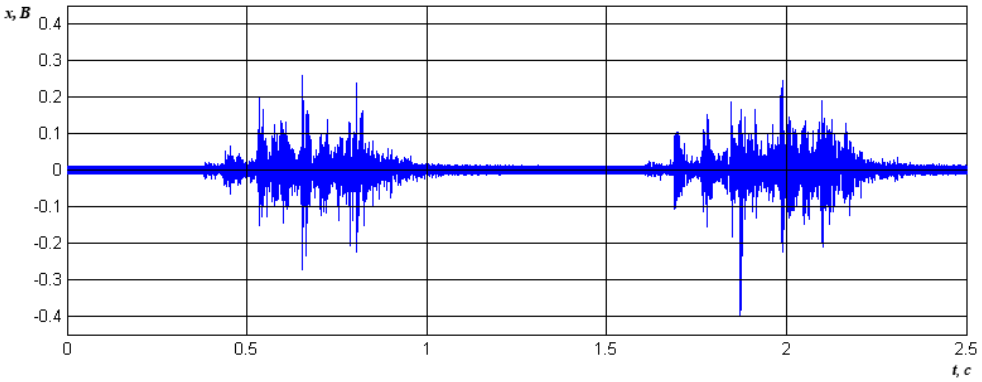


Рис. 2. Сигнал с датчика

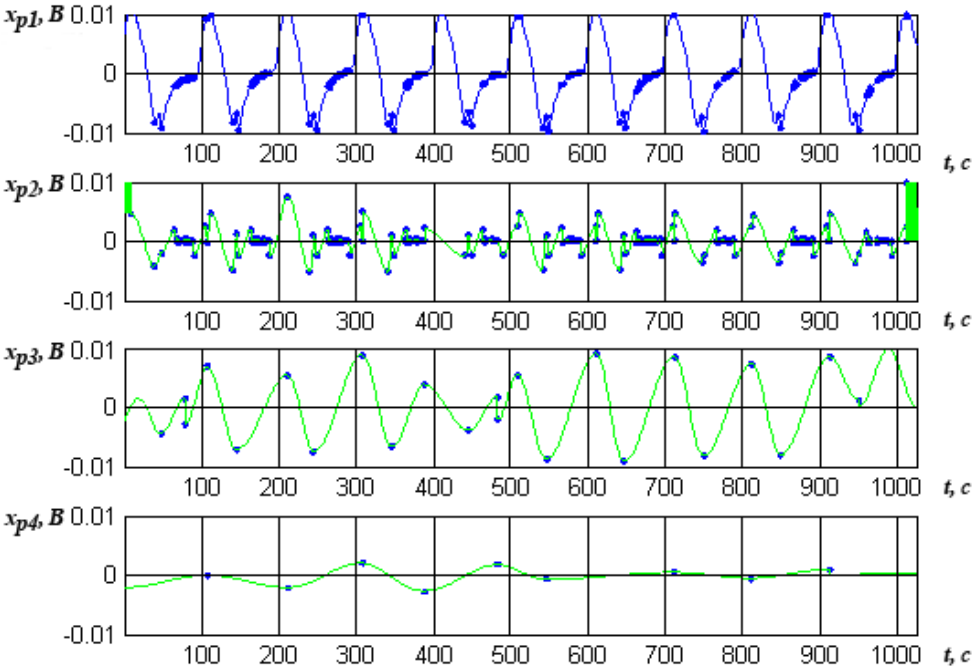


Рис. 3. Знакопеременные составляющие одного из участков анализа

При переходе от сейсмошума к сигналу, генерируемому при вторжении в зону ответственности, существенно меняется частота составляющих и их амплитуды (и, соответственно, мощности). Это иллюстрирует рис. 4, где на верхнем графике показан сигнал, а на втором и третьем – частоты f_i и амплитуды A_i выделенных составляющих в скользящем окне, привязанном к началу интервала анализа. Здесь $i = 1...p$, а p – количество выделенных составляющих. Видно, что при обнаружении наблюдается уменьшение частоты (высокочастотные шумы маскируются более мощным сигналом) и увеличение амплитуды.

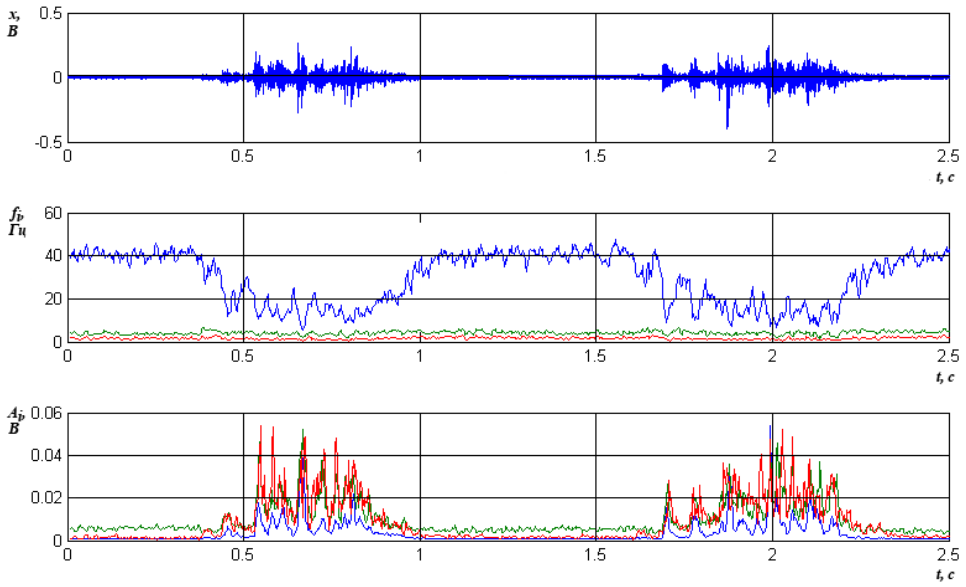


Рис. 4. Сигнал x и параметры составляющих: f_i, A_i, $i = 1...p$

Совокупность A_i и f_i образует время-частотное распределение сигнала.

При приближении объекта к датчику увеличивается соотношение сигнал/шум, и частотные свойства регистрируемого сигнала будут определяться возмущением – амплитуда выделяемых составляющих увеличивается, а частота, наоборот, уменьшается. Следовательно, можно установить разделяющую границу частот шум-сигнал.

Вероятно, возможна и обратная ситуация, когда шуму будет соответствовать низкочастотная область. В этом случае сигналу будут соответствовать более высокочастотные сигналы с бóльшими амплитудами.

Известно, что амплитуда является косвенным признаком в задаче обнаружения, так как она сильно зависит от расстояния до объекта. Поэтому предложено сформировать диагностический признак для разделения сигнал/шум в виде отношения A_i / f_i. Этот диагностический признак более контрастно разделяет классы.

Известно, что экстремумы сигнала несут информацию о самой высокочастотной узкополосной составляющей. Если удалить (отфильтровать) из сигнала эту составляющую, то получим сглаженную кривую, экстремумы

которой несут информацию о следующей узкополосной составляющей. Процедуру можно выполнять до тех пор, пока не будет получена последовательность со знакопеременными экстремумами – самая низкочастотная узкополосная составляющая. Таким образом, возможно осуществление алгоритма адаптивной фильтрации.

4. Обнаружение и классификация с помощью нейронной сети

Для отделения сигналов, создаваемых нарушителем от шумов и помех, на третьей и заключительной части обработки в БОС выполняется анализ данных, основанный на принципе нейронной сети. Применение нейронной сети обеспечивает высокую надежность обнаружения при низком уровне ложных срабатываний.

Среди всего множества нейросетевых архитектур можно выделить базовую архитектуру – многослойные сети (рис. 5).

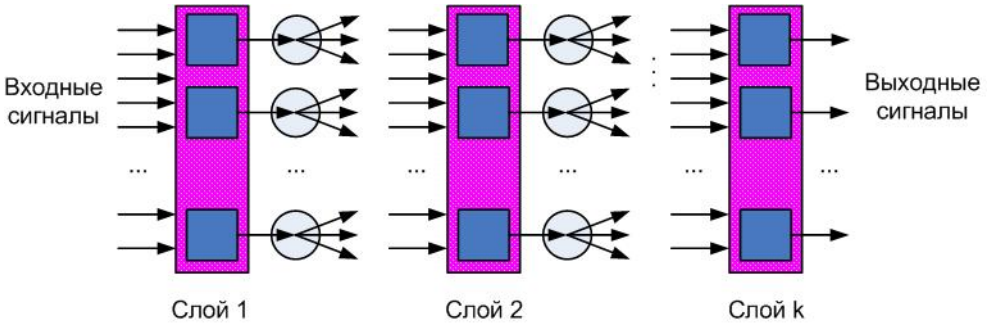


Рис. 5. Многослойная нейронная сеть

В данной архитектуре нейроны расположены в несколько слоев. Нейроны первого слоя получают входные сигналы, преобразуют их и через точки ветвления передают нейронам второго слоя. Далее срабатывает второй слой и т.д. до k-го слоя, который выдает выходные сигналы. Если не оговорено противное, то каждый выходной сигнал i-го слоя подается на вход всех нейронов $(i + 1)$-го (полносвязные сети). Как правило, число нейронов в каждом слое может быть любым и никак заранее не связано с количеством нейронов в других слоях. Особое распространение получили трехслойные сети, в которых каждый слой имеет свое наименование: первый – входной, второй – скрытый, третий – выходной.

Для работы нейронной сети требуется ее предварительно обучить. Алгоритм обучения нейронной сети заключается в том, что выход последнего слоя нейронов сравнивается с образцом обучения, и из разницы между желаемым и действительным делается вывод о том, каковы должны быть связи нейронов последнего слоя с предыдущим. Затем подобная операция производится с нейронами предпоследнего слоя. В итоге по нейросети от выхода к входу составляется таблица изменения весов связей. Нейронная сеть, в общем виде, обладает двумя отличительными свойствами: способностью к обучению на некотором множестве примеров и стабильно распознавать (прогнозировать) новые ситуации с высокой степенью точности, причем в условиях сильных внешних помех, таких как появление противоречивых или неполных

значений. Обучение системы сводится к работе алгоритма подбора весовых коэффициентов, который действует без непосредственного участия оператора.

Обучение предполагает регистрацию исходных сигналов от датчиков, установленных на периметре. Уникальные образы или параметры различных событий проходят процедуру идентификации с помощью многопараметрического анализа, учитывающего пересечение пороговых уровней, временные и частотные свойства сигналов, частоты гармоник и т.п. Эти образы сигналов могут быть позже использованы для разработки алгоритмов классификации тревожных и нетревожных сигналов в реальном времени с помощью нейронных сетей. Обучение охранной системы выполняется как часть общей настройки системы – путем добавления в базу данных образов сигналов, которые являются результатом воздействия шумовых факторов и характерных откликов конкретной ограды.

Авторы имеют опыт использования многослойных сетей.

Преимущество радиально-базисной сети в том, что ее структура формируется автоматически. Наиболее подходящей нейросетью применительно к системам охраны периметра является радиально-базисная сеть с нулевой ошибкой. В отличие от большинства других многослойных сетей, радиально-базисная не имеет патологий сходимости, архитектура проста и построена на прямых связях.

5. Применение нейросетевых алгоритмов на массивах экспериментальных данных

Итак, на рис. 6 представлено обучение с помощью радиально-базисной сети с нулевой ошибкой. Первый график – желаемый выход сети (обнаружение); второй график – амплитуда сигнала в системе вибрационной защиты; третий график – зафиксированный факт нарушения периметра охраняемого объекта. Данная сеть обучалась на сигнале «перекус сетчатого полотна». Тестирование на другом виде воздействия («перелаз через ограждение») показало правильное срабатывание обнаружителя.

Для систем сейсмических наблюдений использовались многослойные сети (*newff*): первая сеть, на вход которой подавались предыдущие и текущие значения диагностического признака A_i / f_i и текущей частоты f_i, выполняла обнаружение, а вторая анализировала результат срабатывания первой сети на предыдущих интервалах. Для обнаружения транспортных средств анализ проводится скользящим окном длительностью 3 с, а сигнал тревоги формируется через каждую секунду.

На основе метода может быть построен и классификатор «человек – группа людей». При обнаружении техники идет разделение сигналов на два класса – «сигнал – фон». При движении человека или группы людей идет постоянное чередование фона и сигнала, причем при проходе одного человека и проходе группы людей это чередование разное: при проходе одного человека ритм более четкий, а при проходе группы – чередование носит более хаотичный характер.

Еще один «умный» обнаружитель может быть построен на основе нечеткой логики. Преимущество такого обнаружителя в том, что принцип работы сети отражает бесспорный факт – разделяемые классы являются пересе-

кающимися («слабый» сигнал мало отличается от фона, медленно движущаяся машина и быстро идущая группа людей имеют сходные спектры и т.д.). Если, например, нужно обнаруживать только транспорт и не реагировать на пешеходов-нарушителей, то можно соответствующим образом обучить сеть Сугено. Для обучения использовались данные – комбинация фона, проходов и проездов. Желаемый выход формировался следующим образом: выход сети «0», если на входе наблюдается фон или регистрируется проход группы людей (человека); выход сети «1» при проезде машины.

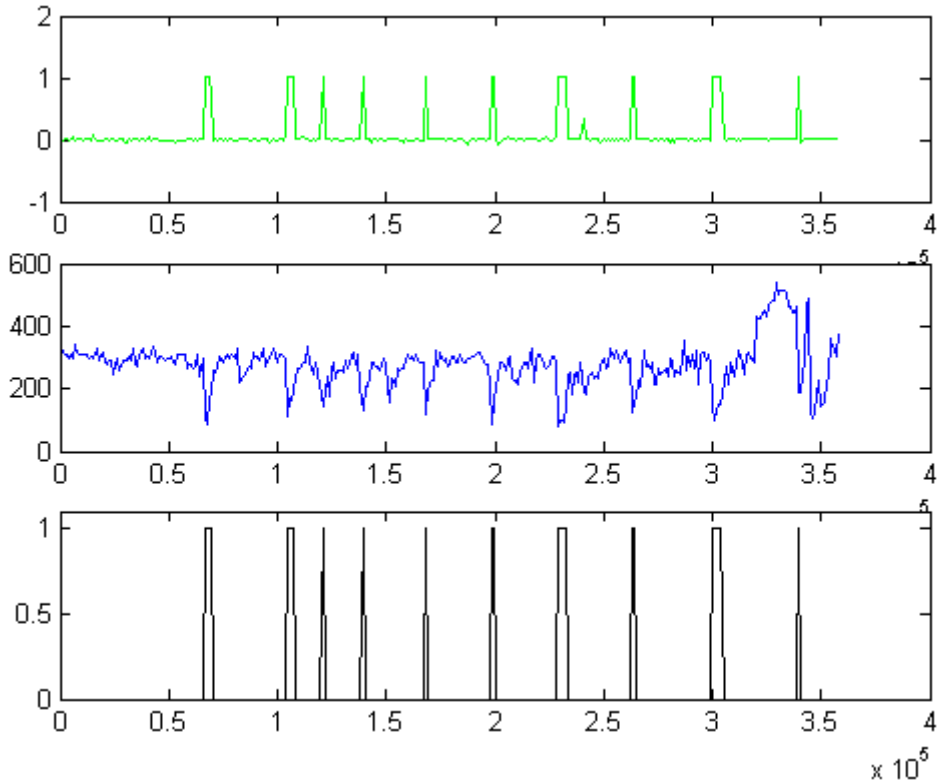


Рис. 6. Срабатывание радиально-базисной сети с нулевой ошибкой

Для создания, обучения и тестирования сети использовался редактор Anfisedit среды Matlab. Структура сети: четыре входа, один выход, количество функций принадлежности – 5 на каждый вход, тип функции принадлежности psigmf. На вход сети подаются параметры высокочастотной составляющей – средняя, минимальная, максимальная частоты и нормированный по среднеквадратичному отклонению размах амплитуд на 3-секундном интервале наблюдения.

Для данных «проезд автомобиля, бег группы, проезд автомобиля» на рис. 7 показано обнаружение транспорта. При этом выход сети – «–1».

Заключение

В системах охранной сигнализации нейронная сеть представляет собой вычислительную систему, алгоритм решения задач в которой представлен

в виде сети пороговых элементов с динамически перестраиваемыми коэффициентами и алгоритмами настройки, независимыми от размерности сети пороговых элементов и их входного пространства. Внедрение нейросетевых структур в алгоритмы БОС позволяет приблизиться к разработке охранных систем с искусственным интеллектом, повысить помехозащищенность системы охраны периметров в целом. Повышается как средняя наработка на ложную тревогу, так и вероятность обнаружения с последующей классификацией типа нарушителя. Охранная система с искусственным интеллектом выполняет задачу обнаружения и распознавания автоматически, учитывая при анализе все характеристики исходного сигнала. Процесс обработки происходит значительно быстрее и дает более достоверный результат. Использование интеллектуальных систем охраны периметра не требует вмешательства оператора для анализа тревожных сигналов и определения признаков реального вторжения или ложной тревоги. Они способны выдать информацию типа да/нет, а также определить тип события – перелаз через ограду, перекус сетчатого полотна заграждения, порыв ветра и т.п. В системах сейсмических наблюдений выполняются распознавание вторжения в зону ответственности, а также определяется тип нарушителя. В результате система сама принимает решение – является данный сигнал свидетельством реальной тревоги или помехи.

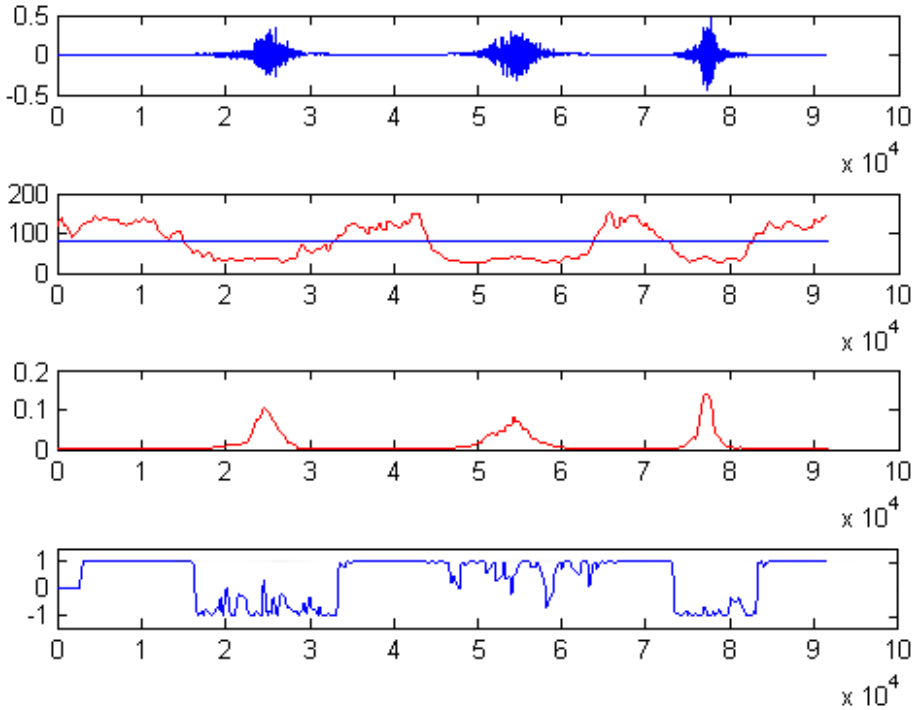


Рис. 7. Обнаружение техники

Формирование системы признаков – параметров знакопеременных составляющих, выделенных из наблюдаемого сигнала экстремальным фильтром, позволяет решить задачу обнаружения и классификации с помощью нейронных сетей.

Список литературы

1. **Иванов, И. В.** Охрана периметров – 2 / И. В. Иванов. – М. : Паритет Граф, 2000. – 196 с.
2. **Мясникова, Н. В.** Экстремальная фильтрация и ее приложения / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Датчики и системы. – 2004. – № 4. – С. 8–11.
3. **Мясникова, Н. В.** Обнаружение и классификация нарушителя на особоважных объектах охраны / Н. В. Мясникова, А. Ю. Зенов, Е. И. Иванова // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2011.
4. **Мясникова, Н. В.** Теоретические основы экспресс-анализа / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6. С.117–123.

Зенов Андрей Юрьевич
аспирант, Пензенский государственный университет

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Zenov Andrey Yuryevich
Postgraduate student, Penza State University

Мясникова Нина Владимировна
доктор технических наук, профессор, кафедра автоматики и телемеханики, Пензенский государственный университет

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Myasnikova Nina Vladimirovna
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of automation and remote control, Penza State University

УДК 681.3.01

Зенов, А. Ю.

Применение нейросетевых алгоритмов в системах охраны периметра / А. Ю. Зенов, Н. В. Мясникова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 15–24.

УДК 004.94

Е. Б. Захарикова, П. П. Макарычев

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И СЕТЕЙ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СРЕДСТВАМИ ПРИЛОЖЕНИЯ К ПАКЕТУ MATHCAD

Аннотация. Рассматриваются особенности разработанного пакета прикладных программ имитационного моделирования, реализованного на языке C++ и встроенного в Mathcad. Проводится анализ адекватности, чувствительности и устойчивости конкретной модели.

Ключевые слова: система массового обслуживания, сеть массового обслуживания, аналитическая модель, имитационная модель, марковский процесс, размеченный граф переходов случайного процесса, система дифференциальных уравнений Колмогорова, критерий Уилкоксона.

Abstract. The article considers the features of the developed software package of simulation, implemented in C++ and built into Mathcad. The authors analyze adequacy, sensitivity and stability of the model.

Key words: queuing system, queuing network, analytical model, simulation model, Markov process, labeled transition graph of a random process, system of differential equations of Kolmogorov, Wilcoxon test.

Введение

В процессе создания и исследования сложных систем важное место занимает имитационное моделирование. Реализация имитационного моделирования может быть осуществлена с использованием специализированных проблемно-ориентированных программных средств (Arena, AnyLogic, GPSS, Vissim, ExtendSim, AutoMod, Promodel и др.) и универсальных математических пакетов (Mathcad, Matlab, Maple, Mathematica и др.).

Областью применения разработанного пакета прикладных программ имитационного моделирования является моделирование систем массового обслуживания (СМО) и сетей массового обслуживания (СеМО), в состав которых могут быть вложены СеМО. Отличительными особенностями являются возможности задания буфера в каждом узле обслуживания, а также завершения процесса моделирования по заданному времени или по количеству обслуженных заявок.

1. Описание структуры и принципа работы пакета прикладных программ имитационного моделирования

Модель структуры СеМО задается в виде ориентированного графа, вершины которого представляют множество возможных узлов обслуживания. В качестве основных компонентов сети рассматриваются:

– генератор, предназначенный для моделирования входного потока заявок по заданным законам распределения (экспоненциальный, нормальный, детерминированный или эмпирический). Количество генераторов заявок не ограничено;

– узел обслуживания, осуществляющий обслуживание заявок по заданным законам распределения (экспоненциальный, нормальный или детерминированный). Количество узлов обслуживания не ограничено;

– буфер узла обслуживания, определяющий возможность ожидания обслуживания, если узел занят. Возможны два типа буфера: неограниченный (содержит неограниченное число заявок), ограниченный (содержит определенное число заявок, остальные заявки покидают систему), а также отсутствие буфера (заявка, заставшая узел обслуживания занятым, покидает систему).

Расчет статистических характеристик выполняется на основе накопления данных и многократного повторения эксперимента.

Данный комплекс программ имеет модульную структуру и встроен в Mathcad с помощью подключения внешней библиотеки динамической компоновки DLL (Dynamic Link Library), написанной на языке C++. При этом пользователь автоматизированной системы моделирования располагает возможностями абсолютного контроля над своей моделью, может варьировать по желанию любой параметр и судить о поведении модели по наблюдаемым результатам.

Визуализация результатов достигается с помощью построения графиков зависимостей входного и выходного потока заявок от времени, числа заявок в системе от времени, вероятностей нахождения системы в каждом состоянии от времени.

2. Анализ адекватности имитационной модели

Оценка адекватности модели была выполнена методом предельных точек путем сравнения результатов, полученных при аналитическом и имитационном моделировании [1]. В качестве примера была рассмотрена двухузловая СМО без буфера с неоднородным потоком заявок от двух источников с интенсивностями $\lambda_1 = 0{,}4$ и $\lambda_2 = 0{,}3$ соответственно. Интенсивности обслуживания $\mu_1 = 0{,}5$ и $\mu_2 = 0{,}6$ зависят от типа заявки и не зависят от узла. Концептуальная модель данной системы в международном стандарте моделирования IDEF3 представлена на рис. 1.

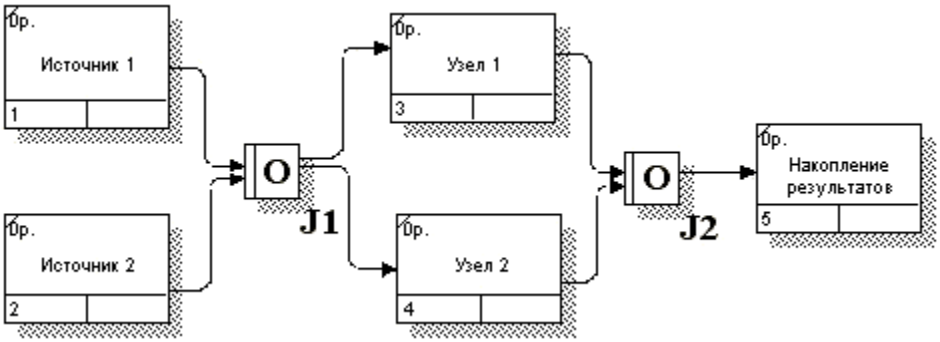


Рис. 1. Концептуальная модель

Сформулируем предположения и допущения для аналитического моделирования:

– поступающие в систему заявки двух типов образуют простейшие потоки;

– длительности обслуживания заявок каждого типа распределены по экспоненциальному закону;

– дисциплина обслуживания FIFO: заявка, поступившая в систему, принимается на обслуживание, если есть хотя бы один свободный узел. Если заявка застала свободными несколько узлов, то она направляется в один из них случайным образом.

Случайный процесс, протекающий в системе с дискретными состояниями и непрерывным временем, является марковским.

Для описания состояний марковского процесса используется распределение заявок между узлами. Закодируем состояния следующим образом: ($У_1$,$У_2$), где $У_1$, $У_2$ = {0, 1, 2} – состояние обслуживающих приборов, задаваемое типом заявки, находящейся на обслуживании («0» – узел свободен; «1» или «2» – на обслуживании в приборе находится заявка типа 1 или 2 соответственно).

При выбранном способе кодирования система может находиться в следующих состояниях:

E_0:(0,0) – в системе нет ни одной заявки;

E_1:(1,0) – на обслуживании в узле 1 находится заявка типа 1;

E_2:(2,0) – на обслуживании в узле 1 находится заявка типа 2;

E_3:(1,1) – на обслуживании в узле 1 находится заявка типа 1 и на обслуживании в узле 2 находится заявка типа 1;

E_4:(1,2) – на обслуживании в узле 1 находится заявка типа 1 и на обслуживании в узле 2 находится заявка типа 2;

E_5:(0,2) – на обслуживании в узле 2 находится заявка типа 2;

E_6:(0,1) – на обслуживании в узле 2 находится заявка типа 1;

E_7:(2,2) – на обслуживании в узле 1 находится заявка типа 2 и на обслуживании в узле 2 находится заявка типа 2;

E_8:(2,1) – на обслуживании в узле 1 находится заявка типа 2 и на обслуживании в приборе 2 находится заявка типа 1.

Размеченный граф переходов случайного процесса представлен на рис. 2.

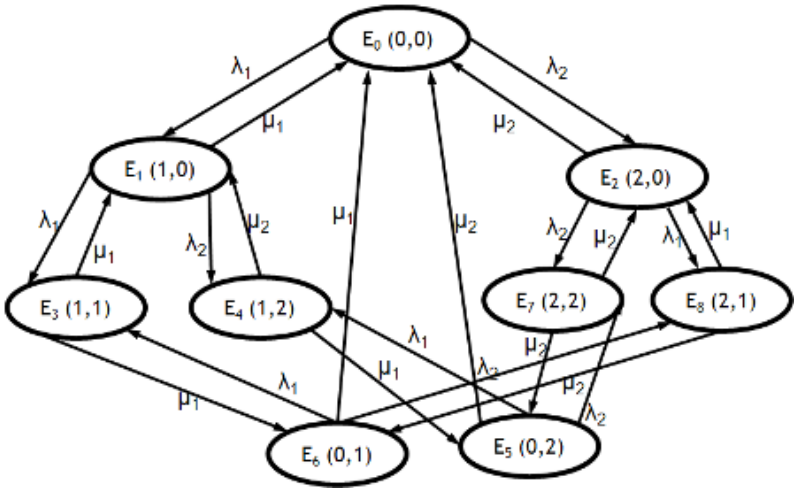


Рис. 2. Размеченный граф переходов случайного процесса

В каждый момент времени может произойти только одно событие (или поступление заявки какого-либо типа, или завершение обслуживания заявки, находящейся в узле), поскольку вероятность появления двух и более событий в один и тот же момент времени равна нулю.

Для вероятностей состояний $p_0(t)$, $p_1(t)$, …, $p_8(t)$ можно по графу переходов составить систему линейных дифференциальных уравнений Колмогорова [2]:

$$\begin{cases} \dfrac{dp_0(t)}{dt} = \mu_1 p_1(t) + \mu_2 p_2(t) + \mu_1 p_6(t) + \mu_2 p_5(t) - (\lambda_1 + \lambda_2) p_0(t), \\ \dfrac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_1 p_0(t) + \mu_2 p_4(t) + \mu_1 p_3(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) p_1(t), \\ \dfrac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_2 p_0(t) + \mu_1 p_8(t) + \mu_2 p_7(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) p_2(t), \\ \dfrac{dp_3(t)}{dt} = \lambda_1 p_1(t) + \lambda_1 p_6(t) - 2\mu_1 p_3(t), \\ \dfrac{dp_4(t)}{dt} = \lambda_2 p_1(t) + \lambda_1 p_5(t) - (\mu_1 + \mu_2) p_4(t), \\ \dfrac{dp_5(t)}{dt} = \mu_1 p_4(t) + \mu_2 p_7(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) p_5(t), \\ \dfrac{dp_6(t)}{dt} = \mu_1 p_3(t) + \mu_2 p_8(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) p_6(t), \\ \dfrac{dp_7(t)}{dt} = \lambda_2 p_5(t) + \lambda_2 p_2(t) - 2\mu_2 p_7(t), \\ \dfrac{dp_8(t)}{dt} = \lambda_2 p_6(t) + \lambda_1 p_2(t) - (\mu_1 + \mu_2) p_8(t). \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия для интегрирования отражают состояние системы в начальный момент: $p_0(t) = 1$; $p_i(t) = 0$, $i = 1, \ldots, 8$.

Было произведено решение данной системы в Mathcad с получением наглядной графической интерпретации, представленное на рис. 3.

При предельном режиме $t \to \infty$ $\dfrac{dp_i(t)}{dt} = 0$; $i = 0 \ldots 8$, полученная система принимает вид системы линейных алгебраических уравнений. Получены следующие значения предельных вероятностей: p_0 = 0,318, p_1 = 0,181, p_2 = 0,116, p_3 = 0,102, p_4 = 0,065, p_5 = 0,043, p_6 = 0,073, p_7 = 0,04, p_8 = 0,062.

Предельная вероятность того, что первый узел занят, равна

$$p1t = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_7 + p_8, \quad p1t = 0{,}565. \quad (2)$$

Предельная вероятность того, что второй узел занят, равна

$$p2t = p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + p_8, \quad p2t = 0{,}385. \quad (3)$$

Предельная вероятность потерь равна

$$pt = p_3 + p_4 + p_7 + p_8, \quad pt = 0{,}269. \quad (4)$$

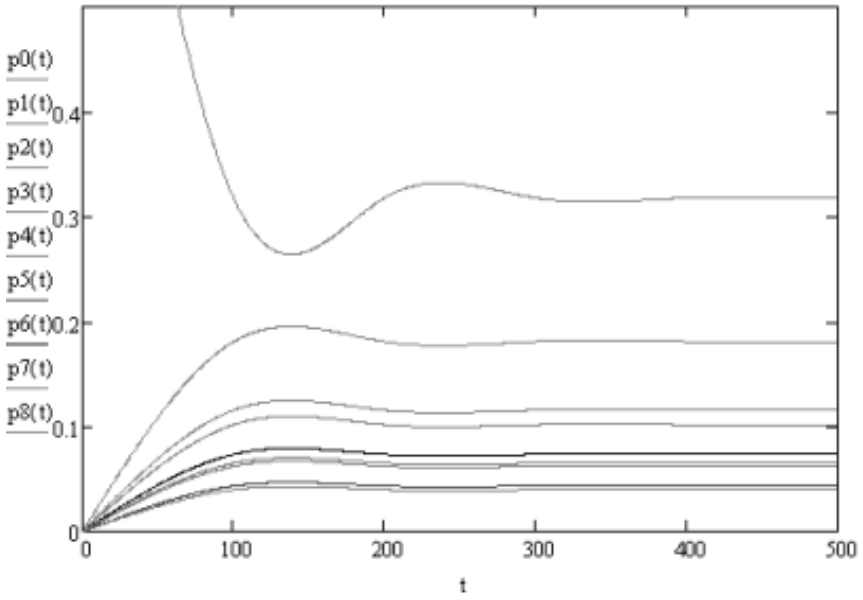


Рис. 3. Решение системы уравнений (1)

С помощью программных средств имитационной модели также были рассчитаны значения вероятностей занятости первого и второго узлов $p1p$, $p2p$ и вероятность потерь pp [3]. При общем времени моделирования $T = 1000$ были вычислены времена работы каждого узла с повторением вычислений $n = 10$ раз при $t = 0, 10, \ldots, T$. Листинг главной программы, управляющей процессом моделирования, приведен на рис. 4, где *Ns* – количество источников; *Nk* – количество узлов обслуживания; *distInStr*, *DistCan* – законы распределения времен генерирования и обслуживания; *distPar*, *ParCan* – параметры распределения. Подпрограмма *InputStream* генерирует входной поток заявок от каждого источника, подпрограмма *CombineNStream* формирует единый поток заявок, *AutoServ* инициирует обслуживание.

Графики теоретической и практической вероятностей потерь $pt(t)$, $pp(t)$ и занятости узлов $p1t(t)$, $p1p(t)$, $p2t(t)$, $p2p(t)$ представлены на рис. 5, 6.

Из графиков, представленных на рис. 5 и рис. 6, следует, что в установившемся режиме относительные погрешности вероятности потерь и занятости узлов не превышают 3 и 1,5 % соответственно.

Сравнение результатов моделирования системы приведено в табл. 1.

Таким образом, сопоставление полученных теоретических и практических результатов исследования показало адекватность рассматриваемого пакета прикладных программ имитационного моделирования.

Доступность и наглядность работы системы достигаются визуализацией.

На рис. 7 представлены графики, отражающие функционирование системы, где $f(t)$ и $h(t)$ – распределение во времени заявок первого и второго типов; $w(t)$ и $v(t)$ – распределение во времени занятости первого и второго узлов; $w(t) + v(t)$ – распределение во времени суммарной занятости узлов; $p(t)$ – распределение потерь.

$$T := 1000 \quad Ns := 2 \quad Nk := 2 \quad n := 10$$

$$distInStr := \begin{pmatrix} \text{"exp"} \\ \text{"exp"} \end{pmatrix} \quad distPar := \begin{pmatrix} 0.4 & 0 \\ 0.3 & 0 \end{pmatrix}$$

$$DistCan := \begin{pmatrix} \text{"exp"} \\ \text{"exp"} \end{pmatrix} \quad ParCan := \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0.6 & 0 \end{pmatrix}$$

```
result := | for j ∈ 0..n − 1
          |   | x ← InputStream(T, Ns, distInStr, distPar)
          |   | s ← sum(x)
          |   | comstr ← | s  if  Ns = 1
          |   |          | CombineNStream(s)  otherwise
          |   | service ← AutoServ(T, comstr, ident)
          |   | result_i ← service
          | result
```

Рис. 4. Листинг главной программы

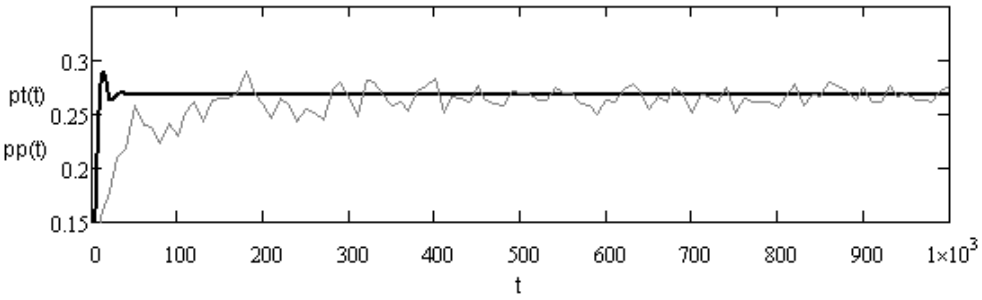
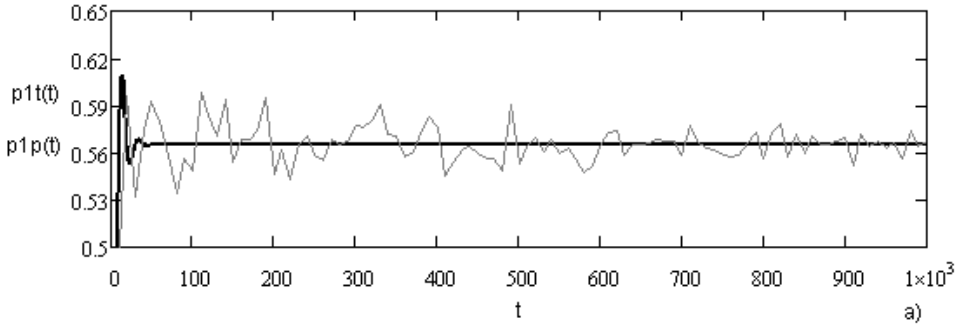
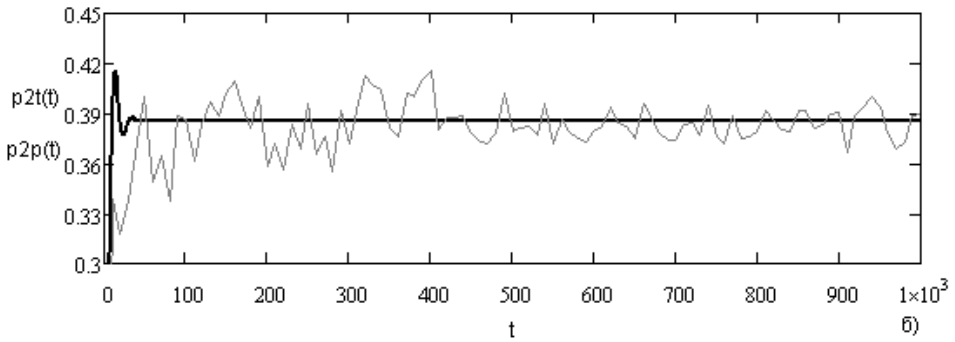


Рис. 5. Графики вероятностей потерь



а)

Рис. 6. Графики вероятностей занятости узлов



б)

Рис. 6. Окончание

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования

	Параметр	Аналитическое моделирование	Имитационное моделирование	Относительная погрешность, %
$T = 1000$ $\lambda_1 = 0,4$ $\lambda_2 = 0,3$ $\mu_1 = 0,5$ $\mu_2 = 0,6$	Вероятность занятости первого канала	0,565	0,567	0,35
	Вероятность занятости второго канала	0,385	0,39	1,3
	Среднее время обслуживания заявки первого типа	2	1,986	0,7
	Среднее время обслуживания заявки второго типа	1,667	1,633	2
	Вероятность потерь	0,269	0,276	2,6

Наряду со стандартной дисциплиной обслуживания многоузловых СМО разработана экономичная дисциплина обслуживания, в которой при наличии нескольких свободных узлов заявка направляется в узел, который к этому времени простаивал больше всего. При этом достигается примерно одинаковая загрузка всех узлов и уменьшается вероятность потерь. Так, для представленного выше примера вероятности занятости первого и второго узлов равны $p1p = 0,468$, $p2p = 0,463$, вероятность потерь $pp = 0,235$.

3. Анализ чувствительности имитационной модели

Чувствительность имитационной модели определяется ее поведением при изменении входных параметров и сравнением результатов с существующим аналогом, в качестве которого в данном случае выбрана математическая модель [4]. Анализ системы на чувствительность был проведен путем сравне-

ния выходных характеристик математической и имитационной моделей при незначительном изменении входных характеристик (табл. 2).

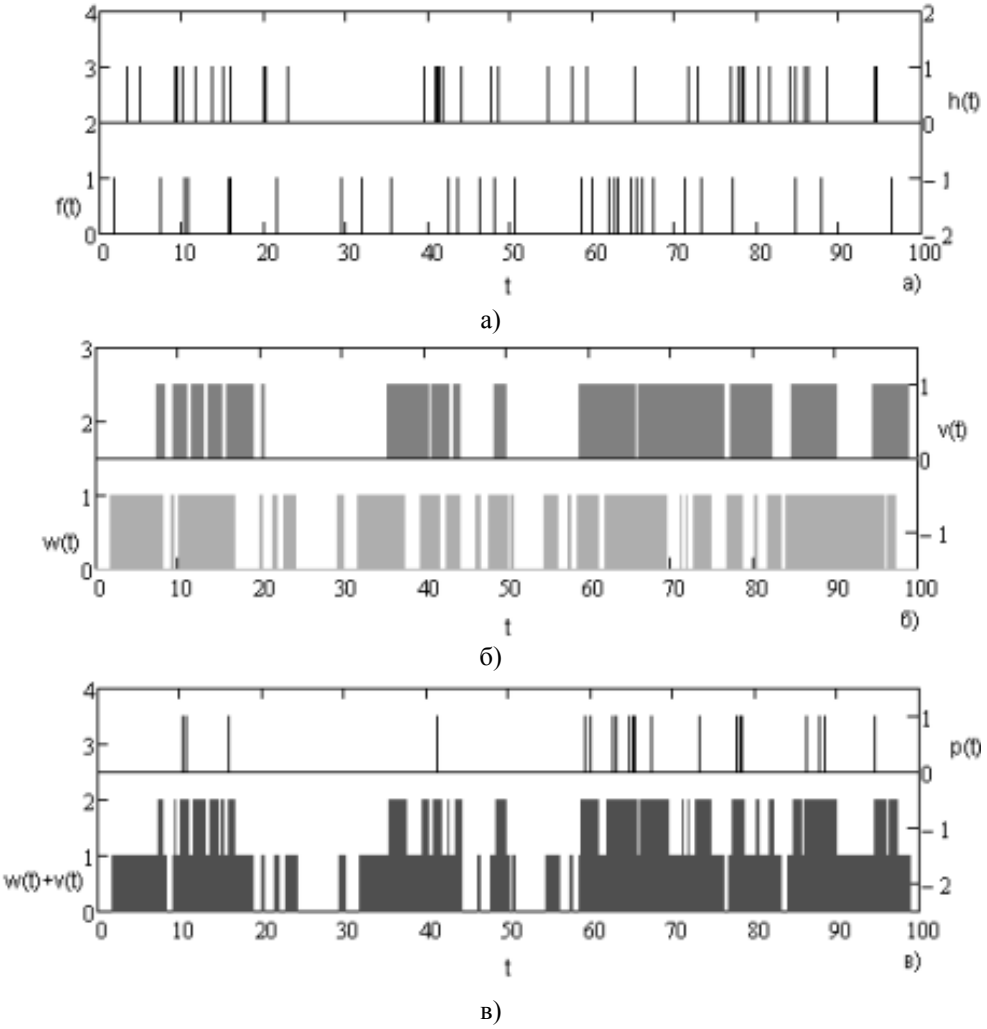


Рис. 7. Графики распределения заявок и потерь в компонентах СМО

Таким образом, относительная погрешность выходных параметров имитационной системы не превышает 3,5 %, что говорит об удовлетворительной чувствительности рассматриваемого пакета прикладных программ имитационного моделирования.

4. Анализ устойчивости имитационной модели

Устойчивость модели – это ее способность сохранять адекватность при исследовании эффективности системы на всем возможном диапазоне рабочей нагрузки [4]. Устойчивость результатов моделирования может быть оценена методами математической статистики, основная задача которой заключается в том, чтобы проверить гипотезу относительно свойств некоторого множества элементов, называемого генеральной совокупностью, оценивая свойства

какого-либо подмножества генеральной совокупности (т.е. выборки). Устойчивость результатов моделирования можно рассматривать как признак, подлежащий оценке. Для проверки гипотезы об устойчивости результатов может быть использован критерий Уилкоксона.

Таблица 2

Результаты анализа модели на чувствительность

		Входные данные	Вероятность занятости		Среднее время обслуживания заявки		Вероятность потерь
			первого канал	второго канала	первого типа	второго типа	
1	Математическая модель	$\lambda_1 = 0,4$ $\lambda_2 = 0,3$ $\mu_1 = 0,6$ $\mu_2 = 0,7$	0,523	0,329	1,667	1,429	0,223
	Имитационная модель		0,527	0,324	1,679	1,431	0,22
	Относительная погрешность		0,7	1,5	0,7	0,1	1,3
2	Математическая модель	$\lambda_1 = 0,4$ $\lambda_2 = 0,3$ $\mu_1 = 1$ $\mu_2 = 1,2$	0,394	0,182	1	0,833	0,113
	Имитационная модель		0,398	0,186	0,99	0,85	0,117
	Относительная погрешность		1	2,2	1	2	3,5
3	Математическая модель	$\lambda_1 = 0,3$ $\lambda_2 = 0,2$ $\mu_1 = 0,5$ $\mu_2 = 0,6$	0,483	0,279	2	1,667	0,184
	Имитационная модель		0,494	0,283	2,061	1,672	0,188
	Относительная погрешность		2,3	1,4	3	0,3	2,2

Критерий Уилкоксона служит для проверки того, относятся ли две выборки к одной и той же генеральной совокупности.

При статистической оценке устойчивости модели соответствующая гипотеза может быть сформулирована следующим образом: при изменении входной (рабочей) нагрузки имитационной модели закон распределения результатов моделирования остается неизменным.

Проверка указанной гипотезы проводится в следующем порядке:

1. Формируются две выборки: вероятности занятости первого канала $pz11$ при $\lambda 1 = 0,4$ и вероятности занятости первого канала $pz12$ при $\lambda 1 = 0,1$ при сохранении значений остальных входных характеристик.

2. Относительно законов распределения $pz11$ и $pz12$ никаких предположений не делается.

3. Значения обеих выборок упорядочиваются по возрастанию ($pz11s$, $pz12s$).

4. В случае $pz12s_i < pz11s_i$, $i = 0\ldots100$, пара значений образует инверсию.

5. Подсчитывается полное число инверсий U; $U = 100$.

6. Если гипотеза верна, то U не должно сильно отклоняться от своего математического ожидания $M = m$, где m – размер выборки, $m = 101$.

Очевидно, что в данном случае согласно критерию Уилкоксона выборки принадлежат одной и той же генеральной совокупности, что подтверждает достаточную устойчивость системы. Принадлежность выборок к одной и той же генеральной совокупности иллюстрируют графики, представленные на рис. 8.

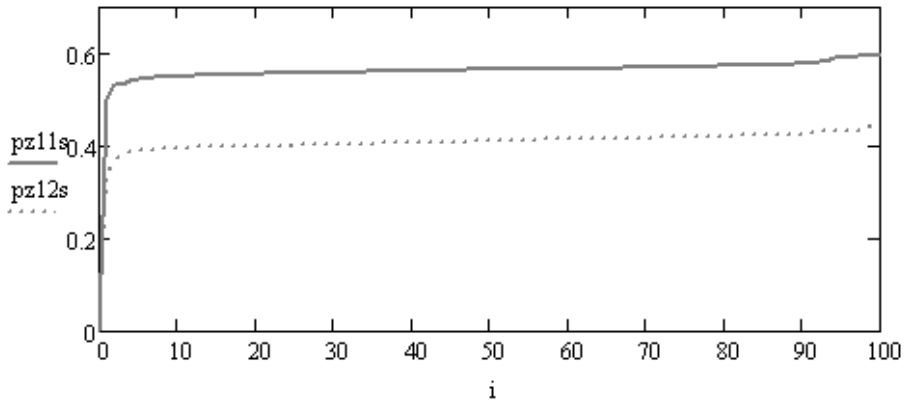


Рис. 8. Визуализация анализа модели на устойчивость

Заключение

Таким образом, исследование полученных теоретических и практических результатов СМО показало удовлетворительную работу данного пакета прикладных программ имитационного моделирования. Далее планируется проведение исследований с более сложными СеМО.

Список литературы

1. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем. Искусство и наука / Р. Шеннон. – М. : Мир, 1978. – 418 с.
2. **Клейнрок, Л.** Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с.
3. **Кельтон, В.** Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб. : Питер, 2004. – 847 с.
4. **Алгазинов, Э. К.** Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем / Э. К. Алгазинов, А. А. Сирота. – М. : Диалог-МИФИ, 2009. – 416 с.

Захарикова Елена Борисовна
аспирант, Пензенский
государственный университет

Zakharikova Elena Borisovna
Postgraduate student,
Penza State University

E-mail: makpp@yandex.ru

Макарычев Петр Петрович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой математического
обеспечения и применения ЭВМ,
Пензенский государственный университет

Makarychev Petr Petrovich
Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of computer
application and software,
Penza State University

E-mail: makpp@yandex.ru

УДК 004.94
Захарикова, Е. Б.
Имитационное моделирование систем и сетей массового обслуживания средствами приложения к пакету Mathcad / Е. Б. Захарикова, П. П. Макарычев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 25–35.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 53.089.68

А. Ю. Шаблицкий, В. К. Доля

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ САМОКОНТРОЛЬ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ДАТЧИКЕ[1]

Аннотация. Описывается новый метод осуществления метрологического самоконтроля в интеллектуальном акустическом пьезоэлектрическом датчике, а также технических средств, автоматически реализующих этот метод. Представлены результаты практических исследований, которые подтверждают возможность реализации описанного метода, а также применение его для мониторинга сложных объектов.

Ключевые слова: метрологический самоконтроль, интеллектуальный датчик, пьезоэлектрический акустический датчик, мониторинг сложных объектов.

Abstract. The article describes a new method of measurement of self-control in a smart acoustic piezoelectric sensors, as well as technical means to automatically implement this method. The authors present the results of practical studies that confirm both the feasibility of this method and its application for monitoring of complex objects.

Key words: metrological self-control, smart sensor, piezoelectric acoustic sensor, monitoring of complex objects.

Введение

Современное развитие науки и техники диктует постоянное ужесточение требований, предъявляемых к качеству измерения различных физических величин и, соответственно, к качеству первичных датчиков, осуществляющих преобразование измеряемой физической величины в электрический сигнал. Следовательно, контроль метрологической исправности датчика (согласно [1] метрологическая исправность датчика в процессе эксплуатации – это состояние датчика, при котором его погрешность в процессе эксплуатации в рабочих условиях находится в установленных пределах) в конкретных условиях эксплуатации является актуальной проблемой.

1. Выбор метода метрологического самоконтроля

В настоящее время мировые тенденции в решении указанной проблемы сконцентрированы в области проектирования и практического использования

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

интеллектуальных датчиков, которые в соответствии с ГОСТ Р 8.673–2009 ГСИ должны иметь функции адаптации, а также метрологического самоконтроля.

Под самоконтролем датчика понимается автоматическая проверка метрологической исправности датчика в процессе его эксплуатации с определением статуса результата измерений. Метрологический самоконтроль должен опираться на дополнительные данные, получаемые за счет пространственной (структурной), временной, информационной (функциональной) избыточности, имеющейся или сформированной в датчике.

Примером реализации метрологического диагностического самоконтроля интеллектуального пьезоэлектрического датчика на основе функциональной избыточности является интеллектуальный датчик с высокотемпературным пьезоэлектрическим микрофоном МПВ-03, входящий в состав измерительного акустического канала акустической подсистемы автоматизированной системы обнаружения течи теплоносителя (АСОТТ) на АЭС с РУРБМК.

В области ядерной энергетики, а также в других областях, в которых используется оборудование с длительным технологическим циклом, возрастает потребность в применении интеллектуальных датчиков, в частности акустических. Именно поэтому остро стоит задача разработки метода осуществления самоконтроля датчиков, а также технических средств, автоматически реализующих этот метод для акустических датчиков.

Рассмотрим способы получения дополнительных данных для осуществления метрологического самоконтроля датчиков [1].

Первый способ заключается во введении в конструкцию контролируемого датчика дополнительного измерительного преобразователя. Опираясь на данные, полученные от дополнительного преобразователя, вводят поправку в результат измерения основного датчика. В качестве примера можно рассмотреть пьезоэлектрический акустический датчик (микрофон), в конструкцию которого введен дополнительный преобразователь, например термопара. Так как параметры пьезокерамики значительно изменяются при воздействии температуры, то, опираясь на данные, полученные от термопары, производят их пересчет и вносят поправку в результат измерения микрофоном, если известны зависимости параметров от температуры. Данный метод обладает существенным недостатком – это сложность в исследовании и получении зависимости основной измеряемой величины от дополнительной измеряемой величины (например, зависимость чувствительности микрофона от температуры окружающей среды). Следует отметить, что сложность заключается в получении зависимости для всех однотипных датчиков, а не для каждого в отдельности.

Использование второго метода предполагает объединение в одной конструкции контролируемого измерительного преобразователя, а также дополнительного измерительного преобразователя или меры, которые характеризуются более высокой точностью. Метрологический самоконтроль с использованием мер может быть реализован при измерении ограниченного набора физических величин, например, температуры, длины, акустического давления. При данном методе дополнительный преобразователь, как правило, имеет более высокую точность, но в значительно более узком динамическом диапазоне. Например, в конструкцию уже упомянутого пьезоэлектрического микрофона вносится дополнительный пьезопреобразователь, который обла-

дает значительно большей чувствительностью при уровнях акустического давления в диапазоне от 90 до 110 дБ, при этом контролируемый микрофон работает в диапазоне от 70 дБ. Значения сигнала, измеренного более точным преобразователем в его динамическом диапазоне, считается эталонным, по этому значению происходит калибровка контролируемого датчика уже в его динамическом диапазоне. Данный способ также обладает существенным недостатком, так как в процессе эксплуатации датчика не всегда возможно наличие требуемых для калибровки сигналов, входящих в динамический диапазон более точного датчика. В таком случае самоконтроль датчика будет невозможен.

Для проверки метрологической исправности датчика (датчиков), входящего в состав измерительной системы, можно использовать дополнительные данные, полученные за счет структурной избыточности системы. Структурная избыточность обеспечивается использованием в системе дополнительных однотипных элементов, количество которых превышает минимально необходимое для осуществления измерений. Если в качестве функции преобразования датчика использована зависимость среднего выходного сигнала от измеряемой величины, то в качестве опорного значения может быть использована статистическая оценка отклонения выходных сигналов от среднего значения (например, среднее отклонение или дисперсия отклонения). Примером применения данного способа получения информационной избыточности может быть датчик температуры, который содержит несколько термопар, близких по точности. Функцией преобразования такого датчика является зависимость среднего выходного сигнала термопар от измеряемой температуры. Если вероятность синхронного дрейфа функций преобразования термопар пренебрежимо мала, то в качестве критической составляющей погрешности датчика можно принять среднее отклонение выходных сигналов термопар от их среднего значения. Значение этого отклонения, определенное при предшествующей калибровке, принимается в качестве опорного. По изменению среднего отклонения выходных сигналов термопар от опорного значения можно оценить метрологическую исправность датчика. К недостаткам данного метода относятся требования по ограниченности массы и габаритов, а также высокая стоимость датчиков и измерительных систем, построенных на основе этого метода.

На фоне вышеописанных способов проверки метрологической исправности датчиков можно выделить методику, реализующую метрологический диагностический самоконтроль интеллектуального датчика на основе функциональной избыточности. Использование этого метода предполагает априорное знание детерминированной функциональной зависимости между коэффициентом преобразования датчика и другими физическими параметрами датчиками, которые известны (или могут быть дополнительно измерены).

Из описанных выше методов выгодно выделяется метод на основе функциональной избыточности. Основным достоинством данного метода является то, что при его использовании появляется возможность самоконтроля интеллектуального датчика без внесения изменений в конструкцию датчика. Рассмотрим вариант реализации проверки метрологической исправности на основе функциональной избыточности в измерительном канале (рис. 1), основным метрологическим параметром которого является чувствительность.

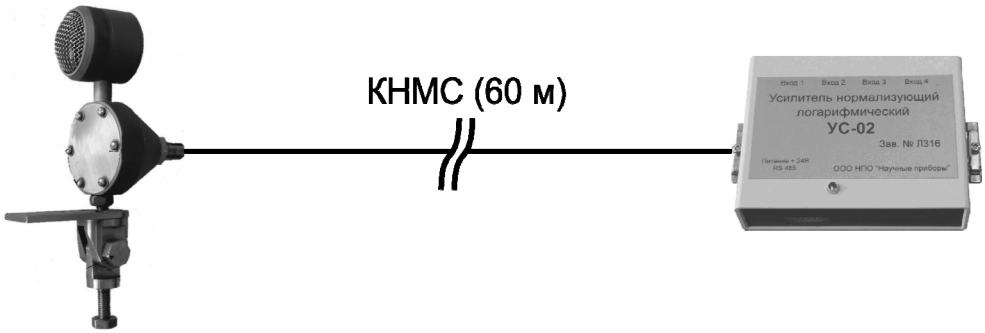


Рис. 1. Интеллектуальный измерительный акустический канал, состоящий из пьезоэлектрического микрофона, лини связи (кабель КНМС) и интеллектуального модуля (предусилитель, блок цифровой обработки)

Основная составляющая погрешности измерения акустического давления с помощью акустического канала возникает из-за деградации пьезоэлектрического преобразователя под действием сложных внешних условий в процессе эксплуатации, что ведет за собой изменение чувствительности как микрофона, так и акустического канала в целом. Температура, активная радиация – все это влияет на параметры (чувствительность, частота резонанса, емкость, электрическое сопротивление) пьезоматериала, из которого выполнен преобразователь. Теоретически и экспериментально показано [2], что чувствительность датчика однозначно связана с его эквивалентными электрическими параметрами. Указанная зависимость использована авторами настоящей работы в качестве функциональной избыточности в интеллектуальном акустическом канале, представленном на рис. 1.

Методика вычисления чувствительности измерительного канала описана в работе [2]. Чувствительность измерительного канала $M_{\text{ИК}}(f)$ определяется функцией коэффициента передачи по напряжению измерительного канала $K_U(f)$ и коэффициентом K, характеризующим колебательные свойства первичного пьезопреобразователя (определяется только геометрическими размерами преобразователя и не зависит от температуры и частоты):

$$M_{\text{ИК}}(f) = \sqrt{L_d}\, K K_U(f), \qquad (1)$$

где L_d – индуктивность динамической ветви эквивалентной схемы пьезопреобразователя.

Для того чтобы определить чувствительность акустического канала по (1), необходимо получить следующие параметры:

1) коэффициент *K*. Для этого достаточно измерить полную массу *m* и полную площадь колебательной поверхности акустического преобразователя *S*, после чего вычислить *K* по формуле $K = S\mu\sqrt{\frac{1}{m\eta}}$, где μ и η – константы из [3];

2) коэффициент передачи по напряжению $K_U(f)$. Для этого необходимо знать параметры линии связи, входное сопротивление интеллектуального усилителя, которые можно получить в технической документации на ка-

бель и усилитель соответственно. Кроме того, необходимо получить параметры эквивалентной схемы пьезопреобразователя: Y_d – проводимость динамической ветви, Y – полная проводимость, L_d – индуктивность динамической ветви, C_d – емкость динамической ветви, R_d – сопротивление динамической ветви эквивалентной схемы преобразователя, Q – добротность преобразователя.

2. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования состояли из нескольких этапов. На первом этапе определялась чувствительность измерительного канала абсолютным методом измерения. На втором этапе производился расчет чувствительности канала по описанной выше методике.

Практическая часть исследования была разделена на две части: измерения в резонансной области пьезопреобразователя (8,5–10 кГц), использующегося в высокотемпературном микрофоне, и измерения в низкочастотной области (10–100 Гц).

Первая часть эксперимента была выполнена на измерительном стенде, структурная схема которого представлена на рис. 2. В качестве источника звука использовался генератор шума ГШ-02, который обеспечивал генерацию эталонного звукового давления с погрешностью ±10 %. С помощью ГШ-02 генерировались акустические синусоидальные сигналы в частотном диапазоне 8,5–10 кГц. Данные сигналы подавались на высокотемпературный пьезоэлектрический микрофон МПВ-03, закрепленный на расстоянии в 20 см от источника звука, который был подключен через эквивалент линии связи к интеллектуальному усилителю УС-02, данные с которого через интерфейс RS-485 поступали на ПК. В результате практического эксперимента были получены значения чувствительностей набора акустических каналов в частотных точках в диапазоне 8,5–10 кГц.

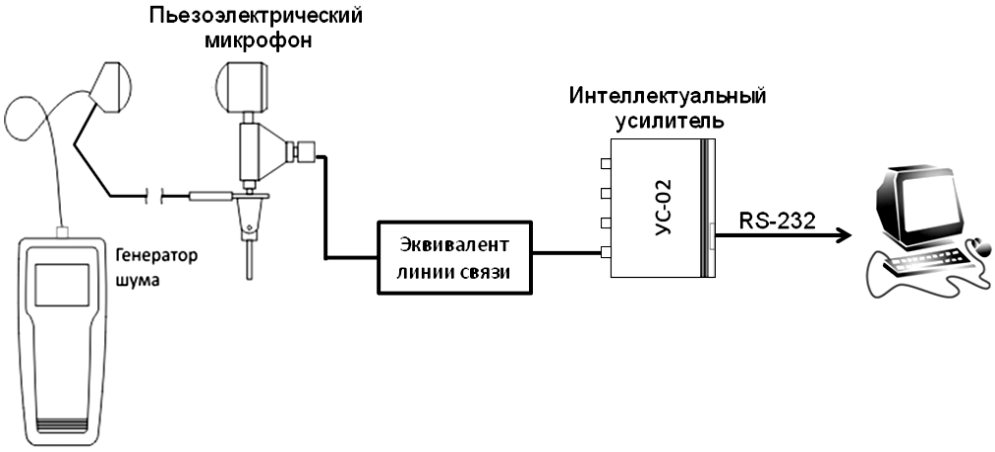


Рис. 2. Акустический измерительный стенд

Вторая часть практического эксперимента выполнялась с помощью измерительного комплекса «Глубина». В результате эксперимента были получены значения чувствительностей в диапазоне частот 10–100 Гц.

На следующем этапе были рассчитаны чувствительности каналов по параметрам микрофонов, эквивалента линии связи и усилителя. Параметры микрофонов (значения параметров эквивалентной схемы) были получены с помощью метода, основанного на анализе амплитудно-частотной характеристики проводимости. Параметры эквивалента линии связи и усилителя были взяты из их паспортов.

Результаты практических измерений чувствительности и получения значения чувствительности с помощью разработанной методики представлены на рис. 3 (а – область частот, близких к резонансу пьезопреобразователя; б – низкочастотная область). В обеих частотных областях рассчитывалась погрешность измерений по формуле (рис. 4)

$$E = \frac{M_{\text{э}} - M_{\text{расч}}}{M_{\text{э}}} \cdot 100\,\%,$$

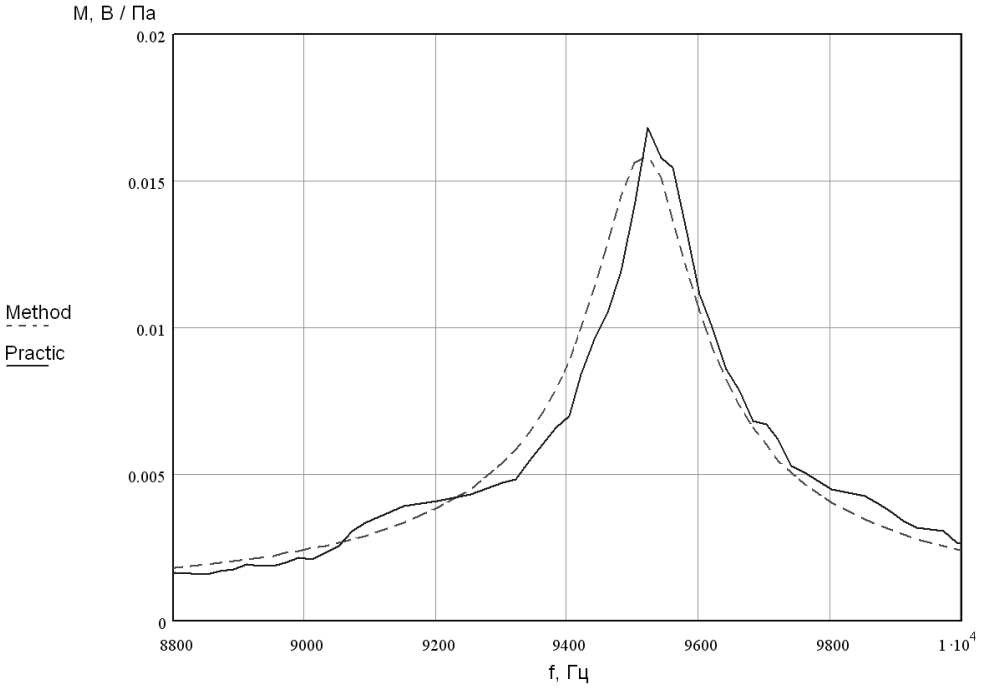
где $M_{\text{э}}$ – значение чувствительности, полученное на первом этапе; $M_{\text{расч}}$ – рассчитанная чувствительность.

По полученным частотным характеристикам чувствительностей было рассчитано интегральное значение чувствительности в рабочей полосе частот. Анализ расчетов показал, что описанная в данной статье методика дает возможность определять интегральную чувствительность в рабочей полосе частот измерительного канала с точностью до 10 %.

Заключение

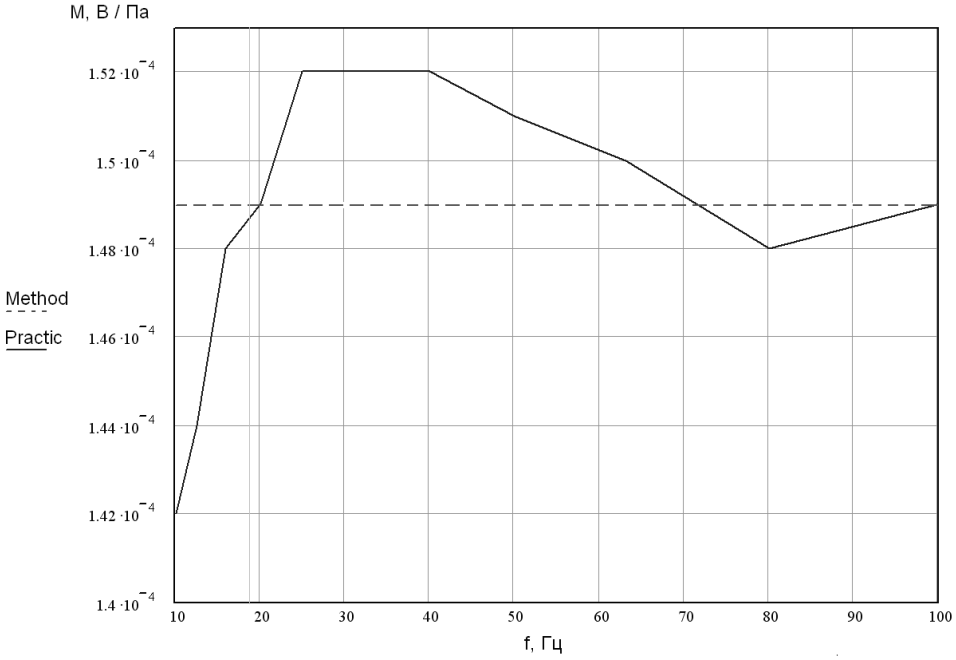
Анализ полученных результатов показывает, что применение разработанного метода определения чувствительности акустического измерительного канала представленной структуры позволяет получать частотную характеристику чувствительности канала на низких частотах с погрешностью не более 5 %, в рабочей полосе частот (8,5–10 кГц) – с погрешностью, не превышающей 20 % (в сочетании с погрешностью эталонных измерений). Обладание данными о чувствительности на конкретных частотах дает возможность контролировать и влиять не только на общий уровень чувствительности канала (среднеквадратичное значение), но и на форму частотной характеристики функции чувствительности. Это может достигаться использованием методов цифровой математической обработки, такими как применение цифровых фильтров, расчет численного интеграла чувствительности в заданной частотной полосе, применение различных оконных функций.

Рассматривая влияние тяжелых условий эксплуатации, а именно температуры, на измерительные параметры датчика, следует отметить уменьшение чувствительности канала (рис. 5,а, сплошной график). Однако применение метода самоконтроля, описанного в данной статье, позволяет вносить поправки в измеряемые величины таким образом, что общий уровень чувствительности канала не будет изменяться более чем на 15 % (рис. 5,а, пунктирный график). Разработанная методика самоконтроля позволяет влиять на чувствительность измерительного акустического канала в различных частотных диапазонах, приводя уровень чувствительности к требуемому уровню (рис. 5,б, сплошной график – значение чувствительности при воздействии тяжелых внешних условий, пунктирный график – требуемый уровень чувствительности).



—— – экспериментально полученные значения,
- - - - – значения, рассчитанные по разработанной методике

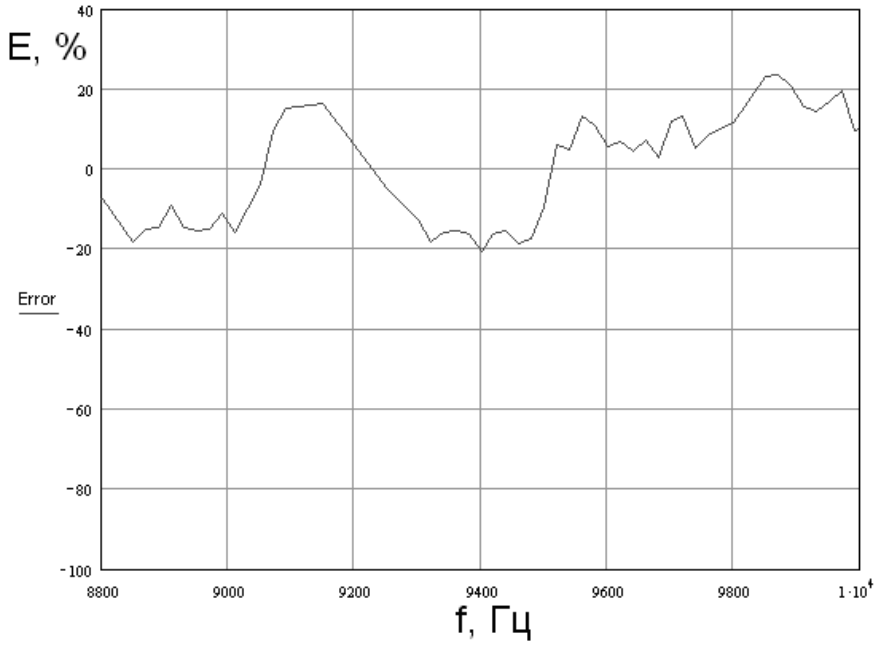
а)



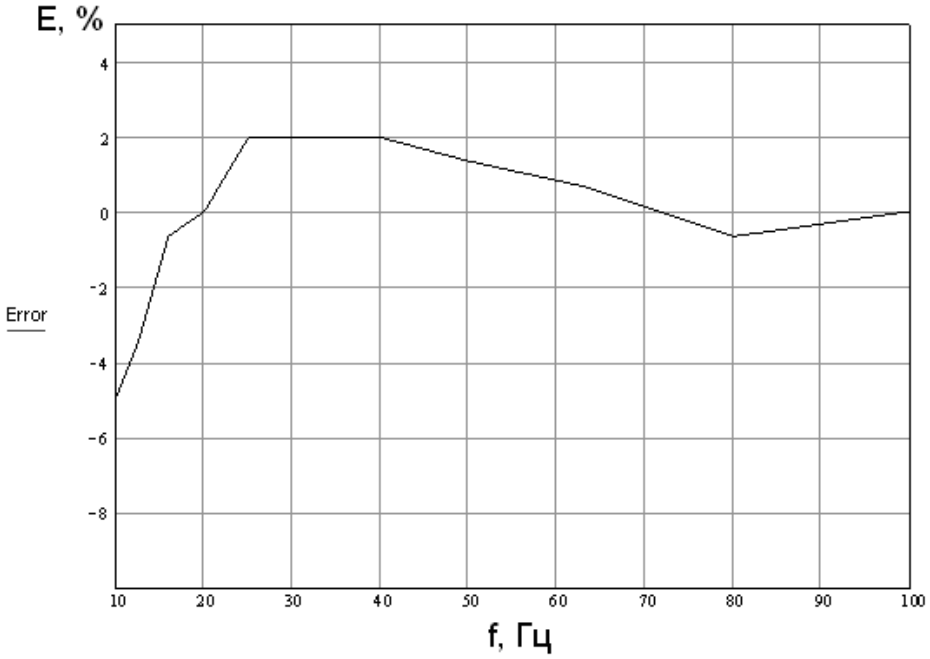
—— – экспериментально полученные значения,
- - - - – значения, рассчитанные по разработанной методике

б)

Рис. 3. АЧХ чувствительности интеллектуального акустического канала в резонансной области преобразователя (а) и в низкочастотной области преобразователя (б)



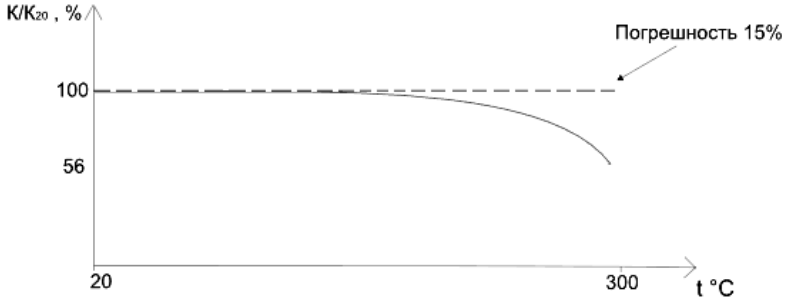
а)



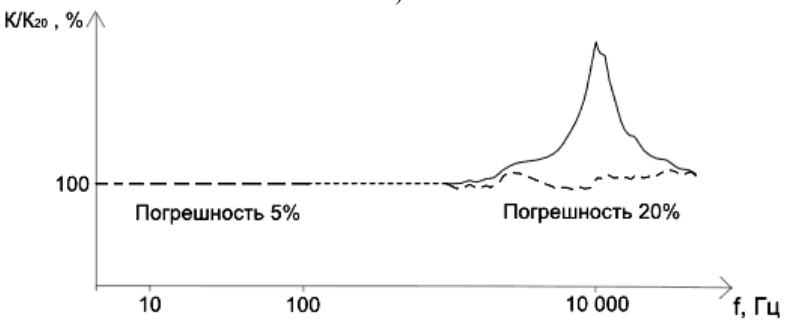
б)

Рис. 4. Относительная погрешность рассчитанной чувствительности относительно полученной экспериментально в резонансной области (а) и в низкочастотной области (б)

Анализ полученных результатов подтверждает возможность реализации метрологического самоконтроля в интеллектуальном акустическом пьезоэлектрическом датчике представленной структуры и применение его для мониторинга сложных объектов.



а)



б)

Рис. 5. Графики зависимости отношения текущей чувствительности интеллектуального датчика к чувствительности при 20 °С от температуры (а) и от частоты (б)

Список литературы

1. **Тайманов, Р. Е.** Метрологический самоконтроль датчиков / Р. Е. Тайманов, К. В. Сапожникова // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения : тр. конф. – М., 2010.
2. **Шаблицкий, А. Ю.** Измерение коэффициента преобразования канала с пьезоэлектрическим преобразователем / А. Ю. Шаблицкий, В. К. Доля, А. В. Боев, А. В. Фомушкин // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы – 2010 : сб. тр. VII Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи. – Анапа, 2010. – С. 80–83.
3. **Аронов, Б. С.** Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики / Б. С. Аронов. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – С. 272.

Шаблицкий Алексей Юрьевич
аспирант, Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону)

E-mail: lesha_rostovnd@mail.ru

Shablitsky Aleksey Yuryevich
Postgraduate student, South Federal University (Rostov-on-Don)

Доля Владимир Константинович
кандидат технических наук, заместитель директора по науке и инновациям, Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону)

E-mail: dvk@sfedu.ru

Dolya Vladimir Konstantinovich
Candidate of engineering sciences, deputy director for research and innovation, research and design department “Pyezopribor” of the South Federal University (Rostov-on-Don)

УДК 53.089.68
Шаблицкий, А. Ю.
Метрологический самоконтроль в интеллектуальном акустическом пьезоэлектрическом датчике / А. Ю. Шаблицкий, В. К. Доля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 36–45.

УДК 623.681.7

В. Н. Федотов, С. Е. Ашанин, А. В. Федотов, А. Ю. Беженцев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОРУЖИЕМ

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования влияния непреднамеренных помех на многоканальные средства разведки, функционирующие в спектральных диапазонах: 0,38…0,75; 3…5; 8…14 мкм. В качестве помех применялись пыледымовые помехи от разрывов снарядов и движения военной техники. Экспериментальные исследования проводились на штатных образцах военной техники, для помех измерялись плотность, геометрические размеры и время существования. В качестве фактора воздействия выбрано время потери видимости цели.

Ключевые слова: видимость цели, многоканальные средства разведки, непреднамеренная аэрозольная помеха, оптический канал, тепловизионный канал.

Abstarct. The authors have experimentally researched the influence of inadvertent hindrances on multichannel means of investigation, functioning in spectral ranges 0,38…0,75; 3…5; 8…14 microns. To simulate hindrances the researchers used dust smoke clouds from shell ruptures and movement of military vehicles. Experimental researches were conducted on regular samples of military vehicles; as for hindrances the researchers measured the density, the geometrical sizes and existence time. As an influence factor the authors chose the time of target's visibility loss.

Key words: visibility of the target, multichannel management system, inadvertent hindrance, optical channel, thermal imaging channel.

Введение

По оценкам военных экспертов, возрастающее количество оптико-электронных средств разведки и систем наведения высокоточного оружия, работающих в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, обусловили ситуацию, при которой эффективность тактических действий будет существенно зависеть от превосходства в этой области.

1. Общие положения по функционированию многоканальных систем управления оружием

Одним из методов повышения эффективности функционирования оптотехнических средств разведки является комплексирование систем различного диапазона. В настоящее время для решения задач в системах управления и наведения комплексов ракетно-артиллерийского вооружения нашли применение тепловизионные средства, функционирующие в диапазоне 3...5 и 8…14 мкм. Совместное применение многодиапазонных оптических средств позволило значительно расширить возможности разведки, ее информативность, что обеспечивает решение задач огневого поражения противника.

Вместе с тем анализ локальных войн, тактических учений последних лет показывает, что для защиты вооружения и военной техники широкое применение находят аэрозольные средства [1, 2]. Основные воздействия аэрозольных средств, обусловливающие их маскирующую способность, сводятся к рассеянию, поглощению и отражению оптического излучения.

Рассеяние оптического излучения, т.е. отклонение лучей, проходящих через аэрозольные помехи, от своего первоначального направления, обусловливается различными явлениями, происходящими с лучом на границе аэрозольных частиц и воздуха. Преломление и отражение оптического излучения на границе частиц происходят в том случае, если размеры частицы больше длины волны проходящего излучения. Если длина волны оптического излучения соизмерима с размером аэрозольной частицы, то имеет место дифракция, состоящая в том, что лучи огибают дымовую частицу и рассеиваются. Если размеры аэрозольных частиц меньше длины волны оптического излучения, то лучистая энергия поглощается атомами и молекулами частиц. Кроме размеров частиц, весьма существенную роль играет химический состав аэрозольных средств.

Анализ исследований последних лет показывает, что изучение в основном проводилось для случая влияния аэрозольных преднамеренных помех на возможности многоканальных средств, создаваемых противником. В результате ведения боевых действий будут возникать непреднамеренные аэрозольные помехи, наиболее вероятными являются пыледымовые облака от движения техники, разрыва снаряда.

2. Методика проведения исследований

Характеристики пыледымовых облаков (ПДО), возникающих при разрывах осколочно-фугасных снарядов (ОФС), существенно зависят от внешних условий их образования. Из совокупности характеристик ПДО, образующих при разрыве снаряда (мины), для оценки эффективности средств разведки, наблюдения и наведения оружия существенными являются [3] размеры (высота h и ширина l), прозрачность $T_{\text{ПДО}}$ и время существования $\overline{t}_{\text{р}}$. По результатам ранее проведенных исследований установлено, что существенное влияние на характеристики ПДО оказывает влажность грунта [3, 4].

Влажность грунта – это отношение количества воды, содержащейся в нем, к абсолютно сухой массе грунта. В зависимости от значения этого отношения различают следующие степени влажности грунта:

– высокая: 50 % и выше;

– средняя: 25…49 %;

– низкая: 5…25 %.

Определение характеристик ПДО при подрывах 100 и 152 мм ОФС на разных грунтах проводилось экспериментально для видимой области оптического излучения.

Влажность грунта определялась как отношение массы воды, удаленной из грунта высушиванием до постоянной массы, к массе высушенного грунта. Проба грунта для определения влажности отбиралась массой 15…50 г, помещалась в заранее высушенный, взвешенный и пронумерованный стаканчик, который плотно закрывался крышкой и взвешивался. Затем стаканчик открывали и вместе с крышкой помещали в нагретый сушильный шкаф. Грунт высушивался до постоянной массы при температуре (105 ± 2) °С. Песчаные грунты высушивали в течение 3 ч, а остальные – в течение 5 ч. Последующие высушивания песчаных грунтов производились в течение 1 ч, остальных – в течение 2 ч.

После каждого высушивания грунт в стаканчике охлаждали в эксикаторе с хлористым кальцием до температуры помещения и взвешивали. Высу-

шивание производили до получения разности масс грунта со стаканчиком при двух последующих взвешиваниях не более 0,02 г.

Если при повторном взвешивании грунта, содержащего органические вещества, наблюдалось увеличение массы, то за результат взвешивания принималась наименьшая масса.

Влажность грунта (в процентах) вычисляли по формуле

$$W_{\text{гр}} = \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m},$$

где m – масса пустого стаканчика с крышкой, г; m_1 – масса влажного грунта со стаканчиком и крышкой, г; m_0 – масса высушенного грунта со стаканчиком и крышкой, г.

Допускается выражать влажность грунта в долях единицы.

В результате экспериментальных исследований установлено, что развитие ПДО делится на два этапа. На первом этапе (до момента $t_0 \le 1{,}5...2$ с) облако разрыва растет независимо от внешних условий за счет энергии взрыва. В момент $t_0 = 1{,}5...2$ с движущиеся против ветра частицы облака начинают менять свое направление движения на противоположное, завершается падение на землю наиболее крупных частиц грунта. Размер облака до этого момента времени зависит только от калибра снаряда: чем крупнее калибр снаряда, тем больше облако. К моменту $t_0 = 1{,}5...2$ с по всему объему облака наблюдается наличие частиц разных размеров.

На втором этапе (после $t > t_0$) расширение и рассеяние облаков в основном происходит за счет турбулентного состояния атмосферы. Рост облака в высоту происходит за счет подъема нагретого объема воздуха, включающего в себя мельчайшие частицы грунта и продукты разложения взрывчатых веществ (ВВ). Из-за различия скорости ветра по высоте облако растягивается по направлению ветра. Его передний фронт двигается со скоростью ветра на вершине облака. Время существования таких облаков исчисляется десятками секунд.

В связи с этим изменение прозрачности $T_{\text{ПДО}}$ облака в зависимости от вида и состояния грунта имеет разный характер. Приближенная зависимость прозрачности облака между точками a и b на высоте 1,5...10 м в зависимости от времени существования облака $\overline{t}_{\text{р}}$, полученная в работе [3], приведена на рис. 1.

Кривые 1 и 2 характерны для случаев образования ПДО на сильно влажных грунтах. Штрихпунктирной линией на рис. 1 показана приближенная зависимость остаточной замутненности ПДО. Для одиночного ПДО остаточная замутненность не мешает наблюдению, а для совокупности облаков может закрыть цель от наблюдения на длительное время. На рис. 1 приведена также шкала исходных контрастов (в видимом диапазоне) целей K_0, по которой можно определить время $t_{\text{р}}$ для заданных условий наблюдения.

Гистограммы скорости подъема и расширения облака в поперечном направлении (перпендикулярно направлению ветра) приведены на рис. 2.

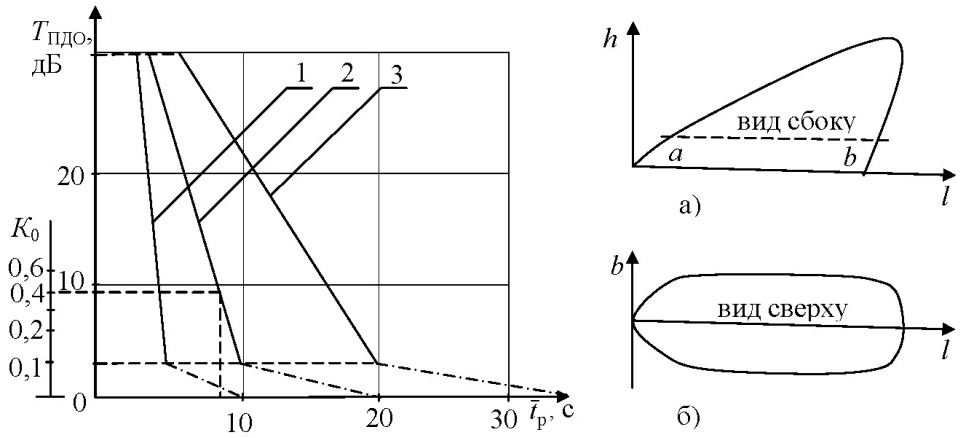


Рис. 1. Зависимость прозрачности пыледымового облака от времени

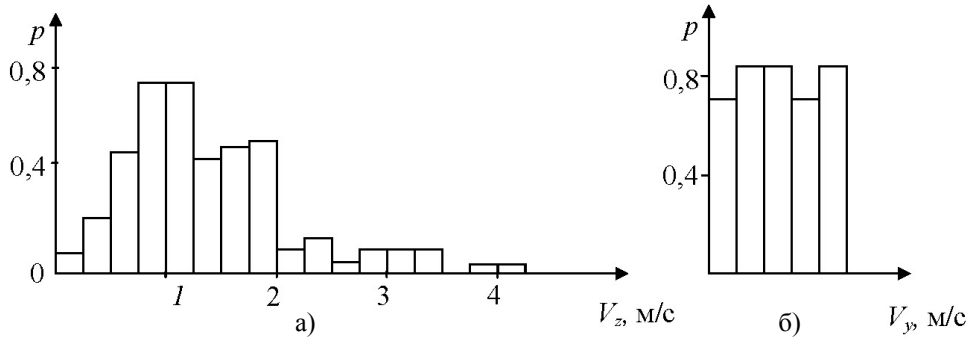


Рис. 2. Гистограммы скоростей расширения облака:
а – вертикальное направление V_z ; б – поперечное направление V_y

С точки зрения оценки воздействия на средства разведки, наблюдения и наведения оружия наибольший интерес представляет ширина облака, измеряемая по линии визирования «прибор – цель». Ширина же облака в конечном итоге зависит от времени существования ПДО $\bar{t}_р$. Поэтому для сравнительной оценки различных ПДО между собой предлагается использовать фактор возможного воздействия (ФВВ) облака, определяемый как произведение средней ширины облака $l_{ср}$ на среднее время его существования $\bar{t}_р$:

$$\gamma_{вв} = l_{ср} \cdot \bar{t}_р = \int_0^{\bar{t}_р} l(t)dt \ .$$

Результаты ФВВ в зависимости от условий образования ПДО приведены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что значение ФВВ составляет при разрывах 100- и 152-мм ОФС может изменяться от 80 до $5 \cdot 10^4$ м с соответственно для влажных и сухих грунтов.

Оценка влияния ПДО на возможности многоканальных средств разведки проводилась на основе экспериментальных исследований. В качестве по-

казателя воздействия выбрано время потери видимости цели оператором. Многоканальные средства разведки включали артиллерийский прибор разведки с переменным увеличением 1Н11, тепловизинный прибор наблюдения подвижного разведывательного пункта 1НП59 и тепловизинный визир противотанкового ракетного комплекса 1ПН65, соответственно функционирующие в диапазонах 0,35…0,78, 3…5, 8…13 мкм. Схема проведения эксперимента показана на рис. 3.

Таблица 1

Значения фактора возможного воздействия

Характеристика пыледымового облака	Калибр снаряда, мм	Степень влажности грунта		
		высокая	средняя	низкая
Средняя ширина, м	100 152	16…20 35…40	20…30 40…50	>30 >50
Среднее время существования при прозрачности $T_{ПДО}$ = 3дБ	100 152	5…10	10…20	>20
Фактор возможного воздействия, м·с	100 152	80…200 170…400	200…600 400…1000	>600 >1000

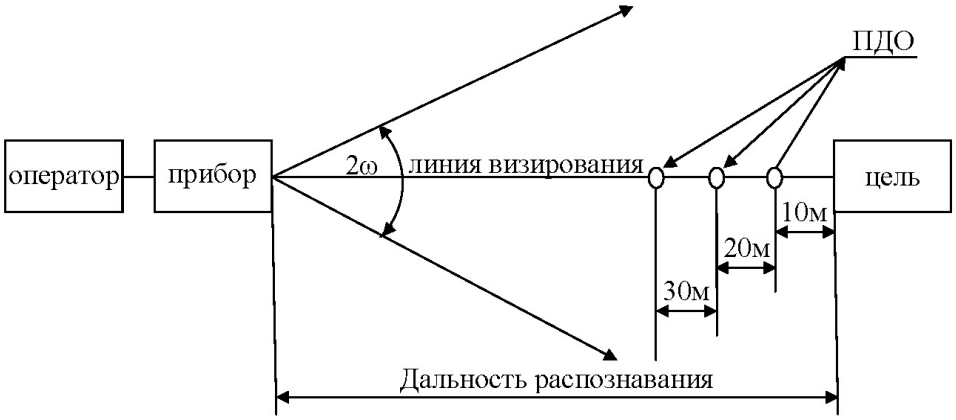


Рис. 3. Схема эксперимента

Экспериментальные исследования проводились в полевых условиях в летне-осеннее время на слабо пересеченной местности. В качестве цели использовался танк (лобовая проекция). Вид местности показан на рис. 4–6.

Рис. 4. Общий вид местности и наблюдаемая цель – танк (лоб)

Рис. 5. Внешний вид ПДО (t_1 = 1 с)

Рис. 6. Внешний вид ПДО (t_2 = 6 с)

Фотографирование осуществлялось перископом дальнего фотографирования в моменты времени $t_1 = 1$ с и $t_2 = 6$ с (рис. 5, 6) после подрыва. Наблюдаемая цель обозначена значком ◊ на рис. 4.

Условия проведения экспериментальных исследований:

1. Температурный контраст цели, $\Delta T^{\circ} \approx 4{,}3$ °С.

2. Метеоусловия во время эксперимента: температура воздуха 18,5 °С; влажность 65 %; давление 754,3 мм рт.ст.; метеорологическая дальность видимости 30 км; коэффициент прозрачности атмосферы на 1 км – 0,9; скорость ветра 4 м/с; направление ветра перпендикулярно линии визирования; грунт – средней влажности.

3. Дальность до цели – 1400 м.

Для обеспечения техники безопасности проведения экспериментов на местности использовались заряды тола, при подрыве которых образуются ПДО, эквивалентные облакам разрывов реальных снарядов по геометрическим размерам, прозрачности, времени существования. Экспериментальным путем были подобраны величины зарядов толового эквивалента для создания ПДО, соответствующих разрывам снарядов 100 и 152 мм калибра.

Для создания ПДО использовался заряд толового эквивалента для 100-мм ОФС весом 3,6 кг. Заряд подрывался в одной точке на глубине 10 см от поверхности земли. Имитация разрыва 122-мм ОФС осуществлялась подрывом двух зарядов тола по 2,4 кг каждый в двух точках, разнесенных на 10 м друг от друга по фронту (на одной линии, перпендикулярной линии визирования); имитация разрыва 152-мм ОФС трех зарядов тола по 2 кг на расстоянии 10 м друг от друга по фронту. Подрывы толового эквивалента осуществлялись на удалении 10 м от цели, по 3 подрыва перед целью и 1 за целью.

Максимальная разница средних значений характеристик ПДО, полученных для реального снаряда и эквивалентного заряда тола, составляла не более 20 %.

При проведении эксперимента измерялись следующие показатели и характеристики:

– время потери видимости цели оператором за облаком разрыва $\overline{t}_{\text{р}}$;

– средняя ширина и высота ПДО $l_{\text{ср}}$ и $h_{\text{ср}}$.

Время потери видимости цели определялось с помощью секундомера с момента подрыва заряда до момента появления цели. Геометрические размеры ПДО определялись по угломерной сетке прибор 1Н11.

Результаты экспериментальных исследований по определению характеристик ПДО приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики ПДО	Калибр снаряда, мм	Наименование приборов		
		1Н11 0,38…0,75 мкм	1ПН59 3…5 мкм	1ПН65 8…14 мкм
Средняя высота, м	100	11	10	11
	122	11	11	11
	152	11	11	11
Средняя ширина, м	100	5	10	11
	122	10	20	20
	152	25	35	35
Среднее время потери видимости цели, с	100	10	5	4
	122	12	5	4
	152	15	8	8

При подрыве толового заряда на экране тепловизора появляется быстро расширяющееся темное пятно (в режиме «негатив»). Размеры пятна тем больше, чем больше калибр снаряда. Причем в приборе 1ПН65 по периферии облака наблюдаются белые пятна. Цель закрыта облаком, которое движется по направлению ветра. Цель появляется через 4...8 с, в зависимости от величины облака.

При подрыве 100-мм снаряда за целью (10 м сзади цели) на экране тепловизора возникает темное пятно (режим «негатив»), контраст которого превышает контраст цели. Цель не видна. Облако постепенно светлеет. Цель появляется через 3 с на сером фоне.

Заключение

1. На основании проведенных исследований установлено, что геометрические размеры ПДО в диапазонах спектра 3...5 и 8...14 мкм практически одинаковы и составляют:

– для калибра 100 мм: 10×12 м;

– для калибра 122 мм: 20×12 м;

– для калибра 152 мм: 35×12 м.

2. Невидимость цели оператором в тепловизионые приборы за облаком разрыва обусловлена двумя факторами: наличием горячих продуктов распада ВВ в облаке подрыва, температурный контраст которых превышает темпера-

турный контраст цели (что характерно в первой фазе развития облака, $t = 1...3$ с), и наличием пыледымовой смеси непрозрачной в диапазоне 3…5, 8...14 мкм (на всем этапе существования ПДО).

3. Время потери видимости цели для оптических каналов, функционирующих в диапазоне 0,38…0,75 мкм в 1,8…2,1 раза больше, чем для диапазонов 3…5, 8...14 мкм.

Список литературы

1. Боевой устав артиллерии : в 2 ч. Ч. 2. Дивизион, батарея, взвод, отделение (расчет). – М. : Воениздат, 2006. – 360 с.
2. Руководство по боевой работе подразделений оптической разведки артиллерии. – М. : Воениздат, 2006. – 188 с.
3. **Федотов, В. Н.** Вероятностная модель расчета эффективности дымовых боеприпасов при оптико-электронном противодействии / В. Н. Федотов, В. В. Пинчук, А. В. Федотов, В. В. Андрианов // Сборник докладов VII научной конференции Волжского регионального центра РАРАН. – Саров : РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2011. – С. 132–139.
4. **Федотов В. Н.** Оценка влияния экранирующих объект предметов на работу лазерных дальномеров / В. Н. Федотов. – М. Деп. в ЦИВТИ, № В154385. – 1988. – 10 с.

Федотов Владимир Николаевич
кандидат технических наук, доцент, кафедра артиллерийских приборов, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения

E-mail: wlad_3008@mail.ru

Fedotov Vladimir Nikolaevich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of artillery devices, Penza branch of the Military academy of material support

Ашанин Сергей Евгеньевич
адъюнкт, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения

E-mail: staylex24@rambler.ru

Ashanin Sergey Evgenyevich
Postgraduate student, Penza branch of the Military academy of material support

Федотов Алексей Владимирович
кандидат технических наук, кафедра артиллерийских приборов, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения

E-mail: staylex24@rambler.ru

Fedotov Aleksey Vladimirovich
Candidate of engineering sciences, sub-department of artillery devices, Penza branch of the Military academy of material support

Беженцев Алексей Юрьевич,
старший инженер-испытатель, войсковая часть 21374

E-mail: staylex24@rambler.ru

Bezhentsev Aleksey Yuryevich,
The senior engineer the verifier Military unit 21374

УДК 623.681.7

Федотов, В. Н.

Экспериментальная оценка влияния непреднамеренных помех на эффективность многоканальных систем управления оружием / В. Н. Федотов, С. Е. Ашанин, А. В. Федотов, А. Ю. Беженцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 46–54.

УДК 006.91

Н. П. Ординарцева, О. В. Фурман

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Аннотация. Проанализирована ситуация с формированием результата измерений и оценкой неопределенности в контексте международных норм и соглашений.

Ключевые слова: результат измерения, погрешность/неопределеенность измерения.

Abstract. The authors analyze the current situation of measurement result forming and uncertainty evaluation in the context of international norms and arrangements.

Key words: measurement result, error/uncertainty of measurement.

Введение

В настоящее время в предметной области измерений главенствующими являются две концептуальные модели:

1) концептуальная модель, основанная на погрешности измерения (классическая модель);

2) концептуальная модель, основанная на неопределенности измерения.

Последняя концептуальная модель была разработана Объединенным комитетом по руководствам в метрологии (JCGM), возглавляемым директором Международного бюро мер и весов (BIPM) и сформированным семью международными организациями. В настоящее время эта концепция неопределенности измерения одобрена международным метрологическим сообществом.

Эпоха глобального рынка ставит задачу обеспечения единства измерений в широком масштабе: методы оценки результатов измерений и выражения неопределенности должны быть глобально едиными с тем, чтобы измерения, проводимые в разных странах, были сопоставимы по единым правилам. В период вступления страны в ВТО, учитывая задачи гармонизации национальной нормативной базы при сохранении достижений отечественной метрологической школы, вопрос правильного понимания новых концептуальных представлений и понятий в рамках положений этой концепции планирования и организации измерений является особенно актуальным.

1. Сравнительный анализ концепций погрешности/неопределенности измерения

Основополагающим понятием классической концептуальной модели является погрешность Δ, определяемая выражением

$$\Delta X = X_{\text{изм}} - \underset{\substack{\uparrow \\ X_{\text{дейс}}}}{X_0},$$

где X_0 и $X_{\text{дейс}}$ – соответственно истинное и действительное (условно принятое истинное) значение измеряемой физической величины (ФВ); $\left(\delta; X_{\text{дейс}}\right) \to \left(\delta; X_0\right)$, $\delta(.)$ – дельта-функция Дирака.

Деление погрешностей по характеру проявления на систематические и случайные [JCGM 200:2008 (VIM) 2.19] [1, п. 3.5] приводит к внутреннему противоречию в этой модели: анализ погрешностей содержит как статистические, так и нестатистические процедуры. А из этого следует, что не существует математически корректных и общепринятых средств комбинирования систематической и случайной составляющих погрешности в одну суммарную (полную) погрешность, которая давала бы общее представление о качестве результата измерения, т.е. его близости к истинному значению физической величины. Кроме того, невозможно корректно (а не на описательном уровне) определить X_0 и $X_{\text{дейс}}$ – первое является только теоретическим понятием, с его единственным и несуществующим значением, а второе «как можно ближе» (а как близко?) приближается к нему.

Преодоление указанных противоречий классической модели привело к появлению концепции неопределенности, которая согласно [JCGM 200:2008 (VIM) 2.26] [1, п. 4.2] определяется как *«неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании используемой информации»* (заметим, что погрешность по знаку могла быть как положительной, так и отрицательной).

Вероятностная основа концепции неопределенности позволяет оценивать качество измерения, вычисляя и систематическую, и случайную погрешности на ***сравниваемой основе*** [1, п. 3.7]. (Соответствующие составляющие неопределенности группируются по способу оценивания в две категории – типа А [JCGM 100:2008 (GUM) 4.2, JCGM 200:2008 (VIM) 2.28] и типа В [JCGM 100:2008 (GUM) 4.3, JCGM 200:2008 (VIM) 2.29] [1, п. 4.6], и обрабатываются для получения дисперсии результата измерения в соответствии с правилами математической статистики и теории вероятностей). В том что касается случайных воздействий, новая концепция дает в сущности такие же результаты, как и анализ погрешностей, но это абсолютно не так в отношении неизвестных систематических эффектов [2]. В последнем случае результаты оценивания данных измерений признаются более приемлемыми, чем результаты анализа погрешностей.

Концепция неопределенности не отбрасывает понятие «*истинное значение*», оно необходимо для формулировки цели измерения, а также модели измерения, однако в интервале охвата

$$\left(x - U_p \langle X \langle x + U_p\right),$$

где U_p – расширенная неопределенность для данной вероятности охвата p, лежит не одно, а множество истинных значений величины X.

Образно говоря, в первой модели (на основе погрешности Δ) система отсчета связана с результатом измерения, во второй модели (на основе неопределенности $u(x)$) – со значением измеряемой ФВ. Последнее иллюстрирует рис. 1, показывающий в метрологическом пространстве сформированных образов две нечисловые шкалы линейного порядка и получаемый проецированием на эти шкалы результат измерения в соответствии с каждой из этих концепций. Но оценка погрешности как разница между результатом измерения $X_{\text{изм}}$ и референтным значением $X_{\text{дейс}}$ тоже имеет свою неопреде-

ленность, формируемую неопределенностями результата измерения и референтного значения [2]. Таким образом, неопределенность результата измерения является его неотъемлемым свойством, независимо от выбранной модели описания его качества, и в этом смысле термин «неопределенность результата измерения» корректен как в случае использования концепции погрешности, так и в случае обращения к концепции неопределенности.

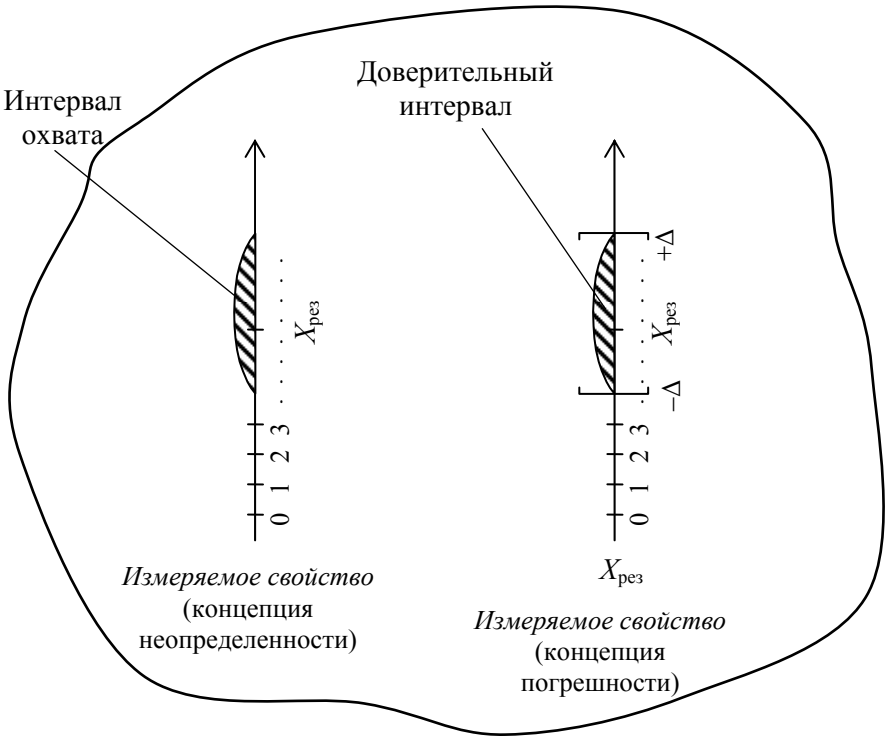


Рис. 1. Метрологическое пространство сформированных образов, нечисловые шкалы линейного порядка и результат измерения в соответствии с концепцией погрешности/неопределенности

Определение оценки погрешности и принадлежащей этой оценке неопределенности иллюстрирует совместимость и непротиворечивость этих двух концептуальных моделей, что наилучшим образом объясняется тем, что обе модели описывают **один и тот же** объект измерения.

2. Цель измерения. Модель измерения

Цель измерения – достижение наилучшей оценки измеряемой величины. Само понятие *измеряемой величины* вводится на определенной *модели* объекта, которая строится для решения конкретной практической задачи и отражает существенные для решения данной задачи особенности объекта при некоторой идеализации его свойств. Изменение измерительной задачи может потребовать уточнения модели (что никак не противоречит принципу множественности моделей). Более того, такое уточнение должно происходить в процессе изучения объекта при постановке новых задач, таким образом, в процессе подготовки измерительного эксперимента необходимыми этапами

являются: выбор модели объекта исследования; определение (дефиниции) параметров модели; определение измеряемой величины, соотнесенной с параметрами модели [3].

Модель измерения [JCGM 200:2008 (VIM) 2.48] является одним из ключевых понятий новой концепции неопределенности [1, п. 3.10–3.12]. Рассмотрим вопрос ее оценивания.

3. Оценки и их виды

Методы получения оценок можно разделить на две большие группы. При использовании первой группы методов и полученных с их помощью *параметрических* оценок приходится оперировать функциями распределения случайных величин, причем характер функции распределения предполагается известным, а неизвестными являются лишь их некоторые числовые параметры. При использовании второй группы *непараметрических* методов знания функций распределения не требуется, иногда предполагается их непрерывность (непрерывность всегда предполагается в задачах измерений).

Среди методов первой группы определения оценок наиболее широкую известность получили метод максимального правдоподобия, байесовский метод получения оценок, метод условных математических ожиданий, метод моментов. Как частные случаи этих методов, выступают метод наименьших квадратов, метод наименьших положительно определенных форм, являющийся обобщением метода наименьших квадратов, метод наименьших модулей.

Полезными свойствами оценок являются свойства **адаптивности** и **робастности**. При адаптивном (или асимптотически всюду эффективном) оценивании благодаря наличию параметра формы имеется возможность для методов оценивания адаптироваться к свойствам ошибок измерений. При робастном оценивании процедуры устойчивы в окрестности выбранной параметрической модели. Робастность оказывается полезным свойством для байесовского подхода, причем не только как средство защиты от дезинформирующих отклонений в строго параметрической модели, что характерно в частотной теории, но и от изменений в априорном распределении параметров. Строгая байесовская теория требовала бы априорных распределений для всего, включая модели и полные окрестности моделей.

И, наконец, если говорить о **точечных** и **интервальных** оценках, то в силу нечисловой природы результата измерения, гомоморфности прямого отображения реального измеряемого свойства объекта измерения на нечисловую шкалу и изоморфности обратного преобразования имеем интервальную неопределенность результата [4]: в классической концепции погрешности выражаемую доверительным интервалом, а в концепции неопределенности – интервалом охвата (JCGM 200:2008 (VIM) 2.36) [1, п. 4.11; п. 5.3].

4. Оценка результата измерения на основе байесовского подхода

Рассмотрим вероятностный байесовский метод получения оценки случайной величины. Введем обозначения: $g(x,\hat{x})$ – совместная плотность распределения x и $\hat{x}$; $g_0(\hat{x}|x)$ – плотность вероятности распределения $\hat{x}$ при условии, что уже получены наблюдения $x_1, x_2, ..., x_n$ случайной величины x,

т.е. апостериорная вероятность $\hat{x}$; $g_1(x)$ – априорная плотность распределения величины x; $g_2(\hat{x})$ априорная плотность распределения $\hat{x}$, если $\hat{x}$ является случайной величиной. Теорема Байеса представляет, по существу, математическое описание познавательного процесса [5]. Имея априорную оценку величины и располагая дополнительной информацией о ней, получаем с помощью этой теоремы соответствующую новую (апостериорную) оценку величины. Математически теорема Байеса представляет собой следствие закона умножения условных вероятностей в теории вероятности и является формальным правилом для изучения явлений, процессов, объектов на основе наблюдений. Последнее символически может быть представлено как

$$\textit{апостериорная} \propto \textit{правдоподобие} \times \textit{априорная},$$

где $\propto$ – пропорциональность с точностью до множителей.

Согласно теореме умножения вероятностей правило Байеса записывается в принятых обозначениях следующим образом:

$$g_0(\hat{x}|x) = \frac{g(x,\hat{x})}{g_1(x)} = \frac{g_0(x|\hat{x})g_2(\hat{x})}{g_1(x)} .$$

Задача отыскания байесовских оценок состоит в том, чтобы при данных наблюдениях $x_1, x_2, ..., x_n$ случайной величины x найти такое значение $\hat{x}$, которое обращает в максимум апостериорную вероятность $g_0(\hat{x}|x)$. Но тогда байесовский метод совпадает с методом максимального правдоподобия, так как решаем в каждом случае соответствующее уравнение

$$\frac{\partial g(x|\hat{x})}{\partial \hat{x}} = 0; \ \frac{\partial g_0(\hat{x}|x)}{\partial \hat{x}} = 0$$

и имеем следующее

$$\frac{\partial g(\hat{x}|x)}{\partial \hat{x}} = \frac{\partial}{\partial \hat{x}}\left(\frac{g(x|\hat{x})g_2(\hat{x})}{g_1(x)}\right) = \frac{\partial g_2(x|\hat{x})}{\partial \hat{x}} = \text{const} .$$

Пусть $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}_{x_i \subset \Omega}$ – измеряемая ФВ с получаемыми результатами измерений x_i, лежащими в диапазоне Ω. Пусть I будет условным обозначением для информации любого рода, относящейся к заключению о X. Тогда вероятность (обусловленная I) гипотезы $x < X < x + dx$ составит

$$\Pr(x \langle X \langle x + dx | I) = f_X(x|I)dx ,$$

где $f_X(x|I)$ – функция плотности вероятности pdf для X.

Если придерживаться теории Гаусса, лучшая оценка для X дается точкой $\hat{x}$, вокруг которой наиболее сильно концентрируется приписанная функция pdf. Эта точка определяется минимум от $\mathrm{E}(X - \hat{x})^2$, т.е. лучшей оценкой для X является

$$\hat{x} = \mathrm{E}X = \int x f_X\left(x \middle| I\right) dx,$$

а соответствующим значением меры концентрации –

$$u^2\left(x\right) = \mathrm{E}\left(X - x\right)^2 = \int \left(x - \hat{x}\right)^2 f_X\left(x \middle| I\right) dx.$$

Это стандартное отклонение pdf принимается за стандартную неопределенность $u\left(x\right)$ для измеряемой ФВ X (JCGM 200, словарная статья 2.30) (из списка № 6 ГОСТ Р 54500.1–2011 «Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределенности измерения», п. 3.18). Следует отметить, что в то время, как стандартная неопределенность $u\left(x\right)$ отражает свойство pdf для X, это не справедливо для расширенной неопределенности.

Если значение измеряемой ФВ задается функцией $X = G\left(X^m : X_1, X_2, ..., X_m\right)$ и содержит m-мерную информацию, то наилучшая оценка X и соответствующая стандартная неопределенность непосредственно получаются из m-мерных интегралов:

$$\begin{cases} \hat{x} = \int G\left(\hat{x}\right) f_X\left(x \middle| I^m\right) dx, \\ u^2\left(x\right) = \int \left(G\left(x\right) - \hat{x}\right)^2 f_X\left(x \middle| I^m\right) dx. \end{cases}$$

Принцип трансформирования как этапа оценивания неопределенности измерений (JCGM 101:2008 5.2) [1, п. 7.1.1] на основе имеющейся информации I позволяет использовать последнюю наиболее полным образом, что позволяет избежать недостатков, присущих параметрическим оценкам.

Заключение

В связи с актуальностью поставленного вопроса проведен сопоставительный анализ основных представлений концептуальных моделей погрешности и неопределенности измерения для решения задач оценивания данных по результатам измерений и формирования результата измерений в условиях неопределенности. Представленный в статье подход гармонизирован с международными нормативными документами, имеющими статус добровольного применения.

Список литературы

1. Введение к «Руководству по выражению неопределенности измерения» и сопутствующим документам. Оценивание данных измерений / пер. с англ. под науч. ред. д.т.н., проф. В.А. Слаева, д.т.н. А. Г. Чуновкиной. – СПб. : Профессионал, 2011. – 58 с.
2. **Данилов, А. А.** Планирование эксперимента в условиях неопределенности результатов измерений / А. А. Данилов, Н. П. Ординарцева // METROLOGY AND METROLOGY ASSURANCE 2012 : Proceeding of the 22th National Scientific Symposium with International Participation, September 10–14, 2012, Sozopol, – Bulgaria, Technical University of Sofia, 2012. – P. 29–34.

3. **Ординарцева, Н. П.** Математическая модель измерительной задачи / Н. П. Ординарцева // Известия ЮТУ. Технические науки. Тематический выпуск «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». – 2012. № 5 (130). – С. 90–94.
4. **Ординарцева, Н. П.** Регрессионная модель на данных с интервальной неопределенностью / Н. П. Ординарцева // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 83–87 // URL: http://mca.altsu.ru/download/M12-2_1p3.pdf
5. **Вегер, В.** Информация об измеряемой величине как основа формирования функции плотности вероятности / В. Вегер // Измерительная техника. – 2003. – № 9. – С. 3–9.

Ординарцева Наталья Павловна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра метрологии и системы качества,
Пензенский государственный
университет

E-mail: nat@rclink.ru

Ordinartseva Natalya Pavlovna
Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of metrology and quality system,
Penza State University

Фурман Оксана Васильевна
директор, Сердобский филиал,
Пензенский государственный
университет

E-mail: sf.pgu@yandex.ru

Furman Oksana Vasilyevna
Director, Serdobsk branch
of Penza State University

УДК 006.91

Ординарцева, Н. П.

Формирование результата измерения в условиях неопределенности / Н. П. Ординарцева, О. В. Фурман // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 55–61.

УДК 620.1.08, 608.2

С. Н. Галий, В. К. Доля

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗОНАНСНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ ЗАДАЧ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ[1]

Аннотация. Формулируются требования к резонансному высокочастотному пьезоэлектрическому элементу антенной решетки для решения задач неразрушающего контроля. Рассматриваются различные способы изготовления элементов антенной решетки. Производится математическое моделирование предложенных вариантов конструкции. На основе анализа полученных данных строятся и исследуются макеты антенных решеток.

Ключевые слова: ультразвуковая антенная решетка, пьезоэлектрический элемент, неразрушающий контроль.

Abstract. The authors formulate the requirements for high-frequency resonant piezoelectric element of an ultrasonic phased array to solve the problems of nondestructive testing. The article considers various ways of making the phased array elements. The researchers conduct mathematical simulation of different design variants and on the basis of obtained data analysis construct and investigate array samples.

Key world: ultrasonic phased array, piezoelectric element, nondestructive testing

Введение

Исследованиям характеристик и возможностей применения антенных решеток (АР) для задач ультразвукового (УЗ) неразрушающего контроля материалов и изделий, а также разработкам аппаратуры с их использованием уделяется большое внимание у нас в стране и за рубежом. В настоящее время это направление неразрушающего контроля – одно из наиболее перспективных и активно развивающихся. Применение систем неразрушающего контроля (НК) с преобразователем типа АР позволяет повысить производительность, достоверность и наглядность контроля и осуществить оперативное изменение формы диаграммы направленности преобразователя, фокусировку УЗ энергии в заданной точке [1–3].

Наибольшее применение находят линейные АР (рис. 1), представляющие собой набор идентичных (приемо-излучающих) пьезоэлектрических элементов, расположенных на определенном расстоянии, не более половины длинны УЗ волны на одной оси. В состав линейной АР, так же как и в «классический» УЗ преобразователь, входят: протектор, демпфер, корпус, кабель и разъем.

1. Проектирование антенной решетки

Проектирование АР – наукоемкий, технологически сложный и многоитерационный процесс, при котором приходится решать массу сложных задач, таких как выбор конструкционных материалов для составных частей АР,

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрауки Росси в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

создание технологии сборки, проведение испытаний и т.д. Одной из основных проблем при разработке АР является поиск оптимального решения двух взаимосвязанных вопросов: обеспечение оптимальных геометрических размеров элементов и выбор технологии их изготовления. В настоящее время применяют следующие подходы для решения данных проблем:

– распил пьезоэлектрической пластины на отдельные механически несвязанные (частично связанные) элементы;

– сборка из одиночных пьезоэлектрических преобразователей;

– секционирование активного электрода на цельной пьезоэлектрической пластине;

– применение пьезоэлектрических композиционных материалов.

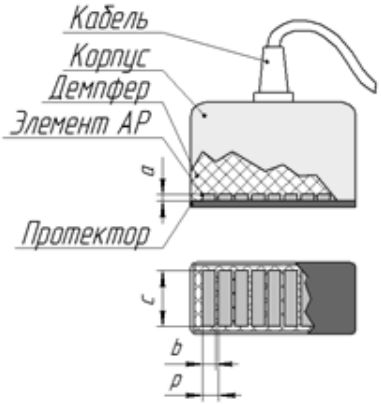


Рис. 1. Линейная АР: *a* – высота элемента АР; *b* – ширина элемента АР; *c* – длина элемента АР; *p* – шаг расположения элементов АР

Для решения вышеобозначенной проблемы введено понятие «Идеальный элемент АР», к параметрам и свойствам которого необходимо стремиться при разработке элемента АР. «Идеальный элемент АР» решетки должен обладать следующими характеристиками:

– круговая диаграмма направленности (элемент АР излучает цилиндрическую акустическую волну), отсутствие боковых лепестков на диаграмме направленности;

– поршнеобразные колебания в полосе пропускания;

– большой коэффициент двойного преобразования, так как АР решетка работает в совмещенном режиме;

– широкая полоса пропускания, необходимая для излучения и приема коротких УЗ эхо-сигналов.

После оценки возможных областей применения АР с учетом потребностей рынка НК была выбрана для разработки линейная 16-элементная АР со следующими параметрами: центральная частота 5 МГц, рабочая полоса не мене 50 %, сектор сканирования не менее ±40°, коэффициент преобразования –40 дБ).

Для излучения и приема УЗ-волн существует множество разнообразных способов. Применение пьезоэлектрических материалов наиболее предпочтительно для целей УЗ НК. После анализа доступных пьезоэлектрических материалов [4] был выбран ЦТС-19 как наиболее подходящий по своим техниче-

ским характеристикам, качествам, а также как материал с хорошо налаженной технологией производства. Перспективным также является применение одноосных и композиционных пьезоэлектрических материалов связанности 3-1 [5], но из-за сложности технологии производства высокочастотных образцов, в рамках данной работы не рассматривается.

Выполнение первого условия «Идеального элемента АР» возможно, если размер излучающего элемента b стремится к бесконечно малой величине, так называемый линейный излучатель. На практике из-за технологических сложностей изготовления, падения коэффициента преобразования, а также из-за ограниченности количества каналов системы НК ширину элемента АР нецелесообразно выполнять менее л/8 [6] (где λ – длина УЗ-волны в объекте контроля). Таким образом, каждый элемент АР имеет поле излучения/приема не сферической формы, а с определенной «вытянутой» диаграммой направленности, что приводит к ослаблению УЗ-волны при отклонении ее на некоторый угол от нормали и ограничению сектора сканирования всей АР.

Другим фактором, ограничивающим ширину элемента АР и шаг их расположения, является то, что при отклонении УЗ-луча АР на некоторый угол от нормали возможно появление дополнительных лепестков на диаграмме направленности, так называемых «дифракционных максимумов решетки», характерных только для АР.

Известно [6] что для обеспечения максимально возможного отклонения луча без образования дифракционных максимумов необходимо выполнение условия

$$p_{max} = 0{,}52\lambda/\sin \alpha_{max},$$

где p_{max} – максимально возможный шаг расположения элементов АР; α_{max} – максимальный угол отклонения УЗ луча; λ – длина волны в объекте контроля.

С учетом технологических возможностей получаем для нашего случая следующее соотношение:

$$0{,}125\lambda < b < 0{,}61\lambda.$$

Также следует учитывать наличие взаимной связи между элементами АР, существенно меняющей свойства как отдельного элемента, так и всей решетки в целом. Суть явления взаимной акустической взаимосвязи внутри конструкции состоит в том, что каждый элемент решетки, являясь излучателем акустической волны, создает дополнительное поле на всех соседних элементах, что, в свою очередь, приводит к появлению на них напряжений и токов, наведенных под действием акустических полей соседнего элемента. Наличие связи между элементами АР приводит к сужению возможного сектора сканирования АР, а также к появлению ложных эхо-сигналов, регистрации «ложных» дефектов в объекте контроля. Величина дополнительного поля зависит от взаимного расположения элементов и их размеров. Исходя из вышеприведенных рассуждений, АР с заданной центральной частотой должна иметь следующие геометрические параметры: $p \approx 0{,}6$ мм, $a \approx 0{,}5\lambda$, конкретные значения будут уточнены далее.

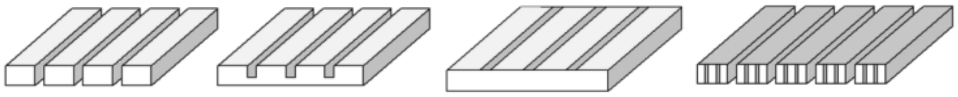
2. Постановка задачи на моделирование

Поскольку разрабатываемая АР является высокочастотным устройством, функционирующим в коротковолновой области ($\lambda \approx 1$ мм), размеры

чувствительного элемента становятся соизмеримы с длиной волны. Это приводит к необходимости решения достаточно сложной задачи колебаний, возникающих в АР, что аналитическими методами практически не осуществимо. Поэтому задача выбора типа элемента АР и его оптимальных геометрических размеров осуществлялась методами математического моделирования.

Выполнение второго условия «идеального элемента АР» при применении пьезоэлектрических преобразователей в полной мере невозможно, так как колебания пьезоэлектрического элемента в данном случае носят более сложный характер из-за соизмеримости геометрических размеров ($0{,}125\lambda < b < 0{,}61\lambda$, $a \approx 0{,}5\lambda$). Известно [7], что моды колебаний ограниченных пьезоэлектрических тел прямоугольной формы в общем случае являются трехмерными сложными колебаниями, т.е. колебаниями, у которых смещения по трем осям координат связаны между собой. Лишь в некоторых случаях при определенных соотношениях размеров моды колебаний допускают простую интерпретацию, которая и позволяет выбрать размеры пьезоэлектрических элементов, соответствующие определенной частоте резонанса. Пример специального соотношения размеров пьезоэлектрических элементов, характерных для традиционных пьезоэлектрических преобразователей, – это толщинные колебания плиты [8]. При этом предполагается, что размер вдоль оси поляризации намного меньше поперечных размеров. В этом случае имеется четкий изолированный резонанс. Однако при поперечных размерах, соизмеримых с продольными, картина резко изменяется. Как показали результаты моделирования, при сравнимых геометрических размерах элемента АР $a \approx 0{,}29$ мм и $b \approx 0{,}5$ мм и при значительно большем размере $c = 12$ мм можно перейти от задачи трехмерного моделирования к задаче плоско деформированного состояния, без существенной потери в достоверности результатов моделирования. При этом автоматически отсекаются низкочастотные продольные моды колебаний вдоль наибольшего размера, а также прочие сложные трехмерные моды колебаний.

Построено пять типов моделей чувствительного элемента АР (рис. 2) для проведения расчетов в частотной и временной области. В качестве среды излучения был использован материал, по своим механическим характеристикам аналогичный ЦТС-19, но не обладающий пьезоэлектрическими свойствами.



а) б) в) г)

Рис. 2. Условное изображение чувствительных элементов АР: а – модель № 1; б – модель № 2, 3; в – модель № 4; г – модель № 5

При проведении моделирования во временной области на элемент № 1 АР подавался импульс возбуждения –1 В, 100 нс. Элементы АР № 2…5 и элемент № 1 после окончания импульса возбуждения находились в режиме короткого замыкания. Производился расчет изменения заряда на элементах АР, а также возникающих деформации и напряжений во всей конструкции модели. Затем выполнялась оценка следующих параметров: коэффициент пе-

рекрестной связи ($K_{\text{с}}$), коэффициент двойного преобразования ($K_{\text{П}}$), форма колебаний элемента АР, создаваемая УЗ-волна, параметры сигнала при переходном процессе и эхо-сигнала.

Моделирование конструкций АР в частотной области включало в себя расчет зависимостей модуля, активной и реактивной составляющих полного электрического сопротивления. По данным характеристикам оценивалась полоса пропускания элемента АР и наличие паразитных резонансов.

3. Результаты моделирования

Модели № 1, 2, 3 представляют собой АР, выполненные из пьезоэлектрической пластины, в которой формирование элементов выполнялось путем нанесения параллельных пропилов на глубину *a*, 0,8*a*, 0,6*a* для моделей № 1, 2, 3 соответственно. Как показали результаты моделирования, данные типы конструкций обладают длительными переходными процессами (рис. 3), обусловленными наличием квазипоперечной модой колебаний элемента АР. Данный факт подтверждается наличием высокодобротного ($Q_M \approx 5...15$) резонанса на частоте 2,8 МГц (рис. 4).

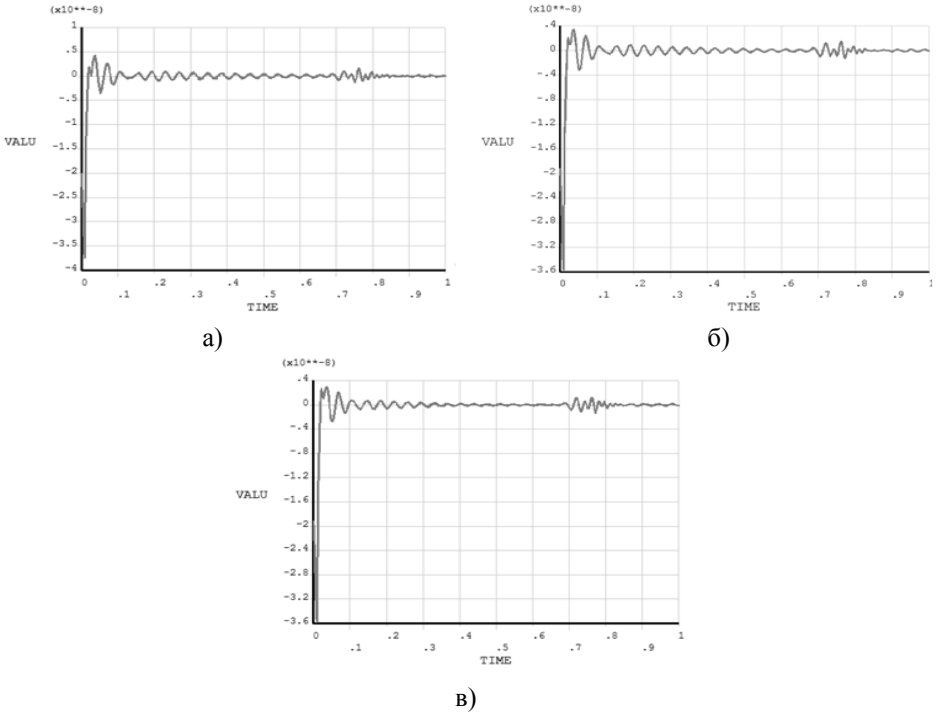
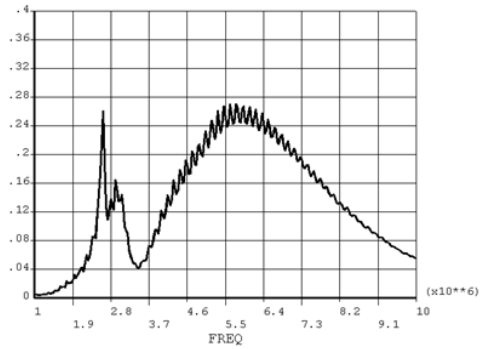


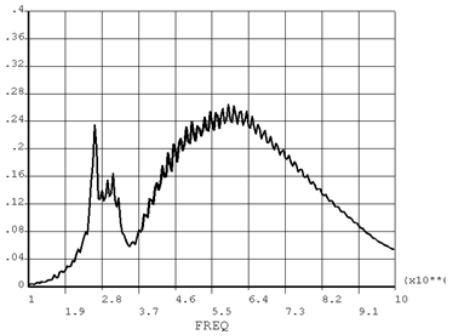
Рис. 3. Осциллограмма изменения заряда на элементе АР № 1:
а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3

Необходимо отметить, что добротность данного резонанса падает по мере уменьшения глубины пропила. Можно предположить, что для крайнего случая (при отсутствии пропилов) высокочастотный квазипоперечный резонанс исчезнет. Для проверки данной гипотезы была построена модель № 4. Как показал результат расчета (рис. 5), элемент АР действительно возбуждается только на частоте, соответствующей высокочастотному продольному

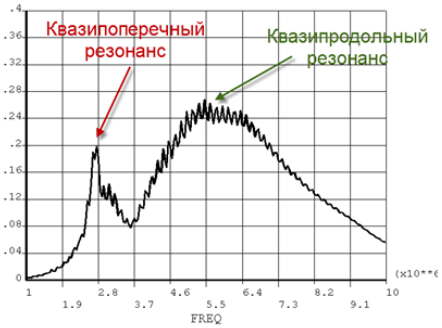
резонансу пьезоэлектрической пластины. При этом наблюдается короткий переходной процесс (рис. 5). В свою очередь, модель № 4 имеет самый большой из всех моделей K_c = –16,6 дБ (табл. 1), что вполне логично и объясняется наличием сильной механической и электрической связи между элементами. Наличие столь сильной связи между элементами АР приводит к возбуждению соседних элементов АР, что, в свою очередь, влечет существенное сужение диаграммы направленности элемента АР, появление противофазных участков и малый коэффициент преобразования.



а)

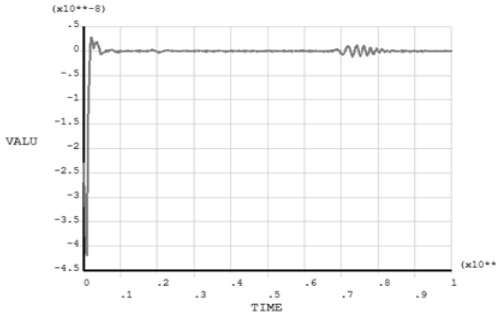


б)



в)

Рис. 4. Графики зависимости активной проводимости элемента АР:
а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3



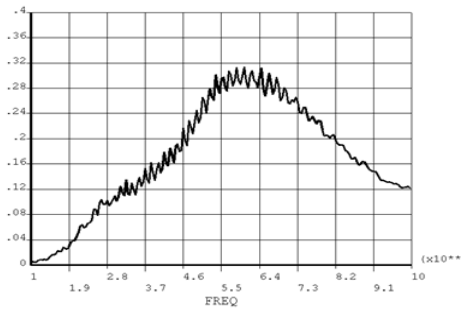


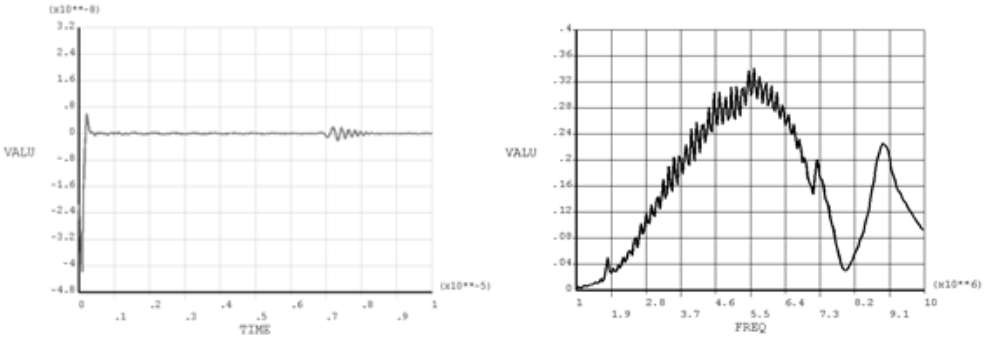
Рис. 5. Осциллограмма изменения заряда и график
зависимости активной проводимости элемента АР, макет № 4

Таблица 1

Результаты моделирования

Модель	$K_{П}$, дБ	$K_{с}$, дБ	$t_{ПП}$, мкс	$t_{ЭС}$, мкс	$f_{П}$, МГц	$Q_{М}$
№ 1	–23,0	–31,2	5,2	1,1	5,5	11
№ 2	–22,5	–28,5	4,1	1,1	5,5	9
№ 3	–22,5	–26,0	3,2	1,1	5,5	8
№ 4	–25,1	–16,6	0,5	1,1	5,7	8
№ 5	–21,2	–38,4	0.3	1.1	5,5	1,5

Модель № 5 принципиально отличается от моделей № 1…4 тем, что элемент АР образован из трех подэлементов, механически не связанных, но имеющих общие электроды. Предварительно для определения оптимальных размеров была построена модель одиночного элемента, в котором варьировалось соотношение размеров a/b, критериями выбора служили частота резонанса и коэффициент электромеханической связи. Было установлено, что наиболее полно требованиям «идеального элемента» удовлетворяет подэлемент с конкретным соотношением размеров. По этим результатам была построена модель № 5. Как показал результат расчета (рис. 6), элемент АР имеет: ярко выраженные продольные колебания, короткий переходной процесс, самый большой $K_{П}$ и малый $K_{с}$. Также данный тип элемента АР обладает квазипоперечным резонансом на частоте 9,1 МГц, который практически не оказывает никакого влияния на основные технические характеристики элемента АР и может быть отфильтрован в системе НК.



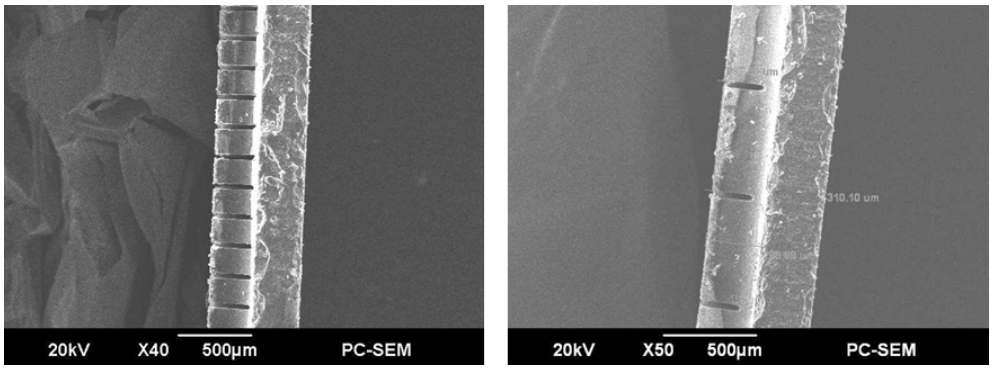
а) б)

Рис. 6. Осциллограмма изменения заряда (а) и график зависимости активной проводимости элемента АР, макет № 5 (б)

4. Экспериментальное исследование

По результатам моделирования были изготовлены макеты модулей АР (рис. 7), состоящих из пьезоэлектрического элемента, разрезанного на подэлементы и протекторы.

Как показали измерения основных характеристик в частотной и временной области (рис. 8, 9) изготовленных образцов, выбранные математические модели и их теоретический анализ адекватно отображают свойства элементов АР.



а) б)

Рис. 7. Снимок торца пьезоэлектрического модуля АР: а – АР, изготовленная по модели № 5; б – АР, изготовленная по модели № 2

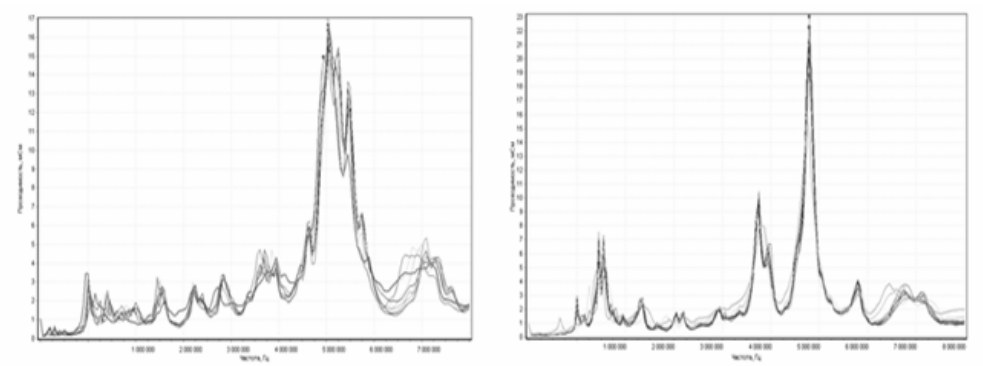


Рис. 8. График зависимости активной проводимости подэлементов модуля АР: а – АР, изготовленная по модели № 5; б – АР, изготовленная по модели № 2

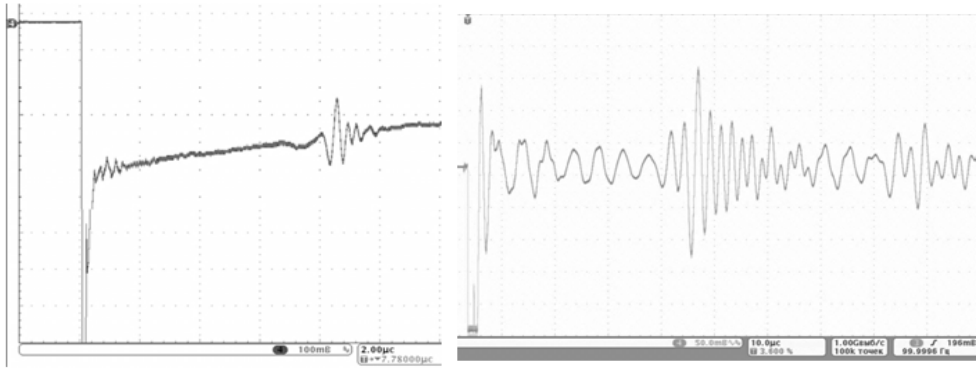


Рис. 9. Осциллограмма изменения заряда подэлементов модуля АР: а – АР, изготовленная по модели № 5; б – АР, изготовленная по модели № 2

Следовательно, на основе представленных в настоящей работе теоретических экспериментальных исследований можно сделать вывод, что для изготовления элемента АР можно рекомендовать конструкцию, построенную по модели № 5: элемент должен состоять из подэлементов с оптимальным соотношением размеров (0,29×0,3 мм).

Список литературы

1. **Фалькевич, С. А.** Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор) / С. А. Фалькевич // Дефектоскопия. – 1984. – № 3. – С. 3–16.
2. **Song, S. J.** Development of an ultrasonic phased array system for nondestructive tests of nuclear power plant components / S. J. Song, H. J. Shin, Y. H. Jang // Nuclear Engineeringand Design. – 2002. –V. 214. – С. 151–161.
3. **Pettigrew, I. G.** Further Developments in Ultrasonic Phased Array Inspection of Aging Aircraft / I. G. Pettigrew, D. I. A. Lines, J. A. Skramstad et al. // Proceedings of Aging Aircraft. – Atlanta, 6–9 March 2006.
4. **Галий, С. Н.** Исследование характеристик пьезоматериалов в сильных электрических полях «Петля» / С. Н. Галий, М. Б. Копелиович, В. А. Хренкин // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4. – С. 72–74.
5. **Fleury, G.** Improvements of ultrasonic inspections through the use of piezocomposite transducers / G. Fleury, C. Gondar. // 8th European Conference on Non Destructive Testing's. June 2002. – Barcelona, Spain, 2002. – С. 215 – 218.
6. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. R/D Tech Guideline. 2004. Quebec: R/D Tech inc., 312 с.
7. **Митько, В. Н.** Анализ математических подходов и выбор метода математического моделирования пьезоэлектрических устройств / В. Н. Митько // Отчет по НИР, Ростов н/Д : НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, 2010. – 214 с.
8. **Мадорский, В. В.** Симметричные колебания пьезоэлектрических тел с потерями / В. В. Мадорский, В. Н. Митько // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42. – С. 282–285.

Галий Сергей Николаевич
аспирант, Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону)

Galiy Sergey Nikolaevich
Postgraduate student, South Federal University (Rostov-on-Don)

E-mail: sn.galiy@gmail.com.

Доля Владимир Константинович
кандидат технических наук, заместитель директора по науке и инновациям, Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону)

Dolya Vladimir Konstantinovich
Candidate of engineering sciences, deputy director for research and innovation, research and design department "Pyezopribor" of the South Federal University (Rostov-on-Don)

E-mail: dvk@sfedu.ru

УДК 620.1.08, 608.2

Галий, С. Н.

Оптимизация резонансного высокочастотного пьезоэлектрического элемента антенной решетки для задач неразрушающего контроля / С. Н. Галий, В. К. Доля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 62–70.

УДК 519.6

И. В. Бойков

ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ НА МАЛЫХ ТЕЛАХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Построены итерационные методы решения следующих задач электростатики и электродинамики: 1) распределение заряда на поверхности идеального проводящего тела, находящегося во внешнем поле; 2) вычисление электрической емкости идеально проводящих тел; 3) приближенное решение задачи рассеяния излучений на малых телах произвольной формы. Исследование этих задач основано на общем математическом аппарате – приближенном решении слабосингулярных интегральных уравнений на спектре.

Ключевые слова: итерационные методы, задачи электростатики, задачи электродинамики, слабосингулярные интегральные уравнения.

Abstract. The article describes iterative methods to solve the following problems of electrostatics and electrodynamics: 1. Charge distribution on the surface of an ideal conducting body, situated in the external field; 2. Calculation of capacitance of ideal conducting bodies; 3. Approximate solution to a problem of radiation scattering on small bodies of random shape. Investigation of these problems is based on the general mathematical technique – approximate solution of weakly singular integral equations on a spectrum.

Key words: iterative methods, electrostatics problems, electrodynamics problems, weakly singular integral equations.

Введение

Многие задачи физики и техники моделируются операторными и, в частности, интегральными уравнениями первого рода вида

$$Ax = f, \tag{1}$$

где A – линейный оператор из банахова пространства B в B.

Интегральные уравнения первого рода являются классическим примером некорректных задач [1]. Для их решения разработаны многочисленные методы регуляризации, в число которых входят итерационные методы. Приведем несколько итерационных методов решения операторных и интегральных уравнений первого рода, которые используются в работе.

Для решения уравнения (1) при условиях $\| A \| = 1$, $\| A - I \| = 1$ в работе [2] предлагается следующий итерационный метод:

$$x_{n+1} = (I - A)x_n + f, \quad n = 0,1,\ldots, \ \bar{x}_n = \frac{1}{n+1}\sum_{m=0}^{n} x_n, \tag{2}$$

где x_0 – произвольный элемент пространства B.

Показано, что если B – рефлексивное пространство, то итерационный процесс (2) всегда сходится к одному из решений уравнения (1), если последнее разрешимо, и является регуляризующим. Итерационный метод (2) обладает, как показано в [2], еще одним достоинством – он сходится в равномерной метрике.

Итерационный метод (2) допускает следующее обобщение [2]: последовательность $x_{n+1} = (I - \mu A)x_n + \mu f$, $0 < \mu \le 1$, сходится.

Замечание. Последовательность (2) построена по аналогии с суммированием расходящихся рядов по методу Фейера [3]. Из доказательства, приведенного в работе [2], следует, что и многие другие методы суммирования расходящихся рядов [4, 5], в частности методы Валле – Пуссена и Бернштейна – Рогозинского, также могут быть использованы для решения уравнения (1).

Теорема 1 [6]. Пусть B – рефлексивное банахово пространство и $\| K^n \| = C,\ n = 1,2,...,C = \text{const},\ 0 < C < \infty.$ Итерационный процесс

$$x_{n+1} = \alpha_n x_n + (1-\alpha_n)(Kx_n - f), 0 < \alpha_* \le \alpha_n \le \alpha^* < 1,\ n = 0,1,\ldots, \tag{3}$$

сходится к решению x^* уравнения $x = Kx - f$, если последнее разрешимо.

Распределение зарядов на поверхности идеального проводника

Рассмотрим следующую классическую задачу электростатики. Пусть идеально проводящее тело с кусочно-гладкой поверхностью Γ находится в электростатическом поле $E = -\nabla\varphi.$ Тогда на поверхности тела индуцируется заряд с плотностью $\sigma,$ которая удовлетворяет [7] интегральному уравнению

$$\sigma(s) = -2\frac{\partial\varphi}{\partial n} - \int_\Gamma \frac{\partial}{\partial n_s}\frac{1}{2\pi r(s,t)}\sigma(t)dt \equiv f - A\sigma, \tag{4}$$

где n – внешняя нормаль к поверхности Γ, нижний индекс s в n_s означает, что производная берется по переменной s; s и t – точки на поверхности Γ; $r(s,t)$ – расстояние между точками s и t в евклидовой метрике; dt – элемент площади поверхности Γ.

Уравнение $\sigma + A\sigma = 0$ исследовано в монографии [8, с. 623–625]. Показано, что оно не имеет собственных значений внутри единичной окружности с центром в начале координат, а на единичной окружности имеет собственное значение $\lambda = -1$.

Замечание. В данном разделе собственные значения понимаются как это принято в теории интегральных уравнений: комплексное число λ называется собственным значением уравнения $\sigma + A\sigma = 0$, если существует элемент $x \ne 0$ такой, что $x + \lambda Ax = 0.$

Тамже показано, что однородное уравнение $\sigma + A\sigma = 0$ имеет только одно линейно независимое решение σ_0.

Известно [8, с. 624], что уравнение (4) имеет собственное значение, равное -1 кратности единица, и единственную собственную функцию. Таким образом, задача распределения заряда по идеально проводящей поверхности является классической задачей на спектре.

Различным методам решения этой задачи посвящено большое число работ. В работе [7] для решения уравнения (4) предложен итерационный метод

$$\sigma_{n+1}(s) = -\int_\Gamma \frac{\partial}{\partial n_s}\frac{1}{2\pi r(s,t)}\sigma_n(t)dt - \frac{2\varphi(s)}{\partial n_s} \tag{5}$$

и доказана его сходимость в предположении, что выполнено условие

$$\int_{\Gamma} \sigma_0(t)dt = 0. \qquad (6)$$

При численной реализации этого метода возникают большие затруднения из-за его неустойчивости к возмущениям и при аппроксимации интегрального оператора.

В этом отношении более предпочтительными являются итерационные методы (2), (3).

Для решения уравнения (4), которое представим в виде

$$K\sigma \equiv \sigma + A\sigma = f, \qquad (7)$$

воспользуемся итерационным процессом

$$\sigma_{n+1} = \alpha_n \sigma_n - (1-\alpha_n)(A\sigma_n - f), \quad n = 0,1,\ldots, \qquad (8)$$

где $0 < \alpha_* \le \alpha_n < \alpha^* < 1$.

Теорема 2. Итерационный процесс (8) сходится при любом начальном приближении.

Доказательство. Из теоремы 1 следует, что для доказательства сходимости итерационного процесса (8) достаточно выполнения неравенства $\| A^n \| \le B = \text{const}, n = 1, 2, \ldots$ Известно [9], что расстояние от начала координат до ближайшего собственного значения уравнения $\sigma + A\sigma = 0$ определяется формулой

$$r = 1 / \lim_{n\to\infty} (| A^n |)^{1/n}.$$

Так как оператор A не имеет собственных значений внутри единичного круга, а на единичной окружности имеет собственное значение $\lambda = -1$, то $r = 1$ и, следовательно, $\lim_{n\to\infty} (\| A^n \|^{1/n}) = 1$. Отсюда $\| \mathrm{A}^n \| \le B = \text{const}, \ n = 1, 2, \ldots$

Теорема доказана.

Замечания.

1. При численной реализации вычислительной схемы (8) необходимо следить за тем, чтобы норма конечномерной аппроксимации оператора A не превосходила 1. Проведение подобной коррекции программно реализуемо.

2. При решении задачи о распределении заряда во внешнем поле естественно предполагать, что первоначальный заряд равен нулю. Для этого в итерационном процессе (8) следует в качестве начального значения взять функцию $\sigma_0(s)$, удовлетворяющую условию $\sigma_0(s) \equiv 0$.

Тогда итерационный процесс (8) будет сходиться к функции $\sigma^*(s)$, описывающей распределение заряда на идеально проводящей поверхности, не имеющей первоначального заряда. Докажем это утверждение. Известно, что подпространство нулей уравнения $\sigma + A\sigma = 0$ имеет размерность 1 и его базисом является собственная функция уравнения $\sigma + A\sigma = 0$.

Пусть $H -$ гильбертово пространство. Обозначим через H_1 подпространство нулей уравнения $\sigma + A\sigma = 0$, а через H_2 его дополнение до H.

Из теории Рисса – Шаудера [10] следует, что итерационный процесс (8) можно представить в виде системы из двух независимых уравнений:

$$\sigma_1^{n+1} = \alpha_n \sigma_1^n + (1-\alpha_n)(A\sigma_1^n - f_1); \tag{9}$$

$$\sigma_2^{n+1} = \alpha_n \sigma_2^n + (1-\alpha_n)(A\sigma_2^n - f_2), \quad n = 0,1,\ldots, \tag{10}$$

где $f = f_1 + f_2, \sigma^0 = \sigma_1^0 + \sigma_2^0, f_1, \ \sigma_1^0 \in H_1, \ f_2, \sigma_2^0 \in H_2$.

Так как базисом подпространства H_1 является собственная функция уравнения $\sigma + A\sigma = 0$, то из разрешимости уравнения (4) следует, что

$$f_1 \equiv 0, \ \int_\Gamma f_2(s)\,ds = 0.$$

Следовательно, предыдущая система имеет вид

$$\sigma_1^{n+1} = \alpha_n \sigma_1^n + (1-\alpha_n) A\sigma_1^n; \tag{11}$$

$$\sigma_2^{n+1} = \alpha_n \sigma_2^n + (1-\alpha_n)(A\sigma_2^n - f_2). \tag{12}$$

Из теоремы 2 следует, что каждый из итерационных процессов независимо сходится к функциям σ_1^* и σ_2^*, причем $\sigma_1^0 = \sigma_1^1 = \ldots \sigma_1^n = \ldots = \sigma_1^* \equiv 0$. Решение x_2^* второго уравнения определяет распределение заряда. Интегрируя уравнение (12) по области Γ, имеем

$$\int_\Gamma \sigma_2^{n+1}(s)\,ds = \int_\Gamma \sigma_2^n(s)\,ds = \cdots = \int_\Gamma \sigma_2^0(s)\,ds = 0.$$

Таким образом, итерационный процесс (8) с начальным приближением $\sigma_0 \equiv 0$ сходится к функции $\sigma^*(s)$, описывающей распределение заряда на поверхности идеального проводника, помещенного во внешнее поле и не имеющего первоначального заряда.

Методы вычисления электрической емкости

Теория электростатики описывается уравнениями

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho_0}{\varepsilon_0}, \tag{13}$$

$$\nabla \times E = 0, \tag{14}$$

где E – электрическое поле; ρ_0 – распределение зарядов; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$; ε_0 – характеристика среды.

Переход от уравнений (13), (14) к соответствующим уравнениям теории гармонических функций осуществляется с помощью электростатического потенциала φ, который определяется формулой $E == -\nabla\varphi$.

Электростатический потенциал в точке P записывается в виде

$$\varphi(P) = -\int_{P_0}^{P} Eds.$$

Обычно в качестве точки P_0 берут бесконечно удаленную точку.

Пусть заряд распределен на поверхности Γ с плотностью $\rho(x, y, z)$, $(x, y, z) \in \Gamma$. Тогда потенциал, создаваемый этой поверхностью в точке P, равен

$$\varphi(p) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_{\Gamma} \frac{\rho(\xi, \eta, \zeta)}{r(p, p')} ds,$$

где p' – точка с координатами (ξ, η, ζ), расположенная на поверхности Γ.

С математической точки зрения введение электростатического потенциала очень удобно, так как сводит задачи электростатики к простейшим эллиптическим уравнениям.

Подставляя в уравнение (13) значение $E = -\nabla \cdot \varphi$, приходим к уравнению

$$\Delta\varphi = -\rho_0. \tag{15}$$

Обозначим через Γ поверхность проводника, находящегося в электростатическом поле E. Так как в стационарном электростатическом поле заряды в проводнике Γ постоянно распределены, то справедливо граничное условие $E_t|_{\Gamma} = 0$. Здесь, как и всюду ниже, через N обозначена внешняя нормаль к поверхности Γ, а через t – тангенциально составляющая вектора E. С понятием потенциала тесно связано понятие емкости. Приведем определение емкости, принятое в электротехнике.

Определение 1 [11, с. 52]. Емкостью уединенного проводника, т.е. проводника, бесконечно удаленного от всех других проводников, называется величина заряда, необходимая для сообщения этому проводнику потенциала, равного единице. Емкость принято обозначать буквой C.

Наряду с определением емкости, принятым в электротехнике, емкость может быть введена как константа, характеризующая геометрические свойства поверхности. Пусть в евклидовом пространстве E_n задана замкнутая поверхность $\partial\Omega$, ограничивающая область Ω. Поверхность $\partial\Omega$ будем рассматривать, следуя [12], как проводник. Это означает, что гармоническая функция $u(x)$, $x = (x_1, \ldots, x_n)$, определенная вне области Ω, принимает на $\partial\Omega$ постоянные значения.

Пусть гармоническая функция $u(x)$ вне области Ω разлагается в ряд по поверхностным гармоникам $r = (x_1^2 + \cdots + x_n^2)^{1/2}$. На поверхности $\partial\Omega$ потенциальная функция $u(x)$ принимает постоянное значение

$$u_0 = X_0 r^{-1} + X_1 r^{-2} + \cdots + X_n r^{-n+1}. \tag{16}$$

Определение 2 [13]. Величина $C = X_0 / u_0$ зависит только от поверхности Ω и называется емкостью проводника Ω.

Известно, что величины емкости, введенные определениями 1 и 2, совпадают.

Для некоторых простейших геометрических тел известны аналитические формулы для определения емкости. Приведем некоторые из них.

Емкость уединенного шара равна его радиусу: $C = R$.

Известно [12, стр. 40], что емкость уединенного сплюснутого эллипсоида $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{c^2}{c^2} = 1$ $(a = b > c)$ равна $C = \frac{4\pi\varepsilon_0\sqrt{a^2 - c^2}}{\arccos(c/a)}$, а емкость уединенного вытянутого эллипсоида $(a < b = c)$ равна $C = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{\mathrm{Arch}(a/b)}$.

В общем случае [12, с. 39], емкость эллипсоида выражается эллиптическим интегралом I рода по формуле

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{2}\int_0^\infty \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi + a^2)(\xi + b^2)(\xi + c^2)}}.$$

Отметим, что точные аналитические формулы для вычисления емкости удалось получить лишь в исключительных случаях.

В книге [13] показано, что $C = -\frac{1}{4\pi u_0}\iint \frac{\partial u}{\partial n_e} d\sigma$, где интеграл берется по произвольной замкнутой поверхности, охватывающей Ω (возможно, по самой поверхности $\partial\Omega$), $d\sigma$ есть элемент площади поверхности, n_e – внешняя нормаль к поверхности.

С вычислением электростатической емкости связаны изопериметрические задачи математической физики. А. Пуанкаре показал в 1903 г., что из всех тел с данным объемом сфера имеет наименьшую электростатическую емкость.

Т. Карлеман в 1918 г. получил аналог теоремы Пуанкаре на плоскости. Строгое доказательство теоремы Пуанкаре было дано в 1930 г. Г. Сеге.

Важную роль в оценке величины электростатической емкости играют принципы Дирихле и Томсона, причем оценки сверху получаются на основании принципа Дирихле, а оценки снизу – на основе принципа Томсона.

Принцип Дирихле

Пусть $f(x)$ – произвольная скалярная функция, определенная вне поверхности Ω, причем $f(x) = u_0$ при $x \in \partial\Omega$ и $f(\infty) = 0$. Принцип Дирихле заключается в следующем: для любой функции $f(x)$, удовлетворяющей перечисленным выше условиям,

$$C \le \frac{1}{4\pi}\frac{1}{u_0}\iiint_\Omega |\operatorname{grad} f(x)|^2 \, d\tau, \tag{17}$$

где $d\tau$ – элемент объема.

Таким образом, для того чтобы оценить сверху емкость C, нужно найти нижнюю грань значений интеграла, стоящего в правой части неравенства (17) на множестве всевозможных скалярных функций $f(x)$, определенных вне Ω и удовлетворяющих условиям: $u(x) = u_0$ при $x \in \partial\Omega$ и $u(\infty) = 0$.

Очевидно, при выборе классов функций $f(x)$, на которых ищется infimum приходится руководствоваться различными предпосылками физического характера.

Принцип Томсона

Пусть $f(x)$ есть произвольная векторная функция $f(x) = if_1(x) + jf_2(x) + kf_3(x)$ без источников: $\mathrm{div} f(x) = 0$.

Положим $Q = \frac{1}{4\pi}\int\int_{\partial\Omega} f_n(x)d\sigma$, где n – единичный вектор внешней нормали к поверхности $\partial\Omega$; f_n – проекция векторной функции $f(x)$ на вектор n.

Принцип Томсона. Для любой векторной функции $f(x)$ без источников справедливо неравенство

$$\frac{1}{C} \le \frac{1}{4\pi}\frac{1}{Q}\iint\int_{E_3\setminus\Omega} |f(x)|^2\, d\tau. \tag{18}$$

Таким образом, для оценки снизу электростатической емкости C достаточно найти нижнюю грань значений интеграла, стоящего в правой части неравенства (18), по множеству всевозможных векторных функций без источников.

Обобщение принципов Дирихле и Томсона

В монографии [13, с. 71] принципы Дирихле и Томсона обобщены на случай нескольких поверхностей, которые рассматриваются как «проводники». Это означает, что значение гармонической функции на каждой из этих поверхностей принимает постоянное значение.

Пусть $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$ – две замкнутые поверхности, причем $\partial\Omega_1$ охватывает $\partial\Omega_0$. Пусть в области, расположенной между поверхностями $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$, определена гармоническая функция $u(x)$, принимающая на поверхности $\partial\Omega_0$ – значение u_0, а на поверхности $\partial\Omega_1$ – значение u_1, где u_0 и u_1 – постоянные, $u_0 \ne u_1$.

Величина

$$C = \frac{1}{4\pi(u_0 - u_1)}\iint \frac{\partial u}{\partial n_i} d\sigma \tag{19}$$

называется емкостью поверхностей $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$.

Здесь интеграл берется по произвольной поверхности, охватывающей $\partial\Omega_0$ и содержащейся внутри $\partial\Omega_1$, n_i означает внутреннюю нормаль.

Пусть $f(x)$ – произвольная скалярная функция, определенная в области, заключенной между поверхностями $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$ и принимающая значения u_k на поверхностях $\partial\Omega_k$, $k = 0,1$, $u_1, u_2 = \text{const}$, $u_1 \neq u_0$. Тогда принцип Дирихле выражается неравенством

$$C \leq \frac{1}{4\pi}\frac{1}{u_0 - u_1}\iint\limits_{\overline{\Omega_1 \setminus \Omega_0}} |\operatorname{grad} f(x)|^2 \, d\tau,$$

где интеграл берется по замкнутой области, включающей область, расположенную между поверхностями $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$, и сами эти поверхности.

Пусть $f(x)$ – векторная функция, определенная в области $\overline{\Omega_1 \setminus \Omega_0}$ и принимающая значения u_0 и u_1 на поверхностях $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$, $u_1, u_2 = \text{const}$, $u_1 \neq u_0$.

Пусть $Q = \frac{1}{4\pi}\iint f_n d\sigma$, где интеграл берется по произвольной поверхности $\partial\Omega$, расположенной между поверхностями $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$, n означает внешнюю нормаль.

Принцип Томсона выражается неравенством

$$\frac{1}{C} \leq \frac{1}{4\pi}\frac{1}{Q}\iint\limits_{\overline{\Omega_1 \setminus \Omega_0}} |f(x)|^2 \, d\tau.$$

Пусть даны две замкнутые поверхности $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$, расположенные одна вне другой. Пусть $u(x)$ – гармоническая функция, определенная вне поверхностей $\partial\Omega_0$ и $\partial\Omega_1$, принимающая на этих поверхностях значения u_0 и u_1, $u_0, u_1 = \text{const}$, $u_0 \neq u_1$, и такая, что в разложении в ряд (16) отсутствует слагаемое $X_0 r^{-1}$.

В этом случае емкость определяется формулой

$$C = \frac{1}{4\pi}\frac{1}{(u_0 - u_1)}\iint\limits_{\delta\Omega} \frac{\partial u}{\partial n_i} d\sigma,$$

где интеграл определяется по поверхности $\partial\Omega$, охватывающей поверхность $\partial\Omega_0$ и расположенной вне поверхности $\partial\Omega_1$.

Принципы Дирихле и Томсона определяются по аналогии с приведенными выше.

Итерационные методы вычисления электрической емкости тел произвольной формы

Приведенные выше принципы Дирихле и Томсона позволяют получить оценки емкости. Во многих задачах требуется знать с высокой точностью емкость тел достаточно сложных форм. Определение электрической емкости

различных тел является классической задачей электростатики, которой посвящено более 800 работ, в каждой из которых для отдельных классов тел предлагаются отдельные методы. Изложение известных методов и подробная библиография содержатся в книгах [7, 14].

При этом остался открытым вопрос о построении универсального метода вычисления емкости произвольных тел. Таким методом является приближенный метод вычисления электрической емкости тел произвольной формы. Эффективный алгоритм решения этой задачи дан в статье [15] и в книге [16].

В последнее время активно развиваются направления нанотехнологии, связанные с построением радиотехнических схем и устройств вычислительной техники на фракталах. Предлагаемый ниже алгоритм позволяет вычислять емкость на фракталах различных поколений, в частности, на снежинках Коха, развертках Гильберта и Пеано [17].

Итерационные методы вычисления электрической емкости тел произвольной формы

В работе [7] предложена аналитическая формула для вычисления емкости произвольного тела с любой наперед заданной точностью ε:

$$C^{(n)} = = 4\pi\varepsilon_0 S^2 \left\{ \frac{(-1)^n}{(2\pi)^n} \iint\limits_{\Gamma\Gamma} \frac{dsdt}{r_{st}} \underbrace{\int\limits_{\Gamma} \ldots \int\limits_{\Gamma}}_{n} \psi(t,t_1)\ldots\psi(t_{n-1},t_n)dt_1\ldots dt_n \right\}^{-1}, \quad (20)$$

где S – площадь поверхности Γ проводника; ε_0 – электрическая проницаемость; $r_{st} := |s-t|$;

$$\psi(t,s) := \frac{\partial}{\partial N_t}\frac{1}{r_{st}},\ C^{(0)} = \frac{4\pi\varepsilon_0 S^2}{J} \le C, \quad J \equiv \iint\limits_{\Gamma\Gamma} \frac{dsdt}{r_{st}}.$$

Там же доказано, что $\left|C - C^{(n)}\right| \le Aq^n, \quad 0 < q < 1,$ где A и q – постоянные, зависящие от формы тела Γ.

Из (20) следует, что

$$C^{(n)} = 4\pi\varepsilon_0 S^2 \left(\iint\limits_{\Gamma\Gamma} r_{st}^{-1}\delta_n(t)dtds \right)^{-1}, \quad (21)$$

где δ_n определяется последовательными приближениями

$$\delta_{n+1} = -A\delta_n,\ \delta_0 = 1, \int\limits_{\Gamma} \delta_n dt = S, \quad (22)$$

а оператор A определяется формулой $A\delta = \int\limits_{\Gamma} \delta(t)\frac{\partial}{\partial N_s}\frac{1}{2\pi r_{st}}dt,$ где N_s – внешняя единичная нормаль к поверхности Γ в точке s.

Итерационная схема (21), (22) неустойчива при аппроксимации оператора A и при различных возмущениях. Поэтому для вычисления емкости следует использовать следующую итерационную схему:

$$\delta_{n+1} = \alpha_n \delta_n - (1-\alpha_n) A\delta_n,\ \delta_0 = 1, \int_\Gamma \delta_n dt = S,\ 0 < \alpha_n < 1, \tag{23}$$

сходимость которой обоснована в предыдущем разделе.

При использовании итерационного метода (23) необходимо располагать эффективными кубатурными формулами для вычисления интеграла

$$\frac{1}{2\pi}\int_\Gamma \delta(t)\frac{\partial}{\partial N_S}\frac{1}{r_{st}}dt. \tag{24}$$

Опишем кубатурную формулу вычисления интеграла (24), предполагая, для простоты обозначений, что область G, ограниченная поверхностью Γ, выпуклая. Следует отметить, что предлагаемый алгоритм может быть применен к телам произвольной формы.

Обозначим через S сферу с центром в начале координат и с максимальным радиусом r^*, вписанную в поверхность Γ. Введем сферические координаты (r,φ,Θ) и через (r^*,φ_k,Θ_l) обозначим систему узлов $\varphi_k = 2k\pi/n,\ k = 0,1,\ldots,n, \Theta_l = \pi l/m, l = 0,1,\ldots,m.$

Предположим, что m – четное число и покроем сферу S сферическими треугольниками Δ_k, $k = 1,2,\ldots,N$, $N = 2n(m-1)$. Опишем построение сферического треугольника. При $0 \le \Theta \le \pi/m$ треугольники $\Delta_k, k = 1,2,\ldots,n,$ имеют вершины $(r^*,0,0)$, $(r^*,\varphi_{k-1},\theta_1)$, (r^*,φ_k,θ_1), $k = 1,2,\ldots,n.$

При $\theta_l \le \theta \le \theta_{l+1}$, $l = 1,2,\ldots,m/2-1$, треугольники Δ_k, $k = n + 2n(l-1) + j$, $1 \le j \le 2n$, строятся следующим образом. Прямоугольник $[0,2\pi;\theta_l,\theta_{l+1}]$ покрывается квадратами $\Delta_{kl} = [\varphi_k,\varphi_{k+1};\theta_l,\theta_{l+1}]$, $k,l = 0,1,\ldots,n-1$. Каждый квадрат Δ_{kl} делится на два равных треугольника Δ_{kl}^1 и $\Delta_{kl}^2, k = 0,1,\ldots,n-1, l = 1,2,\ldots,m/2-1$. Сферические треугольники Δ_{kl}^1 и $\Delta_{kl}^2, k = 0,1,\ldots,n-1, l = 1,2,\ldots,m/2-1$, являются образами треугольников Δ_{kl}^1 и Δ_{kl}^2 на сфере S.

В результате этих построений сфера S оказывается покрытой треугольниками $\Delta_k, k = 1,2,\ldots,N.$

Проведем прямые из начала координат через вершины треугольников $\Delta_k, k = 1,2,\ldots,N.$ Точки пересечения этих прямых с поверхностью Γ являются вершинами треугольников $\overline{\Delta}_k, k = 1,2,\ldots,N.$ В результате этих построений поверхность Γ аппроксимируется поверхностью Γ_N, состоящей из плоских треугольников $\overline{\Delta}_k, k = 1,2,\ldots,N,$ и интеграл (32) аппроксимируется интегралом

$$A_N\delta = \int_{\Gamma_N} \delta(t)\frac{\partial}{\partial N_S}\frac{1}{r_{st}}dt. \tag{25}$$

Зафиксируем произвольный треугольник $\overline{\Delta}_k, k=1,2,\ldots,N,$ и поставим ему в соответствие точку $\tau_k \in \overline{\Delta}_k, k=1,2,\ldots,N,$ равноудаленную от вершин треугольника $\overline{\Delta}_k, k=1,2,\ldots,N.$ Будем вычислять интеграл (25) в точках $\tau_k, k=1,2,\ldots,N,$ по кубатурным формулам, описанным в [16, разд. 1 гл. 4].

Таким образом, для вычисления емкости реализуется следующий вычислительный процесс:

$$\delta_{n+1} = \alpha_n \delta_n - (1-\alpha_n) A_N \delta_n, \quad \delta_0 = 1, \quad \int_{\Gamma_N} \delta_n dt = S_N,$$

$$A_N \delta = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_N} \delta(t) \frac{\partial}{\partial N_s} \frac{1}{r_{st}} dt, \quad C_N^{(n)} = 4\pi\varepsilon_0 S_N^2 \left(\int_{\Gamma_N} \int_{\Gamma_N} r_{st}^{-1} \delta_n(t) dt \right)^{-1},$$

S_N – площадь поверхности Γ_N.

Решение модельных примеров показало его высокую эффективность. Некоторые примеры приведены в [16].

Рассеяние излучения на малых телах произвольной формы

Задаче дифракции волн на различных препятствиях посвящена обширная литература, из которой упомянем лишь монографии [18–21].

Особенно сложными являются задачи дифракции волн на произвольных телах малой формы, когда длина волны сопоставима с размерами тела.

Исследование этих задач представляет значительный интерес в геофизике (особенно в сейсмологии), астрофизике, оптике, нанотехнике.

В данном разделе предлагается численный алгоритм решения этой задачи для одного тела.

Будем рассматривать внешнюю задачу Неймана для уравнения Гельмгольца

$$(\Delta + k^2) v = 0 \quad \text{в} \quad \Omega \tag{26}$$

с граничным условием

$$\left(\frac{\partial v}{\partial N} \right)\Bigg|_{\Gamma} = -\left(\frac{\partial u_0}{\partial N} \right)\Bigg|_{\Gamma} \tag{27}$$

и с условием на бесконечности вида $v(x) = 0\left(\frac{1}{|x|} \right)$ при $x \to \infty$.

Здесь Δ – оператор Лапласа; $\Omega = R^3 \setminus D$, D – ограниченная область с гладкой границей Γ.

Будем искать решение краевой задачи (26), (27) в виде

$$v = \int_{\Gamma} \frac{\exp(ikr_{xy})\sigma(y)}{4\pi r_{xy}} ds, r_{xy} = |x-y|. \tag{28}$$

Подставляя (28) в граничное условие (27), получим интегральное уравнение относительно σ:

$$\sigma = A(k)\sigma + 2\frac{\partial u_0}{\partial N}, \tag{29}$$

где

$$A(k)\sigma = \int_{\Gamma} \frac{\partial}{\partial N_x} \frac{\exp(ikr_{xy})}{2\pi r_{xy}} \sigma(y)ds. \tag{30}$$

Для удобства обозначим последнее слагаемое в (29), обозначим как $g(x) = 2\frac{\partial u_0(x)}{\partial N}$ и окончательно получим $\sigma = A(k)\sigma + g$, или в развернутом виде:

$$\sigma(x) = \int_{\Gamma} \frac{\partial}{\partial N_x} \frac{\exp(ikr_{xy})}{r_{xy}} \sigma(y)ds + g(x). \tag{31}$$

Будем решать это интегральное уравнение методами простой итерации:

$$\sigma_{n+1}(x) = \int_{\Gamma} \frac{\partial}{\partial N_x} \frac{\exp(ikr_{xy})}{r_{xy}} \sigma_n(y)ds + g(x), \ x \in \Gamma, \tag{32}$$

и итерационным методом:

$$\sigma_{n+1}(x) = \alpha_n \sigma_n(x) + (1-\alpha_n)\times$$

$$\times \int_{\Gamma} \frac{\partial}{\partial N_x} \frac{\exp(ikr_{xy})}{r_{xy}} \sigma_n(y)ds + g(x), \ 0 < \alpha_n < 1, \ x \in \Gamma. \tag{33}$$

Для вычисления интеграла в формулах (32), (33) используются оптимальные по порядку кубатурные формулы вычисления слабосингулярных интегралов [15, 16]. Триангуляция поверхности Γ описана в предыдущем разделе.

Решение модельного примера показало высокую эффективность численного алгоритма. При различных значениях волнового числа невязка метода колеблется от величин порядка 10^{-5} до величин порядка 10^{-10}.

Список литературы

1. **Тихонов, А. Н.** Некорректные задачи / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1974.
2. **Бакушинский, А. Б.** О решении некоторых интегральных уравнений I рода методом последовательных приближений / А. Б. Бакушинский, В. Н. Страхов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1968. – Т. 1. – С. 181–185.
3. **Натансон, И. П.** Конструктивная теория функций / И. П. Натансон. – М. ; Л., 1949. – 688 с.
4. **Кук, Р.** Бесконечные матрицы и пространства последовательностей / Р. Кук. – М. ; Л., 1960. – 472 с.
5. **Харди, Г.** Расходящиеся ряды·/ Г. Харди. – М. ; Л., 1951. – 504 с.

6. **Обломская, Л. Я.** О методах последовательных приближений для линейных уравнений / Л. Я. Обломская // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1968. – Т. 8, № 2. – С. 417–426.
7. **Ramm, A. G.** Iterative Methods for Calculating Static Fields and Wave Scattering by Small Bodies / A. G. Ramm. – New York : Springer-Verlag, 1982. – 124 p.
8. **Смирнов, В. И.** Курс высшей математики / В. И. Смирнов. – М. : ГИФМЛ, 1958. – Т. 4. – 812 с.
9. **Красносельский, М. А.** Приближенное решение операторных уравнений / М. А. Красносельский, Г. М. Вайникко и др. – М. : Наука, 1969. – 456 с.
10. **Люстерник, Л. А.** Элементы функционального анализа / Л. А. Люстерник, В. И. Соболев. – М. : Наука, 1965. – 510 с.
11. **Тамм, И. Е.** Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – М. : Наука, 1989. – 504 с.
12. **Ландау, Л. Д.** Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : ГИТТЛ, 1957. – 532 с.
13. **Полиа, Г.** Изопериметрические неравенства в математической физике / Г. Полиа, Г. Сеге. – М. : ГИФМЛ, 1962. – 336 с.
14. **Иоссель, Ю. Я.** Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 288 с.
15. **Boikov, I. V.** Optimal with Respect to Accuracy Algorithms for Calculation of Multidimensional Weakly Singular Integrals and Applications to Calculation of Capacitances of Conductors of Arbitrary Shapes / I. V. Boikov, A. G. Ramm // Acta Applicandae Mathematicae. – 2003. – V. 79, № 3. – P. 281–362.
16. **Бойков, И. В.** Приближенные методы вычисления сингулярных и гиперсингулярных интегралов. Часть 1. Сингулярные интегралы / И. В. Бойков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. – 360 с.
17. **Кроновер, Р. М.** Фракталы и хаос в динамических системах / Р. М. Кроновер. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с.
18. **Стретт, Дж. В.** (лорд Релей). Теория звука / Дж. В. Стретт (лорд Релей). – М. : ГИТТЛ, 1958. – Т. 1. – 504 с.
19. **Стретт, Дж. В.** (лорд Релей) Теория звука / Дж. В. Стретт (лорд Релей). – М. : ГИТТЛ, 1958. – Т. 2. – 476 с.
20. **Бабич, В. М.** Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн / В. М. Бабич, В. С. Булдарев. – М. : Наука, 1972. – 250 с.
21. **Колтон, Д.** Методы интегральных уравнений в теории рассеяния / Д. Колтон, Р. Кресс. – М. : Мир, 1987. – 311 с.

Бойков Илья Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей и прикладной математики, Пензенский государственный университет

E-mail: math@pnzgu.ru

Boykov Ilya Vladimirovich
Doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of sub-department of higher and applied mathematics, Penza State University

УДК 519.6
Бойков, И. В.
Приближенное решение задачи рассеяния излучений на малых телах произвольной формы / И. В. Бойков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 71–84.

УДК 621.7-4

И. И. Артемов, А. А. Генералова, Н. Е. Артемова

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ

Аннотация. Получены зависимости, устанавливающие взаимосвязь режимов обработки поршневых колец с фрактальными параметрами и другими показателями качества поверхности, позволяющие обеспечивать заданные эксплуатационные свойства поверхности колец.

Ключевые слова: поверхностный слой, оценка шероховатости, фрактальная размерность, финишная обработка.

Abstract. The authors have obtained the dependencies that interrelate processing modes of piston rings with fractal parameters and other indicators of quality of the surface, which provide the required performance properties of the surface of the rings.

Key words: blanket, roughness evaluation, fractal dimension, finishing.

Введение

Важнейшим фактором, определяющим качество деталей и соединений, является состояние поверхностей, которое формируется в процессе изготовления. Установление взаимосвязи качества поверхности с технологическими параметрами и условиями обработки возможно только на основе адекватной параметрической оценки состояния поверхности после обработки. Существует большой класс деталей, у которых в процессе финишной обработки формируется профиль поверхности сложной структуры. Это относится к деталям цилиндропоршневой группы, золотниковой паре, прецизионным и тонкостенным деталям, соплам ракетных двигателей и т.д. При обработке этих поверхностей современными технологическими методами (концентрированными потоками энергии, электрофизическим, электрохимическим, нанесением покрытий и др.) часто формируется шероховатость, имеющая сложную геометрическую форму (грибообразные, гребешковые и чешуйчатые структуры).

1. Постановка задачи исследования

Применение стандартных методов и параметров для оценки свойств подобных поверхностей малоэффективно. В то же время имеются исследования, направленные на применение теории фракталов при описании свойств поверхностей [1–3]. Такой подход дает возможность оценки свойств шероховатой поверхности независимо от формы ее элементов и плотности их распределения, что позволяет повысить информативность и адекватность оценки и назначить эффективные режимы обработки.

В качестве примера поверхности можно рассмотреть поршневые кольца дизельного двигателя 1-ПДГ4Д, финишной обработкой которых является хромирование [4], так как в результате электролитической операции под воздействием большой плотности тока формируется чешуйчатая структура поверхности.

Таким образом, целью работы является установление взаимосвязи режимов обработки поршневых колец с фрактальными параметрами и другими показателями качества поверхности, которые позволяют обеспечивать заданные эксплуатационные свойства поверхности колец.

Основными показателями качества хромового покрытия поршневых колец являются толщина покрытия, твердость, пористость, шероховатость (рис. 1).

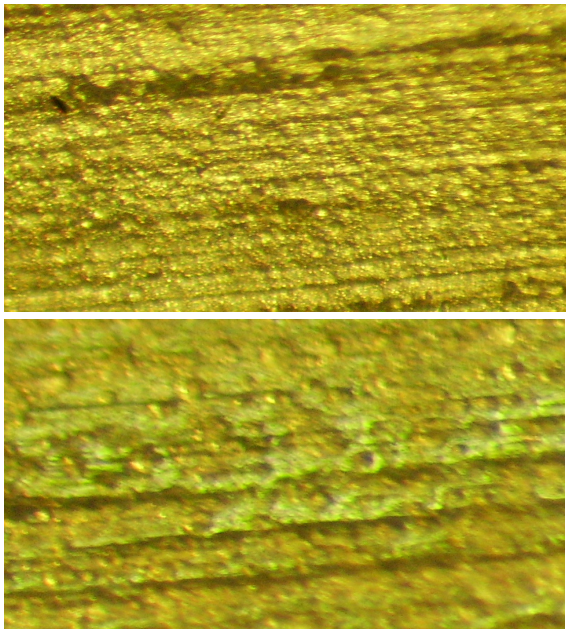


Рис. 1 Хромированная поверхность поршневого кольца (×200)

Хромирование колец осуществляется в ванной для хромирования при установке колец в кондуктор путем осаждения на поверхность детали слоя хрома из электролита под действием электрического тока (рис. 2).

С целью определения параметров процесса хромирования, в результате которого формируется шероховатость, близкая к равновесной, проведены стендовые испытания дизельного двигателя 1-ПДГ4Д в течение 80 ч.

Для проведения эксперимента кольца четырех поршней (6 колец на каждом поршне) хромировались при следующий режимах (время хромирования – 7,5 ч – и температура электролита – 50–52 °С – для всех колец неизменны):

– поршень № 1: сила тока I = 600 А, концентрация хромового ангидрида C = 100 г/л;

– поршень № 2: сила тока I = 650 А, концентрация хромового ангидрида C = 100 г/л;

– поршень № 3: сила тока I = 600 А, концентрация хромового ангидрида C = 150 г/л;

– поршень № 4: сила тока I = 650 А, концентрация хромового ангидрида C = 150 г/л.

а) б)

Рис. 2. Кондуктор (а) и ванна (б) для хромирования поршневых колец

Визуальное представление картин компьютерной двухмерной модели поверхности поршневого кольца, полученной с использованием атомно-силового микроскопа SFM, и пористости покрытия, полученной с помощью микроскопа МИМ-7, при разных параметрах режима хромирования представлены на рис. 3 и 4.

2. Обработка экспериментальных данных

На основе построенной функции мультифрактального спектра становится возможным выявить такие свойства структуры поверхности, которые напрямую связаны с дефектностью и поврежденностью материала, как, например, ее шероховатость, однородность и регулярность [1, 3]:

– D_0 указывает на шероховатость, является показателем изрезанности;

– $D_{+\infty}$ определяет степень однородности структуры (под однородностью структуры следует понимать не внешний вид поверхности, а распределение ее точек в евклидовом пространстве);

– K отражает степень скрытой периодичности – чем он выше, тем более регулярной является структура;

– Δ является мерой упорядоченности, чем он выше, тем больше в структуре поверхности периодических составляющих.

По результатам исследований выявлено, что оптимальными для операции хромирования поршневых колец являются следующие режимы: ток I – 650 А, содержание ангидрида C – 100 г/л, так как при таких режимах обработки исходная шероховатость поверхности поршневых колец близка к равновесной, поскольку изменение стандартных параметров шероховатости и параметров теории фракталов (табл. 1) меньше, чем при других режимах, что

позволяет сделать вывод о наименьшем износе поверхностных слоев в процессе приработки.

Для условий работы дизеля 1-ПДГ4Д определены параметры равновесной шероховатости рабочей поверхности поршневых колец:

$$R_a = 0{,}16 \text{ мкм}; S_m = 63{,}14 \text{ мкм}; D_0 = 1{,}452361;$$

$$D_{+\infty} = 1{,}209367; K = 0{,}143321; \Delta = 0{,}43667.$$

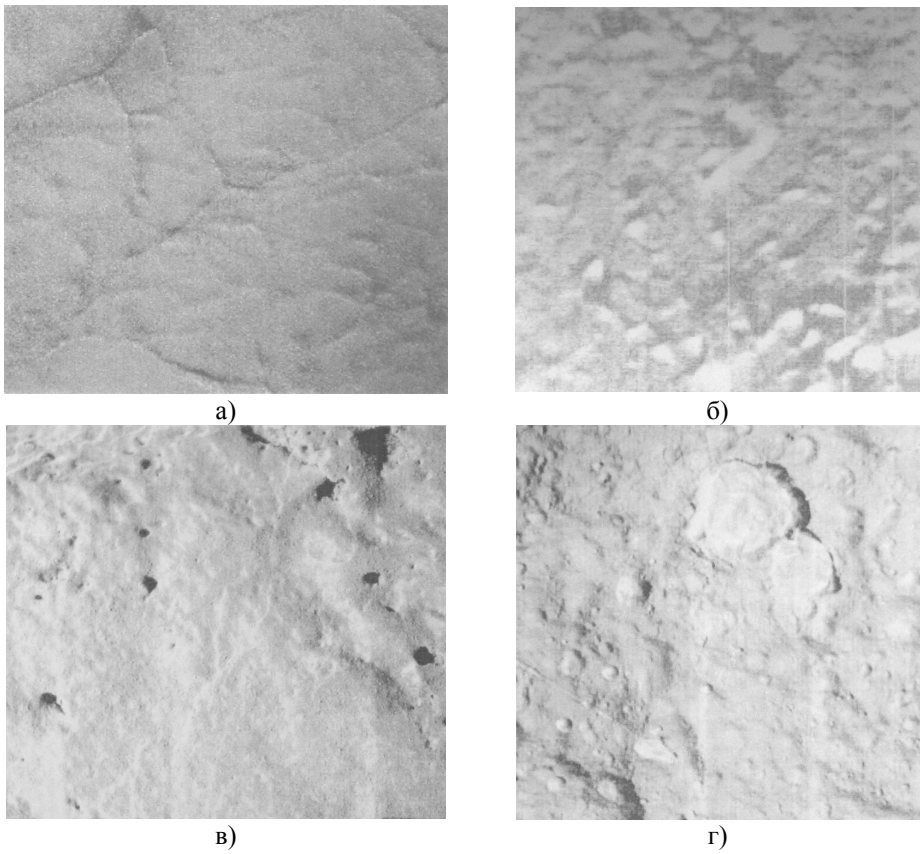


Рис. 3. Компьютерная двухмерная модель, построенная по результатам сканирования поверхностей поршневых колец 5×5 мкм: а – сила тока 600 А, содержание ангидрида 100 г/л; б – сила тока 650 А, содержание ангидрида 100 г/л; в – сила тока 600 А, содержание ангидрида 150 г/л; г – сила тока 650 А, содержание ангидрида 150 г/л

Математическая обработка экспериментальных данных параметров качества поршневых колец при проведении полного факторного эксперимента позволила получить адекватные математические зависимости и значения независимых параметров (оценочных параметров теории фракталов, толщины покрытия h, коэффициенты пористости (КП) и твердости покрытия, НВ:

$$D_0 = 1{,}422 + 7{,}84 \cdot 10^{-3} I - 1{,}725 \cdot 10^{-3} C - 0{,}021 IC; \quad (1)$$

$$D_{+\infty} = 1{,}298 + 0{,}0073 I + 0{,}098 C + 0{,}063 \cdot 10^{-4} IC; \quad (2)$$

$$K = 0{,}133 + 8{,}75 \cdot 10^{-3} I + 6{,}25 \cdot 10^{-3} C - 7{,}75 \cdot 10^{-5} IC; \quad (3)$$

$$\Delta = 0,418 + 0,028I + 0,01C + 2,5 \cdot 10^{-4} IC; \quad (4)$$

$$h = 146,24 + 13,75I + 13,75C - 3,75IC; \quad (5)$$

$$\text{КП} = 0,6 - 0,05I - 0,025C - 0,025IC; \quad (6)$$

$$\text{НВ} = 5,15 \cdot 10^3 - 100I + 100C - 150IC. \quad (7)$$

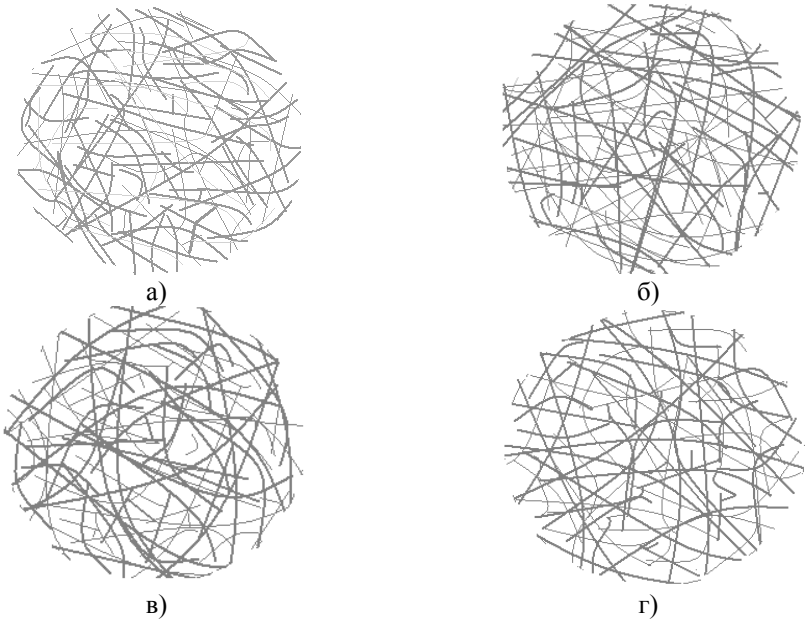


Рис. 4. Пористость хромированного слоя поршневых колец (×115):
а – сила тока 600 А, содержание ангидрида 100 г/л; б – сила тока 650 А, содержание ангидрида 100 г/л; в – сила тока 600 А, содержание ангидрида 150 г/л; г – сила тока 650 А, содержание ангидрида 150 г/л

Таблица 1

Изменение параметров теории фракталов и стандартных параметров компрессионного поршневого кольца

Номер опыта (поршня)	Изменение исследуемых параметров, %							
	Фрактальные оценочные параметры				Стандартные характеристики оценки шероховатости			
	D_0	$D_{+\infty}$	K	Δ	R_a	$R_{\max}$	S_m	S
1	19	31	2	5	8	5	1	0,1
2	5	6	2	3	3	3	0,3	0,04
3	24	41	2	6	6	4,38	1,03	1
4	8	39	0,2	5	3	3,25	3	1,2

Полученные зависимости в совокупности представляют математическую модель, связывающую реальный процесс хромирования поршневых колец; устанавливают явную взаимосвязь между фрактальными параметрами поверхности, характеристиками качества покрытия и параметрами режима хромирования, что обеспечивает возможность определения:

– параметров технологического процесса в зависимости от заданного диапазона изменения параметров поверхности и качества хромового покрытия;

– параметров поверхности и характеристик качества хромого покрытия в зависимости от допустимых параметров процесса в условиях реального производства.

Определение системы весовых коэффициентов и ранжирование по ней решений из области Парето приводит к получению оптимального компромиссного варианта, сбалансированного по противоречивости частных критериев. При этом интегральный показатель качества может представляться следующим образом:

– если i >> min, то

$$M = \left(\omega_i^2 \left(\varphi_i / \varphi_{i\min} - 1\right)^2\right)^{1/2}; \tag{8}$$

– если i >> max, то

$$M = \left(\omega_i^2 \left(\varphi_{i\max} / \varphi_i - 1\right)^2\right)^{1/2}, \tag{9}$$

где φ и ω – частные критерии качества и их «весовые» значения.

Квадратичная форма записи обеспечивает наличие «прогиба» – точки компромиссного проекта. Весовые коэффициенты можно определить и уточнить в ходе решения задачи автоматически, путем последовательного сужения интервала варьирования искомых параметров около точки оптимума (прогиба), так как «веса» являются функцией ширины участка варьирования.

Искомый вектор частных критериев Ω является нормалью к поверхности Парето. Его поиск и определение оптимального решения проводится в следующей последовательности:

– проводится минимизация отдельно по каждому критерию качества (например, $\varphi_{1\min}$), остальные частные критерии вычисляются с учетом полученных таким образом параметров модели (φ_i при $\varphi_{1\min}$);

– по результатам частных оптимизаций формируется матрица Ф.

Это дает возможность определить область возможных изменений частных критериев φ_1, φ_2, φ_3, φ_4, φ_5, φ_6, φ_7:

$$\varphi_1 = D_0 = 1{,}422 + 7{,}84 \cdot 10^{-3} I - 1{,}725 \cdot 10^{-3} C - 0{,}021 IC \to \min;$$

$$\varphi_2 = D_{+\infty} = 1{,}298 + 0{,}073 I + 0{,}098 C + 0{,}063 IC \to \max;$$

$$\varphi_3 = K = 0{,}133 + 8{,}75 \cdot 10^{-3} I + 6{,}25 \cdot 10^{-3} C - 7{,}75 \cdot 10^{-3} IC \to \max;$$

$$\varphi_4 = \Delta = 0{,}418 + 0{,}28 I + 0{,}01 C + 2{,}5 \cdot 10^{-4} IC \to \max;$$

$$\varphi_5 = h = 146{,}255 + 13{,}75 I + 13{,}75 C - 3{,}75 IC \to \min;$$

$$\varphi_6 = \text{КП} = 0{,}6 - 0{,}05 I - 0{,}025 C - 0{,}025 IC \to \max;$$

$$\varphi_7 = \text{НВ} = 5{,}15 \cdot 10^3 - 100 I + 100 C - 150 IC \to \max.$$

Интегральный критерий качества проекта можно определить как

$$K = \left(\omega_i^2 \left(\varphi_i / \varphi_{i\min} - 1\right)^2\right)^{1/2}, \tag{10}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{1\min} & \varphi_2(\varphi)_{1\min} & \varphi_3(\varphi)_{1\min} & \varphi_4(\varphi)_{1\min} & \varphi_5(\varphi)_{1\min} & \varphi_6(\varphi)_{1\min} & \varphi_7(\varphi)_{1\min} \\ \varphi_1(\varphi)_{2\min} & \varphi_{2\min} & \varphi_3(\varphi)_{2\min} & \varphi_4(\varphi)_{2\min} & \varphi_5(\varphi)_{2\min} & \varphi_6(\varphi)_{2\min} & \varphi_7(\varphi)_{2\min} \\ \varphi_1(\varphi)_{3\min} & \varphi_2(\varphi)_{3\min} & \varphi_{3\min} & \varphi_4(\varphi)_{3\min} & \varphi_5(\varphi)_{3\min} & \varphi_6(\varphi)_{3\min} & \varphi_7(\varphi)_{3\min} \\ \varphi_1(\varphi)_{4\min} & \varphi_2(\varphi)_{4\min} & \varphi_3(\varphi)_{4\min} & \varphi_{4\min} & \varphi_5(\varphi)_{4\min} & \varphi_6(\varphi)_{4\min} & \varphi_7(\varphi)_{4\min} \\ \varphi_1(\varphi)_{5\min} & \varphi_2(\varphi)_{5\min} & \varphi_3(\varphi)_{5\min} & \varphi_4(\varphi)_{5\min} & \varphi_{5\min} & \varphi_6(\varphi)_{5\min} & \varphi_7(\varphi)_{5\min} \\ \varphi_1(\varphi)_{6\min} & \varphi_2(\varphi)_{6\min} & \varphi_3(\varphi)_{6\min} & \varphi_4(\varphi)_{6\min} & \varphi_5(\varphi)_{6\min} & \varphi_{6\min} & \varphi_7(\varphi)_{6\min} \\ \varphi_1(\varphi)_{7\min} & \varphi_2(\varphi)_{7\min} & \varphi_3(\varphi)_{7\min} & \varphi_4(\varphi)_{7\min} & \varphi_5(\varphi)_{7\min} & \varphi_6(\varphi)_{7\min} & \varphi_{7\min} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Матрица частных критериев Φ связана с вектором весов W соотношением

$$\Phi\,\Omega = e, \quad (12)$$

где $e^{т} = [1, 1, ..., 1]$ – единичный вектор.

Это соотношение позволяет определить веса частных критериев:

$$\Omega = \Phi^{-1} e. \quad (13)$$

С найденным вектором Ω проводится минимизация интегрального критерия качества. Расчеты проводятся до момента выполнения условий

$$M_j - M_{j+1} \le \varepsilon; \quad (14)$$

$$g_j \le [g_j], \quad (15)$$

где ε – заданная точность расчета критерия K (1, 5, 10 %); $[g_j]$ – ограничения на варьируемые параметры.

Для исходного диапазона режимов процесса хромирования $I \in [600;650]$ А, $C \in [100;150]$ г/л, параметров поверхности и качества покрытия ($D_0 \in [0;2]$, $D_{+\infty} \in [0;2]$, $K \in [0;1]$, $\Delta \in [0;1]$, КП$\in [0,5;0,7]$, $h \in [100;180]$ мкм, НВ$\in [5400;6000]$ МПа) интегральный критерий качества (SA) имеет характер изменения, показанный на рис. 5, на котором оптимум имеет значение $SA_{\min} = 0{,}334$. Характер изменения частных критериев показан на рис. 6.

Анализ характера изменения частного критерия свидетельствует о наличии плавного прогиба, при этом в диапазоне изменения параметров поверхности и качества покрытия ±10 % интегральный критерий качества изменяется от $SA = 0{,}3362$ до $SA = 0{,}3354$.

Проведена оптимизация по Парето для параметров качества хромового покрытия (толщина, пористость, твердость покрытия) и фрактальных показателей качества поверхности. Согласно критерию Парето оптимальными параметрами процесса хромирования являются $I = 633$ А, $C = 133$ г/л. Расчетные значения параметров поверхности и показателей качества покрытия при этих значениях следующие: $D_0 = 1{,}419$; $D_{+\infty} = 1{,}26$; $K = 0{,}129$; $\Delta = 0{,}409$; $h = 139$ мкм; КП = 0,605; НВ 5140.

Для оценки точности определения оптимальных данных проведен дополнительный эксперимент с оптимальными значениями параметров режима хромирования $I = 633$ А, $C = 133$ г/л. Результаты оценки качества поверхности поршневых колец приведены в табл. 2.

Визуальное представление картин компьютерной двухмерной модели поверхности поршневого кольца, полученной с использованием атомно-

силового микроскопа SFM, и пористости покрытия, полученной с помощью микроскопа МИМ-7, показано на рис. 7.

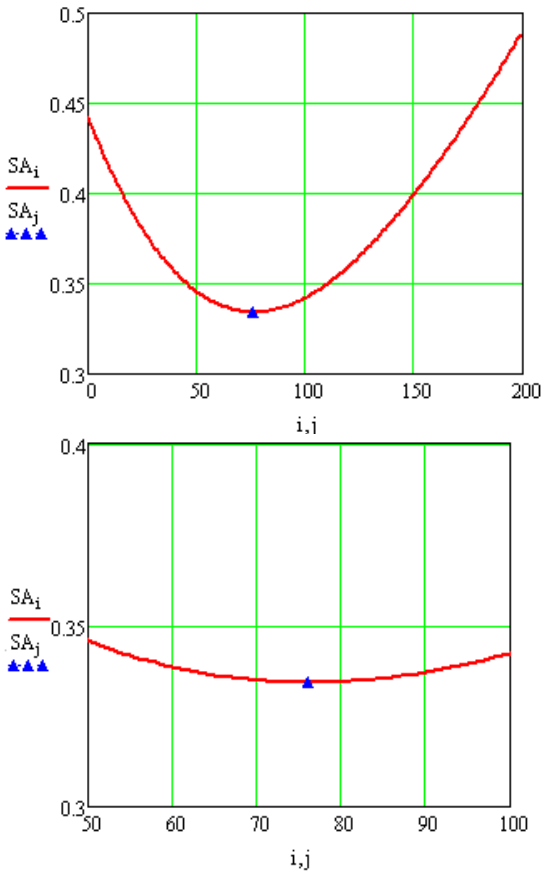


Рис. 5. Характер изменения интегрального критерия качества:
SA_i – текущее значение интегрального значения качества;
$SA_j(j = 76)$– оптимальное значение интегрального критерия качества

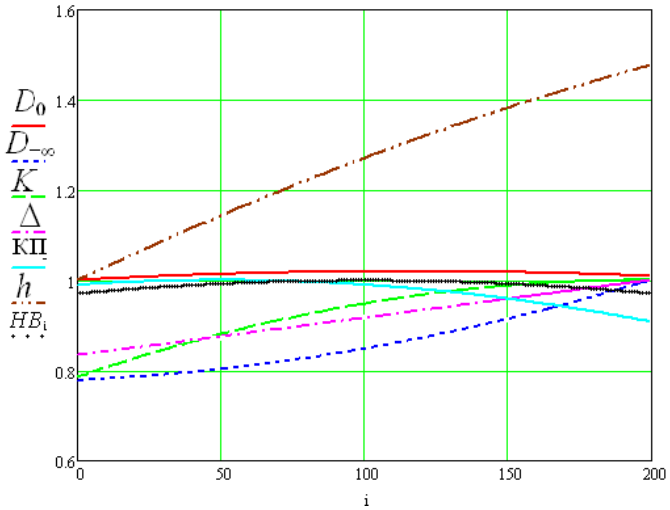


Рис. 6. Безразмерные значения частных критериев качества

Таблица 2

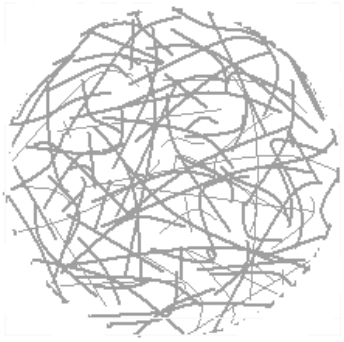
Значения фрактальных параметров поверхности и показателей качества покрытия хромового кольца по результатам эксперимента

Исследуемый параметр	Номер точки на поршневом кольце						Среднее значение
	1	2	3	4	5	6	
D_0	1,44	1,45	1,39	1,42	1,39	1,41	1,417
$D_{+\infty}$	1,3	1,29	1,25	1,25	1,23	1,24	1,26
K	0,13	0,125	0,129	0,19	0,125	0,18	0,147
Δ	0,41	0,4	0,5	0,41	0,39	0,3	0,402
h, мкм	140	140	140	140	140	140	140
КП	0,6	0,65	0,65	0,6	0,6	0,6	0,62
НВ	5200	5100	5100	5100	5200	5100	5133

Выполненный эксперимент показывает согласованность расчетных и экспериментальных значений показателей качества поверхности и хромового покрытия.

×115

а)



×115

б)

Рис. 7. Компьютерная двухмерная модель, построенная по результатам сканирования (а), и пористость поверхности поршневого кольца (б) при режимах хромирования I = 633 А, C = 133 г/л

Таким образом, проведенные исследования показали, что оценочные параметры теории фракталов позволяют проводить оценку качества поверхностей со сложной геометрией и определять эффективные режимы обработки, обеспечивающие эксплуатационные свойства таких поверхностей.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования показателей качества поверхности, имеющей шероховатость сложной геометрической формы, на примере хромированной поверхности поршневых колец двигателя внутреннего сгорания. Установлено, что фрактальные параметры значительно более чувствительны к изменению режимов хромирования и более адекватно оценивают свойства поверхности.

Получены зависимости, связывающие фрактальные параметры поверхности и свойства покрытия (толщина, пористость, твердость) с режимами обработки поршневых колец. Установлены оптимальные режимы процесса хромирования, обеспечивающие равновесную шероховатость и повышенную износостойкость поверхности.

Список литературы

1. **Лепов, В. В.** Структурные модели процессов накопления повреждений и трещиностойкость конструкционных материалов : дис. д-ра техн. наук: 01.02.06 / Лепов В. В. – М. : РГБ, 2007. – (Из фондов Российской государственной библиотеки) // URL: http://diss.rsl.ru/diss/07/0304/070304002.pdf.
2. **Вячеславова, О. Ф.** Современные технологии обработки материалов в свете теории фракталов / О. Ф. Вячеславова // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 11. – С. 27–31.
3. **Артемов, И. И.** Технология формирования структурных составляющих инженерии поверхности на основе теории фракталов / И. И. Артемов, А. А. Генералова // Исследования и проектирования машин : сб. ст. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2008. – С. 8.
4. **Погодаев, Л. И.** Износостойкость пар трения «серый чугун – гальваническое хромовое покрытие» при использовании смазочных композиций с различными присадками / Л. И. Погодаев, П. П. Дудко, В. Н. Кузьмин // Двигателестроение. – 2000. – № 4. – С. 32–37.

Артемов Игорь Иосифович
доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности, Пензенский государственный университет

E-mail: rectorat@pnzgu.ru

Artyomov Igor Iosifovich
Doctor of engineering sciences, professor, vice rector for research and innovative activity, Penza State University

Генералова Александра Александровна
старший преподаватель, кафедра транспортных машин, Пензенский государственный университет

E-mail: generalova_aa@mail.ru

Generalova Alexandra Alexandrovna
Senior lecturer, sub-department of automated vehicles, Penza State University

Артемова Наталья Евгеньевна
кандидат технических наук, доцент, кафедра начертательной геометрии и графики, Пензенский государственный университет

E-mail: ngg@pnzgu.ru

Artyomova Nataliy Evgenyevna
Candidat of engineering sciences, associate professor, sub-department of descriptive geometry and graphics, Penza State University

---

УДК 621.7-4

Артемов, И. И.

Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя поршневых колец на основе оценки его характеристикс применением теории фракталов / И. И. Артемов, А. А. Генералова, Н. Е. Артемова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 85–94.

УДК 681.518.54; 004.3.001.4

А. И. Марков, В. А. Кушников

ЗАДАЧА ОПЕРАТИВНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ФЮЗЕЛЯЖА ВЕРТОЛЕТА МИ-8 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЕГО РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Аннотация. Рассмотрена задача диагностирования дефектов фюзеляжа неисправного вертолета для предварительной оценки стоимости, целесообразности и трудоемкости его ремонта. Разработана продукционная модель, позволяющая связать результаты диагностирования с графом выполнения ремонтных работ, а также со стоимостью их проведения. Указаны источники экономической эффективности поставленной задачи и предложен эвристический алгоритм ее решения.

Ключевые слова: техническое диагностирование, деформация, реперные точки, метод трилатерации, трехмерная модель, геометрические образы, фюзеляж вертолета, нивелирование, оптический дальномер.

Abstract. The article considers a problem of diagnosing of fuselage defects of the damaged helicopter to preliminary estimate the cost, expediency and labor input of its repair. The authors have developed a rule-based model, allowing to bind the diagnostic results with the schedule of repair work, and also with the cost of repair work. The article specifies the sources of economic efficiency of the given objective and suggests the heuristic algorithm for its solution.

Key words: technical diagnostics, strain, control points, method of trilateration, three-dimensional model, geometric images of machines, helicopter fuselage, leveling, optical rangefinder.

Введение

Очень часто на практике возникает необходимость оперативно оценить ремонтопригодность вертолета в полевых условиях, в труднодоступных местах его жесткой посадки или аварии. Для решения этой задачи выполняется оперативное диагностирование деформаций воздушного судна, результаты которого позволяют оценить целесообразность и стоимость предстоящих ремонтных работ, а также дать рекомендации по выбору места их проведения.

Процесс диагностирования деформаций фюзеляжа воздушного судна в авиации носит название нивелировки. Цель нивелировки состоит в определении возможности дальнейшей эксплуатации или необходимости ремонта планера вертолета.

В настоящее время для выполнения нивелировки в полевых условиях в основном используются дорогостоящие специализированные информационно-измерительные системы зарубежного производства. Известные отечественные средства измерения нивелировочных параметров являются, по сведениям авторов, во многом несовершенными, неудобными для применения и, зачастую, не дающими требуемой точности измерений.

В статье рассмотрена методика оперативного проведения нивелировочных работ в полевых условиях на базе отечественной информационно-измерительной системы, опытный образец которой разрабатывается специа-

листами Саратовского государственного университета и Института проблем точной механики и управления РАН (г. Саратов) для ФГУП «356 АРЗ». Особенностью данной методики является совершенствование процесса проведения измерений за счет использования оригинальных интерполяционных методов [1, 2], а также применение разработанной авторами продукционной модели, позволяющей связать результаты измерений с перечнем рекомендуемых ремонтных работ и стоимостью их выполнения.

1. Постановка задачи

Необходимо разработать методику оперативного диагностирования изменений геометрических параметров у фюзеляжа вертолета МИ-8 и его модификаций, предназначенную для предварительной оценки состояния и ремонтопригодности воздушного судна, осуществляемой в полевых условиях, местах жесткой посадки или аварии.

2. Метод решения задачи

Разработанный метод основан на оригинальном подходе к техническому диагностированию сложных систем, изложенном в [1].

Метод можно разбить на следующие этапы:

– получение координат реперных точек для эталонного тела, деформированных тел и неисправного вертолета;

– построение списка контролируемых точек и их доопределение в случае необходимости;

– поиск участков эффективного тестирования;

– построение дерева деформаций;

– проведение диагностического эксперимента;

– оценка стоимости предстоящего ремонта на основе продукционной модели, связывающей результаты диагностирования с графом выполнения ремонтных работ, а также со стоимостью и местом их проведения.

Рассмотрим более подробно особенности практической реализации основных этапов предложенного метода диагностирования состояния воздушного судна, реализуемого на базе разрабатываемой специализированной информационно-измерительной системы.

Под реперными точками будем понимать точки, выбранные и зафиксированные на поверхности тела, изменение координат которых указывает на произошедшую деформацию.

В качестве системы координат используется трехмерная декартова система координат (рис. 1).

Координаты реперной точки $P(Xp, Yp, Xp)$ вычисляются через длины отрезков PA, PB, PC по формулам, следующим из метода трилатерации, широко применяющегося в геодезии и лежащего в основе GPS-навигаторов:

$$Xp = \frac{1 - PB^2 + PA^2}{2}; \; Yp = \frac{1 - PC^2 + PA^2}{2}; \; Zp = \sqrt{PA^2 - Xp^2 - Yp^2}.$$

Следует отметить, что для того, чтобы тело можно было поместить в используемую при диагностике систему координат, необходимо наличие на поверхности контролируемого объекта как минимум трех точек, координаты которых не должны меняться при его деформациях.

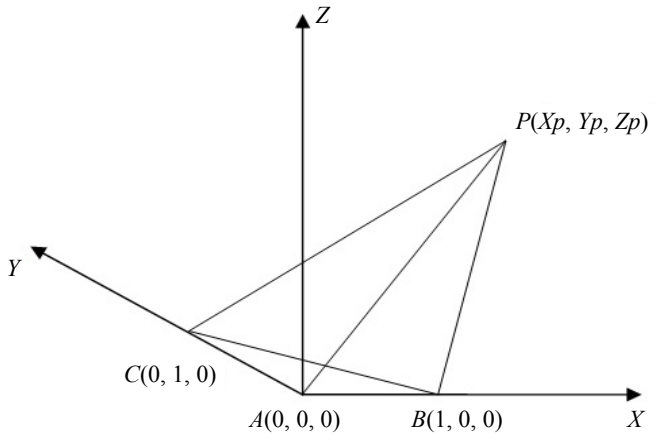


Рис. 1. Положение реперной точки в декартовой системе координат

Далее координаты по осям преобразуются в геометрические образы, первыми координатами при этом являются порядковые номера реперных точек, а вторыми – значения *X*, *Y*, *Z* соответственно. Геометрические образы позволяют доопределять данные последовательности классическими методами интерполяции, с одной стороны, а с другой – использовать хорошо разработанный метод распознавания автоматов в заданном классе как эффективное средство диагностики.

При использовании данного подхода на практике могут возникнуть ограничения на измерительные процедуры, так как некоторые точки могут оказаться недоступными для замеров. В данном случае геометрические образы (а соответственно, и координаты точек в пространстве) могут быть доопределены. Доопределение геометрических образов может быть осуществлено при помощи классических методов интерполяции Ньютона, Лагранжа, Гаусса и др. Метод доопределения подробно рассмотрен в работе [2].

Часто в задачах технического диагностирования требуется определить не точную причину деформации, а принадлежность к классу причин, позволяющую произвести восстановление эталонной формы тела [4–11]. При этом все причины деформации делятся на классы, которым соответствуют определенные методы восстановления. Наибольшим классом, как правило, является класс непригодных для восстановления деформаций. При проведении тестирования целесообразно вначале проверить принадлежность деформации к этому классу, затем к следующему по мощности классу и т.д. до получения однозначного ответа о ремонтопригодности воздушного судна.

Стоит заметить, что существует возможность сократить данный тест, оставив из трех координат каждой точки только те координаты, которые подвержены изменениям при деформациях. Данное замечание следует из того, что при деформации в связи со свойствами среды некоторые точки могут изменять свои координаты только в опредленной плоскости. Также стоит учесть то обстоятельство, что на определенных участках геометрические образы, соответствующие различным деформациям, могут совпадать. При этом при проведении нивелировки необходимо искать такие участки, на которых

максимальное количество геометрических образов не совпадает. Указанные эвристические правила позволяют существенно повысить эффективность процедуры диагностирования.

Формально задача поиска соответствия геометрического образа исследуемого тела геометрическому образу эталонного тела или геометрическим образам его деформаций соответствует задаче распознавания автомата в известном классе. Данная задача подробно рассмотрена в [3].

Для оценки стоимости ремонта воздушного судна каждому классу пригодных для восстановлений деформаций в соответствие поставлен перечень работ, которые, по мнению специалистов ФГУП «356 АРЗ», необходимо выполнить для полного восстановления вертолета. При формализации этих знаний были использованы продукции, имеющие вид следующих выражений:

– если выполняется $B_1(\vec{x},\vec{u})\, R_1\, B_2(\vec{x},\vec{u})\, R_2 \ldots R_{k-1}\, B_k(\vec{x},\vec{u})$, то при выполнении перечня работ $\{U_1, U_2, ..., U_n\}$ ремонт вертолета может быть успешно выполнен на предприятии K;

– если будут выполнены работы $\{U_1, U_2, ..., U_n\}$ на предприятии K, то стоимость ремонта вертолета составит n тыс. рублей, и продолжительность ремонта не превысит m рабочих дней

Здесь $B_i(\vec{x},\vec{u}), i=\overline{1,g}$ – условия принадлежности установленных в процессе нивелировки деформаций одному из базовых классов; $\{AND, OR, NOT, AND-NOT, OR-NOT\}$ – множество логических операций И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ соответственно; $R_i \in \{AND, OR, NOT, AND-NOT, OR-NOT\}$, $i=\overline{1,k-1}$; $\{U_1, U_2, ..., U_n\}$ – множество мероприятий рекомендуемого плана восстановительных работ; K – логико-лингвистическая переменная, характеризующая наименование авиационно-ремонтных заводов).

3. Предлагаемое практическое применение

На практике объектом диагностирования чаще всего может являться фюзеляж вертолета, нивелировка которого выполняется в соответствии с основными положениями разработанного выше метода.

При нивелировке проверяется правильность:

– стыковки хвостовой и концевой балок между собой и с центральной частью фюзеляжа;

– установки главного и хвостового редукторов;

– установки хвостового вала с опорами;

– установки стабилизатора;

– монтажа шасси.

Вертолет нивелируется без лопастей несущего винта, без топлива, масла, экипажа и грузов.

Основными инструментами для нивелировки являются: нивелир, нивелировочная линейка, отвесы, рулетка, квадрант и гидроподъемники, с помощью которых производится выставление вертолета в линию горизонта.

Нивелировка производится согласно нивелировочной схеме с учетом размеров на установку и регулирование отдельных агрегатов и узлов, задан-

ных чертежами, а также фактических замеров, которые занесены в таблицу нивелировочной схемы при первой нивелировке на заводе-изготовителе.

Например, в настоящее время при нивелировке вертолета МИ-8 и его модификаций используются 14 реперных точек (№ 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 20, 21, 24, 25, 26, 27), которые зафиксированы на фюзеляже (рис. 2).[1]

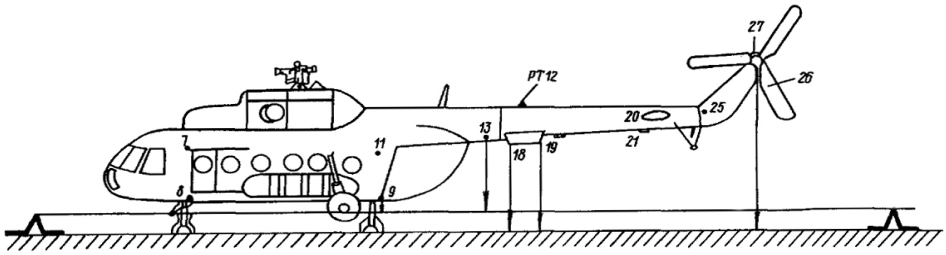


Рис. 2. Схема расположения реперных точек вертолета МИ-8

В ходе нивелировки производится 14 замеров, по которым вычисляются 11 значений (8 размеров в миллиметрах и 3 угла в градусах). Все значения замеров отмечаются на нивелировочной схеме, где линейные размеры показаны в миллиметрах, а углы отклонения – в градусах с соответствующими допусками, которые необходимо проверять при контрольных замерах. Результаты вычислений являются выходными данными и заносятся в протокол нивелировки вертолета.

В качестве инструмента для измерения расстояний в приведенном выше методе предлагается использовать оптический дальномер. Дальномер, установленный на штатив, поочередно помещается в точки A, B, C, выбранные с учетом наилучшего визуального наблюдения реперных точек вертолета. Так как все реперные точки вертолета не могут наблюдаться только из трех точек каждая, то необходимо ввести дополнительную систему координат, заданную точками A', B', C', расположенными на противоположной стороне вертолета. Далее необходимо совместить обе системы, выбрав и измерив любые три точки (D, E, F), не находящиеся на одной прямой. Замеры AD, AE, AF, $A'D$, $A'E$, $A'F$ позволяют «жестко» закрепить обе системы координат между собой. Для удобства полученные координаты точек можно перевести в новую систему координат, плоскость Oxy которой расположена на строительной горизонтали вертолета (проходящей через реперные точки № 5, 7, 10, 11), а плоскость Oxz расположена на продольной оси симметрии вертолета (плоскости, проходящей через реперные точки № 23, 24, 25).

После замеров вычисляются значения, которые необходимо заносить в протокол нивелировки. При вычислениях применяются формулы нахождения расстояний между двумя точками в пространстве, нахождения углов между плоскостью и прямой, и расстояния от точки до плоскости.

Формируется банк моделей вертолетов, заданных множеством координат. При этом для каждой модели добавляется состояние вертолета (плановая нивелировка, жесткая посадка, «завал» вертолета на бок и пр.) В дальнейшем, систематизируя и анализируя информацию из этого банка данных, возможно

[1] Реперные точки № 5 и 10 располагаются с противоположной стороны фюзеляжа, симметрично относительно РТ № 7, 11 соответственно.

опередлить состояние фюзеляжа вертолета и причин его возникновения всего по нескольким замерам.

Как показывает опыт проведения нивелировочных работ, применение разработанного метода позволит:

– сократить время нивелирования (в связи с отсутствием необходимости подъема вертолета на гидроподъемники, транспортировки его в ангар, предварительного демонтажа лопастей и проч.);

– сократить количество используемой рабочей силы;

– уменьшить энергозатраты, связанные с установкой вертолета на подъемниках в линию горизонта;

– уменьшить количество необходимого оборудования (достаточно штатива, нивелира и компьютера с соответсвующим программным обеспечением);

– расширить класс ремонтопригодных вертолетов; данное расширение связано с возможностью многократного выполнения экспериментов по поиску причин изменения геометрии вертолета.

Заключение

Разработанный метод дает возможность измерения расстояний между заданными точками в пространстве, в том числе измерения расстояний, когда между точками находится какое-либо препятствие, затрудняющее выполнение этой операции. С использованием данного метода появляется возможность измерения углов между прямыми и плоскостями, проходящими через выбранные точки. Становится возможным также оценить изменение положения точек, находящихся с противоположных сторон геометрического тела или закрытых другим телом и невидимых для наблюдателя. В некоторых случаях необходимо производить измерения расстояний, сориентировав объект относительно плоскости, образованной линией горизонта.

При использовании разработанного метода удается заменить данную плоскость эквивалентной плоскостью в трехмерной модели, что позволяет производить необходимые замеры без перемещения тела в пространстве. Применение оригинальной продукционной модели дает возможность оперативно оценить стоимость и продолжительность ремонта неисправного вертолета, а также выдать рекомендации по рациональному выбору места проведения ремонтных работ.

Список литературы

1. **Твердохлебов, В. А.** Геометрические образы законов функционирования автоматов / В. А. Твердохлебов. – Саратов : Научная книга, 2008. – 65 с.
2. **Твердохлебов, В. А.** Методы интерполяции в техническом диагностировании / В. А. Твердохлебов // Проблемы управления. – 2007. – № 2. – С. 28–34.
3. **Гилл, А.** Введение в теорию конечных автоматов / А. Гилл. – М. : Наука, 1966. – 192 с.
4. **Куракин, А. Л.** Оптимизация параметров лазерных дальномеров / А. Л. Куракин // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – № 6. – С. 12–20.
5. **Горбачев, А. Ю.** Математическая модель погрешностей GPS / А. Ю. Горбачев // Авиакосмическое приборостроение. – 2010. – № 5. – С. 34–41.
6. **Панкин, А. М.** Построение технических средств систем диагностирования / А. М. Панкин // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 11. – С. 26–34.

7. Основы построения автоматизированных систем контроля сложных объектов / под ред. П. И. Кузнецова. – М. : Энергия, 1969. – 479 с.
8. Нормы летной годности гражданских вертолетов. – М. : Изд. ЦАГИ, 1987. – 350 с.
9. **Зуев, В. Е.** Лазерные навигационные устройства / В. Е. Зуев, В. Я. Фадеев. – М. : Радио и связь, 1987. – 160 с.
10. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования / В. Г. Воробьев, В. В. Глухов, Ю. В. Козлов и др. – М. : Транспорт, 1984. – 182 с.
11. **Макаров, Н. Н.** Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса / Н. Н. Макаров. – М. : Машиностроение – Полет, 2009. – 114 с.

Марков Андрей Игоревич
аспирант, Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

Markov Andrey Igorevich
Postgraduate student, Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky

E-mail: 8markov8@gmail.com

Кушников Вадим Алексеевич
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (г. Саратов)

Kushnikov Vadim Alekseevich
Doctor of engineering sciences, professor, chief researcher, Institute of fine mechanics and control problems of the Russian Academy of Sciences (Saratov)

E-mail: 8markov8@gmail.com

УДК 681.518.54; 004.3.001.4

Марков, А. И.

Задача оперативного диагностирования дефектов фюзеляжа вертолета МИ-8 при проведении предварительной оценки его ремонтопригодности / А. И. Марков, В. А. Кушников// Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 95–101.

УДК 621.787: 539.319

В. А. Кирпичев, А. С. Букатый, А. В. Чирков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ГЛАДКИХ ДЕТАЛЕЙ[1]

Аннотация. Изучено влияние пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения, предел выносливости и микротвердость плоских образцов из сплава ЭИ698ВД. Установлено, что предел выносливости коррелирует с критерием среднеинтегральных остаточных напряжений поверхностного слоя упрочненных образцов, а микротвердость – с величиной сжимающих остаточных напряжений упрочненной поверхности.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, гладкие образцы, критерий влияния остаточных напряжений, предел выносливости, микротвердость.

Abstract. The article studies the influence of the shotblasting on residual stresses, limit of endurance and micro-hardness of flat specimens made of ЭИ698ВД alloy. It is established that the limit of endurance correlates with the average residual stresses criterion of the surface layer of hardened specimens; micro-hardness correlates with compressing residual stresses of hardened surface as well.

Key words: surface hardening, flat specimens, residual stresses influence criterion, limit of endurance, micro-hardness.

После поверхностного пластического деформирования в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклеп и сжимающие остаточные напряжения. Экспериментально установлено [1], что основную роль в повышении сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости таких деталей по остаточным напряжениям применяются два критерия. Первым критерием, используемым в работах [1–4], являются остаточные напряжения на поверхности опасного сечения упрочненной детали. Зависимость для определения предела выносливости при изгибе σ_{-1}^{y} в упрочненной детали в этом случае имеет вид

$$\sigma_{-1}^{y} = \sigma_{-1}^{0} + \psi_{\sigma} \cdot \left|\sigma_{z}^{\text{пов}}\right|, \qquad (1)$$

где σ_{-1}^{0} – предел выносливости неупрочненной детали; ψ_{σ} – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости; $\sigma_{z}^{\text{пов}}$ – осевые остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали.

Другие компоненты остаточного напряженного состояния в соответствии с третьей теорией предельных напряженных состояний в зависимости (1) не участвуют, так как радиальные остаточные напряжения на поверхности детали равны нулю, а окружные являются промежуточными главными напряжениями [5].

Критерий $\sigma_{z}^{\text{пов}}$, учитывающий влияние остаточных напряжений на поверхности упрочненной детали, может быть использован для прогнозирова-

[1] Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

ния предела выносливости по трещинообразованию. Однако, как следует из литературных данных и наших исследований, при расчете предела выносливости по разрушению зависимость (1) непригодна из-за значительного рассеяния коэффициента ψ_σ, так как в этом случае не учитывается влияние характера распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

В работе [6] для оценки влияния сжимающих остаточных напряжений, возникающих при поверхностном упрочнении, на предел выносливости деталей был предложен второй критерий – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ в виде

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi}\int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}}\,d\xi\,, \qquad (2)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали (образца) по толщине поверхностного слоя a; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения до текущего слоя, выраженное в долях $t_{\text{кр}}$; $t_{\text{кр}}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости [7, 8].

Критерий $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ учитывает влияние на предел выносливости не только величины, но и характера распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя детали. Используя этот критерий, представляется возможным прогнозировать предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла детали σ_{-1}^{y} за счет поверхностного упрочнения по формуле

$$\sigma_{-1}^{y} = \sigma_{-1}^{0} + \bar{\psi}_\sigma \cdot \left|\bar{\sigma}_{\text{ост}}\right|, \qquad (3)$$

где $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$.

Возможность использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных образцов и деталей с концентраторами напряжений изучена в работах [7–9]. В настоящем исследовании предпринята попытка использовать критерий $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ для прогнозирования предела выносливости при изгибе гладких плоских образцов из сплава ЭИ698ВД, упрочненных пневмодробеструйной обработкой на различных режимах. В работе исследовалась также микротвердость упрочненных образцов и ее связь с остаточными напряжениями.

Образцы для определения остаточных напряжений (рис. 1) и испытаний на усталость (рис. 2) после шлифования подвергались упрочнению стеклянными и стальными шариками при различном давлении воздуха *P* (табл. 1).

Ускоренные испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на вибростенде, база испытаний – $2\cdot10^6$ циклов нагружения. Значения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1. В упрочненных образцах после испытаний на усталость при напряжениях, равных пределу выносливости, были обнаружены нераспространяющиеся

трещины усталости, средняя глубина которых составляла $t_{кр}$ = 0,065 мм. На рис. 3 приведена фотография излома упрочненного образца, на которой видна нераспространяющаяся усталостная трещина 1.

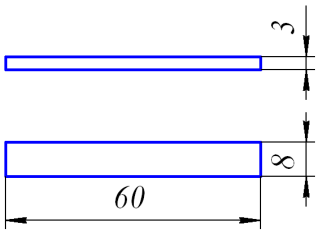


Рис. 1. Образец для определения остаточных напряжений

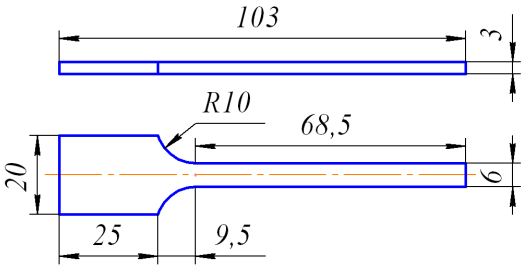


Рис. 2. Образец для испытаний на усталость

Таблица 1

Режимы упрочнения, результаты испытаний на усталость и измерения остаточных напряжений

Вариант упрочнения	Тип шариков	P, МПа	σ_{-1}, МПа	$\sigma_z^{пов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	стеклянные	0,2	395,2	–620	0,100	–529	0,118
2		0,3	395,2	–640	0,097	–595	0,105
3		0,4	411,5	–610	0,129	–637	0,123
4	стальные	0,15	545,4	–440	0,483	–531	0,400
5		0,3	562,6	–280	0,820	–524	0,438
6		0,45	630,2	–260	1,143	–483	0,616
7		0,6	574,8	–220	1,100	–472	0,513
8	исходное состояние	–	332,9	–	–	–	–

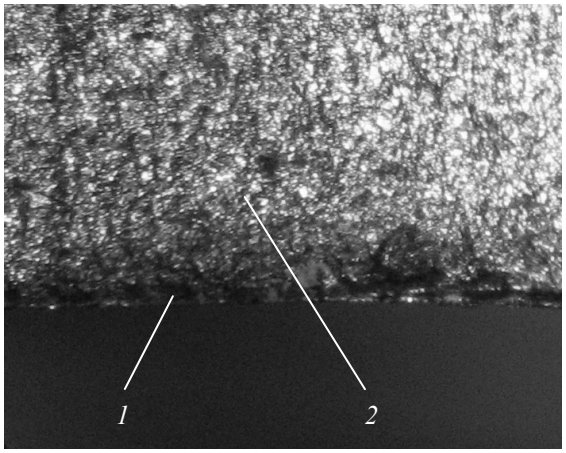


Рис. 3. Усталостный излом плоского упрочненного дробью образца: 1 – нераспространяющаяся трещина, 2 – зона долома

Осевые остаточные напряжения σ_z в образцах по толщине поверхностного слоя a определялись по методике работы [10] и приведены на

рис. 4. В образцах после шлифования (исходное состояние – эпюра 8) действовали растягивающие остаточные напряжения с максимумом 180 МПа на глубине 0,04 мм. При упрочнении стеклянными шариками диаметром 0,2–0,3 мм с увеличением давления воздуха глубина залегания сжимающих остаточных напряжений увеличивается при практически неизменных максимальных значениях, достигающих –670 МПа.

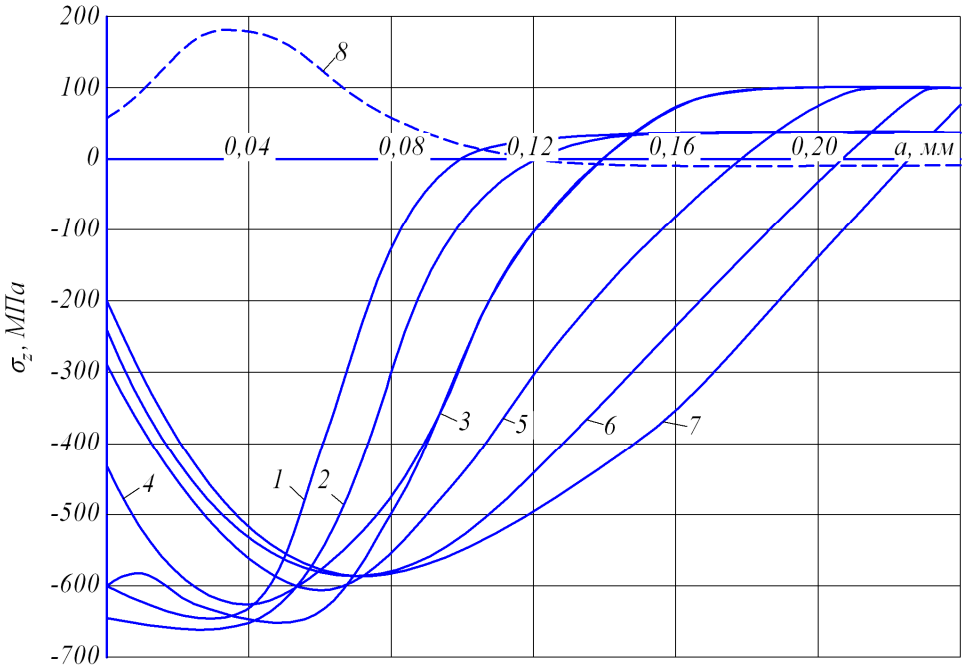


Рис. 4. Осевые остаточные напряжения σ_z в образцах после упрочнения (1–7) и в исходном состоянии (8) (номера эпюр соответствуют номерам вариантов упрочнения в табл. 1)

При упрочнении стальными шариками диаметром 0,18–0,5 мм толщина поверхностного слоя с сжимающими остаточными напряжениями существенно больше, чем при упрочнении стеклянными шариками. С увеличением давления воздуха глубина залегания остаточных напряжений увеличивается при одновременном уменьшении напряжений к поверхности и смещении максимума от поверхности в глубь образца. В табл. 1 приведены значения остаточных напряжений $\sigma_z^{пов}$ на поверхности упрочненных образцов, а также значения коэффициента ψ_σ влияния поверхностного упрочнения по критерию $\sigma_z^{пов}$. Можно видеть, что коэффициент ψ_σ изменяется для всех вариантов упрочнения образцов в 11 раз, а для случаев упрочнения стальными шариками – в 2,3 раза. Изменение коэффициента ψ_σ в таких широких пределах не позволяет использовать критерий $\sigma_z^{пов}$ для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных гладких деталей.

По методике работы [6] были вычислены среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ по толщине поверхностного слоя образца, равной кри-

тической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Значения $\bar{\sigma}_{ост}$ приведены в табл. 1. Здесь же представлены значения коэффициента влияния поверхностного упрочнения $\bar{\psi}_{\sigma}$ на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

Из данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 4, видно, что, несмотря на существенный спад к поверхности сжимающих остаточных напряжений, упрочнение образцов стальными шариками приводит к большему увеличению предела выносливости по сравнению с упрочнением стеклянными шариками. При этом наиболее эффективным из исследованных вариантов упрочнения является вариант № 6.

При упрочнении стальными шариками коэффициент влияния остаточных напряжений $\bar{\psi}_{\sigma}$ составляет в среднем 0,492 и практически совпадает со значением $\bar{\psi}_{\sigma}$, вычисленным по формулам работ [11–13] для случая гладкой детали, т.е. без концентратора напряжений. Приняв для случая гладкой детали теоретический α_{σ} и эффективный K_{σ} коэффициенты концентрации напряжений равными единице, получим среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma} = 0{,}490$. Такое совпадение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ объясняется устойчивостью остаточных напряжений в образцах, упрочненных стальными шариками [1]. Коэффициент ψ_{σ}, учитывающий влияние остаточных напряжений $\sigma_z^{пов}$ на поверхности образцов, изменяется в значительно больших пределах, чем коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$.

При упрочнении стеклянными шариками коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ составляет в среднем 0,115, что в четыре раза меньше, чем при упрочнении стальными шариками. Значительно меньшее значение $\bar{\psi}_{\sigma}$ объясняется снижением сжимающих остаточных напряжений в упрочненных стеклянными шариками образцах под действием переменных напряжений при испытаниях на усталость, что было установлено в работе [14] на основании измерения микротвердости поверхности усталостных образцов до и после испытаний на усталость. Кроме того, из данных табл. 1 и рис. 4 видно, что на предел выносливости образцов основное влияние оказывает не величина сжимающих остаточных напряжений на поверхности, а полнота распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя.

На образцах для определения остаточных напряжений (рис. 1) была измерена микротвердость упрочненной поверхности $H_{\mu}^{пов}$, а также микротвердость образцов после удаления стравленного слоя $a_{стр}$. В табл. 2 представлены средние значения микротвердости по 12 отпечаткам в каждом случае. Из данных табл. 2 следует, что толщина стравленного слоя при определении остаточных напряжений во всех случаях превышает глубину смены знака остаточных напряжений. В связи с этим можно предположить, что микротвердость – это микротвердость ненаклепанного материала, составляющая в среднем 5505 МПа.

Следует обратить внимание на то, что микротвердость $H_{\mu}^{пов}$ упрочненной стеклянными шариками поверхности выше по сравнению с микротвердостью поверхности, упрочненной стальными шариками. Из данных

табл. 1 и 2 видно, что величина микротвердости $H_{\mu}^{пов}$ следует за значениями остаточных напряжений на поверхности: чем выше сжимающие остаточные напряжения на поверхности, тем выше микротвердость. Из анализа данных табл. 1 и 2 также видно, что микротвердость поверхности после обработки стеклянными шариками выше, чем после обработки стальными шариками, а предел выносливости, наоборот, выше после обработки стальными, чем стеклянными, шариками. Поэтому микротвердость упрочненной поверхности, в отличие от остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, не может служить объективным критерием оценки влияния упрочнения на предел выносливости детали.

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости

Вариант упрочнения	Тип шариков	P, МПа	$H_{\mu}^{пов}$, МПа	$a_{стр}$, мм	$H_{\mu}^{подсл}$, МПа	$a_{ОН}$, мм
1	стеклянные	0,2	6020	0,118	5459	0,100
2		0,3	6038	0,127	5506	0,120
3		0,4	5918	0,169	5375	0,140
4	стальные	0,15	5813	0,178	5615	0,150
5		0,3	5802	0,189	5414	0,180
6		0,45	5768	0,225	5542	0,215
7		0,6	5674	0,234	5578	0,230
8	исходное состояние	–	5743	0,118	5550	–

Таким образом, проведенное исследование показало, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ можно использовать и для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных гладких деталей, но лишь в том случае, если сжимающие остаточные напряжения не изменяются под действием переменных нагрузок.

Список литературы

1. **Иванов, С. И.** Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25–27.
2. **Кравченко, Б. А.** Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б. А. Кравченко, К. Ф. Митряев. – Куйбышев : Куйбышев. книж. изд-во, 1968. – 131 с.
3. **Серенсен, С. В.** К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочненных образцов с учетом кинетики остаточной напряженности / С. В. Серенсен, С. П. Борисов, Н. А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – № 2. – С. 3–7.
4. **Туровский, М. Л.** Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали / М. Л. Туровский, Н. М. Шифрин // Вестник машиностроения. – 1970. – № 11. – С. 37–40.
5. **Иванов, С. И.** Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклепанного материала / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Вопросы прикладной механики в авиационной технике. – Куйбышев : КуАИ, 1973. – Вып. 66. – С. 70–73.
6. **Павлов, В. Ф.** О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29–32.

7. **Павлов, В. Ф.** Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 8. – С. 22–26.
8. **Павлов, В. Ф.** Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37–40.
9. **Павлов, В. Ф.** Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичев, В. Б. Иванов – Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
10. **Биргер, И. А.** Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
11. **Кирпичев, В. А.** Сопротивление усталости упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений / В. А. Кирпичев, А. П. Филатов, Ю. Н. Сургутанова, В. Б. Иванов // Математическое моделирование и краевые задачи : тр. Шестой Всерос. науч. конф. с международным участием. – Ч. 1. Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. – Самара : Изд-во СамГТУ, 2009. – С. 126–131.
12. **Кирпичев, В. А.** Влияние остаточных напряжений на предел выносливости детали при различной степени концентрации / В. А. Кирпичев, А. П. Филатов, О. В. Каранаева, Д. В. Иванов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : материалы докладов МНТК 24–26 июня 2009 г. – Ч. 2. – Самара : СГАУ, 2009. – С. 178–179.
13. **Кирпичев, В. А.** Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений / В. А. Кирпичев, А. С. Букатый, А. П. Филатов, А. В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 81–85.
14. **Радченко, В. П.** Влияние поверхностного упрочнения и усталостных испытаний на металлофизические характеристики плоских образцов из сплава ЭИ698ВД / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Математическое моделирование и краевые задачи : тр. Седьмой Всерос. науч. конф. с международным участием. Ч. 1. Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. – Самара : Изд-во СамГТУ, 2010. – С. 287–294.

Кирпичев Виктор Алексеевич
доктор технических наук, профессор, кафедра сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева

E-mail: sopromat@ssau.ru

Kirpichyov Viktor Alekseevich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of strength of materials, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov

Букатый Алексей Станиславович
кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра технологии машиностроения, Ярославский государственный технический университет

E-mail: bukaty@inbox.ru

Bukaty Aleksey Stanislavovich
Candidate of engineering sciences, senior lecturer, sub-department of machine building technology, Yaroslavl State Technical University

Чирков Алексей Викторович
кандидат технических наук, ассистент,
кафедра сопротивления материалов,
Самарский государственный
аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева

E-mail: sopromat@ssau.ru

Chirkov Aleksey Viktorovich
Candidate of engineering sciences, assistant,
sub-departmet of strength of materials,
Samara State Aerospace University
named after S. P. Korolyov

УДК 621.787: 539.319

Кирпичев, В. А.

Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных гладких деталей / В. А. Кирпичев, А. С. Букатый, А. В. Чирков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 102–109.

УДК 621.001.63; 656.13.08

А. Ю. Муйземнек, Е. Д. Карташова, Р. А. Земсков

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Дается описание компьютерных моделей процессов функционирования пиротехнических элементов системы обеспечения пассивной безопасности легкового автомобиля. В качестве примера приводятся результаты компьютерного моделирования процесса функционирования тросового натяжителя ремня безопасности.

Ключевые слова: система обеспечения пассивной безопасности легкового автомобиля, пиротехнический элемент, процесс функционирования пиротехнического элемента, компьютерная модель, моделирование, идентификация параметров модели горения.

Abstract. The work describes computer models of functioning of pyrotechnic elements of passive car safety and gives examples of the results of computer simulation of rope belt tensioner functioning.

Key words: car passive safety system, pyrotechnic element, process of pyrotechnic element functioning, computer model, modeling, identification of burning simulation parameters.

Введение

Современные системы обеспечения внутренней пассивной безопасности (СОВПБ) легковых автомобилей включают удерживающие и квазизащитные устройства, а также единую для всех активных элементов систему управления. К основным удерживающим устройствам относятся ремни и подушки безопасности, подголовники и подлокотники. В современных СОВПБ легковых автомобилей широкое применение нашли пиротехнические устройства. Так, подушки безопасности могут включать куполообразные или трубчатые, одно- или двухступенчатые твердотопливные или гибридные газогенераторы. Ремни безопасности могут комплектоваться тросовыми, шариковыми или роторными пиротехническими натяжителями. Эффективность работы СОВПБ определяется согласованным действием всех активных элементов системы и, прежде всего, своевременным и достаточно энергичным действием пиротехнических устройств. Учитывая то, что эффективность функционирования СОВПБ обеспечивается на стадии разработки автомобиля, создание компьютерных моделей процессов функционирования пиротехнических элементов, позволяющих оценить эффективность системы и определить ее рациональные параметры, является актуальной задачей.

В классических работах по внутренней баллистике ствольных систем сформулированы и решены основные задачи внутренней баллистики для артиллерийских систем с традиционными и некоторыми нетрадиционными схемами выстрела. Значительная часть получивших широкое распространение решений основана на применении термодинамического метода расчета и

системы допущений, оправданной для ствольных систем. Применение газодинамического метода для решения нетривиальных задач внутренней баллистики приводит к необходимости решения систем уравнений большой размерности. Разработка программ для их решения, даже с применением универсальных математических макетов, может потребовать чрезмерно много времени. Использование специализированных программ, предназначенных для решения узкого класса задач внутренней баллистики, может оказаться ограниченным системой принятых допущений. Последнее имеет место при моделировании процессов функционирования пиротехнических элементов системы обеспечения пассивной безопасности легкового автомобиля. Совершенствование систем обеспечения пассивной безопасности легковых автомобилей может быть выполнено на основе компьютерного моделирования с использованием универсальных систем автоматизированного инженерного анализа. Для этого необходимо идентифицировать параметры интегрированных в эти системы моделей горения энергетических материалов.

1. Исходные данные для построения модели процесса функционирования пиротехнического устройства

Твердотопливные газогенераторы СОВПБ имеют пороховой заряд в виде таблеток или колец. После сгорания твердого топлива образуется безопасный для пассажиров газ. Достаточно широкая номенклатура используемых в настоящее время порохов и их характеристик физико-химических и баллистических свойств приведена в табл. 1 и 2 [1, 2].

Таблица 1

Физико-химические характеристики порохов [2]

Сорт пороха	Потенциал пороха П, МДж/кг	Температура взрывчатого превращения T_1, К	Удельный объем пороховых газов w_1, м^3/кг	Удельная газовая постоянная R, Дж/кг·К	Плотность, г/см^3
Дымный	2,09	2200	0,3	111,4	1,5–1,9
Пироксилиновый	3,25	2770	0,9	352,8	1,54–1,64
Нитроглицериновый:					
холодный	2,68	2400	1,025	380,6	1,54–1,64
горячий	3,6	3000	0,9	334,2	1,54–1,64
Нитродигликолевый	2,45	2100	1,025	388,8	1,54–1,64
Нитрогуанидиновый	2,51	2100	1,066	395,8	1,54–1,64
Нитроксилитановый	2,51	2100	1,066	395,8	1,54–1,64

Примечание. В расчетах плотность дымного пороха принято считать равной 1,7 г/см^3, а плотность бездымного пороха – равной 1,6 г/см^3.

Введем основные понятия, используемые в дальнейшем при описании математической и создании компьютерной модели процессов функционирования пиротехнических элементов [1–3].

Относительный вес сгоревшего топлива $\psi = \frac{\omega_{сг}}{\omega}$, где $\omega_{сг}$ – вес сгоревшего пороха; ω – вес заряда.

Таблица 2

Баллистические характеристики порохов [2]

Сорт пороха	Сила пороха f, кДж/кг	Коволюм пороховых газов, α, дм^3/кг	Среднее значение коэффициента скорости горения пороха u_1, нс м^2/кг
Дымный	275	0,5	1020
Пироксилиновый	932	1	0,714
Нитроглицериновый:			
холодный	883	1,1	0,561
горячий	981	0,95	1,836
Нитродигликолевый	854	1,13	0,408
Нитрогуанидиновый	890	1,06	0,612
Нитроксилитановый	890	1,06	0,612

Относительная толщина сгоревшего пороха $z = \dfrac{e}{e_1}$, где e – толщина слоя сгоревшего пороха; $2e_1$ – толщина горящего свода порохового зерна.

Закон образования пороховых газов $\psi = \psi(z)$:

$$\psi = \kappa z\left(1 + \lambda z + \mu z^2\right), \tag{1}$$

где $\kappa = 1 + \alpha + \beta$, $\lambda = -\dfrac{\alpha + \beta + \alpha\beta}{1 + \alpha + \beta}$, $\mu = \dfrac{\alpha\beta}{1 + \alpha + \beta}$ – параметры в законе образования пороховых газов; $\alpha = \dfrac{2e_1}{2b}$, $\beta = \dfrac{2e_1}{2c}$ – характеристики формы пороховых зерен; $2b$, $2c$ – размеры пороховых зерен.

Значения параметров κ, α, β для наиболее широко используемых форм зерен пороха приведены в табл. 3.

Таблица 3

Размеры и характеристики формы пороховых зерен

Форма порохового зерна	Размеры, мм			Характеристики формы		
	$2e_1$	$2b$	$2c$	κ	λ	μ
Куб, шар	$2r$	–	–	3	–1	0,33
Лента	1,5	30	200	1,058	–0,0547	0,00036
Трубка	1,78		255	1,007	–0,007	0
Трубка, бронированная с торцов и наружной поверхности	d_k	–	Любая	0,667	0,5	0
Семиканальное зерно:						
первая фаза	2 d_k	–	25 d_k	0,72	0,345	-0,0556
вторая фаза	0,53 d_k	–	25 d_k	1,808	–0,470	–
Таблетка	2,5	5	–	2	–0,141	0,03125
Кольцо	2,5	2,5	–	2	–0,5	0

Скорость горения пороха $u = \dfrac{de}{dt}$.

Закон горения пороха $u = u(p)$. Считается, что при давлениях, больших 50 МПа, справедлив линейный закон

$$u = u_1 p, \tag{2}$$

где u_1 – коэффициент скорости горения пороха.

Значения коэффициентов скорости горения для ряда порохов приведены в табл. 2.

Быстрота газообразования имеет вид

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\omega}\frac{d\omega_{\text{сг}}}{dt}. \tag{3}$$

Учитывая зависимость между весом ω и объемом пороха Λ

$$\omega = \rho\Lambda,$$

где ρ – плотность пороха, а также, что $d\Lambda = -S\,de$, зависимость (3) может быть преобразована к более удобному виду:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S}{\Lambda_0}\frac{de}{dt}, \tag{4}$$

где S – площадь поверхности горения порохового зерна; Λ_0 – начальный объем порохового зерна.

Относительная поверхность горения равна $\sigma = \frac{S}{S_1}$, где S_1 и S – начальная и текущая площади поверхностей горения.

Одно из наиболее простых аналитических выражений, связывающих σ и ψ, было предложено Шербонье и названо им функцией формы:

$$\sigma = (1-\psi)^{\beta}, \tag{5}$$

где β – параметр, который для пороховых зерен в виде шара равен 2/3, для сплошного цилиндра, равен 1/2, для пороха с постоянной площадью горения равен 0.

2. Идентификация параметров модели горения

В программу AUTODYN [3], начиная с версии 11.0, введена модель пороха «Powder Burn Model». Модель имеет две опции, каждая из которых включает:

– уравнение скорости горения в виде

$$\frac{d\psi}{dt} = G(1-\psi)^c H(p_g), \tag{6}$$

где G, c – параметры; $H(p_g)$ – функция давления пороховых газов;

– уравнение состояния пороховых газов;

– уравнение для скорости распространения фронта горения.

Различия заключаются в следующем:

– в первой опции в качестве уравнения состояния используется уравнение JWL, а во второй – экспоненциальное уравнение в виде

$$p = \rho_g e_g \exp\left(\frac{\rho_g}{D}\right), \tag{7}$$

где ρ_g, e_g – плотность и внутренняя энергия пороховых газов; D – параметр;

– в первой опции скорость распространения фронта горения считается постоянной, во второй опции скорость распространения фронта горения описывается нелинейной функцией, зависящей от давления и плотности пороха.

Для определения параметров модели пороха «Powder Burn Model» выполним следующие преобразования.

Выразим S из выражения (4):

$$S = \Lambda_0 \frac{d\psi}{de}. \tag{8}$$

Найдем производную $\frac{d\psi}{de}$:

$$\frac{d\psi}{de} = \frac{d\psi}{dz}\frac{dz}{de} = \frac{\kappa}{e_1}\left(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2\right). \tag{9}$$

Подставив выражение (8) в выражение (9), найдем S:

$$S = \Lambda_0 \frac{\kappa}{e_1}\left(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2\right). \tag{10}$$

Подставим выражения (2) и (10) в выражение (4):

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\kappa u_1 p^*}{e_1}\left(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2\right)\frac{p}{p^*}, \tag{11}$$

где p^* – отсчетное давление, введенное для того, чтобы сделать третий сомножитель безразмерным.

Сопоставив выражения (6) и (11), заметим:

– имеет место соответствие $G = \frac{\kappa u_1 p^*}{e_1}$, $H\left(p_g\right) = \frac{p}{p^*}$, $Sh(\psi) = Sl\left(z\right)$,

где $Sh(\psi) = \left(1 - \psi\right)^c$, $Sl\left(z\right) = \left(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2\right)$, параметр c в функции $Sh(\psi)$ соответствует параметру β в выражении (5);

– функция $Sh(\psi)$ соответствует процессу горения пороха с уменьшающейся или постоянной поверхностью горения, функция $Sl\left(z\right)$ – с уменьшающейся, постоянной или с увеличивающейся поверхностью горения;

– при линейном законе горения функция $H\left(p_g\right)$ также является линейной, но уравнение горения (6) в модели пороха «Powder Burn Model» позволяет использовать и нелинейные функции давления;

– отмеченные соответствия имеют место при линейном законе горения.

Таким образом, при принятии допущения о линейном законе горения (2) для порохов с постоянной или уменьшающейся поверхностью горения

«стандартных» характеристик достаточно для того, чтобы определить параметры, входящие в уравнение горения модели пороха «Powder Burn Model».

Характеристики формы используемых в современных пиротехнических устройствах пороховых зерен (таблетки и кольца) были определены по зависимостям, приведенным в работе [1]. Размеры пороховых зерен и результаты расчета представлены в табл. 3.

Для определения параметра c в уравнении скорости горения (6) выполним следующие преобразования:

– используя выражения (1) и (10), найдем производную $\frac{d\sigma}{d\psi}$:

$$\frac{d\sigma}{d\psi}=\frac{2\lambda+6\mu z}{\kappa\left(1+2\lambda z+3\mu z^2\right)}; \tag{12}$$

– найдем производную функции формы Шербонье по ψ :

$$\frac{d\sigma}{d\psi}=-\beta(1-\psi)^{\beta-1}; \tag{13}$$

– приравнивая значения выражений (12) и (13) при $\psi=0$, получим

$$\beta=\frac{2\lambda}{\kappa}. \tag{14}$$

Используя выражение (14), учитывая равенство $c=\beta$, найдем значения параметра c для пороховых зерен, имеющих форму таблеток и колец, – $c=0{,}141$ и $c=0{,}5$ соответственно.

Для определения параметров в экспоненциальном уравнении состояния (7) используем основное уравнение пиростатики вычисления полного пиростатического давления:

$$p=\frac{f\Delta}{1-\alpha\Delta}, \tag{15}$$

где f – сила пороха; Δ – плотность заряжания; α – коволюм пороховых газов.

Предположим, что характеристики пороха f и α известны и уравнение (15) достаточно точно позволяет рассчитать полное пиростатическое давление при двух плотностях заряжания $\Delta_1=\rho_1$ и $\Delta_2=\rho_2$:

$$p_1=f\rho_1/(1-\alpha\rho_1),\ p_2=f\rho_2/(1-\alpha\rho_2).$$

Тогда параметры e_g и D могут быть найдены путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} p_1=\rho_1 e_g\exp(\rho_1/D), \\ p_2=\rho_2 e_g\exp(\rho_2/D). \end{cases} \tag{16}$$

Решение системы (16) имеет вид

$$D_1 = (\rho_1 - \rho_2) \Big/ \ln\left[(p_2 \rho_1)/(p_1 \rho_2)\right], \; e_g = p_1 \Big/ \left\{\rho_1 \exp\left[-(\rho_1/D)\right]\right\}. \quad (17)$$

Точность определения параметров может быть повышена за счет использования экспериментально определенных значений давлений вместо значений давлений, рассчитанных по уравнению (15).

3. Использование модели горения в компьютерном моделировании пиротехнических устройств систем обеспечения пассивной безопасности легковых автомобилей

Далее в качестве примера представлены результаты компьютерного моделирования процесса функционирования пиротехнического тросового натяжителя, схема которого представлена на рис. 1. При моделировании использованы полученные в результате описанных выше идентификационных процедур параметров модели пороха «Powder Burn Model» (опция с экспоненциальным уравнением состояния), которые приведены в табл. 4.

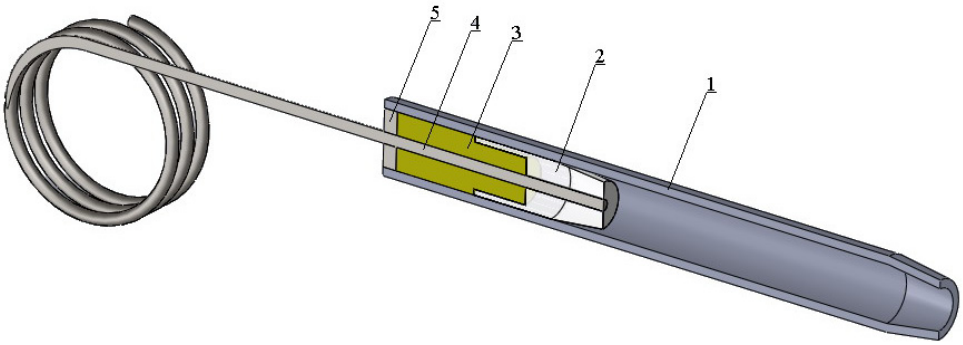


Рис. 1. Схема тросового натяжителя: 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – заряд; 4 – трос; 5 – крышка

Таблица 4

Параметры модели «Powder Burn Model» [3]

Наименование параметра	Номер материала	
	1	2
1	2	3
Плотность заряжания, г/см^3	0,6	0,7
Уравнение состояния непрореагировавшего материала	линейное	
Объемный модуль упругости, Мбар	0,01	
Отсчетная температура, К	293	
Уравнение состояния прореагировавшего материала	экспоненциальное	
Параметр горения G, мкс$^{-1}$	$2{,}1 \cdot 10^{-2}$	
Параметр горения c	0,667	
Параметр C_1, см/мкс	0,01	
Параметр D, г/см^3	0,3474	
Удельная энергия, Гэрг/мм^3	$2{,}53 \cdot 10^{-3}$	$2{,}92 \cdot 10^{-3}$
Давление в 1-й точке, Мбар	минус 10^{-12}	
Давление во 2-й точке, Мбар	0,5	
Давление в 3-й точке, Мбар	0,1	

Окончание табл. 4

1	2	3
Значение функции $H(p)$ в 1-й точке	$5 \cdot 10^{-4}$	
Значение функции $H(p)$ во 2-й точке	$5 \cdot 10^{-4}$	
Значение функции $H(p)$ в 3-й точке	1	
Плотность в 1-й точке, г/см^3	0	
Плотность во 2-й точке, г/см^3	0,6	0,7
Плотность в 3-й точке, г/см^3	1,2	1,4

Компьютерное моделирование выполнено в программе AUTODYN. На рис. 2 показаны положение элементов натяжителя, а также соответствующее распределение давления пороховых газов через 0,6 мс после срабатывания пиропатрона. К этому моменту времени произошло воспламенение всего порохового заряда, но давление пороховых газов не однородно, имеет место незначительный прорыв пороховых газов между поршнем и корпусом.

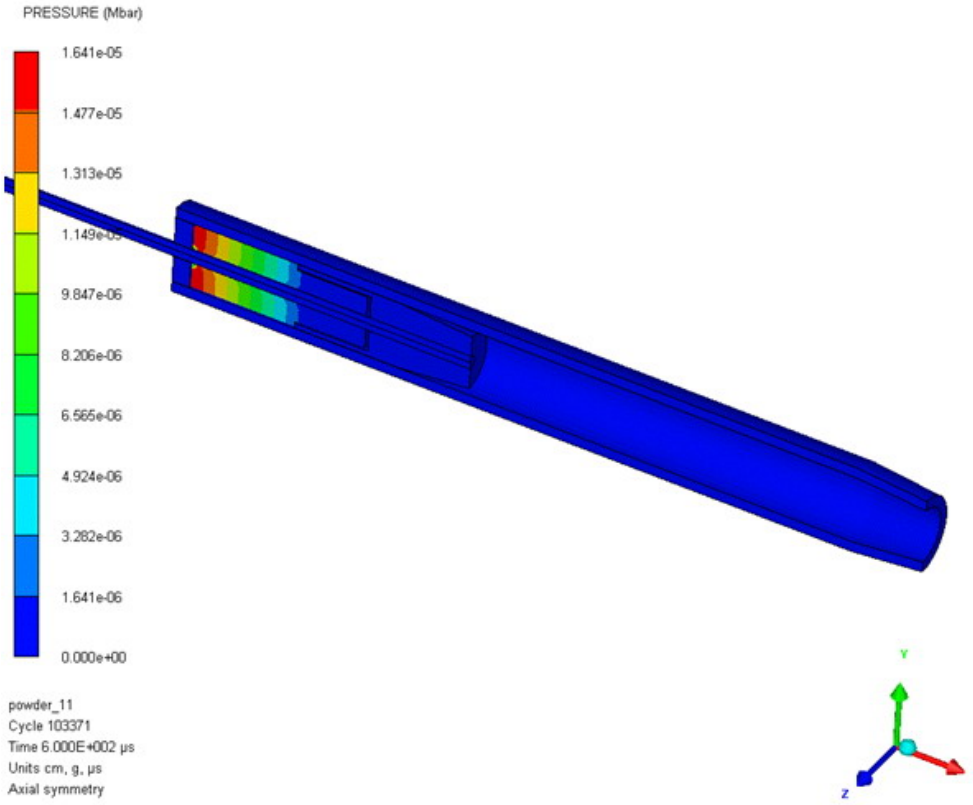


Рис. 2. Положение элементов натяжителя
и распределение давления пороховых газов при t = 2,9 мс

Результаты сопоставления полученных в результате моделирования и эксперимента максимальных значений давления представлены на рис. 3.

Сопоставление результатов компьютерного моделирования свидетельствует об их согласовании с результатами экспериментальных исследований процессов функционирования тросовых натяжителей.

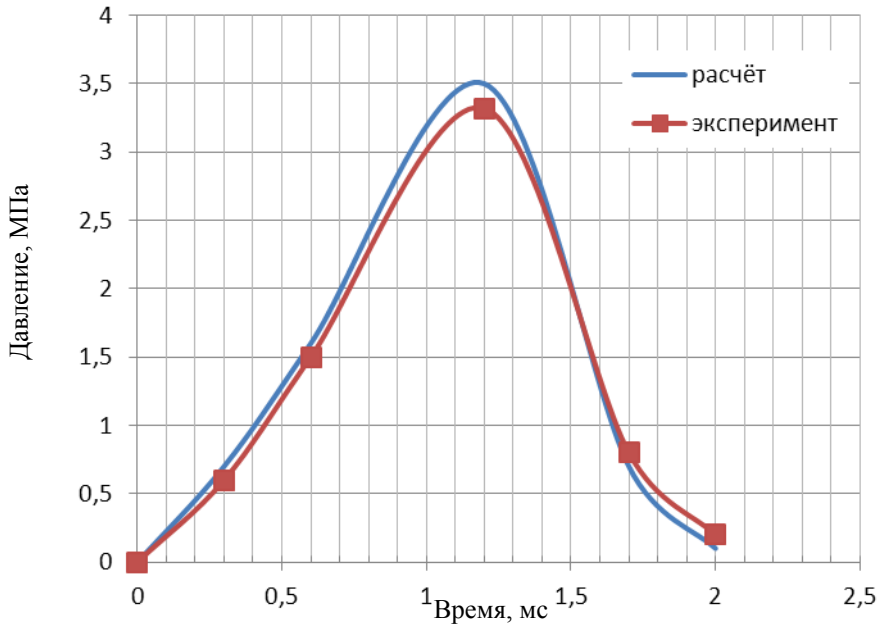


Рис. 3. Зависимость максимального давления от времени

Заключение

Основным результатом работы явилась найденная последовательность определения параметров модели пороха «Powder Burn Model» (опции с экспоненциальным уравнением состояния), основывающаяся на классических методах пиростатики. Определение параметров модели пороха позволило осуществить компьютерное моделирование рассматриваемого процесса. Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными исследованиями процессов функционирования тросовых пиротехнических натяжителей.

Список литературы

1. **Серебряков, М. Е.** Внутренняя баллистика / М. Е. Серебряков, К. К. Гретен, Г. В. Оппоков. – М. ; Л. : Оборонгиз, 1939. – 592 с.
2. **Чурбанов, Е. В.** Внутренняя баллистика / Е. В. Чурбанов. – Л. : Изд-во ВАОЛКА им. М. И. Калинина, 1975. – 243 с.
3. AUTODYN. Theoty Manual. – Century Dynamics Inc.

Муйземнек Александр Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра транспортных машин,
Пензенский государственный
университет

E-mail: muyzemnek@yandex.ru

Muyzemnek Alexander Yuryevich
Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of transport machines,
Penza State University

Карташова Екатерина Дмитриевна
аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: katrina89@yandex.ru

Kartashova Ekaterina Dmitrievna
Postgraduate student,
Penza State University

Земсков Роман Александрович
аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: r.zemsckov@yandex.ru

Zemskov Roman Alexandrovich
Postgraduate student,
Penza State University

УДК 621.001.63; 656.13.08

Муйземнек, А. Ю.

Совершенствование систем обеспечения пассивной безопасности легковых автомобилей на основе компьютерного моделирования процессов функционирования пиротехнических элементов / А. Ю. Муйземнек, Е. Д. Карташова, Р. А. Земсков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 120–129.

УДК 621.74.01

С. И. Соломонидина, Т. А. Дурина

ГАЗОВЫЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ ДЛЯ ПЛАВКИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. Газовые плавильные агрегаты на водородном топливе позволяют вести плавку шихтовых материалов, имеющих высокую температуру плавления. Добавка в продукты горения углеродсодержащих веществ снижает энергоемкость процесса плавки, достигается повышение температуры, уменьшается расход топлива, повышается производительность плавильного агрегата.

Ключевые слова: газовый плавильный агрегат, водород, углеродсодержащие вещества.

Abstract. The gas melting system based on hydrogen fuel enable to melt charge materials with high melting point. The addition of carbonaceous substances in the combustion products reduces energy intensity of the melting process, raises the temperature, reduces fuel consumption, increases productivity of a melting unit.

Key words: gas melting system, hydrogen, carbonaceous substances.

Введение

Энергетика, основанная на ископаемом топливе, создает много экологических проблем. Возникает дилемма: без энергии нельзя сохранить нашу цивилизацию, однако существующие методы производства энергии и высокие темпы роста ее потребления приводят к загрязнению окружающей среды. Естественно, что поиск путей преодоления экологических проблем – одна из основных задач, стоящих перед современной энергетикой.

Проблема состоит в том, что существующие источники энергии ограничены. Для того чтобы иметь топливо, когда на Земле будут исчерпаны запасы нефти и газа, и решить экологические проблемы, необходимо переходить к новым источникам энергии и иметь «чистую энергетику». Поэтому перспективной является водородная энергетика – использование водорода как основного энергоносителя. Благодаря этому резко сократится потребление ископаемых топлив, потому что водород можно получать из воды, разлагая ее на водород и кислород. Вода является более дешевым и доступным сырьем для получения водорода.

Как топливо, водород применяется в двигателях ракет и в топливных элементах. Водород используется и в черной металлургии, с его помощью восстанавливают металлы из окислов, он легко транспортируется по газопроводам и имеет значительное преимущество перед другими видами топлива. Водород можно будет использовать для отопления печей литейного производства.

1. Описание процессов, происходящих при сжигании водородного топлива

Одной из важнейших задач для предприятий машиностроительного и металлургического комплекса, имеющих литейное производство, является задача достижения экономичности при использовании водородного топлива для нагрева железоуглеродистых сплавов, так как продуктами сгорания водо-

родного топлива являются пары воды, которые при высокой температуре могут окислять железо, способствовать увеличению потерь металла и ухудшать процессы теплопередачи. Все это свидетельствует о проблеме нагрева углеродсодержащих материалов, уменьшения потерь материала, уменьшения теплообмена при нагреве.

Идея решения этой проблемы заключается в том, что процесс, включающий сжигание водородного топлива, нагрев материала продуктами сгорания, осуществляют таким образом, что в местах теплообмена снижают окислительные свойства продуктов сгорания путем введения газообразных или порошкообразных раскислителей, содержащих мелкодисперсный углерод.

Проблемой плавки тугоплавких материалов является необходимость повышения температуры в печи. Решить эту проблему можно, если для плавки материала, включающей сжигание в печи газообразного топлива, нагрев, плавление и перегрев материала продуктами сгорания, использовать водород, к которому добавлять углеродсодержащие вещества. Это позволяет повысить экономичность процесса, интенсифицировать теплопередачу, повысить термический коэффициент полезного действия тепловых агрегатов, уменьшить потери, повысить тепловое напряжение и температуру, снизить энергоемкость процесса плавки, повысить температуру в печи, что обеспечит проведение плавки тугоплавких материалов, так как водород имеет большую, по сравнению с природным газом, теплоту сгорания и жаропроизводительность, факел при горении более короткий, следовательно, тепловое напряжение выше и не затрачивается энергия на диссоциацию метана. Так как продукты горения водорода обладают малой светимостью, то возникает необходимость в наличии в печной атмосфере мелких частиц углерода, что делает газовые потоки светящимися и повышает эффективность теплопередачи в зоне перегрева расплава и в зоне плавления шихты.

В 1990 г. был разработан способ плавки в газовой вагранке [1], содержащей водоохлаждаемую шахту с встроенными газовыми горелками и водоохлаждаемые балки, на которые загружается огнеупорная насадка, состоящая из тугоплавких и термостойких материалов. Недостатком этого способа является то, что он не позволяет проводить плавку тугоплавких шихтовых материалов, так как при повышении температуры в зоне расположения огнеупорной насадки выше 1650 °С наблюдается деформация насадочных тел. Они начинают подплавляться и слипаются, что приводит к уменьшению проходного сечения шахты, затрудняет процесс горения и ведет к срыву плавки.

Известен также способ плавки металла в газовой вагранке [2], согласно которому плавку осуществляют в газовой вагранке с уступами в шахте таким образом, что природный газ сжигают над поверхностью расплава с коэффициентом расхода воздуха $\alpha \approx 0{,}9–0{,}98$. Выше горелочных туннелей состав газовой фазы в камере перегрева меняют за счет подачи природного газа, $\alpha \approx 0{,}6–0{,}7$, в зоне плавления $\alpha \approx 0{,}4–0{,}5$. Однако этот способ не позволяет создавать высокую температуру в вагранке, приводит к увеличенному расходу энергоносителя, так как значительное количество тепла затрачивается на диссоциацию метана.

Техническим результатом предлагаемого способа плавки материалов в шахтной печи – в газовой вагранке, который может быть применен в литейном производстве, является снижение энергоемкости процесса плавки, по-

вышение температуры в печи и возможность плавки тугоплавких материалов. Плавку материала в газовой вагранке [3], в которой имеется опорная часть, шахта, газовые горелки, копильник, путем сжигания газообразного топлива, нагрева, плавления и перегрева материала продуктами сгорания осуществляют таким образом, что в качестве топлива используют водород, к которому добавляют углеродсодержащие вещества. Например, газообразные, жидкие углеводороды или мелкодисперсный углерод в виде дробленого графита, древесного угля, термоантрацита. Футеровка выполняется из огнеупорных изделий, имеющих огнеупорность 2500 °С. В газовые горелки подается топливо – водород и воздух в качестве окислителя. Кроме того, для повышения светимости продуктов горения водорода в горящий факел подают углеродсодержащие вещества, что повышает эффективность теплопередачи в камере перегрева и шахте вагранки. В течение 20–30 мин прогревают камеру перегрева, шахту вагранки и копильник, затем загружают шихтовые материалы. Поднимаясь вверх, подсвеченные продукты сгорания водорода нагревают и плавят шихту. Расплав в капельно-струйном режиме стекает в камеру перегрева, где дополнительно перегревается в ванне, образованной на подине камеры перегрева, и затем поступает в копильник. Ввод углеродсодержащего вещества обусловлен необходимостью повышения эффективности теплопередачи за счет увеличения светимости продуктов сгорания водорода.

Экспериментальные плавки проводили в газовой вагранке с водоохлаждаемыми уступами в шахте (рис. 1).

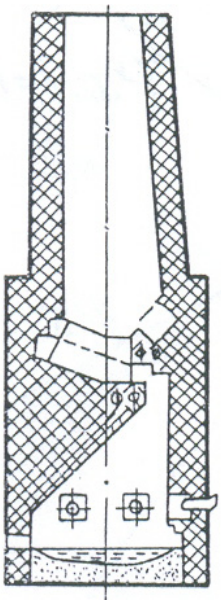


Рис.1. Газовая вагранка с водоохлаждаемыми уступами в шахте

В качестве топлива использовали технический водород, который сжигали в воздушной среде. Непосредственно в горящий факел вводили углеродсодержащее вещество в виде мелкодисперсного углерода, количество которого изменяли от 0,5 до 21 % от массы водорода.

После прогрева футеровки вагранки и копильника загружали шихту, содержащую чугун и до 65 % стального лома. Расход водорода во всех плав-

ках сохранялся постоянным. Доводку расплава по химическому составу производили в индукционном миксере. Результаты плавок представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследований

Условия плавки	Температура продуктов сгорания в камере перегрева, °С	Температура расплава, °С	Расход углеродсодержащего вещества, % от массы водорода	Производительность печи, т/ч	Удельный расход топлива, кг/т	Примечание
Известный способ. Топливо – природный газ	1700	1480	0	0,5	143,4	В расплаве образовалось 30 % FeO
Предлагаемый способ. Топливо – водород	1900	1490	0,5	0,7	42,9	
	1900	1535	1,0	0,75	40,0	
	1900	1540	2,0	0,96	31,25	
	1900	1540	7,0	0,98	30,6	
	1900	1540	13,0	1,0	30,0	
	1900	1540	19,0	0,97	30,9	
	1870	1530	20,0	0,95	31,6	
	1850	1520	21,0	0,95	31,6	

Примечания. 1. Диапазон температур продуктов сгорания в камере перегрева ±20 °С; 2. Диапазон температур расплава ±10 °С.

Как видно из табл. 1, применение в качестве топлива водорода позволяет вести плавку шихтовых материалов, имеющих высокую температуру плавления, а добавка в продукты горения 2–19 % углеродсодержащих веществ снижает энергоемкость процесса плавки [4, 5].

Применение в качестве топлива водорода позволяет вести плавку шихтовых материалов, имеющих высокую температуру плавления, а добавка в продукты горения углеродсодержащих веществ снижает энергоемкость процесса плавки, достигается повышение температуры на 46–63 °С, уменьшается расход топлива на 26,3–32,0 %, повышается производительность плавильного агрегата на 35,7–44,0 %.

Добавка в высокотемпературную зону горящего факела водорода менее 2 % углеродсодержащих веществ не обеспечивает необходимую светимость факела, температура расплава понижается, производительность вагранки падает, а удельный расход топлива увеличивается. При добавке в продукты горения более 19 % мелкодисперсного углерода снижается температура расплава, так как большее количество тепла затрачивается на нагрев частичек углерода, а производительность печи и удельный расход топлива не изменяются.

2. Математическое моделирование процессов, происходящих при сжигании водородного топлива

Применение эффективной методики математического моделирования позволяет оптимизировать литейные процессы и прогнозировать их улучшение.

Математическое моделирование и расчеты по математическим моделям выполнены по программе NV5 (план 5, количество опытов по плану $X = 5$) [6–8].

Таблица 2

Данные для математического моделирования
(показатели степени J1 = 1, O1 = 1,5, P1 = 2, T1 = 2,5)*

Расход углеродсодержащего вещества, % от массы водорода	Повышение температуры, °C	Уменьшение расхода топлива, %	Повышение производительности, %
1	2	3	4
A1 = 0,5 B1 = 21 C1 = 2 D1 = 20 E1 = 12	Y(1) = 0,1 Y(2) = 40 Y(3) = 55 Y(4) = 50 Y(5) = 60	Y(1) = 0,1 Y(2) = 26,3 Y(3) = 27 Y(4) = 26,3 Y(5) = 30	Y(1) = 0,1 Y(2) = 35,7 Y(3) = 37 Y(4) = 35,7 Y(5) = 42,9
Данные анализа адекватности математической модели			
Количество опытов на среднем уровне факторов N0	4	4	4
F8	3	3	3
Дисперсия опытов U9	0,08	0,07	0,09
Табличный *t*-критерий T0	3,182	3,182	3,182
Табличный *F*-критерий F7	9,12	9,12	9,12
Проверка точности и расчеты по модели	F(1) = 1 F(2) = 4 F(3) = 15 F(4) = 18 F(5) = 22	F(1) = 1 F(2) = 4 F(3) = 15 F(4) = 18 F(5) = 22	F(1) = 1 F(2) = 4 F(3) = 15 F(4) = 18 F(5) = 22

Примечание. * J1, O1 – показатели степени первого фактора в уравнении регрессии (соответствуют величинам n, r для первого фактора); P1; T1 – коэффициенты ортогонализации, определяемые при первом уровне фактора; Y – значения показателей процесса; F8 – число степени свободы при определении дисперсии неадекватности; t – критерий Стьюдента; F7 – табличный критерий Фишера; $F(n)$ – расчетное значение критерия Фишера.

Заключение

В результате проведенной работы были выявлены процессы, происходящие в газовых плавильных агрегатах, работающих на водородном топливе и позволяющие значительно снизить их энергоемкость и существенно улучшить экологическую обстановку, снизить выбросы вредных веществ в атмосферу: пыли – в 3 раза; сернистого ангидрида – в 50 раз; оксида углерода – в 100 раз; оксидов азота – в 3 раза.

Техническое решение предлагаемого способа (Патент РФ № 2340855 «Способ сжигания углеводородного топлива в вагранке» Черный А. А. и др.) может быть использовано при плавке тугоплавких неметаллических материалов, содержащих оксиды кремния, алюминия, магния, хрома, при плавке ми-

нерального сырья (тугоплавких природных минералов) для получения минеральной ваты в промышленности строительных материалов, литых огнеупорных изделий, каменного литья, причем конструкция печи может быть с водоохлаждаемыми элементами в шахте, с выносной камерой перегрева, с холостой огнеупорной колошей.

Применение методов математического моделирования, выявление математических моделей, выполнение расчетов по математическим моделям, анализ математических моделей и результатов расчетов позволяют прогнозировать и совершенствовать процессы плавки материалов в газовых плавильных агрегатах.

Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР № 1610209 / Грачев В. А. и др., кл. F 27 B 1/08, Б.И. № 44, 1990.
2. Авторское свидетельство СССР № 269947 / Черный А. А., Грачев В. А. и др., кл. C 21 C; B 22 B, Б.И. № 16, 1970.
3. **Грачев, В. А.** Конструктивные особенности газовых вагранок с холостой огнеупорной колошей / В. А. Грачев, А. А. Черный, В. Н. Моргунов // Труды восьмого съезда литейщиков России. – Ростов н/Д : Российская ассоциация литейщиков, 2007. – Т. 2. – С. 35–39.
4. **Соломонидина, С. И.** Закономерности воздействия на нагреваемый материал переменной подачи высокотемпературных продуктов сгорания водородсодержащего топлива / С. И. Соломонидина // Актуальные проблемы науки и образования : тр. XXI науч.-практ. Конф., посвященной 65-летию Победы в ВОВ. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010.
5. Пат. 2340855 Российская Федерация. Способ сжигания углеводородного топлива в вагранке / Черный А. А., Черный В. А., Соломонидина С. И., Фролова Т. Н. ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. ун-т. – № 2007113999/02 ; опубл. 10.12.2008.
6. **Черный, А. А.** Применение математического моделирования для прогнозирования свойств сплавов / А. А. Черный // Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем : сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов, аспирантов и студентов. – Пенза : Пензенский государственный университет ; Приволжский Дом знаний, 2007. – С. 135–139.
7. **Черный, А. А.** Компьютерные программы математического моделирования и расчетов по математическим моделям : учеб. пособ. / А. А. Черный. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 197 с. (Электронное учебное пособие).
8. **Черный, В. А.** Эффективные методы математического моделирования литейных процессов / В. А. Черный, А. А. Черный // Прогрессивные литейные технологии : тр. 4 Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. проф. В. Д. Белова. – М. : ИД МЕДПРАКТИКА–М, 2007. – С. 169–172.

Соломонидина Светлана Ивановна
ведущий инженер, кафедра сварочного, литейного производства и материаловедения, Пензенский государственный университет

E-mail: ssolomonidina@yandex.ru

Solomonidina Swetlana Ivanovna
Engineer, sub-departament of welding and foundry production and materials science, Penza State University

Дурина Татьяна Анатольевна
старший преподаватель, кафедра сварочного, литейного производства и материаловедения, Пензенский государственный университет

E-mail: Tana23@rambler.ru

Durina Tatyana Anatolyevna
Senior lecturer, sub-departament of welding and foundry production and materials science, Penza State University

---

УДК 621.74.01

Соломонидина, С. И.

Газовые плавильные агрегаты на водородном топливе для плавки литейных сплавов / С. И. Соломонидина, Т. А. Дурина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 120–126.

УДК 65.015.13+678.86

Р. С. Зиновьев, В. Я. Савицкий

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ РАЗОРИЕНТАЦИИ АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВТУЛОК ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Проанализированы условия возникновения свилеватости конструкций намоточных изделий, что обусловливает преждевременное их разрушение. Предложен метод направленной разориентации арматуры при формировании силовой рубашки, эффективность применения которого определяется снижением коэффициента анизотропии, повышением трансверсальной прочности подшипников скольжения.

Ключевые слова: втулки, полимерный композиционный материал, намотка, армирующий наполнитель, свилеватость, метод направленной разориентации, опрессовочные устройства.

Abstract. The authors analyze the origin of knag on constructions of reeling products causing their premature destruction. Theresearchers suggest a method of direct disordered orientation of armature in formation of power sleeve, the effectiveness of which is determined by decreasing anisotropy coefficient and by increasing transverse strength of friction bearings.

Key words: plugs, polymeric composite material, winding-on, reinforcing filler, knag, method of direct disordered orientation, hydrostatic testing unit.

1. Оценка влияния свилеватости на характеристики намоточных изделий из полимерных композиционных материалов

Искривление армирующих волокон в намоточных конструкциях происходит не только из-за внешнего давления, прикладываемого к трубчатой заготовке на этапе намотки и отверждения, но и вследствие различия теплофизических свойств компонентов армированного полимера, а также усадочных явлений, возникающих в полимерной матрице в результате химических, термических и механических процессов, которые при наличии градиента температуры по толщине заготовки протекают крайне неравномерно. Неравномерности усадки и теплофизических свойств армирующих волокон и полимерной матрицы ведут к стесненному деформированию волокон, появлению внутренних сжимающих напряжений в армирующих волокнах. Поскольку матрица на этапе переработки до температуры стеклования T_c представляет вязкую среду, не обеспечивающую взаимодействия между армирующими волокнами, то под действием внутренних сжимающих напряжений при определенных условиях происходит потеря устойчивости их кольцевой формы. Искривленные волокна, занимающие большие зоны в конструкции, образуют дефекты макроструктуры армированного полимера в виде текстурной волнистости – свилеватости. Умение прогнозировать условия, при которых появляются дефекты текстурной волнистости, и рационально управлять определяющими их параметрами переработки армированного полимера открывает перспективы создания конструкций намоточных изделий бездефектной структуры и более обоснованно использовать свойства исходных компонентов.

В работах [1, 2] приводятся теоретические и экспериментальные данные, показывающие, что различие в значениях модуля упругости в направлении армирования для материалов с искривленными и выпрямленными волокнами составляет 24…32 %, а различие в прочности этих материалов достигает 60 %. Особую опасность представляют эти дефекты для намоточных конструкций, работающих на сжатие. Резкое местное уменьшение жесткости, вызванное искривлением арматуры, существенно снижает критические параметры готовых намоточных изделий, что ведет к преждевременному их разрушению из-за потери устойчивости при внешнем нагружении.

Для трубчатой заготовки из однонаправленного углепластика (при предположении синусоидального однофазного искривления волокна) оценку влияния текстурного дефекта на ее жесткостные характеристики можно с достаточной степени точности произвести с помощью выражения, предложенного Г. М. Гуняевым [3]:

$$E_x^{\varphi} = \frac{E_a v_a}{1 + \dfrac{E_a v_a \left(1 - V_a\right)}{G_{\text{м}}} \varphi^2},$$

где E_x^{φ} – модуль упругости в направлении волокон при однофазном искривлении; E_a – модуль упругости армирующего волокна; v_a – объемное наполнение волокон; $G_{\text{м}}$ – модуль сдвига полимерной матрицы; φ – угол искривления.

Расчеты показывают, что коэффициент реализации модуля однонаправленного углепластика $K_{\varphi}^{E} = E_x^{\varphi} / E_x$ при однофазном искривлении волокон уменьшается от 0,97 до 0,88 при увеличении угла искривления от 5 до 10°. Влияние текстурной волнистости на прочностные характеристики трубчатых заготовок из стеклопластика оценивается зависимостью, позволяющей вычислить прочность σ_x^{φ} в любом направлении по отношению к оси волокон на основании экспериментально полученных значений в продольном (σ_x), поперечном (σ_y) и диагональном ($\sigma_{\pi/4}$) направлениях [3]:

$$\sigma_x^{\varphi} = \frac{\sigma_x}{\cos^4\varphi + \left(\dfrac{\sigma_x}{\sigma_{\pi/4}} - \dfrac{\sigma_x}{4} + \dfrac{1}{4}\right)\sin^2 2\varphi + \dfrac{\sigma_x}{\sigma_y}\sin^4\varphi}.$$

Коэффициент реализации прочности стеклопластика $K_{\varphi}^{\sigma} = \sigma_x^{\varphi} / \sigma_x$ уменьшается до 0,8 при увеличении угла искривления до 10°.

Экспериментальное определение E_x^{φ} и σ_x^{φ} на образцах, изготовленных из углепластиковых и стеклопластиковых трубчатых заготовок, показало хорошее совпадение с расчетными данными (табл. 1).

Влияние искривлений (в случае синусоидально искривленных волокон) на деформационные свойства в трансверсальном направлении менее значительно [4]. Так, из формулы [1]

$$E_r^f = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r}{G_{r\varphi}} \cdot \frac{f^2}{2}},$$

где E_r^f – модуль упругости материала перпендикулярно армирующим слоям с изогнутыми волокнами; E_r – модуль упругости материала перпендикулярно армирующим слоям с выпрямленными волокнами; $G_{r\varphi}$ – модуль межслойного сдвига; $f = A\frac{\pi n}{l}$ – параметр, характеризующий искривление волокон; A – амплитуда синусоиды; n – число полуволн на базе l, следует, что только при больших значениях A можно ожидать значительного снижения E_r^f, так как E_r и $G_{r\varphi}$ – величины одного порядка. В то же время при оценке надежности узла трения следует учитывать даже незначительный разброс упругих свойств материала. Коэффициент реализации K^{E_r} углестеклопластика в радиальном направлении изменяется в диапазоне 0,95…0,91 (экспериментальные значения).

Таблица 1

Исследуемые характеристики материалов трубчатой заготовки

Физико-механические характеристики	Материал трубчатой заготовки	
	Углепластик однонаправленный	Стеклопластик на основе ткани Т-10-80
$E_x \cdot 10^4$, МПа	15,5	
σ_x, МПа		500
φ, град.	10	10
$E_x^\varphi \cdot 10^{-4}$, МПа	13,6 (эксп.)	
σ_x^φ, МПа		380 (эксп.)
K_φ^E	0,87 (эксп.)	
	0,88 (расч.)	
K_φ^σ		0,76 (эксп.)
		0,80 (расч.)

Анализ экспериментальных данных, полученных на серийно изготавливаемых втулках, показывает, что разброс прочности при трансверсальном сжатии по периметру втулки, обусловленный свилеватостью материала, достигает 154 МПа, коэффициент вариации прочности составляет 12,8 %. Особую опасность представляют эти дефекты, сконцентрированные в одной из торцевых зон втулки, где кромочные напряжения, обусловленные монтажными и эксплуатационными перекосами осей элементов узла трения (корпус, втулка, ось), являются наиболее вероятными. Таким образом, создание конструкции подшипника с бездефектной структурой необходимо связывать не только с умением формулировать и прогнозировать условия появления дефектов текстурной волнистости, но с разработкой и внедрением новых методов переработки армированного полимера.

2. Метод направленной разориентации арматуры при формовании силовой рубашкой

Снижение разброса и повышение свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) в радиальном направлении предложено достичь методом создания направленной разориентации армирующего наполнителя по периметру и толщине трубчатой заготовки [5]. Сущность метода заключается в том, что при опрессовке заготовки слои армирующего наполнителя искривляются равномерно относительно исходной круговой формы с переменной амплитудой прогиба по толщине заготовки. Схематично процесс формования заготовки с созданием направленной разориентации армирующего наполнителя можно представить следующим образом (рис. 1):

– трубчатая заготовка наматывается на оправку радиусом $R_{\text{оп}} = R_{\text{в}}$ с набором толщины $h = R_{\text{заг}} - R_{\text{в}}$;

– давление формования ($P_{\text{ф}} = P_{\text{нэ}} - P_{\text{гс}}$) осуществляется формовочным корсетом, выполненным в виде равномерно расположенных по периметру заготовки нажимных элементов диаметром $d_{\text{нэ}}$, связанных между собой гибкой связью;

– усилие формования создается намоткой поверх нажимных элементов опрессовочной ленты, причем усилие натяжения $T_{\text{н}}$ опрессовочной ленты задается таким, чтобы обеспечить нарастающую (со стороны $R_{\text{в}}$) по толщине заготовки амплитуду прогиба разориентированных слоев наполнителя, т.е. создания условия $\chi_{j+1} > \chi_j > \chi_{j-1}$, где χ_j – амплитуда полуволны разориентированного j-го слоя.

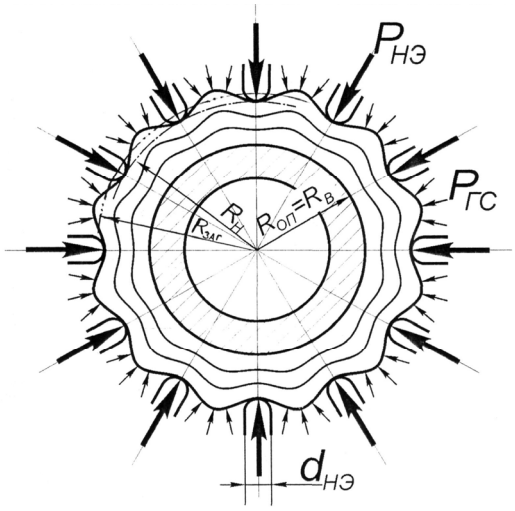


Рис. 1. Схема направленной разориентации армирующего наполнителя в процессе формования силовой рубашкой

Реализация заданной программы разориентации армирующего наполнителя связана с определением формы кривой j-го слоя по толщине заготовки и необходимого усилия натяжения $T_{\text{н}}$ опрессовочной ленты.

В общем виде кривая с нарушенной круговой формой армирующего наполнителя запишется в виде

$$\omega_j = \chi_j \cdot \cos\left(\alpha_j \cdot y + \theta_j\right),$$

где α_j – параметр, характеризующий длину полуволны,

$$\left(\alpha_j\right)^{-1} = r_j \cdot n^{-1}, \quad (1)$$

здесь n – число полных волн, образующихся при нарушении устойчивости круговой формы кольцевого слоя армирующего наполнителя; r_j – радиус j-го слоя; θ_j – параметр, характеризующий сдвиг по фазе устойчивости j-го армирующего элемента относительно смежных слоев.

Граничные условия для случая деформации намотанного пакета трубчатой заготовки с нарастающей со стороны внутреннего диаметра прогиба:

– первый кольцевой (антифрикционный) слой не изменяет своей круговой формы. Так обеспечиваются условия полного прилегания антифрикционного слоя подшипника к формообразующей поверхности технологической оправки, т.е.

$$\chi_1 = 0; \quad (2)$$

– деформация каждого вышележащего слоя больше нижележащего, т.е.

$$\chi_{j-1} < \chi_j < \chi_{j+1}; \quad (3)$$

– разориентация армирующих слоев равномерная по периметру трубчатой заготовки в каждом последовательно нанесенном слое, т.е.

$$\theta_{j-1} = \theta_j = \theta_{j+1}. \quad (4)$$

Подставляя (2), (3), (4) в (1), получаем формулу кривой:

– разориентированного j-го слоя:

$$\omega_j = \chi_j \cdot \cos(n) \cdot (r)^{-1} \cdot y; \quad (5)$$

– внутреннего слоя:

$$\omega_j = 0; \quad (6)$$

– разориентированного наружного слоя подшипника:

$$\omega_{RH} = \chi_{RH} \cdot \cos(n) \cdot (R_H)^{-1} \cdot y \omega_{RH} = \chi_{RH} \cos(n) \cdot (R_H)^{-1} \cdot y; \quad (7)$$

– разориентированного слоя намотанной заготовки:

$$\omega_{заг} = \chi_{заг} \cos(n) \cdot (R_H)^{-1} \cdot y. \quad (8)$$

Технологическая реализация кривых (5)–(8) связана с определением оптимальной величины обжатия $\chi_{заг}$ в зоне нажимных элементов формовочного корсета и усилия натяжения $T_н$ опрессовочной ленты. Варианты схем

формовочного корсета и обжатия заготовок представлены на рис. 2, из которого видно, что максимальная величина $\chi_{заг}$ обеспечивается формовочным корсетом по варианту 3, т.е. при размещении гибкой связи по верхним кромкам нажимных элементов. Отмечается также, что величина $\chi_{заг}$ зависит от диаметра нажимных элементов, а давление формования $P_{гс}$ – от упругих свойств гибкой связи.

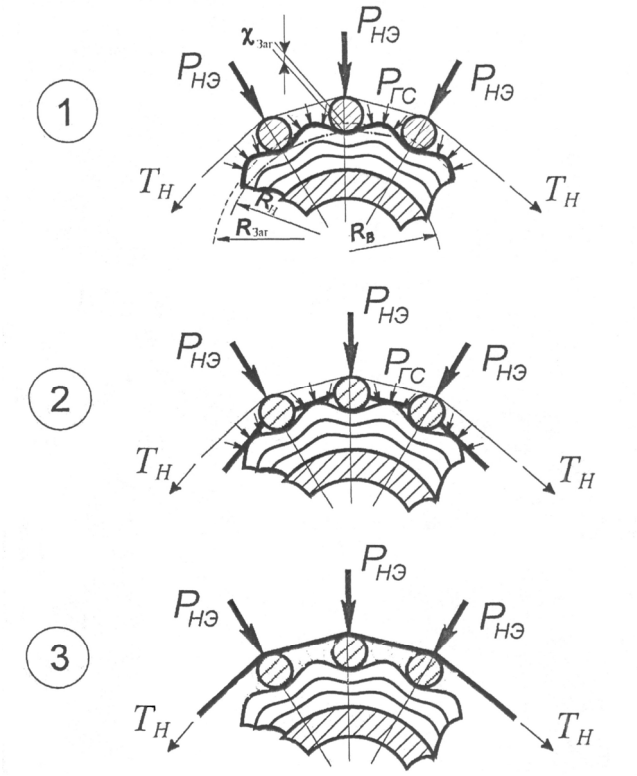


Рис. 2. Варианты схем технологической реализации способа обжатия трубчатой заготовки формовочным корсетом

Исследование деформационных свойств заготовки при использовании формовочного корсета осуществлялось на плоских образцах по диаграмме $\sigma_{\bar{r}} - \varepsilon$ при поперечном сжатии. На рис. 3 приведены сравнительные кривые деформации при обжатии пакета полуфабриката (33 слоя стеклоткани Т-10-80) двумя типами инденторов – плоским и снабженным нажимными элементами ∅5 мм с шагом 20 мм.

Из графика (рис. 3) видно, что:

– пределы пропорциональности $\sigma_{\bar{r},кр}$ при обжатии полуфабриката по схемам 1 и 2 примерно одинаковы, однако при обжатии по схеме 2 уплотнение полуфабриката происходит при большей степени обжатия ($\varepsilon = 20\,\%$ при $\sigma_{\bar{r},кр} = 0{,}5$ МПа);

– коэффициент анизотропии уплотняемого по схеме 2 пакета полуфабриката после $\sigma_{\bar{r},кр}$ ниже, чем пакета, уплотняемого по схеме 1, что обуслов-

ливает большую равномерность упругих свойств по толщине заготовки и меньшее влияние технологических несовершенств на разброс характеристик материала;

– нелинейность деформационной кривой при обжатии полуфабриката по схеме 2 выражена в большей степени за счет одновременно протекающих процессов уплотнения пакета и трансверсальной разориентации уложенных слоев наполнителя.

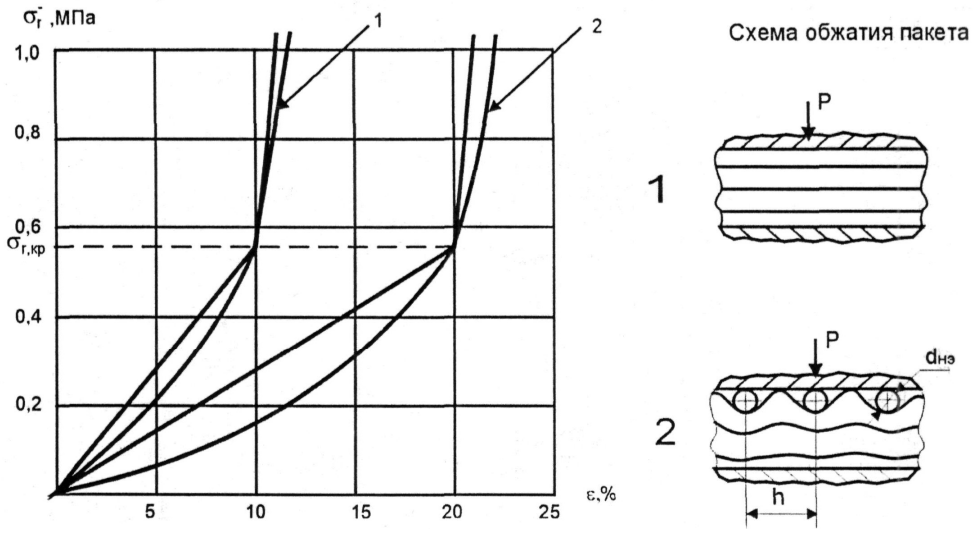


Рис. 3. Диаграммы $\sigma_{\bar{r}} - \varepsilon$ при поперечном сжатии полуфабриката: 1 – по схеме 1; 2 – по схеме 2

Эффективность метода направленной разориентации на плоских образцах оценивалась путем анализа экспериментальных значений характеристик (табл. 2) отвержденных стеклопластиков с вышеприведенными структурными параметрами, формование которых производилось по схемам 1 и 2 (см. рис. 2).

Таблица 2

Характеристики стеклопластиков, изготовленных по схемам 1 и 2

Схема изготовления	Количество образцов, *n*	Степень отверждения, η, %	Содержание смолы, ν, %	Плотность γ, кг/м^3	Твердость HRC (ГОСТ 24622-91)
1	38	92	37–44	1610	80
2 (выступы)	38	92	32–39	1620	92
2 (впадины)	38	92	19–23	1930	94

Из табл. 2 видно, что характеристики материала образцов, изготовленных по схеме 2, выше, чем у образцов, изготовленных по схеме 1.

3. Технологическая реализация метода направленной разориентации армирующего наполнителя

Проблема технологической реализации рассматриваемого метода заключается в разработке наиболее технологичной конструкции опрессовочно-

го устройства, не привносящего в процесс намотки дополнительных временных затрат и обеспечивающего выполнение заданных конструкторско-технологических параметров переработки. В качестве исследуемых рассмотрены несколько вариантов конструктивного исполнения опрессовочных устройств, с помощью которых произведена технологическая отработка метода при изготовлении трубчатых заготовок подшипников скольжения.

На рис. 4 представлено устройство для опрессовки с помощью стержневых нажимных элементов 1, диаметр, расположение и направленное перемещение которых обеспечивается двумя направляющими шайбами 2 и 3, устанавливаемыми на оправке 4 по торцам намотанной заготовки.

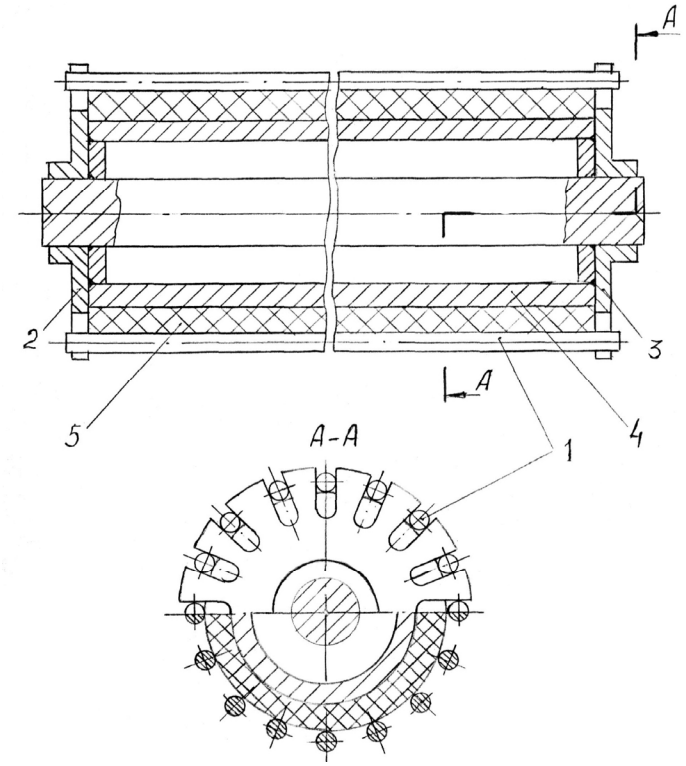


Рис. 4. Вариант стержневой конструкции опрессовочного устройства с торцевыми направляющими шайбами: 1 – нажимные элементы (стержни); 2, 3 – торцевые направляющие шайбы; 4 – оправка; 5 – намотанная трубчатая заготовка

Корсетное опрессовочное устройство, схемы выполнения которого приведены на рис. 5, отличается простотой изготовления и универсальностью использования. Изменяя только шаг и диаметр нажимных элементов, возможно изготовление формовочного корсета любой длины, а значит, и опрессовка заготовок различных диаметров.

При опрессовке недлинных втулок (до 30 мм) и толстостенных намоточных конструкций типа «буртик» радиально-упорного подшипника достаточно хорошо себя зарекомендовало цепное опрессовочное устройство (рис. 6). Однако его применение ограничивается специфичностью.

На рис. 7 представлен универсальный формовочный корсет, нажимные элементы которого выполнены из фторопластовых стержней, связанных друг с другом металлической проволокой.

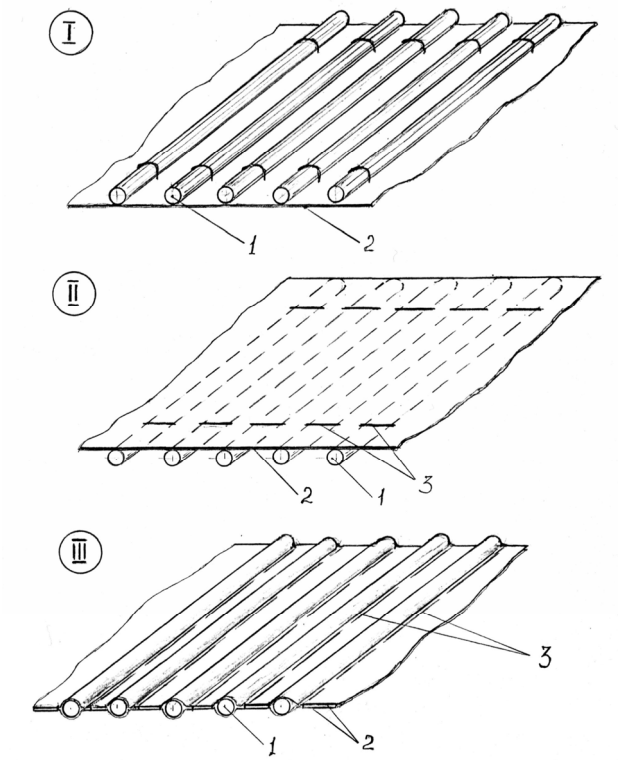


Рис. 5. Формовочный корсет: I, II, III – верхнее, нижнее, центральное расположение нажимных элементов относительно рубашки: 1 – нажимные элементы; 2 – ткань; 3 – нити фиксации

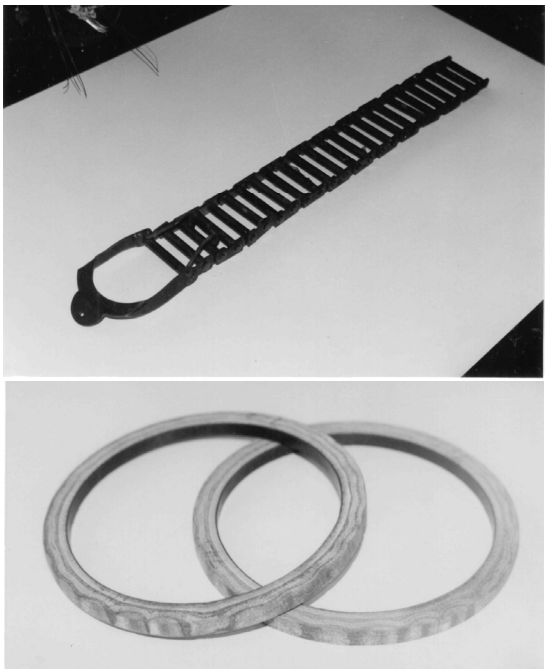


Рис. 6. Цепное опрессовочное устройство (а) и намоточная конструкция (б), изготовленная с помощью этого устройства

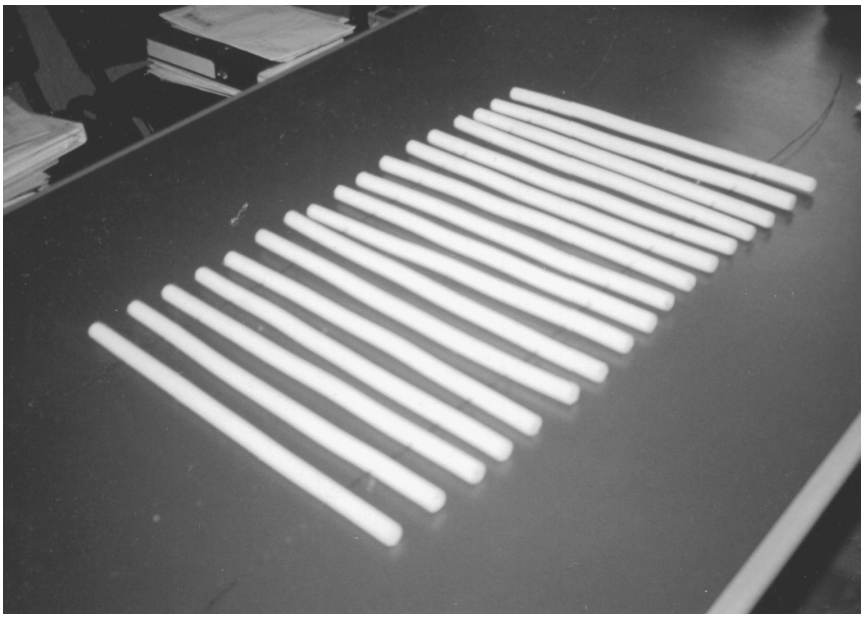


Рис. 7. Формовочный корсет с нажимными элементами из фторопласта

Основное достоинство такого корсета – возможность его многократного использования, что обеспечивается простотой его подготовки к повторной опрессовке. Полимерное связующее, мигрирующее в процессе опрессовки к наружным слоям заготовки, достаточно легко очищается с поверхности фторопластовых стержней.

Проведенная с использованием перечисленных опрессовочных устройств конструкторско-технологическая отработка метода направленной разориентации [6, 7] показала существенное улучшение не только трансверсальной прочности материала, но и стабильности свойств по периметру заготовки (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительные характеристики материала втулок ПД-036.00.04.011 с различными способами опрессовки

Способ опрессовки	Количество втулок, шт.	Масса втулки, кг	Плотность, кг/м^3	Содержание смолы, %	Прочность при сжатии $\sigma_{\bar{r}}$	
					МПа	Коэффициент вариации, %
Опрессовка стеклолентой ЛЭС	22	0,670–0,672	1580	37–44	320	12,1
Опрессовка с помощью формовочного корсета	22	0,730–0,748	1740* 1920**	31–38* 19–21**	409* 471**	8,1* 8,0**

Примечание. * – свойства материала по выступам; ** – свойства материала по впадинам.

На основании созданного метода разработан технологический процесс [6] изготовления намоточных подшипников скольжения из армированных реактопластов (рис. 8), серийно изготавливаемых с 1999 г.

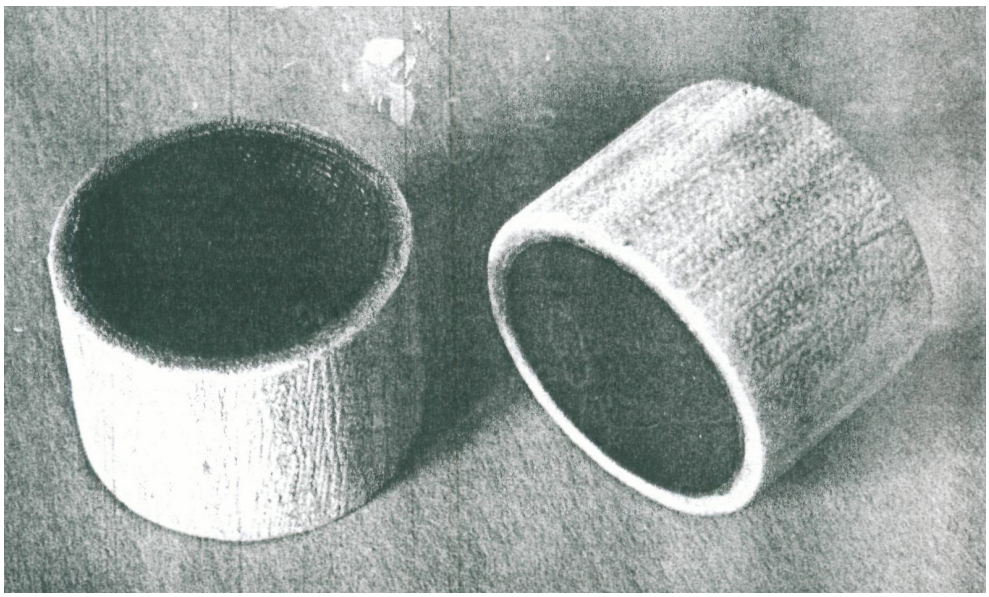


Рис. 8. Общий вид подшипников скольжения
с направленной разориентацией наполнителя

Заключение

Таким образом, теоретически и экспериментально в производственных условиях показана эффективность дополнительного уплотнения трубчатых заготовок методом создания внешнего давления в процессе намотки и отверждения. Применение внешнего давления в качестве средства управления напряженным состоянием материала заготовки дает возможность получать более плотную и монолитную структуру и предотвращать самопроизвольное растрескивание. Метод особенно эффективен при изготовлении изделий больших размеров, когда давления, создаваемого силовой намоткой, недостаточно.

Анализ известных способов и методов, применяемых для достижения необходимого давления формования при отверждении намоточных конструкций из ПКМ, показал, что наиболее доступным и экономически эффективным для изготовления широкой номенклатуры трубчатых заготовок является метод формования силовой технологической рубашкой. Использование для рубашки опрессовочной ленты, составленной из отдельных особо прочных ниток, позволило достичь давления формования 4…5 МПа. Ограничения, накладываемые на величину внешнего давления, связаны с повышенной опасностью возникновения искривления волокон (потерей круговой формы) кольцевых слоев армирующего наполнителя, поэтому кроме расчета степени уплотнения заготовки необходимо проводить расчет окружных напряжений. При этом максимально допустимое давление формования не должно превышать значения, при котором минимум суммарных окружных напряжений (от намотки заготовки и опрессовки) равен нулю.

Снижения разброса свойств и повышения трансверсальной прочности ПКМ при сжатии можно добиться разработанным и внедренным в ООО НПП «Полидор» методом формования трубчатых заготовок с направленной разориентацией армирующего наполнителя, проводя опрессовку заготовки силовой рубашкой регулярно расположенными по периметру нажимными элементами. Удалось добиться повышения $\sigma_{\bar{r}}$ на 27…47 %, снизить разброс характеристик на 34 %.

Список литературы

1. **Тарнопольский, Ю. М.** Особенности расчета деталей из армированных пластиков / Ю. М. Тарнопольский, А. В. Розе. – Рига : Зинатне, 1969. – 274 с.
2. Влияние натяжения и искривления армирующих волокон на прочность и деформативность стеклопластиков / под ред. Ю. М. Тарнопольского и В. В. Перова. – М. : ВИАМ, 1966. – 54 с.
3. **Гуняев, Г. М.** Структура и свойства полимерных волокнистых композитов / Г. М. Гуняев. – М. : Химия, 1981. – 232 с.
4. **Тарнопольский, Ю. М.** Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю. М. Тарнопольский, Т. Я. Кинцис. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1981. – 272 с.
5. Пат. 2252345 Российская Федерация. Способ изготовления подшипника скольжения / Р. С. Зиновьев и др. – № 2003129444/11 ; заявл. 01.10.2003, Бюл. № 14, 2005. МКл.F16C 33/20.
6. ПД ТП 023-97. Технологический процесс изготовления трубчатых заготовок подшипников скольжения из ПКМ. – Челябинск : Полидор, 1997. – 63 с.
7. Выбор технологической оснастки для опрессовки трубчатых заготовок / Инструкция ПД ИН 17/06-03. – Челябинск : Полидор, 2003. – 54 с.

Зиновьев Радий Сергеевич
кандидат технических наук, технический директор группы научно-промышленных компаний «Полидор» (г. Пенза)

Zinovyev Radiy Sergeevich
Candidate of engineering sciences, technical director of research-industrial compnies “Polidor” (Penza)

E-mail: rapolidor@mail.ru

Савицкий Владимир Яковлевич
доктор технических наук, профессор, кафедра № 11, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения

Savitsky Vladimir Yakovlevich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department №11, Penza branch of the Military Academy of Material Support

E-mail: W.savis@gmail.com

УДК 65.015.13+678.86

Зиновьев, Р. С.

Технологическая реализация метода направленной разориентации армирующего наполнителя при изготовлении втулок из полимерных композиционных материалов / Р. С. Зиновьев, В. Я. Савицкий // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 127–138.

УДК 629

А. А. Грабовский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОЦЕНКА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ СХЕМАМИ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА

Аннотация. Представлены результаты сравнительной оценки динамических параметров для двигателей внутреннего сгорания, выполненных по классической схеме с центральным кривошипно-шатунным механизмом и с кривошипно-шатунным механизмом со сдвоенными кинематическими связями, выполненном с использованием двух коленчатых валов. Расчеты проводились при определенных условиях и допущениях. Теоретические выкладки даны на основе приведенной расчетной схемы, имеют классический подход к определению значений, расчеты которых велись в программной среде MathCad по классическим и оригинальным зависимостям.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, кривошипно-шатунный механизм, сдвоенные кинематические связи, возвратно-поступательно движущиеся массы, силы инерции, суммарные силы, тангенциальные силы, радиус кривошипа, крутящий момент.

Abstract. The article introduces the results of comparative evaluation of dynamic parameters for internal combustion engines, conducted by the classical scheme with a central crank mechanism (CSV) and a crank with double kinematic constraints, performed using two crankshafts. Calculations were carried out under certain conditions and assumptions. Theoretical calculations, based on the given design scheme, have a classic approach to determining the value, the calculations are conducted via MathCad software according to classic and original dependencies.

Key words: internal combustion engine, crank mechanism, kinematic connection duplex, reciprocating moving mass, inertia forces, total force, tangential force, radius of the crank torque.

Введение

Динамический расчет является основным, наиболее значимым этапом процесса проектирования и расчета двигателя. Основными исходными данными для динамического расчета являются результаты теплового и кинематического расчетов. Наиболее значимым параметром динамического расчета является крутящий момент, формирующийся на коленчатом валу двигателя как от отдельно взятого цилиндра, так и суммарный от всех цилиндров двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Сравнительный анализ динамических характеристик бензиновых и дизельных ДВС с одинаковым объемом показывает, что дизельный двигатель проигрывает бензиновому двигателю по мощности, но имеет более высокую эффективность за счет значительно увеличенного крутящего момента.

Учитывая особенности кинематической схемы кривошипно-шатунного механизма (КШМ) со сдвоенными кинематическими связями [1, 2] необходимо составить расчетную схему КШМ (рис. 1).

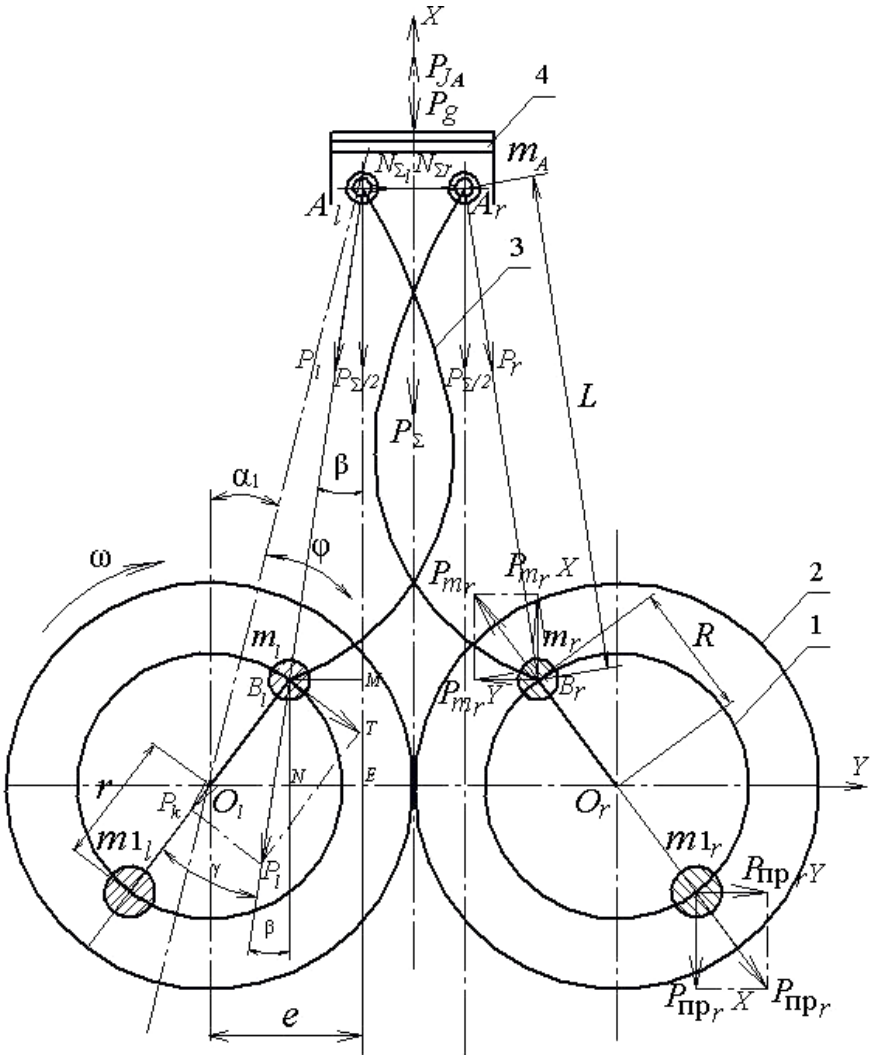


Рис. 1. Расчетная схема КШМ для определения динамических параметров

Анализ расчетной схемы

Из анализа расчетной схемы следует, что $\beta = \alpha_1$ при $\varphi = 0$. Из расчетной схемы кинематического расчета (рис. 1) следует, что углы β и φ связаны между собой зависимостями

$$\sin\beta = \frac{e}{L} - \frac{R}{L}\sin(\alpha_1 + \varphi)\,;\ \cos\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{e}{L} - \frac{R}{L}\sin(\alpha_1 + \varphi)\right)^2}\,.$$

Сила давления газов (суммарные силы), действующая на поршень, на осях поршневых пальцев (верхних головках шатунов) делится пополам и раскладывается на две составляющие: на нормальные N_l и N_r равные по величине и противоположные по знаку и уравновешивающие друг друга и силы P_s, равные между собой, действующие по осям шатунов и прикладывающиеся к осям шатунных шеек кривошипов B_l и B_r.

$$P_s = \frac{P_\Sigma}{\sqrt{1-\left(\frac{e}{L}-\frac{R}{L}\sin(\alpha_1+\varphi)\right)^2}}.$$

При этом $\alpha_1 = \arccos\frac{OE}{OA'}$.

На осях кривошипов каждая из этих сил раскладывается на две составляющие. Силы P_k, действующие по осям кривошипов, и две тангенциальные силы T, действующие на плече R (радиус кривошипов) каждого из кривошипов и создающие крутящие моменты $M_{\text{кр}l}$ и $M_{\text{кр}r}$, на зубчатых венцах маховиков суммируются. Учитывая симметричность расчетной схемы, расчет можно вести по одной из половин.

Для определения значения сил P_k и T необходимо определить угол между осью кривошипа и вектором силы P_l, назовем его γ. Для определения данного угла опустим перпендикуляр $B_l N$ на линию дезаксиала $O_l E$. Угол между вектором силы P_l и перпендикуляром $B_l N$ назовем δ. Из подобия треугольников $B_l A_l M$ и $P_l B_l N$ следует, что угол δ равен углу β. В треугольнике $O_l B_l N$ угол B равен сумме углов α_1 и φ. Следовательно

$$\gamma = (\alpha_1+\varphi)-\beta = (\arccos\frac{OE}{OA'}+\varphi) - \arccos\sqrt{1-\left(\frac{e}{L}-\frac{R}{L}\sin(\arccos\frac{OE}{OA'}+\varphi)\right)^2}.$$

Расчет значений крутящего момента

Сила P_k, действующая по оси кривошипа, в этом случае будет определяться как

$$P_k = P_l \cdot \cos\gamma,$$

а сила T как

$$T = P_l \cdot \sin\gamma.$$

Зная величину силы T для каждого значения угла φ поворота кривошипа определяется значение крутящего момента

$$M_{\text{кр}} = T \cdot R.$$

Сравнительные значения величин динамических параметров ДВС на основе центрального КШМ и КШМ со сдвоенными кинематическими связями представлены в виде графиков.

Расчеты проводились для вновь проектируемых рядных шестицилиндровых ДВС с диаметром цилиндров D = 265 мм при радиусе кривошипов коленчатых валов R = 155 мм и R = 150 мм, длине шатунов L = 680 мм и L = 577 мм с центральным КШМ и КШМ со сдвоенными кинематическими связями. При этом в первом случае ход поршня S составляет 310 мм, а во втором – 325 мм. Это обусловливает разницу в литраже двигателей 102,58 и 107,98 л соответственно, а следовательно, и эффективную мощность 2377 и 2492 кВт при прочих равных параметрах. Эффективный крутящий момент по данным тепловго расчета при этом составляет 22697 и 23795 Нм.

Следует заметить, что тепловой расчет проводился для ДВС с центральным КШМ при допущении, что расчетные значения параметров для ДВС с КШМ со сдвоенными кинематическими связями идентичны. Разница в значениях сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс при равенстве частоты вращения коленчатых валов определяется разницей в значениях их масс

Из сравнения суммарных сил, действующих в обоих случаях (рис. 2), при допущении равенства сил, действующих на поршень со стороны рабочего тела, следует, что силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс в КШМ со сдвоенными связями более благоприятно влияют на значение суммарной силы.

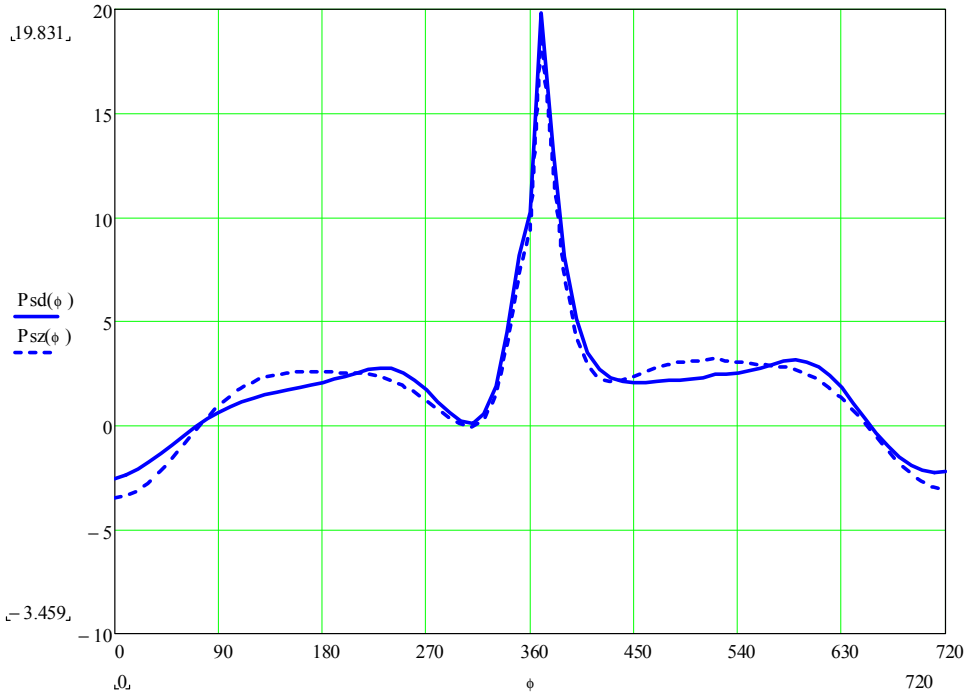


Рис. 2. Сравнение суммарных сил, действующих в ДВС с центральным КШМ (P_{sz}) и ДВС со сдвоенным КШМ (P_{sd})

Так среднее значение m всех значений суммарных сил для ДВС с центральным КШМ составляет

$$m_{Psz} = \sum P_{sz}(\varphi) : 720 = 2{,}01,$$

а для ДВС со сдвоенным КШМ

$$m_{Psd} = \sum P_{sd}(\varphi) : 720 = 2{,}15.$$

Разница в величине этих значений для данного случая составляет 0,14.

Сравнение сил, действующих вдоль осей шатунов, для случая центрального и дезаксиального КШМ представлено на рис. 3.

При этом среднее значение силы для ДВС с центральным КШМ составляет

$$m_{Pshz} = \sum P_{shz}(\varphi) : 720 = 2{,}0311,$$

а для ДВС со сдвоенным КШМ

$$m_{Pshd} = \sum P_{shd}(\varphi) : 720 = 2{,}3649.$$

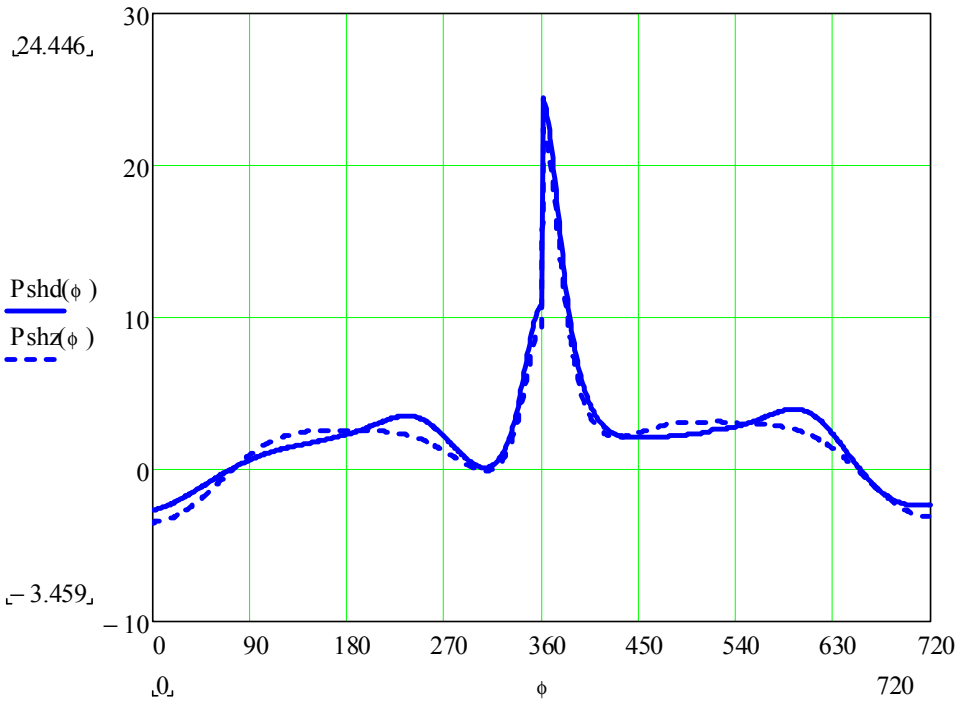


Рис. 3. Сравнение сил, действующих вдоль осей шатунов, для случая центрального и дезаксиального КШМ

Сравнение разницы средних значений для суммарных сил 0,14 и сил, действующих вдоль осей шатунов, 0,33 показывает некоторое увеличение значения динамических параметров в случае дезаксиального КШМ со сдвоенными кинематическими связями. Аналогичное сравнение тангенциальных сил, формирующихся на осях кривошипов, для случая центрального и дезаксиального КШМ, представленных на графике рис. 4, также подтверждает тенденцию увеличения. Так, среднее значение тангенциальной силы для ДВС с центральным КШМ составляет

$$m_{Tz} = \sum T_z(\varphi) : 720 = 11{,}1172,$$

а для ДВС со сдвоенным КШМ

$$m_{Td} = \sum T_d(\varphi) : 720 = 26{,}2297.$$

Среднее значение тангенциальной силы за цикл по данным теплового расчета составляет

$$T_{cp} = \frac{2\times10^6}{\pi\tau} p_i F_n,$$

при p_i = 3,1693 МПа и F_n = 0,0552 м^2 будет составлять 27858 Н. При радиусе кривошипа R = 0,15 м среднее значение момента за цикл для одного цилиндра будет равняться 4179 Нм.

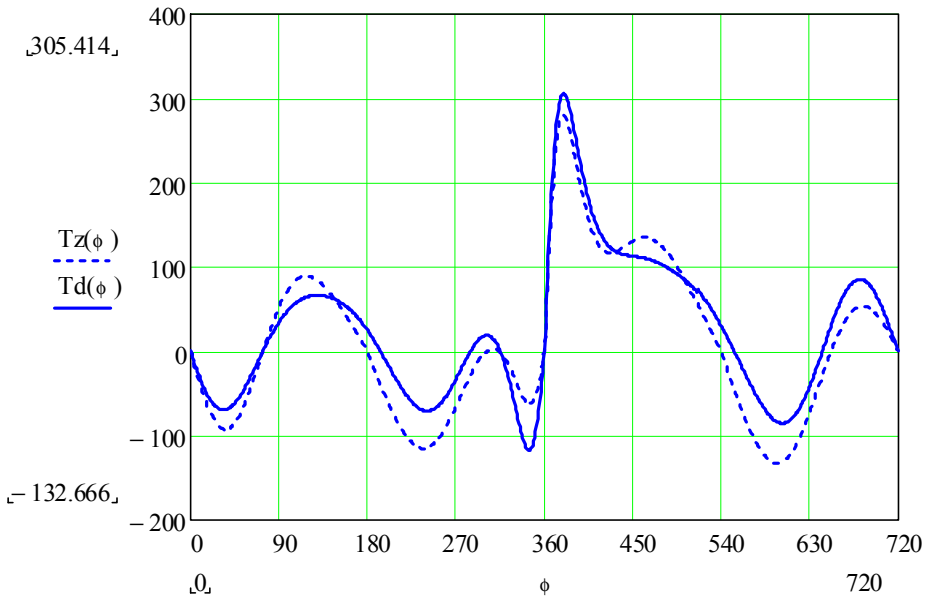


Рис. 4. Сравнение тангенциальных сил, формирующихся на осях кривошипов, для случая центрального и дезаксиального КШМ

Учитывая разницу в радиусах кривошипов для первого R = 0,155 м и второго R = 0,150 м случаев, получим значение крутящих моментов для одного цилиндра представленных на рис. 5.

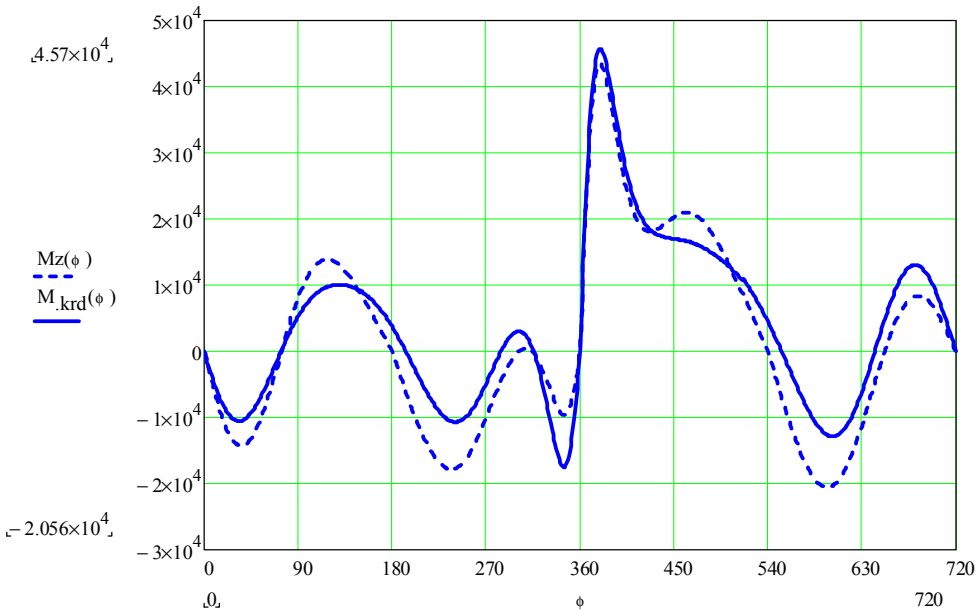


Рис. 5. Значение крутящих моментов для одного цилиндра для центрального и дезаксиального КШМ

При этом среднее значение величины крутящего момента для ДВС с центральным КШМ составляет

$$m_{Mz} = \sum M_z(\varphi) : 720 = 1{,}7232 \cdot 10^3 = 1723{,}2 \text{ Нм},$$

а для ДВС со сдвоенным КШМ

$$m_{Md} = \sum M_d(\varphi) : 720 = 3{,}9847 \cdot 10^3 = 3984{,}7 \text{ Нм}.$$

С учетом шести цилиндров крутящий момент будет составлять 10338 Нм для ДВС с центральным КШМ и 23910 Нм для ДВС с КШМ со сдвоенными кинематическими связями. Снижение суммарного крутящего момента для ДВС с центральным КШМ по сравнению с данными теплового расчета обусловлено значительными величинами сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс.

Величина ошибки $\Delta = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \cdot 100$ между результатами теплового и динамического расчетов составляет 4,6 % при вычислении среднего значения крутящего момента за цикл и 0,5 % при вычислении суммарного крутящего момента.

Заключение

Таким образом, с учетом допущения об аналогичных значениях параметров теплового расчета для случаев ДВС с центральным КШМ и дезаксиальным КШМ со сдвоенными кинематическими связями и разницы в значениях радиусов кривошипов, КШМ со сдвоенными кинематическими связями имеет некоторое преимущество в динамических показателях по сравнению с центральным КШМ.

Кроме того, сравнительный анализ направления векторов суммарных сил, действующих в КШМ, и направлений движения поршней на каждом из тактов свидетельствует о более выгодном их сочетании на тактах впуска, рабочего хода и выпуска.

Список литературы

1. Пат. № 2382891 Российская Федерация. МПК F02B 75/32. Кривошипно-шатунный механизм со сдвоенными кинематическими связями / Грабовский А. А., Грабовский А. А. ; заявитель и патентообладатель А. А. Грабовский. – № 2008110199 ; Заявл. 17.03.2010 ; опубл. 27.02.2010, Бюл. № 6.
2. **Грабовский, А. А.** Кинематика кривошипно-шатунного механизма с двумя коленчатыми валами / А. А. Грабовский, Е. С. Аверьянова // Известия МГТУ «МАМИ». – 2009. – № 2 (8). – 317 с.

Грабовский Александр Андреевич
кандидат технических наук, доцент, кафедра транспортных машин, Пензенский государственный университет

E-mail: algra888@yandex.ru

Grabovsky Alexander Andreevich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of transport machines, Penza State University

УДК 629

Грабовский, А. А.

Определение и оценка крутящего момента в двигателях внутреннего сгорания с различными схемами кривошипно-шатунного механизма / А. А. Грабовский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 139–146.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru, дискета 3,5", CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья обязательно должна сопровождаться индексом УДК, а также краткой аннотацией.

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными надписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версия 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования необходимо соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Номер источника указывается в квадратных скобках. В списке указывается:

- для книг – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц;
- для журнальных статей, сборников трудов – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, выпуск, страницы;
- для материалов конференций – фамилия и инициалы автора, название статьи, название издания, время и место проведения конференции, город, издательство, год, страницы.

В конце статьи допускается указание наименования программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

К материалам статьи должна прилагаться информация для заполнения учетного листа автора: фамилия, имя, отчество, место работы и должность, ученая степень, ученое звание, адрес, контактные телефоны, e-mail.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Рукопись, полученная редакцией, не возвращается.

Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

• ***информатика***
• ***вычислительная техника***
• ***управление***
• ***электроника***
• ***измерительная техника***
• ***радиотехника***
• ***машиностроение***
• ***машиноведение***

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс (841-2) 56-34-96, тел.: 36-82-06, 56-47-33; E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку на второе полугодие 2012 г. можно также оформить по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ» «Газеты. Журналы» тематический раздел «Известия высших учебных заведений». Подписной индекс – 36966

– –

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 2012 г.

№ 1 – ______ шт., № 2 – ______ шт., № 3 – ______ шт., № 4 – ______ шт.

Наименование организации (полное) ____________________________________

____

ИНН ____________________________ КПП ______________________________

Почтовый индекс ____

Республика, край, область____

Город (населенный пункт) ____

Улица _____________________________________ Дом ______________________

Корпус ____________________________ Офис ____________________________

ФИО ответственного ____

Должность ____

Тел. ________________ Факс _______________ E-mail_______________________

Руководитель предприятия _____________________ ________________________

(подпись) (ФИО)

Дата «____» _________________ 2012 г.