

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

*Дмитриенко А. Г., Николаев А. В., Михеев М. Ю.,
Тюрин М. В., Семочкина И. Ю.*

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ СТАРТОВЫХ
И ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОСМОДРОМА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНИТОРИНГОВОЙ
ИНФОРМАЦИИ

6

*Дмитриенко А. Г., Белозерцев А. И., Михеев М. Ю.,
Тюрин М. В., Ляшенко А. В.*

ЭЛЕМЕНТЫ КОНЦЕПЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ
И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

13

Першенков П. П., Савенков А. В.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ДАТЧИК
НА ОСНОВЕ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

22

Трофимов А. А., Цытин Б. В.

ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
С ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ

29

Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М.

АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ
ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ
ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

35

Фролов М. А., Салмин А. В., Мусаев Р. Ш.

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО АККУМУЛЯТОРНОГО МОДУЛЯ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

47

Трофимов А. А., Рязанцев Д. А.

ДАТЧИК ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ДЛЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

52

Исанбаев О. Н., Куликов Д. С.

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ
КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ ПЕРВИЧНОГО
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

58

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Гришко А. К., Жумабаева А. С., Юрков Н. К.

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИКИ
ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА

66

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Данилова Е. А.

ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ
ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

76

Лоскутов В. А., Клыков В. А., Шестопалова О. А.

СИНТЕЗ МИНИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ
КОНЕЧНО-АВТОМАТНОЙ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО ОБОБЩЕННЫМ
ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

85

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Тычков А. Ю., Чураков П. П., Тычкова А. Н., Абросимова О. В.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО МЕДИЦИНСКОГО
ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИМУЛЯТОРА ИЗМЕРЕНИЯ
АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

96

Геращенко М. С., Геращенко С. И., Геращенко С. М.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ГИДРОМАНЖЕТНОГО
ТОНОМЕТРА

106

Геращенко М. С., Геращенко С. И., Геращенко С. М.

РАЗРАБОТКА ГИДРОМАНЖЕТНОГО ПРИБОРА
ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ

112

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Dmitrienko A. G., Nikolaev A. V., Mikheev M. Y.,

Tyurin M. V., Semochkina I. Y.

TECHNIQUE JUSTIFICATION FOR TECHNICAL CONDITION
FORECASTING OF SPACE-LAUNCH AND TECHNICAL
FACILITIES SYSTEMS BASED ON MONITORING DATA

6

Dmitrienko A. G., Belozertsev A. I., Mikheev M. Y.,

Tyurin M. V., Lyashenko A. V.

SECURITY CONCEPT ELEMENTS FOR THE OBJECTS
OF GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE ON THE BASIS
OF CONTROL AND OPERATIONAL MONITORING SYSTEMS

13

Pershenkov P. P., Savenkov A. V.

INTELLECTUAL SENSOR BASED ON PHOTOGALVANIC EFFECT

22

Trofimov A. A., Tsypin B. V.

THE SENSOR OF ANGULAR MOVEMENTS
WITH THE DIGITAL OUTPUT

29

Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M.

THE OPERATION ALGORITHMS OF THE SYSTEMS
FOR MEASURING OF IRREGULAR SHAPED BLADES TIPS'
RADIAL AND AXIAL DISPLACEMENTS

35

Frolov M. A., Salmin A. V., Musaev R. S.

EVALUATION OF THE MECHANICAL RELIABILITY
OF THE ADDITIONAL BATTERY MODULE
OF THE DATA-MEASURING SYSTEM

47

Trofimov A. A., Ryazantsev D. A.

THE SENSOR OF LINEAR POSITIONS FOR ROCKET
AND SPACE TECHNOLOGY

52

Isanbaev O. N., Kulikov D. S.

THE METHOD OF PRELIMINARY TEMPERATURE
CORRECTION OF PRIMARY MEASURING CONVERTER
OF SMART SENSOR OF SHIFT

58

RADIOTECHNICS MEASUREMENT

Grishko A. K., Zhumabaeva A. S., Yurkov N. K.

THE ELECTROMAGNETIC RESISTANCE OF ELECTRONIC
SYSTEMS BASED ON PROBABILISTIC ANALYSIS
OF THE DYNAMICS OF THE INFORMATION CONFLICT

66

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM

Danilova E. A.

BUILDING INFORMATION MEASUREMENT SYSTEM
DETECTING DEFECTS DE-CONDUCTIVE PATTERN
OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

76

Loskutov V. A., Klykov V. A., Shestopalova O. L.

SYNTHESIS OF MINIMAL FORMS OF FINITE-AUTOMATON
MODEL OF FUNCTIONING OF ONBOARD ELECTRONIC
SYSTEMS OF SPACE VEHICLES ACCORDING
TO THE DIAGNOSTIC CRITERIA

85

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENT

Tychkov A. Yu., Churakov P. P., Tychkova A. N., Abrosimova O. V.

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL MEDICAL DIAGNOSTIC
SIMULATOR FOR BLOOD PRESSURE MEASUREMENT

96

M. S. Gerashhenko, S. I. Gerashhenko, S. M. Gerashhenko

HYDROCUFF TONOMETER ERROR ASSESSMENT

106

M. S. Gerashhenko, S. I. Gerashhenko, S. M. Gerashhenko

HEMODYNAMIC PARAMETERS HYDROCUFF
MONITORING DEVICE DEVELOPMENT

112

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

УДК 629.78: 047.36

***А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, М. Ю. Михеев,
М. В. Тюрин, И. Ю. Семочкина***

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ СТАРТОВЫХ
И ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОСМОДРОМА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНИТОРИНГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

A. G. Dmitrienko, A. V. Nikolaev, M. Y. Mikhееv, M. V. Tyurin, I. Y. Semochkina

**TECHNIQUE JUSTIFICATION FOR TECHNICAL CONDITION
FORECASTING OF SPACE-LAUNCH AND TECHNICAL
FACILITIES SYSTEMS BASED ON MONITORING DATA**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены методы прогнозирования остаточного времени безопасной эксплуатации на основе случайных процессов. Целью работы является выбор наиболее перспективного метода прогнозирования технического состояния стартовых и технических комплексов космодрома. *Материалы и методы.* Проведен развернутый анализ методов прогнозирования технического состояния объектов. *Результаты.* Показано, что наиболее перспективным методом прогнозирования технического состояния стартовых и технических комплексов космодрома является апостериорный метод оценки остаточного времени безотказной эксплуатации на основе использования многофункциональных интеллектуальных систем мониторинга и контроля. *Выводы.* Выбранный метод прогнозирования технического состояния объектов мониторинга позволяет получить наиболее достоверную оценку неизрасходованного времени безопасной эксплуатации объекта.

A b s t r a c t. *Background.* Forecasting techniques for remaining safe operation limit on the basis of stochastic processes have been described. The work is aimed to choose the most advanced technique of technical condition forecasting for space-launch and technical facilities. *Materials and methods.* Expanded analysis of techniques for technical condition forecasting has been carried out. *Results.* It has been demonstrated that the most advanced technique of technical condition forecasting for space-launch and technical facilities is the aposterior technique of remaining safe operation limit evaluation using multifunction smart monitoring and control systems. *Conclusions.* The selected technique of technical condition forecasting for the monitoring objects provides the most reliable evaluation of the remaining safe operation limit of the facility.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прогнозирование технического состояния, стартовые и технические комплексы космодрома, система мониторинга и контроля, сети Петри, Марковский анализ, интенсивность отказов, дерево событий.

К e y w o r d s: technical condition forecasting technique, space-launch and technical facilities, monitoring and control systems, Petri nets, Markovian analysis, failure rate, event tree.

Конечной целью мониторинга и контроля любого сложного объекта является прогнозирование остаточного времени безотказной эксплуатации.

В настоящее время известно множество методов прогнозирования технического состояния объектов – от прогнозирования интенсивности отказов, анализа деревьев неисправностей и событий – до сети Петри и Марковских процессов. Особенности, достоинства и недостатки этих методов представлены в табл. 1 [1]. Из них для получения априорных вероятностных оценок эффективно используются методы прогнозирования интенсивности отказов и анализ блок-схем безотказности. Однако ни один из предложенных методов прогнозирования не обеспечивает оценок остаточного времени безотказной работы объекта мониторинга по наблюдениям за характеристиками случайного процесса, статистически связанного с характеристиками объекта.

Техническое состояние сложного объекта характеризуется совокупностями эксплуатационно-технических характеристик, образующих комплекс случайных функций. При решении прикладных задач, к числу которых относятся задачи прогнозирования состояния реальных объектов, случайные функции представляются в виде конечномерного случайного вектора $X_{(n)} = \{x_1, \dots, x_n\}$ [2].

В этом случае проблема прогнозирования представляет собой проблему экстраполяции случайного векторного процесса $X_{(n)}(t)$. Ее основными понятиями являются «наблюдаемый» случайный процесс $Z_{(n)}(t)$, $t \in T$, и «ненаблюдаемый» случайный процесс $X_{(n)}(t)$, $1 \in T$, статистически связанный с $Z_{(n)}(t)$.

Примером статистически связанных случайных процессов являются наблюдаемые массивы измерительной информации о физических параметрах объекта мониторинга, получаемые системами мониторинга и контроля, с ненаблюдаемыми эксплуатационно-техническими характеристиками (ЭТХ) объекта. При этом периодическое наблюдение за сохранением ЭТХ может носить оценочный характер, основанный на подтверждении стабильности массива измерительной информации.

Таблица 1

Особенности использования преимуществ и ограничения известных методов прогнозирования

Метод	Особенности использования	Преимущества	Ограничения
1	2	3	4
1. Прогнозирование интенсивности отказов	Использование предположения о постоянстве интенсивности отказов	Незначительная трудоемкость, простота адаптации к ручным и компьютеризованным вычислениям	Низкая точность прогнозирования, особенно для изделий, изготавливаемых малыми сериями
2. Анализ дерева неисправностей	Основан на идентификации условий и факторов, влияющих на работоспособность	Относительная простота преобразования логических моделей в соответствующее значение вероятностей	Зависимость достоверности результатов прогнозирования от времени происхождения событий
3. Анализ дерева событий	Использование в качестве дополнения к анализу дерева неисправностей	Возможность оценить последствия события и обеспечить уменьшение вероятного неблагоприятного последствия	Необходимость оценки правильности обработки условных вероятностей и определения независимости событий

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
4. Анализ блок-схемы безотказности	Использование в качестве первого этапа оценки безотказности	Возможность получения количественной оценки безотказности в процессе разработки	Необходимость построения вероятностной модели работоспособности для каждого элемента в схеме и невозможность учета сложных видов ремонта и стратегий обслуживания
5. Марковский анализ	Направленность на оценку безотказности с функционально сложной структурой, сложного ремонта и стратегий обслуживания	Возможность получения гибкой вероятностной модели для анализа поведения системы	Быстрое нарастание числа состояний с увеличением числа компонентов системы, что приводит к громоздкости вычислений
6. Сети Петри	Предназначен для анализа сложных логических взаимодействий, включенных в язык сетей Петри	Возможность представления сложных взаимодействий аппаратных средств вычислительной техники и/или модулей программного обеспечения, которые не могут быть описаны другими методами	
7. Анализ видов и последствий отказов	Предназначен для анализа безотказности на основе изучения отказов материалов, компонентов и составных частей и влияние их последствий на результаты функционирования	Системная идентификация взаимосвязи последствий отказов и их причин и определение мероприятий по смягчению риска	Необходимость получения большого объема исходных данных и неуправляемость при отсутствии прямых отношений между причиной и следствием
8. Исследование опасности и удобства эксплуатации	Предназначен для решения проблемы идентификации опасности и удобства эксплуатации, выполняемым персоналом	Использование различных навыков и знаний 1-й группы экспертов, каждый из которых должен быть знаком с различными аспектами исследований системы	Зависимость от способностей и опыта руководителя и знаний, опыта и взаимодействия членов команды
9. Анализ влияния человеческого фактора на безотказность	Предназначен для оценки и распределения функции, задач и ресурсов между людьми и машинами	Вносит существенный вклад в удобство и безотказность применения изделий	Необходимость глубокого знания характеристик человеческой работоспособности
10. Анализ устойчивости к нагрузкам	Анализ возможности возникновения отказов при воздействии электрических, механических, климатических и других нагрузок	Может обеспечивать точное представление безотказности компонента как функции возможных механизмов отказов, обеспечивает более реалистичное физическое понимание последствий разнообразных нагрузок	Возможность ошибочных выводов при неправильном предположении о распределении одной или более случайных величин

Окончание табл. 1

1	2	3	4
11. Таблица состояний	Метод структурного функционального анализа, направленный на выявление и систематизацию всех возможных комбинаций состояний	Предполагает изучение всех возможных комбинаций взаимодействия работоспособных и неработоспособных состояний компонентов, является весьма эффективным	Трудная применимость для сложных систем, когда число состояний становится очень большим
12. Суммирование наработок	Метод расчета показателей безотказности изделий с резервом или избыточностью	Превосходит возможности метода анализа блок-схемы безотказности, является более простым, применим для любых видов резерва или избыточности	Необходимость предположения о постоянстве распределений случайных слагаемых

Главной проблемой прогнозирования является точечная оценка наблюдаемого случайного процесса $X_{(n)}(t)$ для будущего момента времени S , $S \in (T-t_1)$, по известной реализации $Z_{(n)}(t)$. Чаще всего прогнозируется нахождение процесса в некоторой области. При этом выполнение условия $X_{(n)} \in S_0$ определяет работоспособное состояние объекта, а изменение вектора во времени образует случайный процесс $X_{(n)}(t)$ при $t \geq t_1$ и $t \leq \infty$, описывающий изменение ЭТХ во времени (t_1 – фиксированный момент времени, соответствующий началу наблюдений или эксплуатации).

До появления некоторого другого случайного процесса $X_{(n)}(t)$ в серии наблюдений $Z_{(n)}(t)$ первый из наблюдаемых процессов можно охарактеризовать на основе априорных оценок, зависящих только от его случайного поведения [3].

Априорный анализ надежности предполагает использование известных количественных характеристик надежности отдельных блоков и агрегатов стартовых комплексов (СК) и технических комплексов (ТК) и базируется на априорных вероятностных характеристиках надежности, приближенно отражающих действительные процессы эксплуатации. Априорный анализ надежности проводится с использованием формул:

$$P\{Z \in B\} \approx \sum_{i=1}^n P_i\{Z \in B_i\}, \quad P\{Z \in B\} = \int_B f(xz)dz,$$

где $\in$ – знак включения точек одного множества в другое; $Z \in B_i$ означает попадание случайной точки $(Z_1, \dots, Z_n)$ в область B_i .

Если при наблюдении за процессом $Z_{(n)}(t)$ проведено единичное наблюдение за вектором $X_{(n)}(t)$, по результатам которого стало ясно, что с вероятностью единица его значения находятся в области S_0 , то для определения характеристик ненаблюдаемой случайной величины на будущее время необходимо использовать апостериорный метод анализа. Из физических закономерностей следует, что степень случайности ненаблюдаемого процесса в указанной ситуации значительно уменьшена. Если до проведения единичного наблюдения процесс мог изменяться во сколь угодно широких пределах, то после проведения наблюдений диапазон его изменения значительно уменьшился. После этого нахождение процесса в области S_0 является достоверным событием, а за пределами области – невозможным.

Апостериорный анализ проводится путем статистической обработки результатов наблюдений о сохранении значений ЭТХ СК и ТК в процессе эксплуатации и вычисления условий вероятности возникновения отказа вслед за интервалом безотказной работы. Использование этого свойства случайных функций позволяет определять сохранение значений ЭТХ объекта мониторинга по оценкам случайных изменений измеряемых физических величин,

статистически связанных с ЭТХ. Таким образом, наиболее полное решение задачи прогнозирования остаточного времени безотказной работы можно получить по результатам апостериорного анализа надежности, который относится к фундаментальным методам теории вероятности [4].

Апостериорная функция надежности $P_{\omega}^{PS}(S)$ по результатам наблюдений за случайной функцией $\hat{Z}_{(n)}(t)$, $t_1 < t \leq t_K$, статистически связанной с ненаблюдаемой функцией $\hat{X}_{(n)}(t)$, $t_1 < t \leq t_K$, определяется по формуле

$$P_{\omega}^{PS}(S) = P\{\Delta T_{\omega} > S / Z_{(n)\omega}(t)\}, \quad t_1 \leq t \leq t_K, \quad S \geq t_K, \quad (1)$$

где ΔT_{ω} – остаток времени безотказной работы объекта с номером ω , определяемый по формуле

$$\Delta T_{\omega}^* = \int_{t_k}^{\infty} P_{\omega}^{PS}(S) dS. \quad (2)$$

С учетом монотонности реализации случайного процесса $X_{(n)}(t)$ значение ΔT_{ω}^* можно определить по формуле

$$\Delta T_{\omega}^* = \max_{S_0} S \mid \int \varphi_{\xi}(x_{(n)}, s) dx_1, \dots, dx_n, dx \geq P_{\omega}, \quad (3)$$

где $\int \varphi_{\omega}(x_{(n)}, s) dx_1, \dots, dx_n, ds = \int_{S_0}^{\infty} \varphi_{\omega}^{PS}(t) dt, \varphi_{\omega}^{PS}(S) = d(1 - P_{\omega}^{PS}(S)) / dS$.

С учетом формулы (3) задачу прогнозирования технического состояния объектов мониторинга на этапе апостериорного оценивания надежности можно сформулировать как задачу прямого и обратного прогнозирования параметрической безотказности. В основе такого прогнозирования лежат процедуры периодического оценивания плотности $\varphi_{\omega}(x_{(n)}, s)$ по результатам мониторинга параметров объекта. В этом случае оценка будущего значения ненаблюдаемого процесса $X_{(n)}(t)$, определяющего надежность объекта мониторинга, состоит в отыскании такого момента времени S , при котором точечная оценка в первый раз выйдет за допусковую область S_0 . Зная допусковую область на возможные изменения ЭТХ СК и ТК, в процессе эксплуатации можно прогнозировать момент их выхода за пределы установленных значений [5].

Таким образом, на основе решения перечисленных задач можно получить оценку неизрасходованного времени безопасной эксплуатации объекта.

Для реализации метода прогнозирования случайных событий на основе совокупности априорного и апостериорного анализа безотказности необходимо выполнение трех основных этапов:

- получение чистого прогноза по всему известному прошлому о реализации «наблюдаемого» процесса $Z_{(n)}(t)$, который является результатом преобразования без помех интересующего нас процесса $X_{(n)}(t)$ некоторым оператором $Z_{(n)}(t) = AX_{(n)}(t)$, где A – коэффициент статистической взаимосвязи между двумя случайными процессами;
- получение чистого прогноза по частично известному прошлому о реализации «наблюдаемого» процесса $Z_{(n)}(t)$, который не искажен помехами, а «наблюдаемая» реализация представлена из-за недостаточной глубины контроля не всеми своими составляющими;
- получение прогноза по частично известному прошлому о «наблюдаемом» процессе $Z_{(n)}(t)$, который является результатом преобразования $X_{(n)}(t)$ при наличии помех некоторым оператором A (например, в случае аддитивной помехи $n(t)$, $Z_{(n)}(t) = A\{X_{(n)}(t) + n(t)\}$).

Отсюда следует, что для получения совокупности указанных прогнозов необходима априорная информация о наблюдаемом процессе и о помехах для будущих моментов времени. В действительности же может быть известно только поведение аналогичных объектов с точ-

ностью до степени влияния ошибок измерений и глубины контроля на ЭТХ объекта мониторинга.

Усреднение результатов индивидуального прогноза по ансамблю аналогичных объектов позволяет получать необходимые априорные оценки, повышение достоверности которых путем пополнения банка данных о поведении объектов мониторинга представляет собой одну из основных задач, решаемых системой мониторинга и контроля (СМиК) при оценке технического состояния СК и ТК космодрома [6].

Таким образом, для обеспечения заданной достоверности метода прогнозирования технического состояния объектов мониторинга в технических требованиях на разработку СМиК должны задаваться и подтверждаться обязательные требования по оценке априорной и апостериорной вероятностей до начала эксплуатации. Кроме этого, целесообразно пополнение банков данных объектов мониторинга информацией о статистическом поведении объекта с момента ввода в эксплуатацию до начала эксплуатации СМиК.

На основе анализа известных методов прогнозирования случайных процессов установлено, что наиболее перспективным методом прогнозирования технического состояния СК и ТК космодрома является использование апостериорного метода оценки остаточного времени безотказной эксплуатации на основе использования многофункциональных интеллектуальных СМиК.

Список литературы

1. ГОСТ Р 27.301–2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения. ИЕС 60300-3.1:2003 (NEQ). – М. : Стандартинформ, 2013.
2. Васильев, Б. В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств / Б. В. Васильев. – М. : Советское радио, 1970. – 336 с.
3. Тюрин, М. В. Разработка моделей прогнозирования состояния элементов технически сложного объекта / М. В. Тюрин, С. А. Фомин, О. В. Прокофьев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 73–78.
4. Дмитриенко, А. Г. Математическое моделирование состояния технически сложных объектов наземной инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2012. – С. 3–9.
5. Дмитриенко, А. Г. Системы интеллектуального анализа данных: методология, реализация, приложения / А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, И. Ю. Семочкина. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2013. – 164 с.
6. Ломтев, Е. А. Совершенствование алгоритмов сжатия-восстановления сигналов для систем телеизмерений / Е. А. Ломтев, М. Г. Мясникова, Н. В. Мясникова, Б. В. Цыпин // Измерительная техника. – 2015. – № 3. – С. 11–15.

Дмитриенко Алексей Геннадиевич

доктор технических наук, доцент,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rkap@pnzgu.ru

Dmitrienko Aleksey Gennadievich

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of rocket-space
and airtation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николаев Андрей Валерьевич

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

Nikolaev Andrey Valer'evich

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

Михеев Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: rector@penzgtu.ru

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Семочкина Ирина Юрьевна

кандидат технических наук,
начальник Учебно-методического управления
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: rector@penzgtu.ru

Mikheev Mihail Yur'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department
of information technology and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

Tyurin Mihail Vladimirovich

candidate of technical sciences, senior researcher,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Semochkina Irina Yur'evna

candidate of technical sciences,
head of Educational-methodical management,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

УДК 629.78: 047.36

Обоснование метода прогнозирования технического состояния систем стартовых и технических комплексов космодрома с использованием мониторинговой информации / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин, И. Ю. Семочкина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 6–12.

УДК 629.7.08: 047.36

А. Г. Дмитриенко, А. И. Белозерцев, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин, А. В. Ляшенко

ЭЛЕМЕНТЫ КОНЦЕПЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

A. G. Dmitrienko, A. I. Belozertsev, M. Y. Mikheev, M. V. Tyurin, A. V. Lyashenko

SECURITY CONCEPT ELEMENTS FOR THE OBJECTS OF GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE ON THE BASIS OF CONTROL AND OPERATIONAL MONITORING SYSTEMS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрена структурная схема обеспечения безопасности на основе комплексной системы контроля и функционального мониторинга. Проведен анализ существующих подходов к решению проблемы обеспечения сохранения заданных значений эксплуатационно-технических характеристик на протяжении всего времени функционирования стартовых комплексов и наземной космической инфраструктуры. Целью работы является определение направлений обеспечения безопасности объектов наземной космической инфраструктуры на основе систем контроля и функционального мониторинга. *Материалы и методы.* Используется системный подход к рассмотрению проблемы обеспечения безопасности стартовых комплексов и наземной космической инфраструктуры. *Результаты.* Представлены элементы концепции обеспечения безопасности объектов наземной космической инфраструктуры на основе систем контроля и функционального мониторинга. Показана необходимость формирования эталонной модели эксплуатационно-технических характеристик стартового комплекса и наземной космической инфраструктуры. *Выводы.* Предложенный концептуальный подход к созданию комплексной системы контроля и функционального мониторинга позволит осуществлять координацию и системную совместимость соответствующих работ за счет использования готовых методик и информационных технологий.

A b s t r a c t. *Background.* The structural scheme of safety measures on the basis of integrated and operational monitoring systems has been described. The analysis of the existing approaches to solve safety ensuring problem of the given values of technical characteristics throughout the entire operation period of launch complexes and ground space infrastructure has been carried out. The work is aimed to determine the directions of safety ensuring of the ground-based space infrastructure objects on the basis of control and operational monitoring systems. *Materials and methods.* A systematic approach to solve the safety ensuring problem for the launch complexes and ground-based space infrastructure has been used. *Results.* The elements of the safety ensuring concept for the ground space infrastructure objects on the basis of control and operational monitoring systems are presented. The necessity to form a reference model of the operational and technical characteristics for the launch complex and the ground space infrastructure is shown. *Conclusions.* The proposed conceptual approach for the devel-

opment of the integrated and operational monitoring system will allow to coordinate and match relevant operations through the use of ready-made techniques and information technologies.

К л ю ч е в ы е с л о в а: стартовые и технические комплексы космодрома, единая информационная среда космодрома, эксплуатационно-технические характеристики, космический ракетный комплекс, наземная космическая инфраструктура, технически сложный объект.

К e y w o r d s: space-launch and technical facilities, shared launch area IT environment, physical and operational characteristics, guided missile system, ground-based space infrastructure, technically complex object.

Актуальной задачей развития наземной космической инфраструктуры Российской Федерации является [1–5] создание современных стартовых комплексов (СК) на строящемся космодроме «Восточный» для новых модификаций ракет космического назначения (РКН) «Союз» и «Ангара», а также совершенствование систем контроля и мониторинга СК РКН «Ангара» космодрома «Плесецк». Основой строительства стартовых комплексов является проектная документация, обеспечивающая выполнение требований, установленных техническим заданием. Предлагаемый способ формирования концепции обеспечения безопасности наземной космической инфраструктуры включает:

- обобщение требований, установленных техническим заданием, и параметров эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) проекта;
- формирование эталонной информационной модели эксплуатационно-технических характеристик СК.

Формирование эталонной информационной модели эксплуатационно-технических характеристик проектируемого стартового комплекса выполняется по принципу обеспечения уровня безопасности каждой единицы оборудования в составе комплекса в зависимости от его функции при выполнении технологических операций таким образом, чтобы их суммарный уровень безопасности обеспечивал уровень безопасности комплекса.

Строительство новых СК дает уникальную возможность получить и обработать первичную мониторинговую информацию о ЭТХ состояния каждой единицы оборудования агрегатов и систем СК до момента первого старта, в том числе во время пуско-наладочных работ, автономных и комплексных испытаний. Тем самым появляется возможность сравнить эксплуатационно-технические характеристики реального СК с характеристиками, заложенными в его проекте. Получение мониторинговой информации до момента первого старта позволит сформировать реальную модель ЭТХ СК, максимально приближенную к проектной. Использование такой модели в свою очередь позволит разработать комплекс мероприятий и работ, обеспечивающих возвращение эксплуатационно-технических характеристик СК, после очередного пуска максимально приближенных к эталонному. Это принципиально отличается от сложившейся практики управления техническим состоянием СК по принципу «от достигнутого», тем более что существующая нормативно-техническая документация определяет лишь общую номенклатуру требований к оцениванию текущего состояния СК [1, 5, 6].

Впервые с учетом развития информационных и мониторинговых технологий появляется возможность на вновь вводимых объектах осуществлять контроль и мониторинг эксплуатационно-технических характеристик СК и технических комплексов (ТК), используя в качестве точки отсчета эталонную модель, обобщающую параметры СК, полученные расчетным путем, при проектировании оборудования и комплексов, обеспечивающих уровень безопасности в соответствии требованиями ГОСТ Р 54317–2011.

Реальные значения параметров ЭТХ, полученных при проведении приемо-сдаточных испытаний в эксплуатацию (начало эксплуатации, индивидуальные особенности старта, первый пуск), и параметров ЭТХ, полученных при проведении каждого пуска, будут отличаться от расчетных. Сравнительный анализ показателей ЭТХ обозначит слабое звено оборудования

(системы), где происходит отклонение от заданных параметров. По результатам принимается решение о проведении работ по обнаружению и устранению причин, снижающих уровень безопасности, и доведении его до показателей проекта после каждого старта. В процессе проведения работ по подготовке пуска система мониторинга выдает информацию лицу, принимающему решения (ЛПР).

В работе [2] показано, что проектирование новых вариантов СК и ТК основано на системном подходе и носит итерационный характер: от постановки и решения общей задачи создания комплекса к конкретным техническим решениям по его отдельным агрегатам и системам. При этом определяются оптимальные параметры комплекса в целом, выполняется минимизация затрат на создание и эксплуатацию в течение всего жизненного цикла, который для СК и ТК составляет не менее 30 лет. В процессе эксплуатации должны выполняться многочисленные требования по безопасности:

- обоснованное обеспечение требуемых запасов прочности несущих конструкций стартового оборудования;

- автоматизация всех опасных операций подготовки РКН на СК, рациональное резервирование ответственных элементов, создание алгоритмов функционирования автоматизированных систем и агрегатов с возможностью оперативного вмешательства в их работу и резервирования времени выполнения операций.

Тем самым обоснована актуальность задачи проектирования систем диагностики уже на стадии проектирования оборудования новых СК и ТК, что позволит предусматривать диагностику стартовых сооружений и оборудования посредством создания системы непрерывного контроля их ЭТХ. Такой подход позволит реализовать гибкую систему эксплуатации агрегатов, систем и сооружений СК и ТК при их реальном состоянии на протяжении всего жизненного цикла.

Используемые в настоящее время принципы научно-технического сопровождения не в полной мере обеспечивают надежность и безопасность эксплуатации СК за пределами назначенных и продленных сроков службы по следующим причинам [7–9]:

- не в полном объеме проработана методология оценки ТС по результатам мониторинга, которая обеспечила бы возможность своевременного проведения мероприятий для поддержания требуемого уровня качества функционирования СК, прогнозирования остаточного ресурса и продления сроков эксплуатации;

- оценивание и прогнозирование ТС агрегатов и систем СК в настоящее время ведутся преимущественно на основе статистических или экспертных оценок, которые для сложных уникальных объектов не обладают необходимой достоверностью, поскольку в процессе эксплуатации существенно изменяются свойства и нагрузки механических элементов, что не обеспечивает статистическую устойчивость мониторинговых данных;

- используемые в настоящее время модели процессов функционирования СК основаны преимущественно на разработанных в рамках проектов функциональных и конструктивных схемах, которые, в частности, отражают «деградационные» изменения конструктивных материалов и элементов, что приводит к изменениям эксплуатационно-технических характеристик агрегатов и систем СК;

- обычно вопросы организации мониторинга ТС комплексов возникают уже в процессе их эксплуатации, в конце срока выработки назначенного ресурса, поскольку созданные до настоящего времени объекты, как правило, не оснащены специальными системами мониторинга и контроля [3, 5, 10, 11].

Традиционно диагностические системы базируются на принципах и методах, лишь констатирующих отказы и неисправности в штатном режиме, принципиально не позволяющих учесть ряд важнейших динамических свойств СК в нештатных и критических ситуациях, вероятностные характеристики агрегатов и систем, условия возникновения динамического хаоса в детерминированных системах, эффекты динамики механизмов нагружения, старения и разрушения материалов и конструкций, влияние окружающей среды, поведение агрегатов и узлов в нештатных и критических ситуациях. Не решены вопросы управления структурной динамикой сложных систем, процессов их деградации, а также оценки и прогнозирования рисков

возникновения нештатных и критических ситуаций и информационной поддержки принятия решений в соответствующих ситуациях.

Предложенные элементы концепции направлены на решение технических и технологических проблем комплексного мониторинга сохранения заданных значений эксплуатационно-технических характеристик систем стартовых и технических комплексов космодрома в процессе эксплуатации с учетом эксплуатационно-технических характеристик следующих трех типов:

- проектных, т.е. тех, которые были заложены в процессе проектирования и обобщают опыт предыдущих проектов;
- мониторинговых данных, полученных после окончания строительства реального объекта, учитывающие именно его специфику;
- результатов мониторинга, собираемых во время подготовки и проведения пусков, а также регламентных работ.

Создание комплексной системы контроля и функционального мониторинга требует специального обоснования предлагаемых технических и технологических решений.

Возникает необходимость определения исходных – концептуальных положений. Предложено решить задачу комплексирования существующих и разрабатываемых систем контроля и функционального мониторинга на базе единой информационной среды (ЕИС) и интеллектуального анализа данных и системы взаимосвязанных методов научного обоснования технических и технологических решений по ее созданию [10].

В этой связи предлагается новый подход к формированию концепции оценивания ТС СК. Эта концепция содержит два основных аспекта: системный и физический. Физический аспект отражает природу процессов эксплуатации и изменения технического состояния объектов, а системный аспект используется для координации исследований разнообразных явлений и процессов в рамках ЕИС, а также комплекса алгоритмически взаимосвязанных моделей, методов и характеристик.

Новый подход включает:

- концепцию, стратегии, методики и алгоритмы выявления и агрегирования мониторинговых данных для определения ТС, которое может служить методической основой для продления сроков эксплуатации СК;
- комплекс моделей, состоящий из трех типов моделей: эталонной; проектной, обобщающей ЭТХ, заложенные в процессе проектирования; реальной индивидуальной модели конкретного СК, полученной по результатам мониторинговых данных, собранных после окончания строительства конкретного объекта;
- текущую индивидуальную модель конкретного СК, полученную по результатам мониторинга ЭТХ, собираемых во время подготовки и проведения пусков, а также регламентных работ.

На рис. 1 представлена структурная схема обеспечения безопасности на основе комплексной системы контроля и функционального мониторинга.

СПИИРАН (г. Санкт-Петербург) совместно с ЗАО «СКБ «ОРИОН» (г. Санкт-Петербург) разработана технология мониторинга, интеллектуального анализа данных и информационной поддержки принятия решений ЛПР, базирующаяся на применении комплекса логических, лингвистических и математических моделей, что позволило обеспечить параллельную распределенную обработку сверхбольших объемов мониторинговой информации в реальном времени, при этом обеспечивается очистка данных посредством выявления и исключения некорректных, неточных и противоречивых данных. Разработанная технология направлена на упреждающее предсказательное комплексное моделирование развивающейся ситуации и базируется на отечественных разработках в области системотехники и инженерии знаний, что позволило обеспечить консолидацию данных, информации и знаний, получаемых в процессе мониторинга и управления ТСО, и обеспечить формирование целостного образа объекта мониторинга [6].

Проведенный анализ существующих подходов к решению проблемы обеспечения сохранения заданных значений ЭТХ СК и ТК на протяжении всего времени их функционирования показал, что сформировались необходимые предпосылки для формирования нового междисциплинарного научного направления – теории управления ТСО и организационно-техническими системами в кризисных ситуациях [12–14].

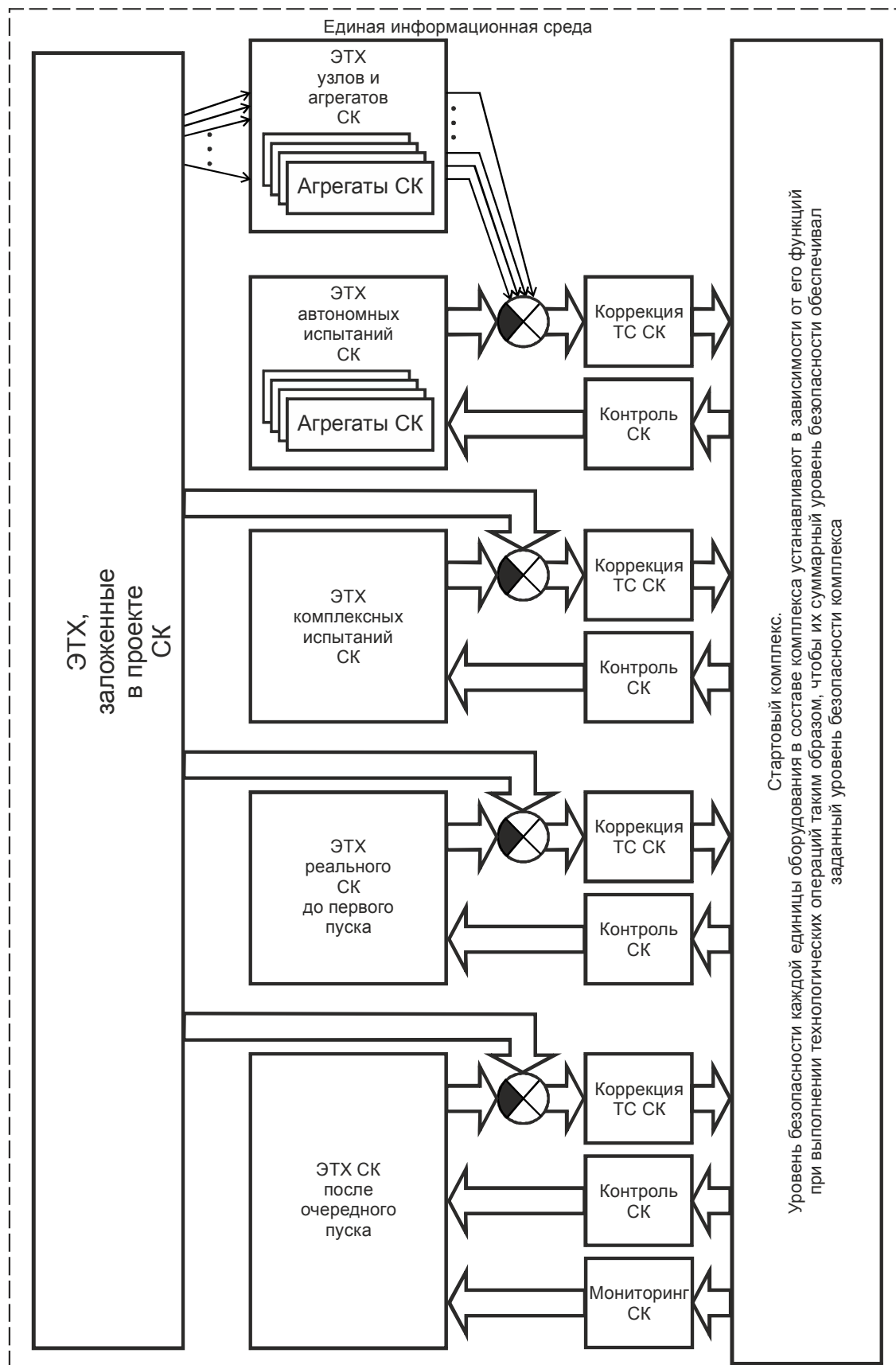


Рис. 1. Структурная схема обеспечения безопасности на основе комплексной системы контроля и функционального мониторинга

Объединение всех применяемых и вновь разрабатываемых подходов к обеспечению безопасности СК на основе предлагаемого способа формирования концепции позволило выделить этапы развития ЭТХ:

- ЭТХ проекта (эталон);
- ЭТХ конкретного вновь созданного СК;
- реальные ЭТХ СК в процессе эксплуатации после каждого пуска;
- приведение ЭТХ СК в процессе подготовки к пуску;
- к эталонным ЭТХ.

Разработка этого направления имеет своей целью создание единой методологии построения систем управления ТСО, которая ляжет в основу информационно-коммуникационных технологий и методик инженерного синтеза интеллектуального анализа данных и информационной поддержки принятия решений, что обусловлено общностью проблем, задач, различных критериев, признаков, параметров и других особенностей, характеризующих процессы и цели управления ТСО при рассмотрении их на некотором общесистемном уровне. Такой концептуальный подход к созданию систем контроля и функционального мониторинга СК и ТК позволит осуществлять координацию и системную совместимость соответствующих работ на основе потребностей и возможностей экономии ресурсов за счет использования готовых методик и информационных технологий.

АО «НИИФИ» г. Пенза разработало и внедрило на СК «Союз» космодрома «Байконур» интеллектуальные системы мониторинга и контроля выполнения технологических процессов подготовки пуска, включающие в свой состав подсистемы наземной безопасности, регистрации и визуализации результатов выполнения операций технологических графиков подготовки и пуска РКН стартовых комплексов, в отличие от существующих, обеспечивающих в реальном времени возможность контролировать действия боевого расчета с учетом меняющейся обстановки в опасной зоне и своевременно принимать меры к недопущению аварийной ситуации. Система реализует следующие функции:

- допуск номеров расчета в сооружения и помещения стартового комплекса в соответствии с требованиями технологического графика подготовки РКН к пуску;
- контроль пребывания и позиционирования номеров расчета (пространственное положение каждого номера расчета на весь период проведения технологических операций подготовки и пуска РКН) в опасных зонах стартового комплекса с использованием RFID-технологии (персональная карта – бэйдж);
- постоянный контроль процентного содержания кислорода в рабочих зонах стартового комплекса, передачу информации на дисплей оператора по наземной безопасности;
- выдача светового и звукового сигнала для оповещения персонала о предельно допустимых значениях процентного содержания кислорода и необходимости немедленно покинуть аварийное помещение или сооружение и управление персоналом по громкой связи;
- измерение температуры магистралей с перекисью водорода, передачу данных на дисплей оператора по наземной безопасности, выдачу предупреждения о превышении допустимой температуры;
- визуальный контроль средствами промышленного телевидения перемещений номеров расчетов в опасных зонах стартового комплекса;
- автоматизированный контроль хода и выполнения технологических операций подготовки пуска РКН;
- автоматизированное оперативное отображение и регистрация в технологическом графике состояния контролируемых параметров оборудования и систем при подготовке к пуску, включающие процессы контроля:
 - пространственного положения передвижных агрегатов;
 - вибрационных и ударных нагрузок передвижных агрегатов с РКН;
 - стыкуемых узлов штрих-кодерами;
 - положения площадок кабины обслуживания;
 - расстояния кабины обслуживания до стены ниши;
 - угла наклона несущих стрел;

- уровня (керосин, пероксид водорода и др.);
- метеопараметров;
- оперативная сигнализация отклонений параметров процесса подготовки от планового хода, возникновения аварийных ситуаций и отказов (неисправностей) наземных систем;
- регистрация и визуализация (распознавание, идентификация) отклонений от планового хода процесса подготовки, в том числе приводящих к аварийным ситуациям, запись данных в «Черный ящик»;
- отображение подсказывающей информации (рекомендаций) по выходу из аварийных ситуаций и устранению отказов или неисправностей;
- информация предоставляется на автоматизированные рабочие места (АРМ) пользователей: АРМ оператора, АРМ руководителя работ, АРМ госкомиссии, АРМ контроля технологических процессов, АРМ видеонаблюдения, средства коллективного наблюдения [15–18].

СМиК обеспечивает интегрированный контроль указанных параметров, что позволяет одному оператору адекватно принимать решения о приостановлении работ или эвакуации обслуживающего персонала на основании полученных данных от датчиков кислорода (где утечка), видеонаблюдения, допуска и позиционирования номеров расчета, которые находятся в опасной зоне. Подсистема допуска и позиционирования имеет обратную связь (тревожная кнопка), которая позволяет в кратчайшие сроки эвакуировать конкретного человека.

Также СМиК позволяет проверить уполномочено или нет конкретное лицо находиться в определенной зоне в определенное время и персонализировать нахождение номеров расчета в зоне выполнения работ в соответствии с технологическим графиком подготовки к пуску РКН – конкретная операция, время, место, безопасность зоны.

Применение штрих-кодов идентификации положений выполненных операций (заправочные шланги, силовые кабели и другое оборудование) позволило автоматизировать контроль выполнения технологических операций и оперативно влиять на ход их проведения.

Применение СМиК повысило безопасность обслуживающего персонала и снизить риск аварийных ситуаций на СК.

Объединение совместных усилий организаций ракетно-космической отрасли позволит окончательно решить задачу обеспечения безопасной эксплуатации космической техники.

Список литературы

1. Бармин, И. В. Вопросы обеспечения безопасности функционирования ракетно-космического стартового комплекса / И. В. Бармин, В. Л. Каджаев // Полет. – 2007. – № 2. – С. 3–11.
2. Обоснование некоторых основных характеристик стартового оборудования космодромов XXI века. / И. В. Бармин, В. А. Зверев, А. Ю. Украинский, В. В. Чугунков, А. В. Языков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 3. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/630.html>
3. Бармин, И. В. Принципы обеспечения надежности и безопасности функционирования ракетно-космического комплекса на этапе предпусковой подготовки / И. В. Бармин, В. Л. Каджаев // Полет. – 2013. – № 8. – С. 53–64.
4. Аникейкин, Н. Д. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. Т. 1. Объекты космической инфраструктуры / Н. Д. Аникейкин, О. А. Антропов, Л. Т. Баранов и др. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
5. Бирюков, Г. П. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов / Г. П. Бирюков, Ю. Ф. Кукушкин, А. В. Торпачев. – М. : Изд-во МАИ, 2002. – 258 с.
6. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов / В. А. Зеленцов, А. П. Ковалев, М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. – Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 5(28).
7. Дмитриенко, А. Г. Синтез информационно-структурных моделей состояния технически сложных объектов наземной инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 405–407.

8. Михеев, М. Ю. Ситуационно-структурный подход к анализу информационных объектов / М. Ю. Михеев, А. Б. Щербань // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 128.
9. Михеев, М. Ю. Синтез обобщенной информационной модели нейросетевой идентификации распределенных информационных объектов / М. Ю. Михеев, Т. В. Жашкова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2009. – Т. 1. – С. 442–444.
10. Дмитриенко, А. Г. Системы интеллектуального анализа данных: методология, реализация, приложения / А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, И. Ю. Семочкина. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2013. – 164 с.
11. Тюрин, М. В. Разработка моделей прогнозирования состояния элементов технически сложного объекта / М. В. Тюрин, С. А. Фомин, О. В. Прокофьев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 73–78.
12. Тюрин, М. В. Реализация систем интеллектуального мониторинга и контроля состояния технически сложных объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры / М. В. Тюрин, Д. И. Волков, А. В. Кердяшов // Датчики и системы – 2011 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 114–115.
13. Дмитриенко, А. Г. Математическое моделирование состояния технически сложных объектов наземной инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2012. – С. 3–9.
14. Дмитриенко, А. Г. Синтез обобщенной математической модели подсистемы нейросетевой идентификации систем мониторинга и контроля состояний технических систем специального назначения / А. Г. Дмитриенко, М. В. Тюрин // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГТА, 2012. – Вып. 15. – С. 8–11.
15. Интеграция беспроводных датчиков в измерительную сеть / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, С. А. Исаков, В. Н. Новиков, О. В. Тужилкин // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 44–46.
16. Дмитриенко, А. Г. Распределенная интеллектуальная система мониторинга состояния сложных технических объектов / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, В. Н. Новиков // Измерительная техника. – 2011. – № 3. – С. 13–15.
17. Дмитриенко, А. Г. Информационная модель интеллектуального датчика / А. Г. Дмитриенко, С. И. Торгашин, И. И. Кочегаров // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд. ПГТА, 2011. – Вып. 14. – С. 77–83.
18. Ляшенко, А. В. Методы распознавания текущего состояния технически сложных объектов наземной космической инфраструктуры / А. В. Ляшенко, А. П. Дергач, Я. С. Ломов // Датчики и системы : сб. тр. XXXI Межрегиональной науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – Пенза : ОАО «НИИФИ», 2013. – С. 11–19.

Дмитриенко Алексей Геннадиевич

доктор технических наук, доцент,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rkarp@pnzgu.ru

Dmitrienko Aleksey Gennadievich

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of rocket-space
and airtation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Белозерцев Александр Иванович

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

Belozertsev Aleksandr Ivanovich

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

Михеев Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: rector@penzgtu.ru

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Ляшенко Антон Валерьевич

начальник конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Mikheev Mikhail Yur'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department
of information technology and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

Tyurin Mihail Vladimirovich

candidate of technical sciences, senior researcher,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Lyashenko Anton Valer'evich

head of the design bureau,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 629.7.08: 047.36

**Элементы концепции обеспечения безопасности объектов наземной космической инфра-
структуры на основе систем контроля и функционального мониторинга / А. Г. Дмитриенко,
А. И. Белозерцев, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин, А. В. Ляшенко // Измерение. Мониторинг. Управление.
Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 13–21.**

УДК 621.317

*П. П. Першенков, А. В. Савенков***ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ДАТЧИК
НА ОСНОВЕ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА***P. P. Pershenkov, A. V. Savenkov***INTELLECTUAL SENSOR BASED
ON PHOTOGALVANIC EFFECT**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Работа посвящена актуальному вопросу практического использования достижений нанотехнологий в измерительной технике. Целью исследования является разработка интеллектуального датчика на основе фотогальванического эффекта для измерения напряженности магнитного поля. *Результаты.* Предложена структура измерительного преобразователя напряженности магнитного поля в электрический ток с последующим аналого-цифровым преобразованием. Для коррекции передаточной характеристики используется микропроцессор. Разработан соответствующий алгоритм. Приведена структурная схема интеллектуального датчика на основе микропроцессора. Предложен алгоритм компьютерной линеаризации передаточной функции фотогальванического преобразователя. *Выводы.* Обоснована возможность использования достижений в области наноразмерных наноструктур, а именно фотогальванического эффекта для построения первичного измерительного преобразователя напряженности магнитного поля. Рассмотренный компьютерный алгоритм позволяет получить линейную передаточную характеристику.

A b s t r a c t. *Background.* Work devoted to topical issues of practical use of nanotechnology advances in measurement technology. The aim is to develop a smart sensor based on the photovoltaic effect to measure magnetic field strength. *Results.* The structure of the transmitter of the magnetic field intensity into an electrical current, followed by analog-to-digital conversion. To correct the transfer characteristic of the microprocessor used. A corresponding algorithm. The block diagram of smart sensor based on a microprocessor. An algorithm for computing the linearization of the transfer function of the photovoltaic inverter. *Conclusions.* The possibility of using advances in nanoscale nanostructures, namely photovoltaic effect for the construction of a primary transmitter magnetic field. Considered a computer algorithm provides a linear transfer characteristic.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик, микропроцессор, измерение, наноструктура, фотогальванический эффект, программирование, магнитное поле, передаточная характеристика, коррекция.

Key words: sensor, measurements, microprocessor, programs, nanostructures, photogalvanic effect, magnetic field.

В последние годы быстрыми темпами происходит внедрение нанотехнологий во все сферы науки и техники, однако практическое внедрение нанотехнологий и наноструктур отстает от быстрого развития теории наноструктур и потребностей науки и техники. В полной

мере это относится к измерительной и датчиковой аппаратуре. В этой связи весьма актуальной и практически значимой является разработка и создание измерительных преобразователей и датчиков на основе достижений теории наноразмерных структур и, в частности, с использованием фотогальванического эффекта.

В статье рассматривается возможность создания датчика магнитного поля на основе фотогальванического эффекта на асимметричной наноструктуре в магнитном поле. В работе [1] исследовались образцы $i\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/i\text{-GaAs}$ ($x = 0,25$) с тремя квантовыми ямами шириной слоев $L_w = 54, 60$ и $70 \text{ \AA}$, разделенных барьерными слоями $L_b = 20$ и $30 \text{ \AA}$. Данная асимметричная система туннельно-связанных квантовых ям находилась между двумя широкими ($200 \text{ \AA}$) барьерными слоями $i\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0,25$) со стороны буферного слоя $i\text{-GaAs}$ (1 мкм) и закрывающего структуру слоя $i\text{-GaAs}$ ($200 \text{ \AA}$). Образцы имели прямоугольную форму размером $8 \times 2 \text{ мм}$ и одну пару контактов, симметрично расположенных вдоль одной линии на расстоянии 4 мм друг от друга. Световое излучение подводилось галогеновой лампой по гибкому световоду диаметром 1 мм . Мощность светового излучения не превышала 5 мВт . Эксперимент показал, что освещенные участки имели сопротивление примерно в 100 раз меньше, чем неосвещенные, а при увеличении светового пятна с 2 до 3 мм ток возрастает более чем в $3,3$ раза.

Как показали экспериментальные исследования фотогальванического эффекта в асимметричной наноструктуре $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ [2], при лазерном облучении образца имеет место линейная зависимость фототока от напряженности магнитного поля (рис. 1) [3].

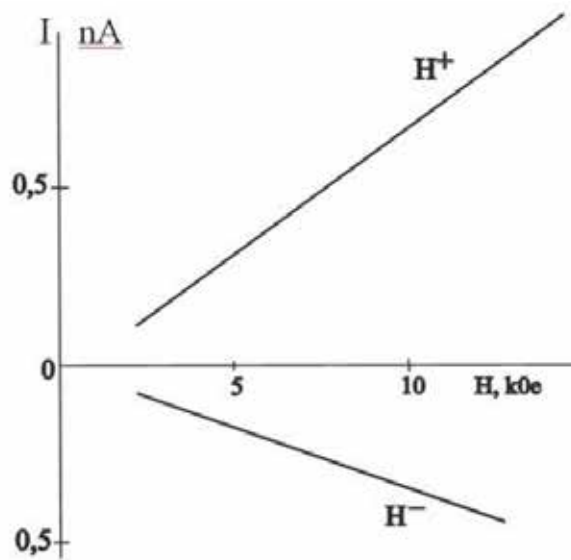


Рис. 1. Зависимость фототока от напряженности магнитного поля

Образец освещался лазером с длиной волны $\lambda = 1,065 \text{ мкм}$, магнитное поле изменялось от нуля до 11 кЭ . Зависимость фототока от напряженности сохраняется и при больших значениях магнитного поля, вплоть до 75 кЭ , но становится нелинейной.

Рассматриваемая асимметричная наноструктура теоретически может быть использована для построения измерительного преобразователя напряженности магнитного поля в электрический ток, причем управление коэффициентом передачи, а также включение и выключение может осуществляться изменением интенсивности светового потока. Как видно из рис. 1, выходной ток такого преобразователя весьма незначителен и требуется использовать прецизионный усилитель. Но при использовании однородных образцов наноструктуры с учетом их крайне малых размеров они легко могут быть соединены в батарею, а это уже позволяет использовать и стандартные аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

На рис. 2 приведена зависимость фототока (I) от напряженности магнитного поля (H) (кривая 1) [2]. Напряженность магнитного поля изменяется от 0 до $\pm 75 \text{ кЭ}$, $T = 283,7 \text{ К}$.

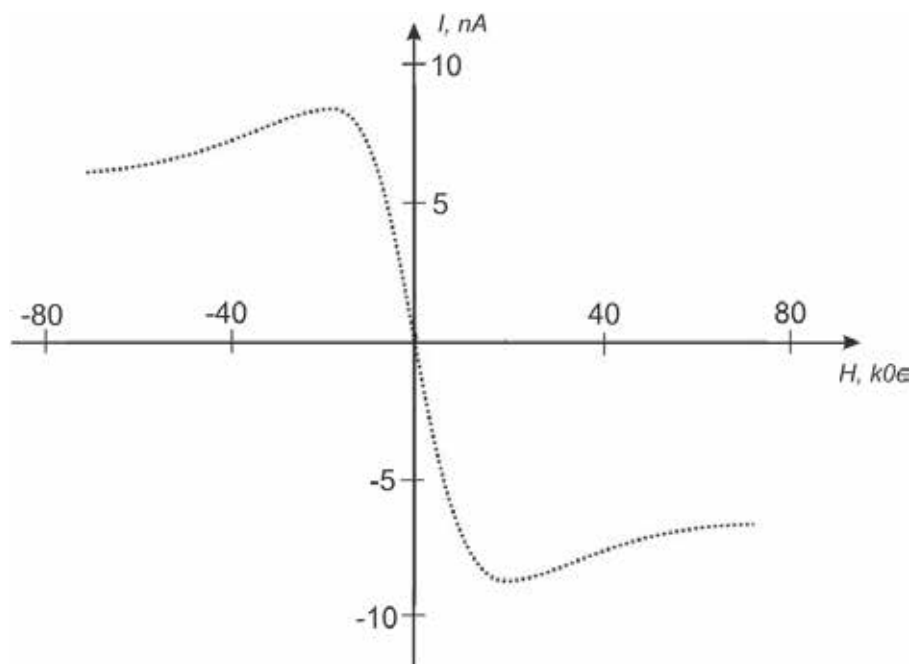


Рис. 2. График зависимости фототока от напряженности магнитного поля

Как следует из результатов экспериментального исследования указанных образцов, вольт-амперная характеристика фотогальванического эффекта (ФГЭ) и зависимость фототока от напряженности магнитного поля нелинейны уже после 10 кЭ.

Это существенно затрудняет использование данных наноструктур в измерительных преобразователях.

Относительно просто проблема нелинейности может быть решена путем создания интеллектуального датчика магнитного поля или светового излучения со встроенным микропроцессором [3–5].

Однако, как показано в работе [1], при увеличении напряжения магнитного поля более 10 кЭ зависимость фототока от напряжения становится нелинейной. Это обстоятельство не позволяет использовать данную структуру в таком виде в качестве датчика или измерительного преобразователя. Авторами данная проблема решается путем создания интеллектуального датчика на основе рассматриваемой наноструктуры и встроенного микропроцессора [3, 5–10].

Примерная схема интеллектуального датчика на основе рассмотренной выше наноструктуры и микропроцессора приведена на рис. 3.

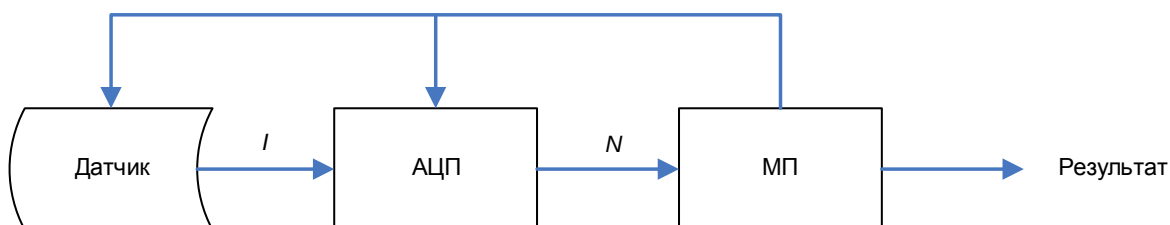


Рис. 3. Структурная схема интеллектуального датчика

Датчик представляет собой чувствительный элемент на основе фотогальванического эффекта. АЦП преобразует входной сигнал датчика (ток) в цифровой с требуемой точностью. Микропроцессор (МП) производит обработку полученной информации, калибровку и коррекцию передаточной характеристики датчика, выполняет другие служебные функции.

Для анализа передаточной характеристики интеллектуального датчика (ИД) рассмотрим алгоритм линеаризации. Допустим, нам необходимо произвести линеаризацию функции пре-

образования $y = f(x)$, график которой представлен на рис. 2. Алгоритм линейризации функции в этом случае выглядит следующим образом (рис. 4):

1. При подаче сигнала $X_0 = 0$, $Y_0 \neq 0$ необходимо произвести «установку нуля» – сменить функцию преобразования так, чтобы при $X_0 = 0$ и $Y_0 = 0$.

2. Рассмотрим часть графика, находящуюся в IV квадранте при изменении X от X_0 до $X_{\max}$. Зеркально отобразим эту часть графика (отрезок AC) относительно оси X , т.е. перенесем ее в I квадрант (рис. 4,б).

3. Находим экстремум функции (точка перегиба графика – X_e). Для нахождения экстремума функции можно использовать любой метод, например, метод дихотомии или метод «золотого сечения» (рис. 4,в). (Выбор метода зависит от удобства его программной реализации для выбранного типа процессора).

4. Производим линейризацию участков графика AB и BC с помощью метода наименьших квадратов. График приобретает вид, показанный на рис. 4,г.

5. Через точки с координатами $(0; Y_e)$ и $(X_e; Y_e)$ проводим линию Y_e .

6. Необходимо зеркально перенести участок графика BC относительно линии Y_e . Его описывает уравнение вида $y = y_e - kx$. Нам необходимо преобразовывать график так, чтобы его описывало уравнение вида $y = y_e + kx$. В общем виде алгоритм можно записать так:

6.1. Для некоторой точки участка BC (рис. 4,д) находим $\Delta Y = Y_e - Y_i$.

6.2. Проводим преобразование (рис. 4,е): $Y_i = Y_i + 2\Delta Y_i$.

6.3. Выполняем аналогичные действия для всех остальных точек участка BC .

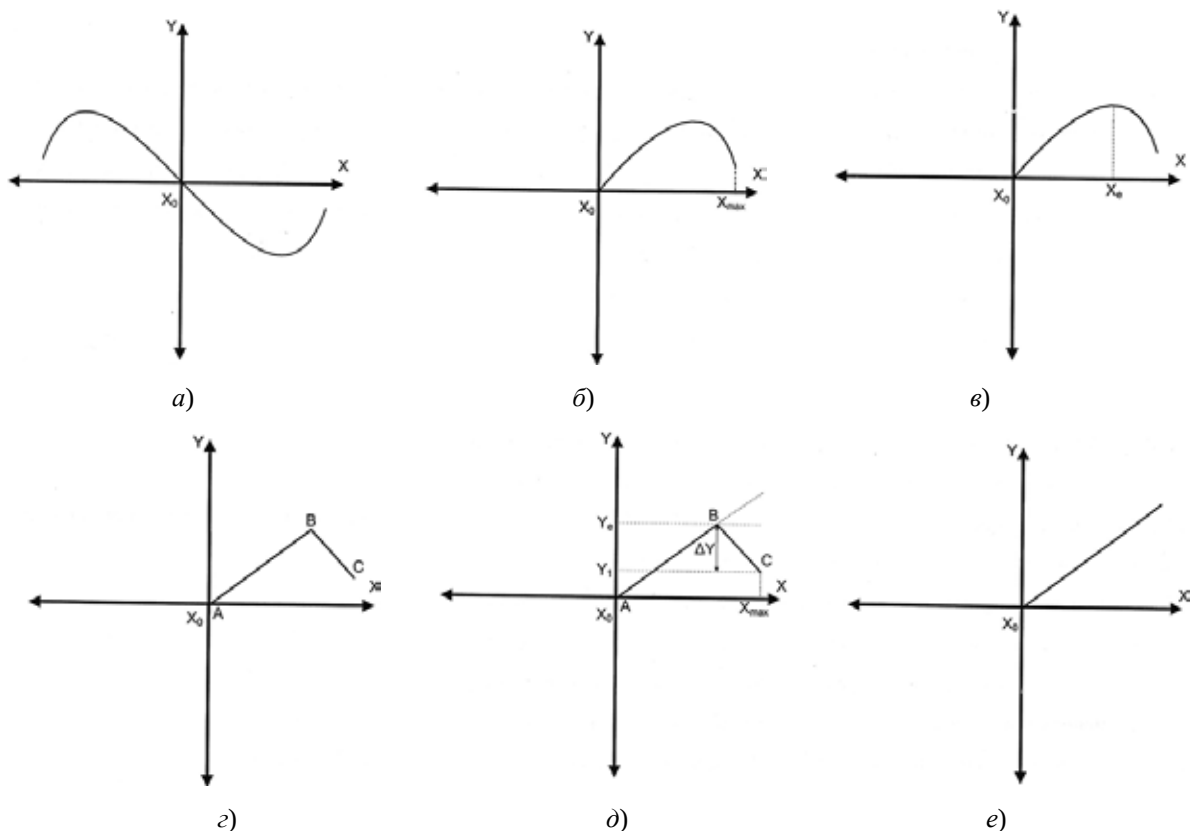


Рис. 4. Алгоритм линейризации функции $y = f(x)$:

a – график функции $y = f(x)$; b – зеркально отраженная часть графика;
 $в$ – нахождение точки экстремума; $г$ – линейризованные отрезки графика;
 $д$ – смещение отрезка $X_e X_1$; $е$ – линейризованный график функции $y = f(x)$

На рис. 5 приведена блок-схема алгоритма программы линейризации для ИД, а также блок-схема алгоритма подпрограммы зеркального отображения отрезков, которая используется при выполнении программы линейризации.

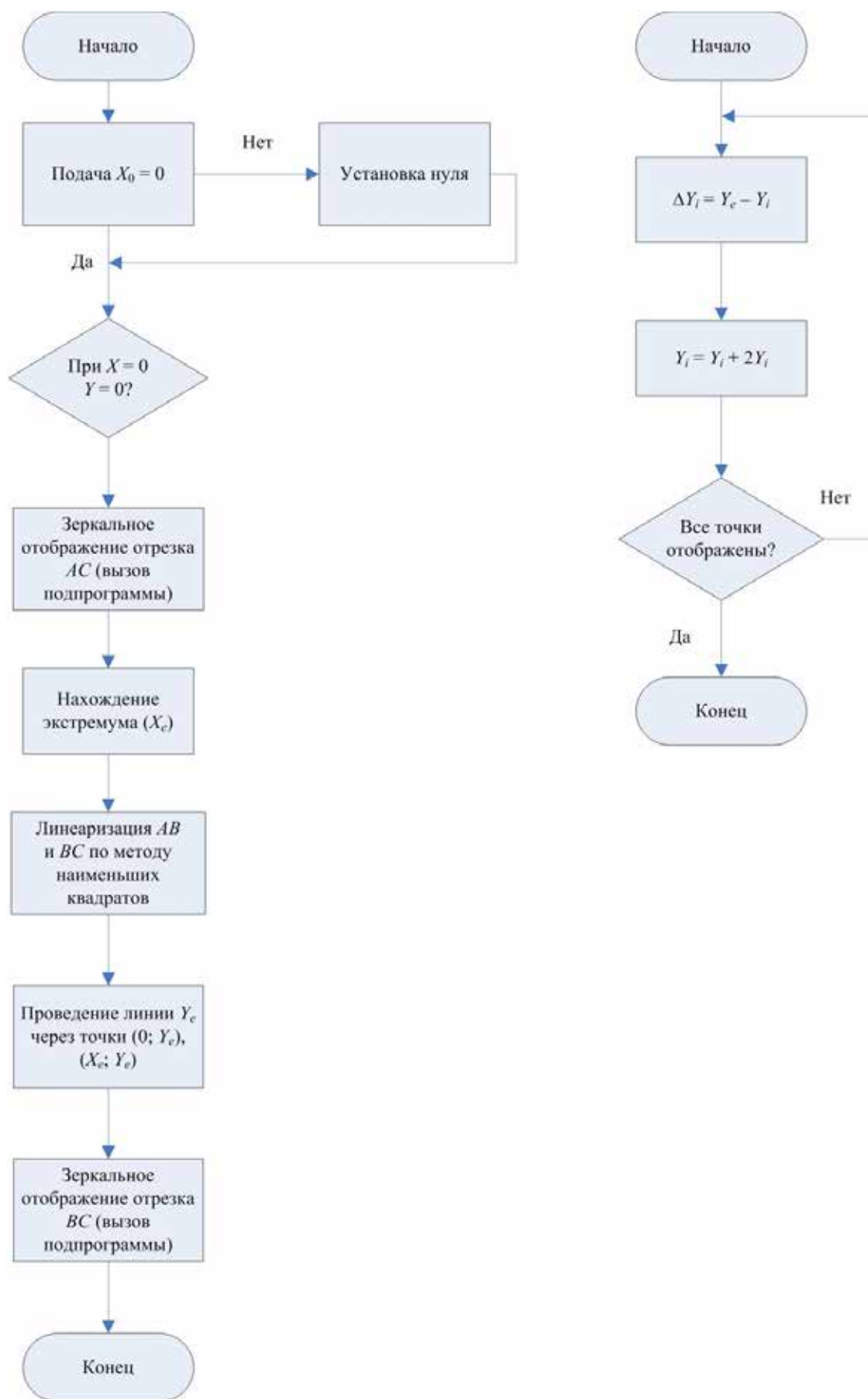


Рис. 5. Блок-схема алгоритма программы линеаризации

На рис. 6 показаны передаточные характеристики ИД после выполнения программы линейаризации (кривые 2 и 3).

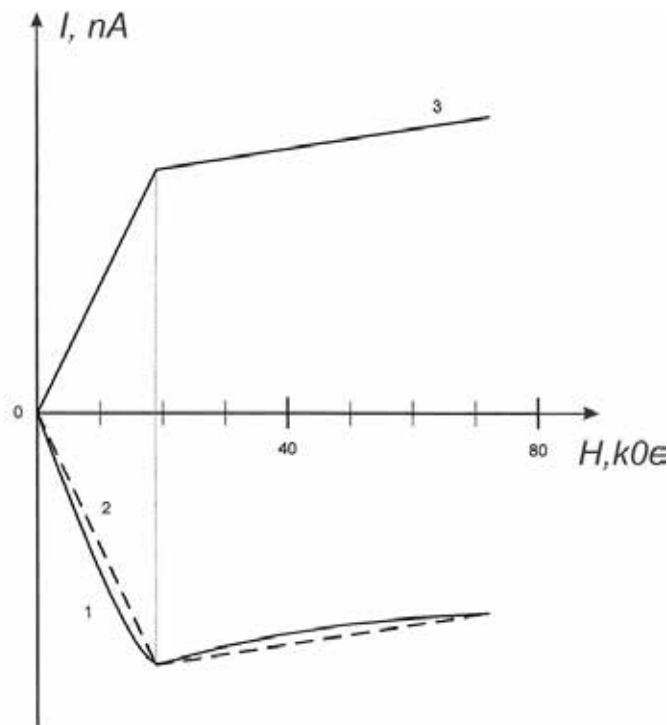


Рис. 6. Передаточные характеристики ИД после выполнения программы линейаризации

Такая передаточная характеристика позволяет работать в диапазоне от 0 до 80 кЭ с разбивкой на два поддиапазона.

Список литературы

1. Омеляновский, О. Е. Фотогальванический эффект в асимметричной системе трех квантовых ям в сильном магнитном поле / О. Е. Омеляновский, В. И. Цербо, В. И. Кадушкин // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1996. – Т. 63, № 3. – С. 197–202.
2. Кучеренко, И. В. Фотогальванический эффект в асимметричной наноструктуре GaAs/AlGaAs при лазерном возбуждении / И. В. Кучеренко, Л. К. Водопьянов, В. И. Кадушкин // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31, № 7.
3. Першенков, П. П. Применение интеллектуальных датчиков в современных ИИС / П. П. Першенков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 68–69.
4. Першенков, П. П. Применение интеллектуальных датчиков в измерителе давления / П. П. Першенков, Е. А. Тюрин // Перспективные технологии искусственного интеллекта : сб. тр. науч.-практ. конф. – Пенза, 2008. – С. 190.
5. Першенков, П. П. Перспективы применения наноразмерных структур в измерительных преобразователях и детекторах / П. П. Першенков, В. Д. Кревчик, А. В. Иванов // Информационно-измерительная техника. – 2012. – Вып. 37. – 2012. – С. 39–44.
6. Першенков, П. П. Применение интеллектуальных датчиков в современных ИИС / П. П. Першенков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 68–67.
7. Першенков, П. П. Исследование возможности измерения частоты электросети методом трех мгновенных значений / П. П. Першенков, О. В. Башкиров, Е. А. Тюрин / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки Пенза. – 2008. – № 4. – С. 107–116.
8. Полосин, В. Г. Информационный способ идентификации несимметричных распределений / В. Г. Полосин, П. П. Першенков // Измерительная техника. – 2013. – № 12. – С. 8–11.

9. Першенков, П. П. Датчики на основе наноразмерных структур / П. П. Першенков, К. В. Иванов // XIV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводниковой опто- и наноэлектроники : материалы конф. – СПб., 2012. – С. 87.
10. Иванов, К. В. Асимметричные наноструктуры в измерительной технике и системах диагностики / К. В. Иванов, В. Д. Кревчик, П. П. Першенков // Методы создания, исследования микро-, наноэлектроники : материалы III Всерос. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – С. 86–88.

Першенков Петр Петрович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра физики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peter@pnzgu.ru

Pershenkov Petr Petrovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of physics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Савенков Александр Валерьевич

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

Savenkov Aleksandr Valer'evich

applicant,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317

Першенков, П. П.

Интеллектуальный датчик на основе фотогальванического эффекта / П. П. Першенков, А. В. Савенков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 22–28.

А. А. Трофимов, Б. В. Цыпин

ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ

A. A. Trofimov, B. V. Tsypin

THE SENSOR OF ANGULAR MOVEMENTS WITH THE DIGITAL OUTPUT

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Предметом исследования является трансформаторный датчик угловых перемещений с цифровым выходом, целью – разработка и исследование трансформаторного датчика угловых перемещений, работающего в жестких условиях эксплуатации с заданными метрологическими и эксплуатационными характеристиками. *Материалы и методы.* Разработана схема замещения и математическая модель датчика угловых перемещений, позволившая вывести выражение для расчета выходной ЭДС секций измерительной обмотки трансформаторного датчика. Предложена структурная схема вторичного преобразователя, предназначенного для преобразования выходных сигналов с датчика в цифровой последовательный код. *Результаты.* Выведены основные выражения для расчета ЭДС секций измерительной обмотки трансформаторного датчика в зависимости от перемещения сердечника, позволившие на этапе проектирования определить чувствительность и характер выходного сигнала. *Выводы.* Полученные технические и эксплуатационные характеристики в сочетании с простотой и технологичностью конструкции позволяют применять разработанный датчик в измерительных и управляющих системах.

A b s t r a c t. *Background.* The subject of this study is to transformer rotary encoder with digital output. The aim is the development and research of transformer angular displacement sensor operating in harsh conditions with the specified metrological and performance. *Materials and methods.* A equivalent circuit and mathematical model of rotary encoder, which allows to derive an expression for the calculation output emf sections measuring winding transformer sensor. The structural scheme secondary converter designed to convert the sensor output signals to a digital serial code. *Results.* Derived basic expression for calculating the emf transformer winding sections measuring sensor according to the movement of the core, which allowed the design phase to determine the sensitivity and the nature output signal. *Conclusions.* The resulting technical and operational characteristics, combined with ease of manufacturability and design allow the use of a sensor designed for measurement and control systems.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик перемещений, взаимная индуктивность, вторичный преобразователь, статор, ротор, микроконтроллер.

К е у w o r d s: motion sensor, mutual inductance, the secondary transducer, a stator, a rotor, a microcontroller.

Эффективность развития и эксплуатации современных автоматизированных систем контроля и управления различными технологическими процессами во многом определяется технико-экономическими характеристиками первичных средств сбора и обработки информации, среди которых значительный удельный вес имеют датчики угловых перемещений [1–4].

Информация с датчиков о контролируемых процессах поступает в автоматизированные системы управления, и ее достоверность определяется метрологическими и надежностными

характеристиками датчиков. При этом к датчикам угловых перемещений предъявляется широкий комплекс метрологических и эксплуатационных требований, зачастую противоречащих, а иногда и исключающих друг друга.

Одним из основных требований является сохранение высоких метрологических характеристик при воздействии жестких дестабилизирующих факторов: механических ударов, вибраций, линейных ускорений, влажности, широкого диапазона воздействующих температур. Другим немаловажным требованием является наличие минимальных габаритных размеров и массы датчика [5, 6].

Для решения этой задачи разработан взаимноиндуктивный датчик перемещений, отличающийся малыми габаритными размерами и высокой точностью при работе в жестких условиях эксплуатации. Основные элементы конструкции датчика представлены на рис. 1.

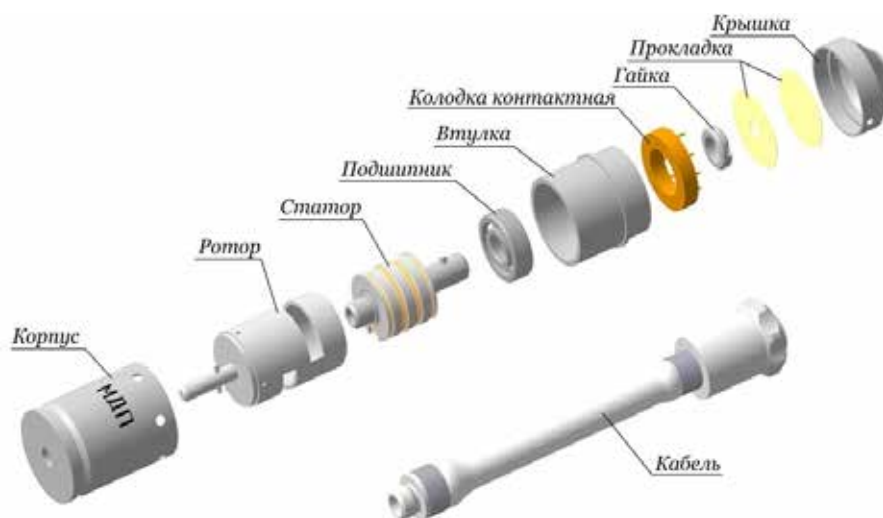


Рис. 1. Основные элементы датчика угловых перемещений

По принципу преобразования датчик является дифференциальным трансформатором. Датчик состоит из корпуса, статора, в кольцевых проточках которого расположены обмотки возбуждения и считывания, ротора с перфорированными окнами и кабельной перемычки, оканчивающейся разъемом. Выводы обмоток припаяны к штырям контактной колодки. Ротор располагается снаружи статора. Статор закреплен в отверстии корпуса, ротор установлен на подшипниках качения.

Для уменьшения составляющей дополнительной погрешности от воздействия температуры, вибрации, ударов, линейных ускорений необходимо найти функцию преобразования датчика и определить параметры, которые могут повлиять на метрологические и надежность характеристики датчика в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов. Для решения поставленной задачи составим схему замещения трансформаторного датчика угловых перемещений, приведенную на рис. 2.

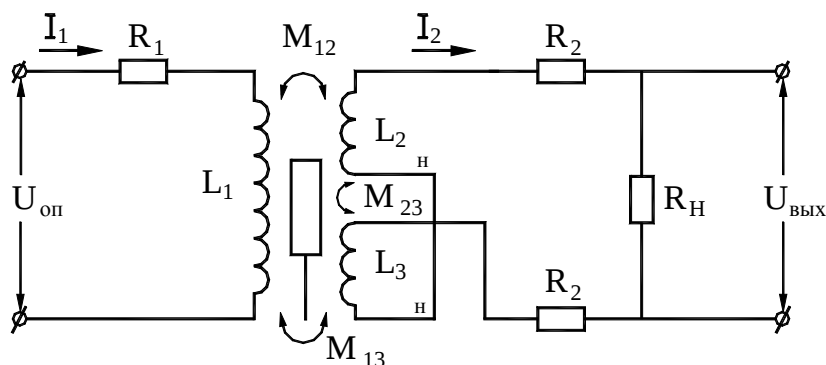


Рис. 2. Схема замещения трансформаторного датчика угловых перемещений

На схеме замещения приняты следующие обозначения: R_1 – активное сопротивление обмотки питания; R_2 – активное сопротивление секции измерительной обмотки; $U_{\text{оп}}$ – напряжение, поступающее на обмотку питания; L_1 – индуктивность обмотки питания; M_{12} и M_{13} – взаимные индуктивности соответственно верхней и нижней секций измерительной обмотки и обмотки питания; M_{23} – взаимные индуктивности секций измерительной обмотки; L_2 и L_3 – индуктивности соответственно верхней и нижней секций измерительной обмотки; R_n – сопротивление нагрузки; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение.

Уравнения Кирхгофа для цепи первичной обмотки имеют вид

$$U_{\text{оп}} = (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega (M_{12} - M_{13})I_2, \quad (1)$$

где $M_{12} = k\sqrt{L_1 L_2}$; $M_{13} = k\sqrt{L_1 L_3}$; k – коэффициент связи катушек, показывающий, какая доля потока, созданного током в контуре, пронизывает соседний контур.

Для цепи вторичной обмотки имеем

$$[2R_2 + R_n + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]I_2 - j\omega (M_{12} - M_{13})I_1 = 0, \quad (2)$$

где $M_{23} = k\sqrt{L_2 L_3}$

Выражение для тока нагрузки имеет следующий вид:

$$I_2 = \frac{j\omega U_{\text{оп}} (M_{12} - M_{13})}{\omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 + (R_1 + j\omega L_1)[2R_2 + R_n + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]}. \quad (3)$$

Выходное напряжение трансформаторного датчика угловых перемещений равно

$$U_{\text{вых}} = I_2 R_n = \frac{j\omega U_{\text{оп}} R_n (M_{12} - M_{13})}{\omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 + (R_1 + j\omega L_1)[2R_2 + R_n + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]}. \quad (4)$$

Угол сдвига фазы выходного напряжения относительно напряжения питания равен

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega [R_1 (L_2 + L_3 - 2M_{23}) + L_1 (2R_2 + R_n)]}{R_1 (2R_2 + R_n) + \omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 - \omega^2 L_1 [L_2 + L_3 - 2M_{23}]}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) характеризуют выходное напряжение трансформаторного датчика угловых перемещений для определенного положения сердечника. Из уравнения (4) видно, что для достижения линейного выходного напряжения датчика необходимо, чтобы при перемещении якоря индуктивность первичной обмотки L_1 и величина $(L_2 + L_3 - 2M_{23})$ оставались неизменными, а разность взаимных индуктивностей $(M_{12} - M_{13})$ изменялась линейно в зависимости от величины перемещения якоря.

Для дифференциального трансформатора, имеющего линейную характеристику преобразования при $R_n \rightarrow \infty$ большинством членов уравнений (4) и (5) можно пренебречь [7–10].

Выходное напряжение с датчика будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{j\omega U_{\text{оп}} (M_{12} - M_{13})}{R_1 + j\omega L_1}. \quad (6)$$

Значение угла сдвига фазы будет определяться как

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega L_1}{R_1}. \quad (7)$$

ЭДС секций вторичной обмотки трансформаторного датчика в соответствии с [2] определяется следующими выражениями:

$$E_1 = \omega M_o \frac{U_{\text{оп}}}{Z_{\text{оп}}} \left(1 - \frac{mx}{M_o} \right); \quad (8)$$

$$E_2 = \omega M_0 \frac{U_{\text{оп}}}{Z_{\text{оп}}} \left(1 - \frac{mx}{M_0} \right), \quad (9)$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота напряжения питания; M_0 – взаимная индуктивность секции вторичной обмотки и первичной обмотки при расположении сердечника на нейтрали трансформаторного датчика; $Z_{\text{оп}}$ – полное сопротивление первичной обмотки (обмотки питания); x – перемещение сердечника относительно электрической нейтрали датчика; m – изменение взаимной индуктивности секции вторичной обмотки и первичной обмотки.

Выражая величины E_1 и E_2 в долях выходной ЭДС, приходящейся на единицу перемещения якоря, получим

$$E_1 = a U_{\text{оп}} \left(1 - \frac{ex}{a} \right) = E_0 \left(1 - \frac{ex}{a} \right); \quad (10)$$

$$E_2 = a U_{\text{оп}} \left(1 + \frac{ex}{a} \right) = E_0 \left(1 + \frac{ex}{a} \right), \quad (11)$$

где E_0 – ЭДС на зажимах секций вторичной обмотки при расположении якоря в электрической нейтрали датчика; e – изменение вторичной ЭДС, приходящееся на единицу перемещения сердечника

$$a = \frac{\omega_0 M_0}{Z_{\text{оп}}} = \frac{E_0}{E_{\text{оп}}}. \quad (12)$$

Значение выходной ЭДС датчика при встречном включении вторичной обмотки определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = E_2 - E_1 = 2E_0 \frac{e}{a} x. \quad (13)$$

В полученном выражении, в отличие от выражения (7), значение выходной ЭДС датчика непосредственно связано с перемещением сердечника.

Для дальнейшей обработки выходной сигнал через кабельную перемычку поступает во вторичный преобразователь. Структурная схема вторичного преобразователя приведена на рис. 3.

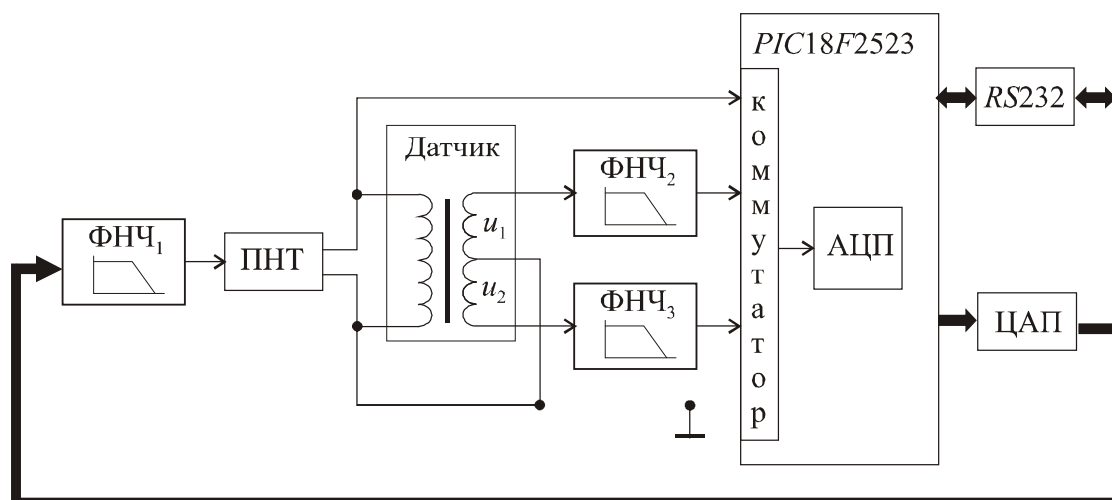


Рис. 3. Структурная схема вторичного преобразователя для датчика угловых перемещений

Преобразователь реализован на микроконтроллере *PIC18F2523*, в состав которого входит 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь с входным коммутатором. Обмотка воз-

буждения датчика питается от источника синусоидального тока с частотой 7 КГц, в состав которого входят 8-разрядный цифроаналоговый преобразователь, фильтр нижней частоты (ФНЧ₁) и преобразователь напряжение–ток (ПНТ). Цифроаналоговый преобразователь управляется микроконтроллером.

Напряжения u_1 и u_2 обмоток считывания датчика через фильтры нижней частоты ФНЧ₂ и ФНЧ₃ подаются на вход АЦП. Измерение амплитуд напряжений производится в моменты максимума сигналов. Оцифрованные значения амплитуд напряжений u_1 и u_2 используются для расчета кода перемещения N по формуле

$$N = \left(\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \cdot k_1 + k_2 \right) \cdot k_t, \quad (14)$$

где k_1, k_2 – нормирующие коэффициенты; k_t – поправочный температурный коэффициент.

Значения нормирующих и поправочного коэффициентов определяются в процессе настройки датчика и хранятся в памяти микроконтроллера. Для введения температурных поправок один раз в минуту производится измерение омического сопротивления обмотки возбуждения датчика, которое изменяется в зависимости от рабочей температуры. Для этого по команде микроконтроллера источник питания обмотки возбуждения датчика в течение 10 мс вырабатывает постоянный ток силой в 1 мА. Падение напряжения на первичной обмотке, зависящее от температуры, оцифровывается, и в зависимости от полученного результата задается значение k_t .

Связь датчика с внешней аппаратурой производится по интерфейсу RS232. В зависимости от внешних сигналов управления возможно изменение формата выходного кода – в относительных единицах или в единицах перемещения – и изменение периодичности проведения температурной коррекции.

Основные технические характеристики датчика приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики датчика угловых перемещений

Наименование	Значение
Диапазон измерений, град	0–160
Основная приведенная погрешность, %, не более	0,2
Выходной сигнал	последовательный двоичный код
Рабочая температура, °С	от минус 60 до 100
Масса датчика, кг	0,1
Масса вторичного преобразователя, кг	0,3
Вибрация, g	40
Частота, Гц	5–5000

Из приведенных в табл. 1 характеристик можно сделать вывод, что применение новой технологичной малогабаритной конструкции и использование микропроцессорной обработки сигнала позволило создать датчик угловых перемещений с цифровым выходом, имеющий расширенный диапазон измерений и меньшее значение основной погрешности по сравнению с ранее разработанными.

Список литературы

1. Дмитриенко, А. Г. Вихретоковые чувствительные элементы для бесконтактных датчиков перемещений / А. Г. Дмитриенко, А. А. Трофимов, Д. И. Нефедьев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 4–10.
2. Баринев, Н. И. Датчики углового положения для внутритрубоного профилемера / Н. И. Баринев, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2004. – № 2. – С. 37–39.
3. Баринев, Н. И. Датчик углового положения лопаток направляющих аппаратов компрессора / Н. И. Баринев, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2004. – № 5. – С. 43–45.

4. Трофимов, А. А. Датчик угловых перемещений / А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 13–14.
5. Дмитриенко, А. Г. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники / А. Г. Дмитриенко, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 18–21.
6. Трофимов, А. А. Датчик угловых перемещений для системы контроля параметров шасси / А. А. Трофимов, В. Н. Новиков, С. Ф. Горбунов // Датчики и системы. – 2008. – № 7. – С. 55–58.
7. Шидлович, Л. Х. Дифференциальные трансформаторы и их применение / Л. Х. Шидлович. – М., 1966.
8. Трофимов, А. А. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений / А. А. Трофимов, Н. Д. Конаков // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 8–10.
9. Гаврилов, В. А. Система измерения линейных перемещений / В. А. Гаврилов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 44–46.
10. Дмитриенко, А. Г. Математическая модель, расчет и оптимизация взаимоиндуктивных датчиков линейных перемещений / А. Г. Дмитриенко, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов, В. Л. Кирьянов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 16–19.

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cypin@yandex.ru

Tsy-pin Boris Vul'fovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of rocket-space
and aviation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 531.714.2

Трофимов, А. А.

Датчик угловых перемещений с цифровым выходом / А. А. Трофимов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 29–34.

В. Н. Белопухов, С. Ю. Боровик, М. М. Кутейникова

**АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ
ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ
ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

V. N. Belopukhov, S. Yu. Borovik, M. M. Kuteynikova

**THE OPERATION ALGORITHMS OF THE SYSTEMS
FOR MEASURING OF IRREGULAR SHAPED BLADES TIPS'
RADIAL AND AXIAL DISPLACEMENTS**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрена задача измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и повышенной кривизны поверхности, применяемых в турбинах современных газотурбинных двигателей. Даны краткие описания особенностей методов измерения таких смещений на основе применения распределенных кластеров одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительными элементами в виде отрезка проводника. Целью исследования являлась разработка основных алгоритмов функционирования систем измерения, реализующих указанные методы. *Материалы и методы.* В качестве основных методов применены численный анализ, аппроксимационные методы, теория алгоритмов. *Результаты.* Предложены алгоритмы функционирования систем, реализующих методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, в том числе алгоритмы предварительной обработки и сжатия исходной измерительной информации, а также определения цифровых кодов, соответствующих информативным сигналам датчиков в моменты прохождения торцами контролируемых лопаток их чувствительных элементов. *Выводы.* Приведенные в статье решения обеспечивают сжатие данных и их передачу на верхний уровень в ПЭВМ в ограниченном объеме, что повышает быстродействие системы, а также уменьшение погрешности дискретизации за счет восстановления огибающей кодов путем интерполяционной обработки на основе аппроксимации выборок кодов полиномами Чебышева I рода или квадратичной параболой с последующим нахождением экстремума восстановленной функции.

A b s t r a c t. *Background.* The paper discusses the problem of measuring of radial an axial displacements of blades tips' used in turbines of modern gas-turbine engines. The blades have irregular shape and enhanced surface curvature. The peculiarity of measuring methods based on use of distributed clusters of single-coil eddy-current sensors with sensitive elements made as a conductor strip is considered. The aim of the article is to present the main operation algorithms of the systems that realize these methods. *Materials and methods.* The main methods are: the numerical analysis, approximation methods and the theory of algorithms. *Results.* The operation algorithms of the systems that realize the methods of measuring of blades tips' with irregular shape radial an axial displacements are proposed. The algorithms include the procedure of preliminary data processing and data compressing as well as a detecting of digital codes that correspond to sensors informative signals when blades tips are passing the sensitive element.

Conclusions. The algorithm of preliminary data processing provides input data compressing before their transmission on upper level in PC. That increases the system operation speed. The algorithms of a detecting of digital codes decreases a digitizing error due to the code envelope reconstruction with the help of interpolation processing on the base of Chebyshev polynomial or parabolic approximation of code samples with further extreme detection.

К л ю ч е в ы е с л о в а: одновитковый вихретоковый датчик, радиальные и осевые смещения, турбина, лопатки сложной формы, система измерения, алгоритмы функционирования.

К e y w o r d s: single-coil eddy-current sensor, radial and axial displacements, turbine, complex shaped blades, measuring system, operation algorithms.

Введение

В современном энергетическом машиностроении основные проблемы определяются противоречивыми требованиями обеспечения высоких энергетических, экономических и экологических показателей силовых установок при условии сохранения их высокой надежности и ресурса. Применительно к газотурбинным двигателям (ГТД) одним из наиболее значимых параметров, определяющих надежность и экономичность, является величина радиального зазора (РЗ) между статором и торцами рабочих лопаток компрессора и турбины [1, 2]. Поэтому вопросы получения достоверной измерительной информации о перемещениях элементов конструкции двигателя, формирующих зазоры, являются очень важными для разработчиков ГТД.

Необходимо отметить, что измерение РЗ происходит в экстремальных условиях: температура более 500 °С в компрессоре и свыше 1000 °С в турбине, высокий уровень вибраций, загрязненность и интенсивная ионизация газозвдушного тракта, околозвуковые линейные скорости перемещения лопаток и др. При этом торцы лопаток в рабочем режиме совершают сложное многомерное движение и их смещение в радиальном направлении, от которых зависит зазор, является лишь одной из возможных координатных составляющих.

В работе [3] приведены описания методов измерения многокоординатных смещений торцов лопаток (в том числе и РЗ) с помощью сосредоточенных или распределенных кластеров (групп) одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [4], удовлетворяющих указанным условиям применения¹. Однако кластерные методы [3] ориентированы на использование в компрессорах, лопатки которых имеют сравнительно простую форму и невысокую степень кривизны поверхности пера, что существенно упрощает обработку первичной измерительной информации и выделение информативного параметра – минимального значения индуктивности рабочего ЧЭ в момент его прохождения торцом контролируемой лопатки.

Лопатки, применяемые в турбинах современных ГТД, характеризуются сложной формой и повышенной кривизной поверхности (сечение плоскостью, перпендикулярной оси лопатки, имеет ярко выраженную серповидную форму, а сечение плоскостью, параллельной ее оси, – U-образную, что связано с выступами боковых поверхностей ее спинки и корыта над «дном»). Такая кривизна и вид сечения приводят к эффекту «двоения» минимумов при прохождении рабочего ЧЭ выступами в торцевой части турбинной лопатки, что ограничивает применение методов [3].

В работах последних лет [5, 6] приведено описание двух кластерных методов измерения радиальных и осевых смещений (y , x координат) торцов турбинных лопаток, свободных от указанных ограничений. Методы отличаются местом размещения распределенного кластера ОВТД относительно контролируемой лопатки, углом разворота ЧЭ относительно оси вращения лопаточного колеса (оси Z) и информативными значениями индуктивности ЧЭ, выполняющего рабочие функции при его прохождении контролируемой лопаткой.

¹ Число датчиков в кластере зависит от числа искомых координат при определенной топологии размещения ЧЭ относительно торцевой части лопаток.

В соответствии с первым методом (*meth1*) распределенный кластер из двух ОБТД смещен в сторону хвостовой части лопатки и угол разворота ЧЭ относительно оси Z составляет 30–60° против часовой стрелки. Такое размещение датчиков позволило устранить эффект «двоения» минимумов индуктивностей рабочих ЧЭ, однако привело к существенному снижению чувствительности и уменьшению диапазона измерений осевых смещений.

Согласно второму методу (*meth2*) тот же кластер ОБТД смещен в сторону головной части лопатки и разворот ЧЭ составляет 60° по часовой стрелке. При этом эффект «двоения» минимумов индуктивностей рабочего ЧЭ сохраняется, а в качестве информативного выбирается наименьшее значение индуктивности. Как следует из [6], *meth2* обеспечивает вдвое большую чувствительность к РЗ и расширение диапазона измерений осевых смещений в пять раз в сравнении с *meth1*.

Настоящая статья посвящена алгоритмам функционирования систем измерения радиальных и осевых смещений торцов турбинных лопаток сложной формы, реализующим оба метода (*meth1* и *meth2*). Рассматриваются алгоритмы предварительной обработки и сжатия входных данных, а также вычисления экстремальных значений кодов, соответствующих минимумам функции изменения индуктивности рабочего ЧЭ при прохождении его торцами контролируемых лопаток.

Алгоритмы функционирования системы

Как уже отмечалось, методы *meth1* [5] и *meth2* [6] предусматривают применение распределенного кластера из двух ОБТД (ОБТД₁ и ОБТД₂), которые включаются в измерительную цепь (ИЦ) с импульсным питанием, реализующую метод первой производной [3]. В такой ИЦ изменения индуктивностей ЧЭ ОБТД, соответствующие искомым координатам смещений, преобразуются в линейно-нарастающие напряжения, амплитудные значения которых приближенно равны значениям первой производной токов цепи при импульсном питании заданной длительности, а затем осуществляется аналого-цифровое преобразование амплитудных значений [7].

Полученные коды подвергаются предварительной цифровой обработке, целью которой является отбраковка заведомо недостоверной информации и сжатие данных, которое подразумевает фиксацию только частей массива, содержащих полезную информацию об искомым координатах. В «упакованном» таким образом массиве кодов выделяются участки, соответствующие прохождению лопатками ЧЭ ОБТД₁ и ЧЭ ОБТД₂. Выборки кодов аппроксимируются и находятся экстремальные значения аппроксимирующих функций. При этом методы *meth1* и *meth2* [5, 6] не предполагают синхронизацию опроса с вращением рабочего колеса – «распознавание» лопаток осуществляется в ходе обработки «упакованного» массива данных с помощью специальных маркеров-разделителей, встраиваемых в массив на этапе предварительной обработки.

Найденные экстремальные значения кодов и градуировочные характеристики измерительных каналов обеспечивают вычисление искомым x , y координат смещений торцов лопаток [8]. При этом для уменьшения температурной погрешности предварительно осуществляется термокоррекция градуировочных характеристик на основе информации о температуре в зоне измерения, полученной с помощью встроенных в ОБТД термопар (ТП) [9].

Ниже подробно рассматриваются алгоритмы предварительной обработки и вычисления экстремальных значений кода.

Алгоритм предварительной обработки информации о координатах смещений торцов лопаток

На рис. 1 представлены изменения во времени кодов $C(t)$ на выходе ИЦ, реализующих *meth1* и *meth2*. При этом изменения кодов $C(t)$ показаны в интервале времени, когда лопатка под номером 1 проходит ЧЭ₁ ОБТД₁ и ЧЭ₂ ОБТД₂, выполняющих рабочие функции, т.е. в моменты t_1 и t_4 , которым соответствуют минимумы индуктивностей ЧЭ и экстремальные значения кодов [6].

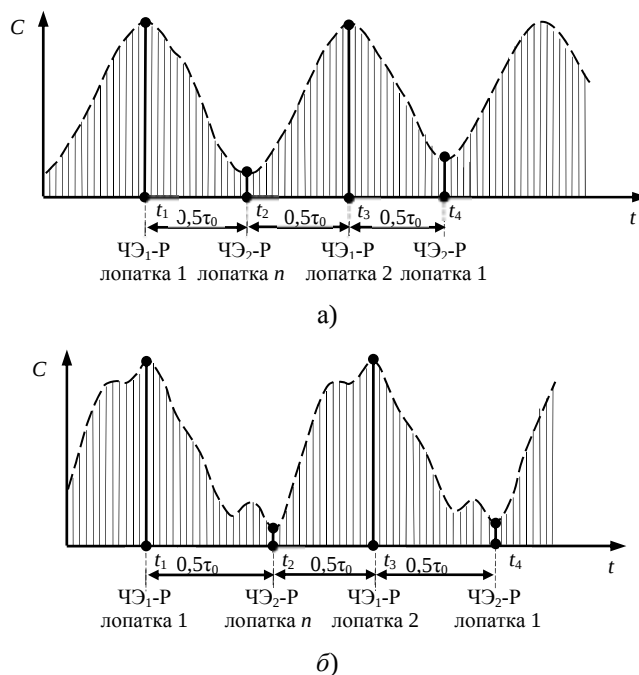


Рис. 1. Изменения во времени цифровых кодов на выходах измерительных цепей, реализующих *meth1* (а) и *meth2* (б)

Если период вращения лопаточного колеса T_0 и число лопаток $n_{\text{л}}$, то период появления каждой лопатки в зонах чувствительности датчиков составит $\tau_0 = T_0/n_{\text{л}}$. В соответствии с методами *meth1* и *meth2* [5, 6] ЧЭ₁ и ЧЭ₂ смещены относительно друг друга на $1,5\Psi_{\text{л}}$, где $\Psi_{\text{л}}$ – угловой шаг установки лопаток на колесе. Тогда интервал времени $t_4 - t_1$ составит $1,5\tau_0$, а каждый из интервалов $t_2 - t_1$, $t_3 - t_2$, $t_4 - t_3$ будет равен $0,5\tau_0$. При частоте вращения рабочего колеса 3000 об/мин ($T_0 = 20 \cdot 10^{-3}$ с) и числе лопаток $n_{\text{л}} = 100$ период $\tau_0 = 200 \cdot 10^{-6}$ с, а интервалы $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3 = 100 \cdot 10^{-6}$ с. Если частота импульсов питания составит 1 МГц (период 10^{-6} с), то число отсчетов в интервале $100 \cdot 10^{-6}$ с будет 10^2 , а при частоте 10 МГц – 10^3 . Это означает очевидную избыточность данных, поступающих с выхода измерительной цепи, при фиксации лишь экстремальных значений кодов и, как следствие, необходимость их сжатия¹.

Огибающая временной развертки выходных кодов измерительной цепи (см. рис. 1) имеет колебательный характер со значительным диапазоном изменения амплитудных, т.е. экстремальных, значений, зависящих от координат смещений торцов лопаток, причем при реализации *meth2* наблюдается дополнительный неинформативный экстремум. В этих условиях представляется эффективным использование известного алгоритма детектирования экстремумов [10], основанного на применении адаптивного порога, величина которого зависит от экстремального значения. Этот алгоритм позволяет выделить окрестность экстремума с управляемой длительностью и осуществить сжатие.

На рис. 2,а показана функциональная схема базовой операции детектирования экстремальных значений кода (C_s), которая включает операции детектирования экстремума (ДЭ), масштабирующего деления (Д) и сравнения кодов (компаратор К). На рис. 2,б изображены огибающая входного кода $C(t)$ (1) и процесс формирования адаптивного порога (2) (предполагается, что экстремальное значение кода – это его максимум (C_{max})). После прохождения точки экстремума в момент t_0 ДЭ фиксирует величину адаптивного порога на уровне $\alpha \cdot C_{\text{max}}$ (где $\alpha < 1$) и на спаде сигнала происходит переключение компаратора в момент времени t^+ , сигнализирующий о том, что был детектирован экстремум. Символ «+» показывает, что выполнялась операция «прямой ход», которая характерна для реального течения времени. Однако когда входной код оцифрован и сохранен в массиве оперативной памяти, легко выполнить подобную операцию детектирования «обратный ход», перебирая элементы массива, начиная с

¹ Подобную диаграмму можно построить и для любой другой лопатки под номером от 2 до $n_{\text{л}}$.

конца, в обратной последовательности, и получить симметричную точку t^- , как показано на рис. 2,б. В результате формируется зона в окрестности экстремума в интервале $[t^-, t^+]$, которая содержит полезные данные. Протяженностью этой зоны можно управлять, изменяя параметр α . Отрезки, соответствующие полуинтервалам $t < t^-$ и $t > t^+$ могут быть удалены как избыточные данные.

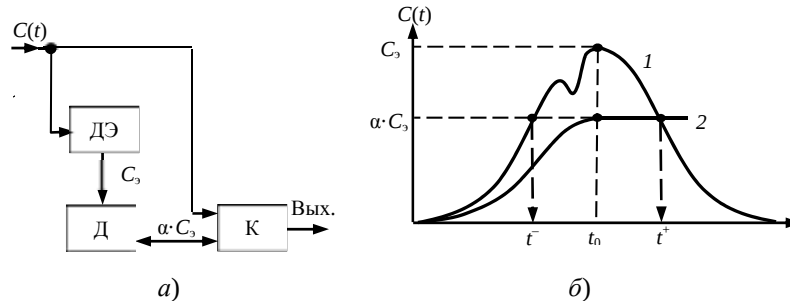


Рис. 2. Функциональная схема (а) и диаграмма (б)

При реализации алгоритма на программном уровне для повышения быстродействия операцию умножения $\alpha \cdot C_3$ можно заменить логическими сдвигами целочисленного кода C_3 .

Необходимо отметить, что, поскольку порог детектирования пропорционален экстремальному значению кода, оценка момента времени t^+ получается устойчивой к разбросу экстремумов по сравнению с фиксированным порогом. Кроме того, данные моменты времени могут быть использованы для попутного измерения скорости вращения лопаточного колеса.

Работу алгоритма предварительной обработки временной развертки кодов на выходе ИЦ поясняет рис. 3, где показаны: огибающая цифровых кодов $C(t)$ (*meth2*) при прохождении лопатками обоих ЧЭ и соответствующие информативные экстремальные значения кодов ($C_{\max}$, $C_{\min}$), уровень кода C_0 , который соответствует состоянию баланса входной части дифференциальной схемы измерительной цепи, фиксированные пороги H_1 и H_2 , задающие зону дискриминации (уровень помех), адаптивные пороги h_1 и h_2 , которые установились после прохождения локальных экстремумов.

Для корректного восприятия и разделения элементов передаваемого массива в него встраиваются маркеры-разделители, помечающие точки детектирования, ограничивающие группы полезных кодов в окрестности экстремумов. С этой целью могут использоваться незаполненные старшие разряды кодовых слов (например, 10-разрядные данные аналого-цифрового преобразователя на выходе измерительной цепи сохраняются в 16-разрядном слове, а добавление единиц в оставшихся старших разрядах позволяет маркировать признаки, сопутствующие коду). На рис. 3 маркерам соответствуют уровни кодов C_{M1} и C_{M2} .

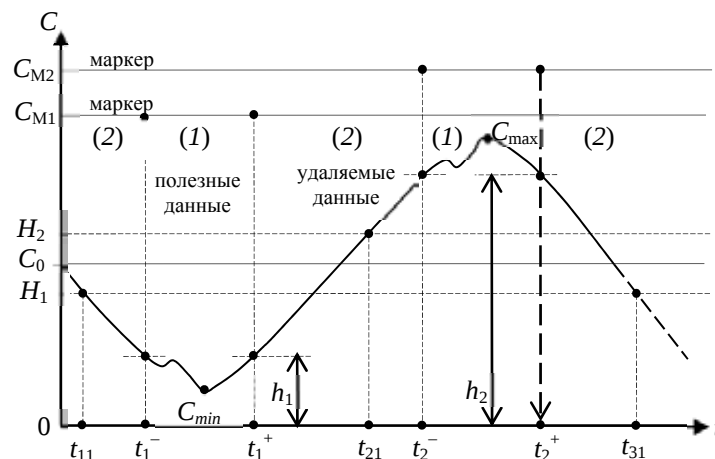


Рис. 3. Временная диаграмма, поясняющая выделение полезных кодов (1) и удаляемые данные (2)

Алгоритм предусматривает две процедуры детектирования локальных экстремумов: *Detect1* – для выделения минимумов кодов и *Detect2* – для максимумов кодов. Блок-схемы этих процедур приведены на рис. 4.

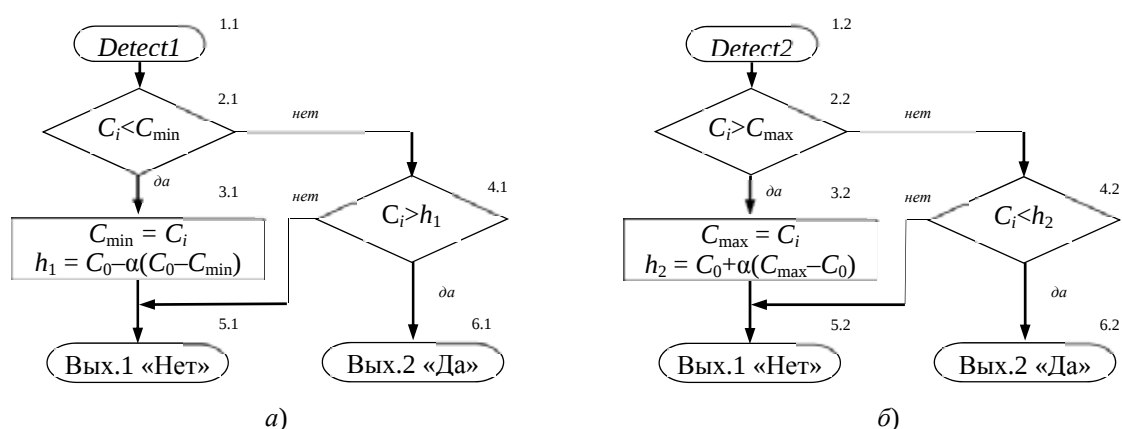


Рис. 4. Процедуры детектирования кодов $C(t)$ *Detect1* (а) и *Detect2* (б)

Каждая из этих процедур предназначена для обработки и анализа одного конкретного отсчета цифрового кода C_i , который является входным параметром, и должна применяться в теле цикла следования отсчетов. Условные операторы 2.1 и 2.2 в сочетании с блоками 3.1 и 3.2 реализуют функции амплитудных детекторов экстремумов $C_{\min}$ и $C_{\max}$ соответственно, а также вычисления на их основе адаптивных порогов h_1 и h_2 . При этом учитывается наличие положительного смещения C_0 . Выражения для определения h_1 и h_2 приведены на рис. 5 в составе блоков 3.1 и 3.2. Условные операторы 4.1 и 4.2 выполняют функции компараторов, по срабатыванию которых фиксируется факт детектирования (Вых.2 «Да»). Полный алгоритм предварительной обработки предусматривает применение указанных процедур на прямом и обратной ходе временной оси.

Работа полного алгоритма основана на чередовании фиксированных состояний, описание которых приведено в табл. 1. В режиме прямого хода выполняется обработка кодов входного потока $C(t)$ в реальном времени. При этом коды $C_i = C(i \cdot T_n)$, поступают с периодом импульсов питания ИЦ (T_n).

Таблица 1

Описание состояний алгоритма (прямой ход)

Состояния	Описание состояний	Временные интервалы
s_0	Код отсчета в зоне $C_i > H_1$. Ожидание появления лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ₁	$t < t_{11}$
s_1	Сохранение кодов. Ожидание момента детектирования экстремума $C_{\min}$	$t_{11} < t < t_1^+$
s_2	Код отсчета в зоне $C_i < H_2$. Ожидание появления лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ₂	$t_1^+ < t < t_{21}$
s_3	Сохранение кодов. Ожидание момента детектирования экстремума $C_{\max}$	$t_{21} < t < t_2^+$

Блок-схема алгоритма сбора и предварительной обработки данных в режиме прямого хода приведена на рис. 5.

В блоке 2 выполняется инициализация: установка алгоритма в исходное состояние s_0 и указателя массива *Buf* на его начало. В виде набора условных операторов (блоки 4.0, 4.1, 4.2, 4.3) показан дешифратор состояний.

В состоянии s_0 при появлении лопатки в зоне ЧЭ₁ (условие 5.0) выполняется сброс памяти ДЭ и алгоритм переводится в последующее состояние s_1 (блок 6.0).

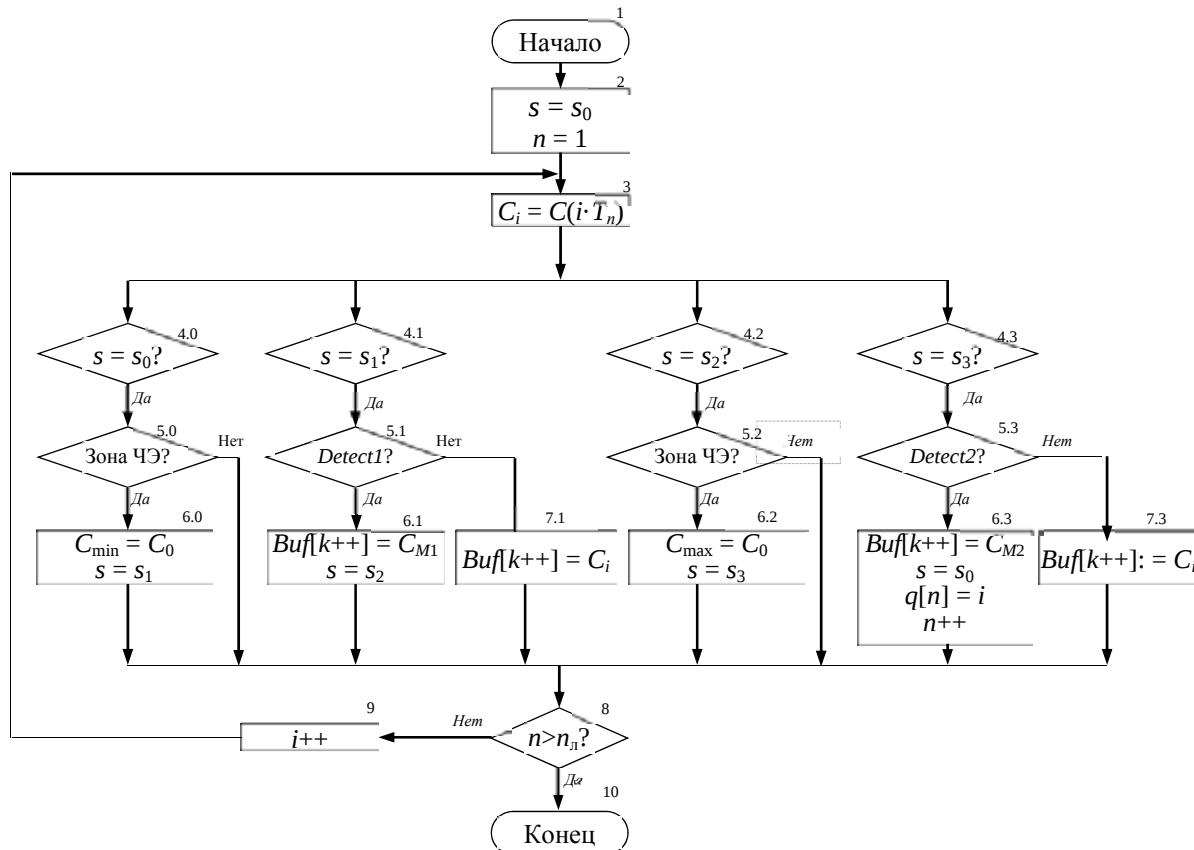


Рис. 5. Блок-схема алгоритма предварительной обработки

В состоянии s_1 при помощи процедуры *Detect1* (условие 5.1) выполняется поиск $C_{\min}$ с сохранением отсчетов кода C_i в массиве *Buf* (блок 7.1). После срабатывания детектора (блок 6.1) текущий элемент массива *Buf* помечается маркером C_{M1} , завершающим сохраненную группу кодов, алгоритм переводится последовательно в состояния s_2 и s_3 . Для обработки кодов прохождения лопаткой зоны чувствительности ЧЭ выполнит аналогичные операции. По завершении операций в состоянии s_3 осуществляется возврат в состояние s_0 для обработки кодов следующей лопатки. После обработки кодов от каждой из n_l лопаток (условие 8), работа прямого хода алгоритма завершается.

Во второй фазе предварительной обработки выполняется обратный ход алгоритма с целью установить маркеры C_{M1} и C_{M2} в моменты времени t^- , полностью ограничив области локализации экстремумов. При этом в качестве отсчетов C_i используются элементы массива *Buf*, сохраненные в результате обработки при прямом ходе, которые перебираются с конца $C_i = \text{Buf}[K-i]$. Общая структура алгоритма аналогична изображенной на рис. 5, порядок следования состояний также меняется на инверсный.

После завершения алгоритма обработки выполняется селективная передача данных на верхний уровень. Передаче подлежит полезная информация между одноименными маркерами $C_{M1}-C_{M1}$ и $C_{M2}-C_{M2}$, которые ограничивают группы кодов в окрестностях выделенных экстремумов. Передача осуществляется по последовательному каналу, поэтому предварительное удаление избыточной информации повышает быстродействие системы в целом.

Оценка постоянной составляющей C_0 и определение пороговых уровней H_1 и H_2 (см. рис. 3) предшествуют рассмотренной выше процедуре сортировки данных и осуществляются однократно при отсутствии лопаток в зонах чувствительностей обоих ЧЭ. Для этих целей получают выборку тестовых кодов сигнала достаточного объема, а затем последовательно определяются среднее значение (C_0) и среднее квадратичное отклонение (СКО) шумовой составляющей. На основе СКО гипотезы о плотности распределения шума и априорной информации о фактической форме огибающей полезных кодов выбирается величина зоны дискриминации (2Δ) и определяются пороговые уровни для выделения полезных кодов $H_1 = C_0 - \Delta$

и $H_2 = C_0 + \Delta$, где Δ – допустимый уровень шума. В свою очередь величина СКО ограничивает и максимальное значения параметра детектирования $\alpha < 1 - \delta_{ш}$, где $\delta_{ш}$ – относительный уровень шума, приведенный к значению экстремума.

Следует отметить, что полученный в результате работы алгоритма предварительной обработки «упакованный» массив данных одномерен, что не удобно для последующего выделения информативных экстремумов кодов и привязки результатов измерения к конкретным лопаткам колеса. Представляется целесообразным преобразование одномерного массива кодов в трехмерный массив, в котором первый элемент является идентификатором ЧЭ, выполняющим рабочие функции, второй элемент массива соответствует порядковому номеру лопатки по мере ее прохождения ЧЭ, а третий элемент – это массив кодов при прохождении контролируемой лопаткой зоны чувствительности рабочего ЧЭ, который подлежит дальнейшей обработке с целью обнаружения экстремума.

Для выделения областей кодов, относящихся к ЧЭ₁ или ЧЭ₂, могут быть использованы оценки пороговых уровней H_1 и H_2 . Так, если значение элемента «упакованного» массива C меньше порога H_1 , то его следует отнести к области кодов ЧЭ₁, и наоборот, если элемент исходного массива C превышает порог H_2 , то он относится к области кодов ЧЭ₂. При этом привязка результатов к лопаткам будет учитывать лишь сдвиг ЧЭ₂ относительно ЧЭ₁ в распределенном кластере и может меняться от замера к замеру. Окончательная идентификация лопаток и привязка к ним результатов измерений осуществляются после вычисления физических значений искомых координат смещений. При этом могут использоваться конструктивные особенности лопаточного колеса и в качестве первой лопатки условно может выбираться самая длинная (минимальный РЗ) или самая короткая (максимальный РЗ) лопатка [11].

Алгоритмы вычисления экстремальных значений кодов

Учитывая дискретный характер данных с результатами преобразований параметров ОВТД, реализация алгоритма прямого поиска экстремальных значений кодов, соответствующих информативным значениям эквивалентной индуктивности рабочего ЧЭ, будет приводить к возникновению соответствующей погрешности, которая в максимальной степени будет сказываться на высоких скоростях вращения лопаточного колеса. Традиционным путем уменьшения указанной составляющей погрешности является восстановление огибающей кодов путем интерполяционной обработки с последующим нахождением экстремума восстановленной функции.

Ниже рассматриваются два алгоритма обработки преобразованных массивов и вычисления экстремальных значений кодов. Первый алгоритм предполагает аппроксимацию выборок кодов на выходе измерительной цепи с помощью ортогональных полиномов Чебышева I рода с последующим выделением экстремумов полученной полиномиальной функции одной переменной и уточнением значений переменной и функции в точке экстремума. Указанный алгоритм обеспечивает хорошее приближение аппроксимирующей кривой к реальной огибающей кодов (по крайней мере, для *meth1*), однако требует повышенных вычислительных и временных ресурсов для своей реализации.

Второй алгоритм предполагает существенно упрощенный подход к поиску экстремумов функций изменений кодов и предусматривает переход от полиномиальной аппроксимации соответствующих выборок кодов к аппроксимации кодов в локализованной зоне экстремума квадратичной параболой с последующим аналитическим нахождением координат ее вершины. Такой алгоритм является наиболее универсальным с точки зрения применимости для *meth1* и *meth2*, а также отличается уменьшением временных и вычислительных затрат на его реализацию, но уступает по точности первому алгоритму.

Алгоритм вычисления экстремальных значений кодов C_1 и C_2 , на основе аппроксимации выборок кодов ортогональными полиномами Чебышева I рода осуществляется в два этапа. На первом проводится аппроксимация полученных после предварительной обработки выборок кодов C_1 и C_2 , а на втором – выделяются коды вблизи экстремума полученной полиномиальной функции одной переменной и производится уточнение значений переменной и функции в точке экстремума.

Для аппроксимации экспериментальных данных используется система ортогональных полиномов Чебышева I рода, которая, в отличие от классической реализации метода

наименьших квадратов (МНК), обладает лучшей обусловленностью при больших степенях полиномов n и позволяет сократить вычислительные затраты на этапе выбора наилучшего аппроксимирующего полинома, так как не требует полного пересчета всех коэффициентов при переходе от полинома степени k к полиному степени $(k + 1)$ [12].

Для полиномов Чебышева дискретной переменной известна двухслойная рекуррентная формула, по которой можно вычислить многочлен любой степени через начальные полиномы $\varphi_0(C_j)$ и $\varphi_1(C_j)$ [12, 13]:

$$\begin{cases} \varphi_0(C_j) = 1; \\ \varphi_1(C_j) = C_j - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i; \\ \varphi_{k+1}(C_j) = (C_j - \beta_{k+1})\varphi_k(C_j) - \gamma_{k+1}\varphi_{k-1}(C_j), k > 1, \end{cases}$$

где N – число точек интерполяции; $\varphi_k(C_j)$ – ортогональный полином Чебышева дискретной переменной C_j степени k ; β_{k+1} , γ_{k+1} – коэффициенты, вычисляемые по формулам

$$\beta_{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^N C_j \varphi_k^2(C_j)}{\sum_{j=1}^N \varphi_k^2(C_j)}, \quad \gamma_{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^N \varphi_k^2(C_j)}{\sum_{j=1}^N \varphi_{k-1}^2(C_j)}.$$

Аппроксимирующая функция $\Phi(C_j)$ определяется в виде линейной комбинации базисных функций, в качестве которых берутся полиномы Чебышева дискретной переменной $\varphi_i(C_j)$:

$$\Phi(C_j) = \sum_{i=0}^k m_i \varphi_i(C_j),$$

где m_i – коэффициенты, вычисляемые по формуле

$$m_i = \frac{\sum_{j=1}^N f(C_j) \varphi_i(C_j)}{\sum_{j=1}^N \varphi_i^2(C_j)}.$$

Поиск наилучшего приближения осуществляется путем последовательного увеличения степени аппроксимирующего полинома $\Phi(C_j)$, определяемого в виде линейной комбинации базисных функций, в качестве которых берутся полиномы Чебышева дискретной переменной, и анализа остаточной дисперсии σ^2 [13]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N - k - 1} \sum_{j=1}^N (f(C_j) - \Phi(C_j))^2,$$

где N – число точек интерполяции; k – степень аппроксимирующего полинома.

Наилучшим выбирается полином, при котором остаточная дисперсия минимальна.

Учитывая, что при оценивании неизвестных параметров по МНК полином $\Phi(C_j)$ и алгебраический полином той же степени k эквивалентны [13], то после нахождения наилучшего приближения с помощью функции $\Phi(C_j)$, последняя может быть преобразована в традиционный степенной полином вида

$$P(C_j) = \sum_{i=0}^k a_i^{(k-i+1)} C_j^i,$$

где $a_i^{(k-i+1)}$ – коэффициенты степенного полинома, которые рассчитываются в соответствии с известным рекуррентным соотношением [12]:

$$a_i^{(l+1)} = a_i^{(l)} - a_{k-l+1}^{(l)} \frac{\sum_{i=1}^N C_j^{k-l+1} \phi_i(C_j)}{\sum_{i=1}^N \phi_i^2(C_j)}.$$

После того как выбран наилучший аппроксимирующий полином ($\Phi(C_j)$ или $P(C_j)$) производится поиск его экстремума. Для этого экстремум сначала локализуется, а затем, в пределах найденного отрезка локализации методом золотого сечения [14], осуществляется уточнение координат экстремума с заданной погрешностью ϵ .

При реализации в системе измерения алгоритма вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации зоны экстремума квадратичной параболой вычисление экстремальных значений кодов C_1 и C_2 также осуществляется в два этапа. На первом проводится выделение кодов вблизи экстремума, а затем (на втором этапе) выбранный участок заменяется квадратичной параболой и аналитически находятся координаты ее вершины.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 6.

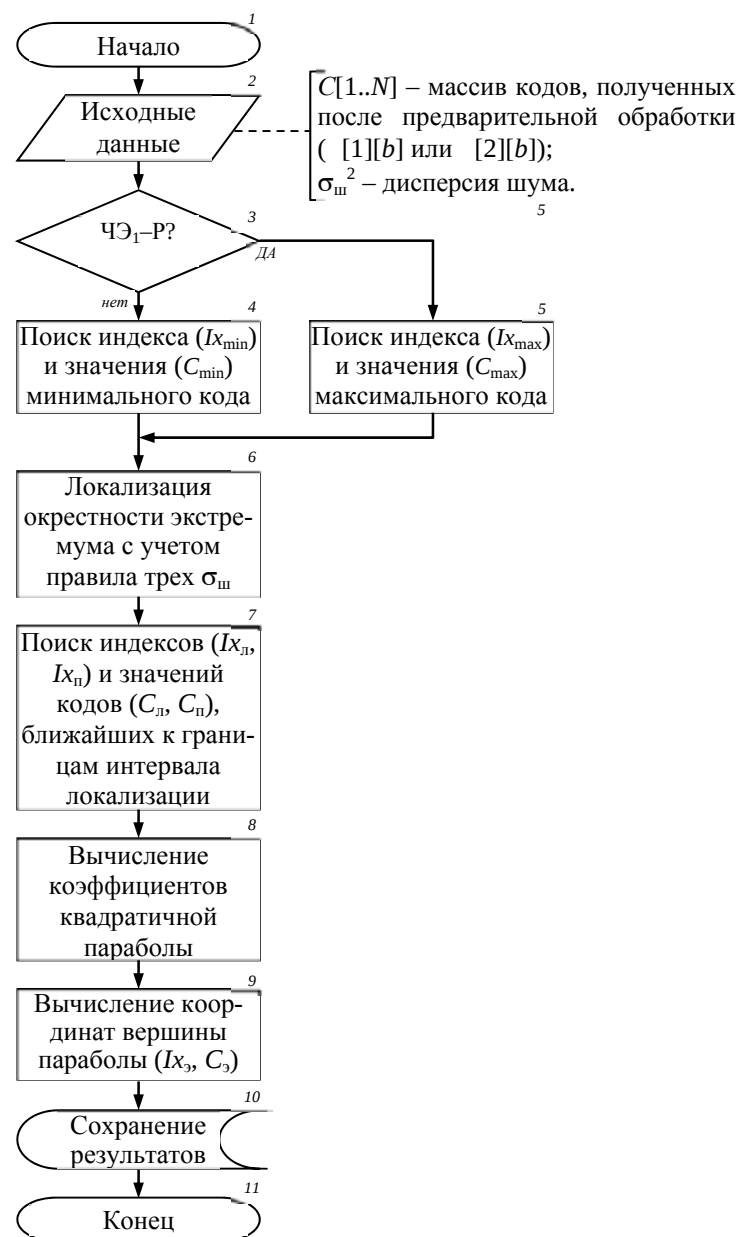


Рис. 6. Блок-схема алгоритма вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации квадратичной параболой

После ввода исходных данных (блок 2), которыми являются массив кодов (C) и дисперсия шума ($\sigma_{ш}^2$), определяемая на этапе подготовки к измерениям, осуществляется выделение кодов вблизи экстремума (блоки 3–7). Для этого сначала прямым поиском в массиве C определяются экстремумы кодов – минимум ($C_{\min}$), если рабочим является ЧЭ₁ (блок 4) и максимум ($C_{\max}$), если рабочим является ЧЭ₂ (блок 5), а затем производится выделение окрестности найденного экстремума с учетом правила трех $\sigma_{ш}$ [15] (блок 6). В локализованной таким образом окрестности экстремума, а также путем прямого поиска со сравнением, определяются коды, ближайшие к левой и правой границам локализации ($C_{л}$, $C_{п}$) (блок 7).

На завершающем этапе работы алгоритма производится аппроксимация выделенных кодов в окрестности экстремума квадратичной параболой $y = ax^2 + bx + c$ (где a , b , c – коэффициенты параболы) и находятся координаты ее вершины. Для этого по найденным кодам ($C_{э}$, $C_{л}$, $C_{п}$, где $C_{э}$ – это $C_{\max}$ или $C_{\min}$) и их индексам ($I_{x_э}$, $I_{x_л}$, $I_{x_п}$) в исходном массиве C по известным соотношениям [16] рассчитываются коэффициенты параболы (блок 8), а затем находится абсцисса ($I_{x_э}$) и ордината ($C_{э}$) ее вершины (блок 9), которые и принимаются за истинное значение координат экстремума. Значение $C_{э}$ сохраняется (блок 10) и используется в дальнейшем в алгоритме расчета физических значений радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы [8].

Заключение

Рассмотрены основные алгоритмы функционирования системы измерения радиальных и осевых смещений торцов турбинных лопаток сложной формы на основе применения распределенных кластеров ОВТД. Приведенные в статье решения обеспечивают сжатие данных и их передачу на верхний уровень в ограниченном объеме, что повышает быстродействие системы, а также уменьшение погрешности дискретизации за счет восстановления огибающей кодов путем интерполяционной обработки на основе аппроксимации выборок кодов полиномами Чебышева I рода или квадратичной параболой с последующим нахождением экстремума восстановленной функции.

Список литературы

1. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей / Е. А. Гриценко, В. П. Данильченко, В. П. Лукачев, Ю. Л. Ковылов, В. Е. Резник, Ю. И. Цыбизов. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2002. – 527 с.
2. Прокопец, А. Необходимость диагностирования радиальных зазоров в проточной части газотурбинных двигателей / А. Прокопец, Б. Ревзин, А. Рожков // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 4. – С. 5–7.
3. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. О. П. Скобелева. – М. : Машиностроение, 2011. – 298 с.
4. Беленький, Л. Б. Одновитковые вихретоковые датчики: от кластерных композиций к кластерным конструкциям / Л. Б. Беленький, Б. К. Райков, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. VI Междунар. конф. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2004. – С. 437–443.
5. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков / С. Ю. Боровик, М. М. Кутейникова, Б. К. Райков, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 10. – С. 38–46.
6. Боровик, С. Ю. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной чувствительностью и в расширенном диапазоне / С. Ю. Боровик, М. М. Кутейникова, Б. К. Райков, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев // Автоматизация. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 104–112.
7. Беленький, Л. Б. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием / Л. Б. Беленький, О. П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XIV Междунар. конф. – Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2012. – С. 602–606.
8. Кутейникова, М. М. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток / М. М. Кутейникова, Ю. Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования

- в сложных системах : тр. XII Междунар. конф. – Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2010. – С. 323–327.
9. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Ю. Н. Секисова, О. П. Скобелева. – Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2001. – 188 с.
 10. А.с. 1550608 SU, МКИ Н 03 К 5/153. Устройство для фиксации момента прохождения задним фронтом импульса заданного уровня / Белопухов В. Н., Малов А. Н., Подвигин В. Н. – № 4332427/24-21 ; заяв. 24.11.87 ; опубл. 15.03.90, Бюл. № 10.
 11. Боровик, С. Ю. Система измерения радиальных зазоров на закапотированной винтовентиляторной установке / С. Ю. Боровик, С. М. Игначков, С. А. Ильинский и др. // Известия вузов. Авиационная техника. – 2004. – № 3. – С. 77–79.
 12. Носач, В. В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров / В. В. Носач. – М. : МИКАП, 1994. – 382 с.
 13. Яковенко, П. Г. Моделирование систем : учеб. пособие / П. Г. Яковенко. – Томск : Изд-во Томс. политехн. ун-та, 2009. – 106 с.
 14. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – 3-е изд. – М. : Высш. шк., 2008. – 544 с.
 15. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
 16. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1986. – 544 с.

Белопухов Валентин Николаевич

кандидат технических наук, научный сотрудник
Институт проблем управления
сложными системами Российской академии наук
(Россия, г. Самара, ул. Садовая, 61)
E-mail: bvnsam@mail.ru

Belopukhov Valentin Nikolaevich

candidate of technical sciences, researcher,
Institute of Control Complex Systems
of Russian Academy of Sciences
(61 Sadovaya street, Samara, Russia)

Боровик Сергей Юрьевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
Институт проблем управления
сложными системами Российской академии наук
(Россия, г. Самара, ул. Садовая, 61)
E-mail: borovik@iccs.ru

Borovik Sergey Yur'evich

doctor of technical sciences, leading researcher,
Institute of Control Complex Systems
of Russian Academy of Sciences
(61 Sadovaya street, Samara, Russia)

Кутейникова Марина Михайловна

научный сотрудник
Институт проблем управления
сложными системами Российской академии наук
(Россия, г. Самара, ул. Садовая, 61)
E-mail: m.kuteynikova@mail.ru

Kuteynikova Marina Mikhaylovna

researcher,
Institute of Control Complex Systems
of Russian Academy of Sciences
(61 Sadovaya street, Samara, Russia)

УДК 681.518

Белопухов, В. Н.

Алгоритмы функционирования систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы / В. Н. Белопухов, С. Ю. Боровик, М. М. Кутейникова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 35–46.

М. А. Фролов, А. В. Салмин, Р. Ш. Мусаев

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО АККУМУЛЯТОРНОГО МОДУЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

M. A. Frolov, A. V. Salmin, R. S. Musaev

EVALUATION OF THE MECHANICAL RELIABILITY OF THE ADDITIONAL BATTERY MODULE OF THE DATA-MEASURING SYSTEM

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрен современный подход к обеспечению механической надежности датчиково-преобразующей аппаратуры, применяемой в изделиях ракетно-космической техники на ранних этапах проектирования. *Материалы и методы.* Исследование влияния внешних воздействующих факторов на механическую надежность дополнительного аккумуляторного модуля информационно-измерительной системы проводилось посредством имитационного моделирования, в частности, оценивалось влияние воздействия механического удара методом конечного элемента с применением специализированного расчетного модуля Simulation программного обеспечения SolidWorks. *Результаты.* Были получены эпюры максимальных напряжений, которые позволили дать оценку механической надежности системы и выработать решения по ее повышению на ранней стадии проектирования. *Выводы.* Проведенные предварительные расчеты механической надежности конструкции дополнительного аккумуляторного модуля информационно-измерительной системы с применением имитационного моделирования позволили повысить надежность более чем в 3 раза за счет изменения материала крепежных винтов и сократить дополнительные временные и финансовые затраты.

A b s t r a c t. *Background.* In article the modern approach on maintenance of mechanical reliability for sensing-reformative equipment, which applied at early design stages in products of the space-rocket technics is considered. *Materials and methods.* Research of influence of external factors on mechanical reliability of the additional storage module as part of information-measuring system was operated by applying of imitation modeling, in particular, influence of mechanical blow by method of finite element with application specialized module Simulation of software SolidWorks was estimated. *Results.* As a result, the diagram of maximum stress, which have allowed to give an estimation of mechanical reliability of system and to develop decisions on its increase at an early design stage, was achieved. *Conclusions.* The preliminary calculations of mechanical reliability of additional storage module as part of information-measuring system with application of imitational modeling have allowed to increase reliability more than in three times at the expense of change of a material of fixing screws and to reduce additional time and financial expenses.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прочность, механическая надежность, эксплуатационные характеристики, имитационное моделирование, механический удар, информационно-измерительная система, метод конечных элементов, SolidWorks Simulation.

К е y w o r d s: durability, mechanical reliability, operational characteristics, imitating modelling, mechanical blow, data-measuring system, method of finite elements, SolidWorks Simulation.

Одной из актуальных проблем при проектировании датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА), применяемой в изделиях ракетно-космической техники, является обеспечение ее механической надежности. Это связано с эксплуатацией ДПА в особо жестких условиях, в виде значительных ударных и вибрационных нагрузок, изменений температуры окружающей среды и т.д. [1] Оценить надежность в виде эксплуатационных и прочностных характеристик ДПА на ранней стадии проектирования стало возможным за счет применения систем автоматизированного проектирования (CALS-технологий).

Одной из последних разработок АО «НИИФИ» с применением CALS-технологий является информационно-измерительная система (ИИС) корабельной установки, предназначенная для удаленного измерения и мониторинга динамических процессов в труднодоступных местах, таких как подвижные части орудий и машин. Рассматриваемая ИИС состоит из автономных блоков первичного преобразования физических величин в аналоговую форму сигнала с приведением их к норме в соответствии со шкалой аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и последующего аналого-цифрового преобразования с сохранением в энергонезависимой памяти.

Одним из основных автономных блоков данной ИИС, испытывающим значительные вибрационные нагрузки и имеющим наибольшие габаритные размеры и массу по сравнению с другими модулями, является дополнительный аккумуляторный модуль (ДАМ). Значительная масса и габаритные размеры при длительном воздействии вибрационных нагрузок в процессе эксплуатации системы могут привести к возникновению различных дефектов. Учитывая специфику геометрии конструкции ДАМ, в целях обеспечения работоспособности в жестких условиях эксплуатации необходимо в обязательном порядке оценивать механическую надежность при воздействии ударов и вибрационных нагрузок. Определять ударную прочность любых конструкций аналитическими методами достаточно сложно, вследствие чего наиболее эффективным признан метод инженерного анализа, а именно численный метод (метод конечных элементов). Использование численных методов позволит определить не только прочность, но и оптимизировать конструктивные и схемные параметры будущего изделия.

Имитационное моделирование воздействия ударных ускорений на ДАМ проведено на раннем этапе разработки с помощью модуля Simulation программного обеспечения SolidWorks [2], отвечающего передовым требованиям современных САПР. Имитационное моделирование позволяет учитывать как статическое, так и динамическое влияние различных факторов, таких как давление, температура, скорость, электрический ток, а также комплексно оценивать работу изделия.

В процессе имитационного моделирования была создана 3D-модель ДАМ, представленная на рис. 1. Моделирование воздействия ударов и вибрационных нагрузок на ДАМ на базе модуля Simulation [3] проводилось с учетом следующих физико-механических характеристик материала: плотность, модуль упругости 2-го рода, предел текучести и коэффициент Пуассона [4].

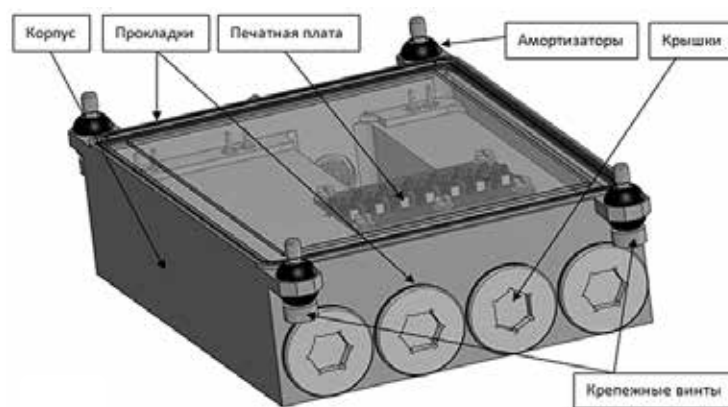


Рис. 1. Твёрдотельная модель ДАМ

Адекватность построенной модели оценивалась экспериментально – путем проведения вибрационных испытаний корпуса ДАМ и сравнения результатов эксперимента с полученными виртуальными испытаниями в SolidWorks. Далее к верифицированной имитационной модели идентично условиям реальной работы были приложены следующие граничные условия (рис. 2):

– «жесткая заделка» на резьбе крепежного винта, посредством которой ДАМ устанавливается на реальном объекте;

- пиковое ударное ускорение 4000 м/с^2 длительностью 5 мс вдоль каждой из трех взаимно перпендикулярных осей координат;
- «распределенная масса», обеспечивающая соответствие массы расчетной модели и реального изделия и позволяющая упростить расчетную модель и сократить время расчета, не влияя на точность результатов.

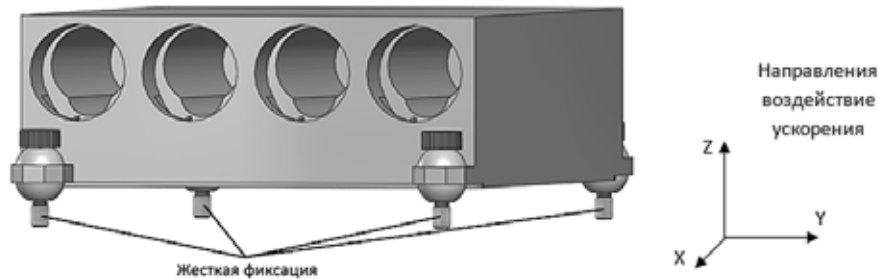


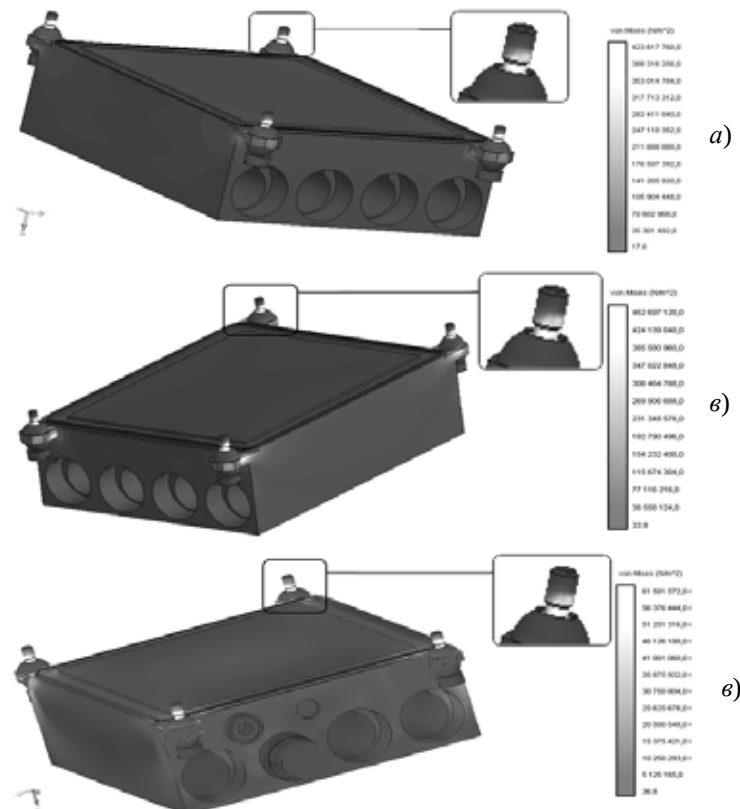
Рис. 2. Схема граничных условий

Критерием оценки влияния механического удара на элемент системы телеметрии корабельной артиллерийской установки является условие прочности технического задания:

$$k = [\sigma] / \sigma_{\max} \geq 1,5, \quad (1)$$

где k – коэффициент запаса прочности; $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение, возникающее при воздействии механического удара [МПа]; $[\sigma]$ – предел текучести материала [МПа].

В результате оценки механической прочности с применением метода конечных элементов были получены эпюры максимальных напряжений, представленные на рис. 3, из которых видно, что в элементе системы ДАМ максимальные напряжения, возникающие при воздействии ускорения 4000 м/с^2 в направлениях вдоль осей X и Y , составляют 423,6 МПа и 462,7 МПа соответственно и возникают на крепежных винтах, изготовленных из материала Сталь 20, предел текучести которого составляет 250 МПа. Следовательно, условие прочности (1) не выполняется, так как $k = 250 \text{ МПа} / 462,7 \text{ МПа} = 0,54 \geq 1,5$.

Рис. 3. Эпюры максимальных напряжений при воздействии ускорения 4000 м/с^2 , направленного вдоль оси X (а), оси Y (б) и оси Z (в)

Используя алгоритм и методику расчета надежности [5], можно рассчитать, что вероятность безотказной работы исследуемого ДАМ ($P_{\text{ДАМ}}$) без электронных радиоизделий (ЭРИ) с учетом снижения предела прочности составила менее 0,5.

Для увеличения вероятности безотказной работы при воздействии на ДАМ механического удара и вибрационных нагрузок, было обосновано решение по замене материала крепежных винтов из стали 20 на сталь 40Х с большим пределом текучести 780 МПа.

Для подтверждения работоспособности измененной конструкции ДАМ проведены определение вибрационной прочности и расчет вероятности безотказной работы ДАМ (рис. 4).

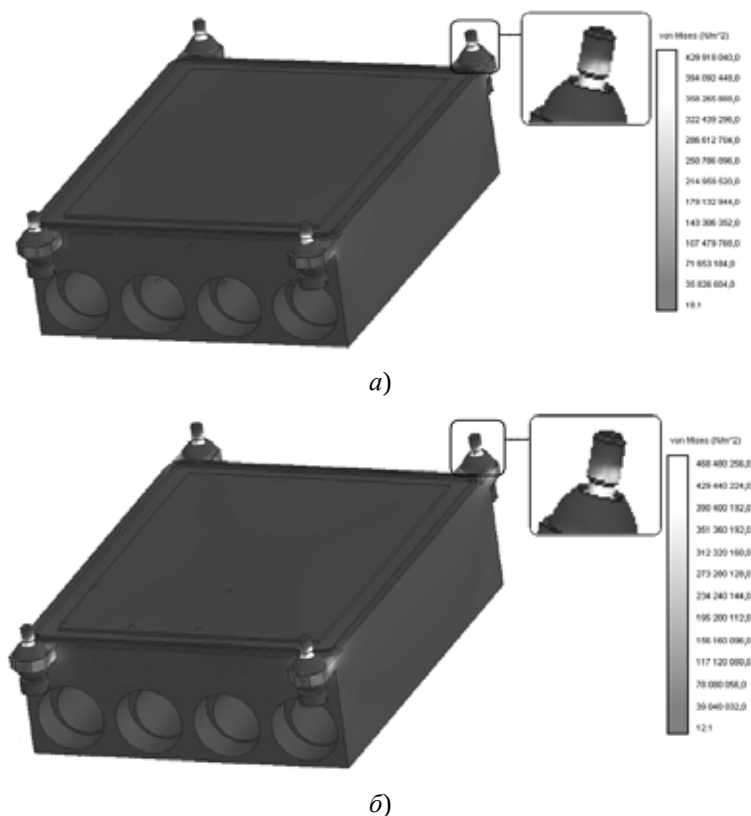


Рис. 4. Эпюры максимальных напряжений при воздействии ускорения 4000 м/с^2 , направленного вдоль оси X (а) и оси Y (б), с измененным материалом винтов

Результаты повторного моделирования, представленные на рис. 5, подтвердили ожидаемое увеличение коэффициентов запаса прочности k по осям x, y до 1,73 и 1,66 соответственно, что удовлетворяет условию обеспечения прочности (1). Вероятность безотказной работы ДАМ без учета входящих в состав ЭРИ составила $P_{\text{ДАМ}} = 1$.

Экспериментальные данные по результатам испытаний на надежность модуля ДАМ ИИС подтвердили расчетные значения вероятности безотказной работы. Проведение имитационного моделирования на раннем этапе разработки предотвратило возникновение возможного разрушения крепежных винтов ИИС во время проведения натурных испытаний.

Используемый в АО «НИИФИ» современный подход к конструированию ДПА с применением CALS-технологий позволяет на раннем этапе проектирования повысить качество и надежность разрабатываемой продукции, снизить затраты на проводимые испытания. Проведенные предварительные расчеты механической надежности конструкции ДАМ с применением имитационного моделирования позволили повысить надежность модуля ИИС более чем в 3 раза за счет изменения материала крепежных винтов и сократить дополнительные временные и финансовые затраты.

Список литературы

1. Трофимов, А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : моногр. / А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов. – Пенза, 2009. – 173 с.

2. Алямовский, А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 784 с.
3. Алямовский, А. А. SolidWorks компьютерное моделирование в современной технике / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 464 с.
4. Тихонов, Л. В. Механические свойства металлов и сплавов / Л. В. Тихонов, В. А. Кононенко. – Киев : Наукова Думка, 1986. – 300 с.
5. Фролов, М. А. Повышение надежности датчиков давления для эксплуатации в жестких условиях / М. А. Фролов. – Датчики и системы. – 2015. – № 6. – С. 28–33.

Фролов Михаил Алексеевич

кандидат технических наук,
начальник отдела – заместитель начальника центра,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: frolov10061987@gmail.com

Frolov Mikhail Alekseevich

candidate of technical sciences,
head of department – deputy head of centre,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Салмин Александр Вячеславович

аспирант, начальник отдела,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: salminab@mail.ru

Salmin Aleksandr Vyacheslavovich

postgraduate student, head of department,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Мусаев Руслан Шабанович

кандидат технических наук,
начальник научно-исследовательского
конструкторского комплекса,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: polim@mail.ru

Musaev Ruslan Shabanovich

candidate of technical sciences,
head of scientific-research design complex,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.398.67.019.3

Фролов, М. А.

Оценка механической надежности дополнительного аккумуляторного модуля информационно-измерительной системы / М. А. Фролов, А. В. Салмин, Р. Ш. Мусаев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 47–51.

УДК 531.714.2

*А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев***ДАТЧИК ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ
ИЗМЕРЕНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ***A. A. Trofimov, D. A. Ryazantsev***THE SENSOR OF LINEAR POSITIONS FOR ROCKET
AND SPACE TECHNOLOGY**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Предметом исследования является датчик линейных перемещений для систем измерения ракетно-космической техники. Целью работы является разработка и исследование датчика линейных перемещений, работающего в условиях открытого космоса. *Материалы и методы.* Разработаны структурная схема и конструкция датчика линейных перемещений на основе линейно-регулируемого дифференциального трансформатора, изготовлен датчик линейных перемещений, представлены технические характеристики разработанного датчика. *Результаты.* Выделены основные конструктивные особенности датчика, влияющие на стойкость к внешним воздействующим факторам. Представлена градуировочная характеристика и значения дополнительных погрешностей датчика линейных перемещений. *Выводы.* Полученные технические и эксплуатационные характеристики разработанного датчика линейных перемещений соответствуют требованиям, предъявляемым к датчикам, работающим в условиях открытого космоса.

A b s t r a c t. *Background.* The research subject is a linear displacement transducer for measuring systems of rocket-and-space equipment. The purpose is engineering and research of the linear displacement transducer that operates in openspace. *Materials and methods.* We worked out a block scheme and a linear displacement transducer configuration on the basis of linear variable differential transformer, made a linear displacement transducer LDT, and provided specification of the engineered sensor. *Results.* The research describes LDT design features that stability of the device against to environmental conditions, introduces gauge line and accuracy of the LDT. *Conclusions.* The obtained specification and operating characteristics of the engineered linear displacement transducer satisfy the requirements set for the sensors operating in the open space.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик перемещений, линейно-регулируемый трансформатор, элемент чувствительный.

К e y w o r d s: motion sensor, electromagnetic linear displacement transducers, sensitive element.

Введение

В космической отрасли решающее значение имеет автоматизация систем контроля и управления различными процессами сбора и получения информации [1]. Одной из составляющих таких систем являются датчики положений объектов, в частности, датчики линейных перемещений (ДЛП). ДЛП для высокоресурсных космических аппаратов (КА) должен обладать следующими характеристиками:

- высокой степенью защиты от воздействия таких факторов космического пространства, как ионизирующее излучение естественного радиационного пояса земли, воздействие протонов и тяжелых заряженных частиц;
- стойкостью к внешним воздействующим факторам (ВВФ), возникающим при запуске и эксплуатации на КА (вибрационным нагрузкам, акустическим шумам, механическим ударам, пониженному атмосферному давлению, повышенной и пониженной температуре, линейному ускорению);
- ресурсом работы датчика, соответствующим сроку активного существования КА;
- минимальными массой и размерами по причине дороговизны вывода на орбиту каждого килограмма вещества.

Основная часть

Разработка ДЛП для систем контроля и управления перемещениями механизмов спутниковых и КА подразумевает предварительный анализ методов измерения перемещения, сравнение технических характеристик имеющихся аналогов и, как итог, выбор конструкции и основных технических решений разрабатываемого датчика.

По требованиям заказчика ДЛП должен иметь следующие характеристики: диапазон измерения 0–5 мм, срок службы 21 год, погрешность не более 1,5 %. ДЛП также должен быть стойким к воздействию температур от минус 50 до плюс 50 °С, вибрации с величиной виброускорения 30g в диапазоне частот от 5 до 2000 Гц и единичного механического удара амплитудой 300g и длительностью 1–3 мс.

Выбор метода измерения перемещения является решающим фактором в определении характеристик разрабатываемого датчика.

Для измерения перемещений в АО «НИИФИ» разработан ряд потенциометрических, электромагнитных [2], линейно-регулируемых дифференциальных трансформаторных, амплитудно-фазовых трансформаторных датчиков.

Датчики положения и перемещений часто реализуются на основе линейных или поворотных потенциометров.

АО «НИИФИ» широко использует потенциометрические датчики для измерения перемещений в диапазоне до 700 мм. Потенциометрические датчики разработки АО «НИИФИ» имеют массу 0,18 и 0,3 кг, основную погрешность не более 2 %, рабочий диапазон температур ± 60 °С, что отвечает требованиям к разрабатываемому датчику по приведенным характеристикам. К недостаткам потенциометрических датчиков следует отнести значительную механическую нагрузку (трение), необходимость обеспечения механического контакта с объектом, низкое быстродействие, срок службы до 12 лет, что не позволяет использовать их в высокоресурсных КА со сроком службы 21 год.

Линейно-регулируемые дифференциальные трансформаторные (ЛРДТ) датчики используют принцип электромагнитной индукции для определения перемещений [3]. При перемещении объекта между двумя катушками изменяется магнитный поток, который преобразуется в выходное напряжение. Датчики перемещений разработки АО «НИИФИ» на основе этого метода имеют как аналоговый, так и цифровой выходной сигнал, массу, сравнимую с массой потенциометрических датчиков, основную погрешность 1–1,5 %, рабочий диапазон температур ± 50 °С, а также высокую надежность в течение всего срока службы, равного 10 годам.

Анализ характеристик растровых электромагнитных и амплитудно-фазовых трансформаторных датчиков [4] показал высокие метрологические характеристики этих датчиков: основная погрешность 0,1–1 %, в то время как масса таких датчиков начинается от 0,55 кг.

Учитывая требования к разрабатываемому датчику, наиболее перспективным направлением является ЛРДТ-метод измерения перемещения. Трансформаторный метод измерения линейных перемещений достаточно хорошо изучен [5] и широко применяется в измерении перемещений из-за своей надежности и прочности конструкции. Отличительной особенностью датчиков положения на основе ЛРДТ-метода является то, что шток не входит в контакт с другими электрическими компонентами устройства [6], как это сделано, например, в потенциометрических датчиках, и поэтому датчик имеет высокую надежность и большой срок службы.

Датчики перемещения на основе ЛРДТ-метода хорошо зарекомендовали себя в изделиях ракетно-космической техники (РКТ), также такие датчики подходят для применения в жестких промышленных средах и в долгосрочных циклах [7, 8].

Линейно-регулируемый дифференциальный трансформатор – это трансформатор с механически управляемым сердечником. На его первичную обмотку подается синусоидальное напряжение постоянной амплитуды. Применение синусоидального сигнала позволяет избавиться от паразитных гармоник. На вторичных обмотках индуцируется переменное напряжение. В цилиндрическое отверстие между обмотками вставляется сердечник из ферромагнитного материала. При этом сердечник не касается обмоток. Две вторичные обмотки включены в противофазе. Когда сердечник расположен в центре трансформатора, сигналы с вторичных обмоток вычитаются, поэтому на выходе трансформатора напряжение равно нулю. Перемещение сердечника в сторону от центрального положения приводит к изменению магнитных потоков во вторичных обмотках. В результате возникшего разбаланса появляется выходное напряжение. Изменение магнитных потоков происходит за счет изменения магнитных сопротивлений пространства между катушками.

Из всего вышесказанного следует, что значение потокосцепления определяется осевым положением сердечника. В линейной рабочей области в стационарном режиме амплитуда индуцированного сигнала пропорциональна смещению сердечника, поэтому выходное напряжение может служить мерой перемещения. Выходной сигнал ЛРДТ не только определяет значение перемещения, но и его направление. Направление перемещения определяется фазовым углом между опорным и выходным напряжением.

На основе метода ЛРДТ АО «НИИФИ» разработан датчик линейных перемещений ДЛП, структурная схема которого представлена на рис. 1.

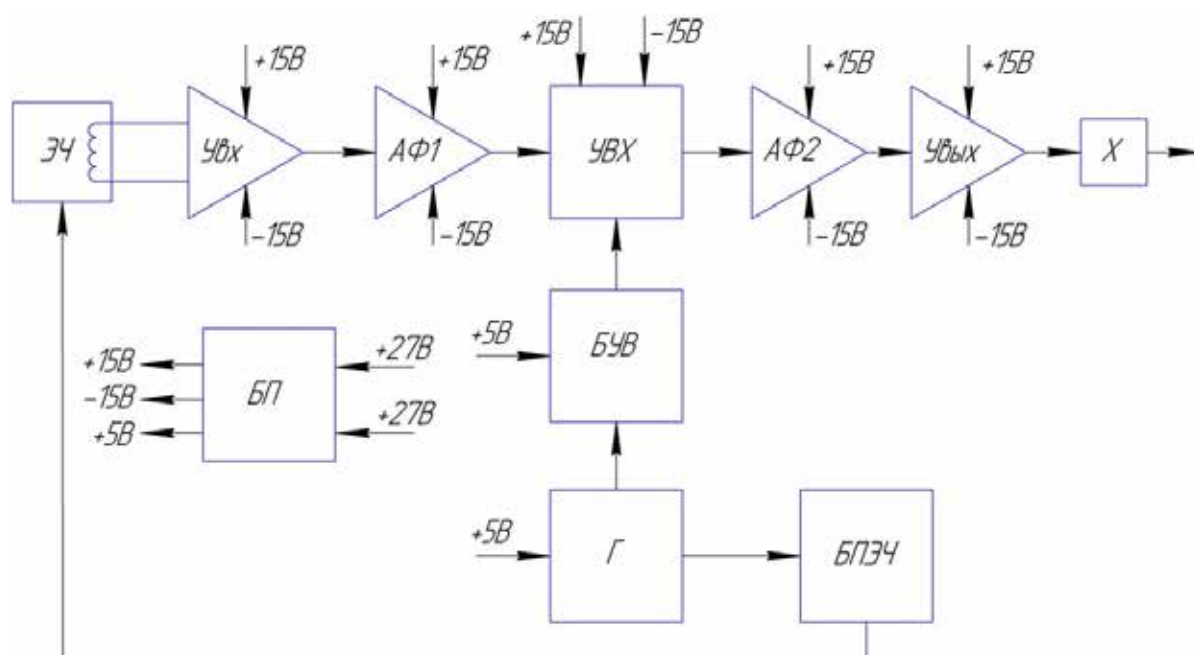


Рис. 1. Структурная схема функционирования датчика:

ЭЧ – элемент чувствительный; УВХ – входной усилитель; АФ1, АФ2 – активные фильтры; УВХ – устройство выборки-хранения; БУВ – блок управления УВХ; Г – генератор; БПЭЧ – блок питания элемента чувствительного; БП – блок питания; УВХ – выходной усилитель; Х – соединитель

Блок питания (БП) формирует напряжения ± 5 В; ± 15 В, требуемые для питания электроприборов (ЭП), входящих в состав функциональных блоков датчика.

Генератор (Г) генерирует прямоугольные импульсы с амплитудой 5 В и частотой 5 кГц. Он задает переменное напряжение на первичной обмотке индуктивности элемента чувствительного ЭЧ через транзисторный каскад блока питания ЭЧ. На вторичной обмотке в зависимости от положения штока наводится ЭДС индукции от первичной обмотки. ЭДС индукции

на вторичной обмотке в зависимости от положения штока может быть положительной, отрицательной и нулевой.

Сигнал с вторичной обмотки ЭЧ поступает на входной усилитель (Увх), который усиливает сигнал до уровня, требуемого для дальнейшей обработки. Далее активный фильтр (АФ1) пропускает частотный спектр сигнала ниже некоторой частоты (частоты среза), уменьшает амплитуду сигнала выше частоты среза и реализует положительный коэффициент усиления.

Сигнал с АФ1 поступает на устройство выборки и хранения (УВХ), которое осуществляет выборку и передачу сигнала с ЭЧ с частотой, задаваемой блоком управления УВХ (БУВ), который синхронизирует фазу сигнала с генератора и фазу сигнала, полученного с ЭЧ, для исключения возможности приема сигнала в противофазе.

Для подавления нежелательных частот на выходе УВХ стоит АФ2. Выходной сигнал с АФ2 требуется усилить до нужного уровня, что осуществляет выходной усилитель (Увых). Таким образом, на выходе датчика появляется аналоговый сигнал напряжения 0–5 В.

Разработанный ДЛП имеет моноблочную конструкцию. Конструктивно датчик линейных перемещений, представленный на рис. 2, состоит из элемента чувствительного 3, кожуха 2, электронных схем 4, штока 1, корпуса 5, соединителя 6.

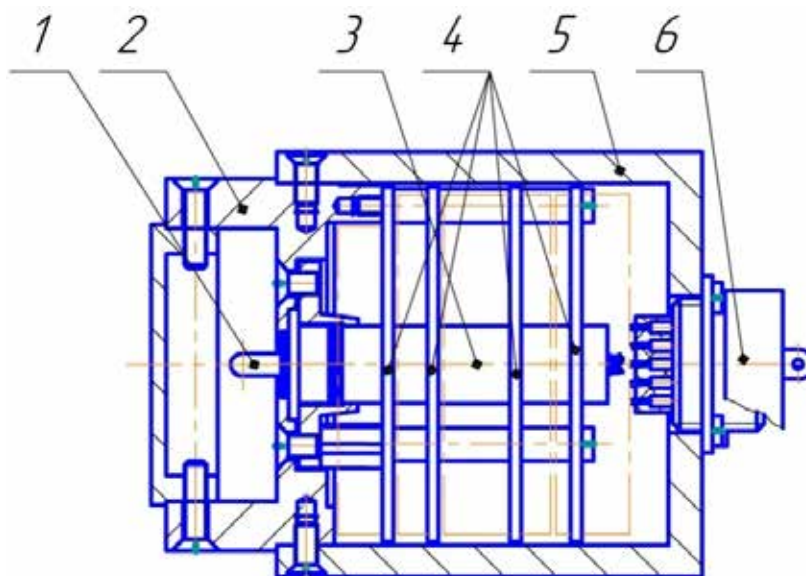


Рис. 2. Конструкция ДЛП

Элемент чувствительный датчика включает в себя: корпус; подвижный сердечник (шток); обмотки первичную и вторичную. Вторичная обмотка выполнена из двух секций одинаковой длины, встречно включенных и намотанных на полиамидный каркас.

Шток ЭЧ состоит из двух частей: одна часть выполнена из магнитного, другая – из немагнитного материала. Так как перемещение сердечника в ЭЧ сопровождается обязательным трением его поверхностей, для условий вакуума и с целью минимизации трения и, следовательно, увеличения срока службы ЭЧ втулки, на которые опирается сердечник, были сделаны из полиамида.

Для обеспечения оптимальных прочностных, габаритно-массовых характеристик и защиты от внешних воздействующих факторов (ВВФ) корпус и кожух датчика выполнены из титанового сплава. Толщина корпуса выбрана таким образом, чтобы защитить электронные компоненты датчика от радиационного излучения и снизить его габаритно-массовые параметры.

Дифференциальное включение обмоток позволяет исключить погрешности от ВВФ, таких как температура и давление. Математическая модель взаимоиндуктивных датчиков перемещений представлена в [9].

На основе разработанной конструкции были изготовлены опытные образцы датчика ДЛП и проведены испытания. По результатам испытаний были определены значения погрешностей, которые приведены ниже.

В изготовленных образцах дополнительная погрешность от температуры составила $\pm 1,5$ %, а от пониженного давления $\pm 2,5$ %. Дополнительная погрешность от пониженного давления превышает погрешности от температуры, так как в условиях пониженного давления $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па теплоотвод осуществляется через корпус изделия [10], поэтому происходит нагрев ЭРИ, который определяет значение дополнительной погрешности от пониженного давления.

Основная приведенная погрешность ДЛП составила 0,11 %. Градуировочная характеристика ДЛП представлена на рис. 3.

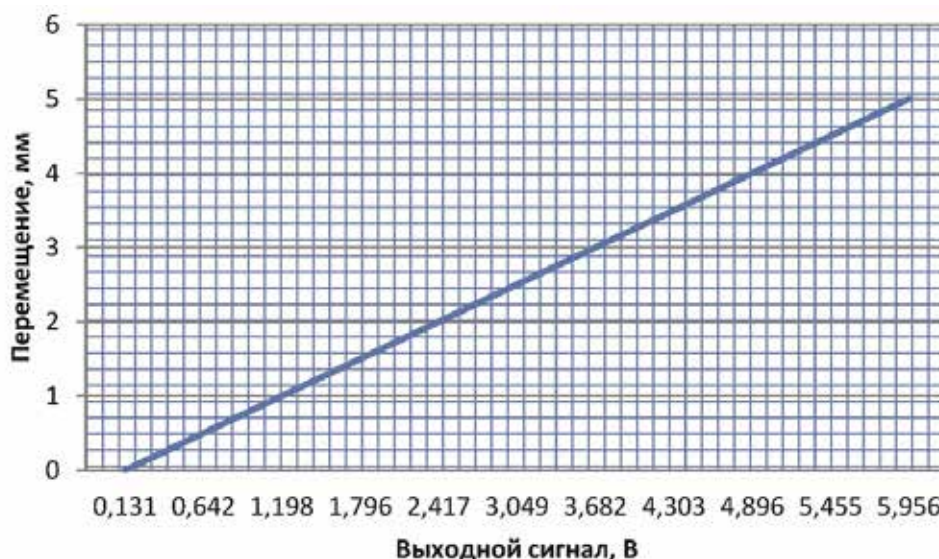


Рис. 3. Градуировочная характеристика ДЛП

Заключение

Разработанный датчик для систем ракетно-космической техники, основанный на принципе линейно-регулируемого дифференциального трансформатора, прошел предварительные испытания, в результате которых были подтверждены основные технические характеристики датчика, представленные в табл. 1. Таким образом, разработанный в АО «НИИФИ» датчик линейных перемещений соответствует требованиям, предъявляемым к датчикам, работающим в условиях открытого космоса.

Таблица 1

Основные технические характеристики ДЛП

Наименование характеристики и единицы измерения	Значения характеристик
	ДЛП
1. Диапазон измерений, мм	от 0 до 5
2. Выходной сигнал	аналоговый
3. Дополнительная погрешность от воздействия температуры, %	$\pm 1,5$
4. Дополнительная погрешность от воздействия пониженного давления, %	$\pm 2,5$
5. Наличие электроники	есть
6. Диапазон рабочих температур, °C	от минус 50 до плюс 50
7. Вибрация: величина виброускорений, g диапазон частот, Гц	30 от 5 до 2000
8. Единичный механический удар, g длительностью, мс	300 1–3
9. Основная приведенная погрешность, %	0,11
10. Масса ЧЭ, кг, не более	0,3
11. Срок службы, лет	21

Список литературы

1. Гаврилов, В. А. Система измерения линейных перемещений / В. А. Гаврилов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 44–46.
2. Дмитриенко, А. Г. Электромагнитный датчик линейных перемещений с торцевым сопряжением растров / А. Г. Дмитриенко, Д. И. Нефедьев, А. А. Трофимов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 4–10.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. Ю. А. Заболотной ; под ред. Е. Л. Свинцова. – М. : Техносфера, 2005. – 588 с.
4. Трофимов, А. Н. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений / А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2009. – № 6. – С. 24–27.
5. Агейкин, Д. И. Датчики контроля и регулирования / Д. И. Агейкин, Е. Н. Костин, Н. Н. Кузнецова. – М. : Машиностроение, 1965. – 928 с.
6. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики. Справочник : пер. с англ. / Р. Г. Джексон ; под ред. В. В. Лучина. – М. : Техносфера, 2007. – 280 с.
7. Шидлович, Л. Х. Дифференциальные трансформаторы и их применение / Л. Х. Шидлович. – М., 1966. – С. 78–86.
8. Дмитриенко, А. Г. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники / А. Г. Дмитриенко, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 18–21.
9. Дмитриенко, А. Г. Математическая модель, расчет и оптимизация взаимоиндуктивных датчиков линейных перемещений / А. Г. Дмитриенко, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов, В. Л. Кирьянов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 16–19.
10. Трофимов, А. А. Результаты разработки тепловой модели датчика линейных перемещений / А. А. Трофимов, Д. А. Скаморин, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2007. – Т. 1. – С. 371–373.

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Рязанцев Дмитрий Андреевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Ryazantsev Dmitriy Andreevich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 531.714.2

Трофимов, А. А.

Датчик линейных перемещений для систем измерения ракетно-космической техники /
А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). –
С. 52–57.

УДК 621.3.088.7

О. Н. Исанбаев, Д. С. Куликов

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

O. N. Isanbaev, D. S. Kulikov

THE METHOD OF PRELIMINARY TEMPERATURE CORRECTION OF PRIMARY MEASURING CONVERTER OF SMART SENSOR OF SHIFT

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрены особенности температурной коррекции с учетом влияния температуры окружающей среды на измерительные цепи датчика перемещений. Целью работы является оптимизация методики температурной коррекции для увеличения быстродействия датчика и снижения используемых ресурсов микроконтроллера. **Материалы и методы.** Применены численные методы, такие как полиномиальная аппроксимация. **Результаты.** Получена методика предварительной коррекции кода температуры, позволяющая увеличить быстродействие датчика, снизить объем используемых ресурсов и повысить точность измерений. **Выводы.** Описанная методика может быть распространена на всю процедуру температурной коррекции основной измеряемой величины.

A b s t r a c t. Background. The article reviews features of temperature correction depending on the influence of environment temperature upon smart sensor of movement measuring chains. The objective is optimization of temperature correction method for increasing sensor's efficiency and decreasing of applied microcontroller's resources. **Materials and methods.** The calculus of approximations such a polynomial approximation are applied. **Results.** The method of preliminary correction temperature's code is obtained. It provides to increase sensor efficiency, to decrease applied microcontroller's resources and to improve a precision of measurements. **Conclusions.** The described method can use to distribut on the whole procedure of temperature correction of basic measured value.

К л ю ч е в ы е с л о в а: температурная коррекция, полиномиальная аппроксимация, погрешность измерения, влияние температуры, измерительная цепь.

K e y w o r d s: temperature correction, polynomial approximation, measurement error, influence of the temperature, measuring chain.

При измерении неэлектрических величин в широком температурном диапазоне температура окружающей среды первичного измерительного преобразователя (ПИП) выходит за пределы рабочего диапазона электрорадиоизделий (ЭРИ), входящих в состав вторичного измерительного преобразователя (ВИП), в том числе и микроконтроллера (МК). В этом случае, как показано на рис. 1, ПИП соединяют с ВИП кабельной перемычкой (КП) такой длины, что-

бы ВИП мог находиться в зоне воздействия температур, при котором возможно нормальное функционирование ЭРИ, входящих в состав ВИП. Для осуществления температурной коррекции выходного сигнала ПИП используют информацию о температуре, действующей на ПИП, разместив в одном корпусе с ПИП датчик температуры ДТ1. Сигналы измерения входной величины x с датчика измеряемой величины Дх и температуры $t_{\text{п}}$ с датчика ДТ1 ПИП поступают через КП на измерительные цепи ИЦ_х и ИЦ_т соответственно, и в виде сигналов $A_{\text{п}}^x$ и $A_{\text{п}}^t$ подаются на аналоговые входы микроконтроллера, где осуществляется преобразование сигналов, их обработка и коррекция температурной погрешности средствами микропроцессора МП с последующей передачей скорректированного кода измеряемой величины $N_{\text{вых}}^x$ через цифровой интерфейс МК. При воздействии на ВИП температуры окружающей среды $t_{\text{в}}$ измерительные цепи вносят дополнительную температурную погрешность преобразования сигналов ПИП, что снижает эффективность температурной коррекции ПИП и вносит существенную погрешность при дальнейшей обработке кода аналого-цифрового преобразователя (АЦП) входной измеряемой величины $N_{\text{п}}^x$.

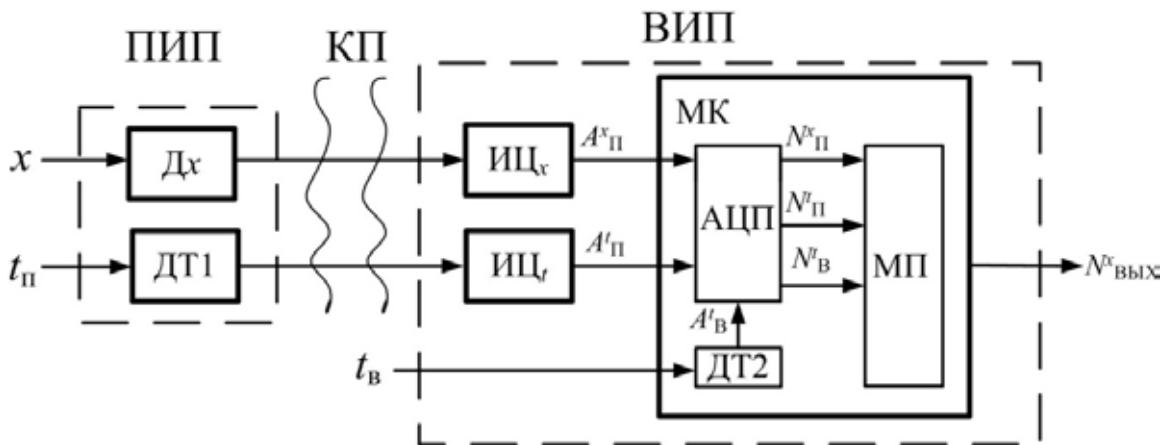


Рис. 1. Структурная схема преобразования сигналов интеллектуального датчика перемещений

Важность вопроса температурной коррекции сигнала измеряемой величины подтверждается рядом работ по данной тематике [1–6]. В работе [1] рассматривается вопрос построения измерительных цепей устройства коррекции температурной погрешности на основе анализа эквивалентной схемы замещения измерительного преобразователя. В статье [2] проблема температурной погрешности решается в основном схемотехническими методами за счет анализа измерительных цепей. Возможность применения теоретических методов анализа (импедансный метод) в вопросах коррекции температурной погрешности проверяется в [3]. В работе [4] рассматривается применение методов полиномиальной коррекции температуры, при которых производится коррекция только показаний ПИП без учета влияния температуры окружающей среды ВИП (рис. 2,а), что приводит к значительным ошибкам при дальнейших вычислениях. Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления с применением методов полиномиальной интерполяции и статистической обработки данных описывается в [5]. Рассматриваемая в [5] методика предполагает, что на ПИП и ВИП воздействует одна и та же температура. Следовательно, проведение температурной коррекции с учетом действующей на ВИП температуры невозможно вследствие малого количества данных, коррекция производится также без учета температуры ВИП (рис. 2,а). Для решения этой проблемы в [6] было предложено перед операцией коррекции кода измеряемой величины x провести предварительную коррекцию кода температуры $t_{\text{п}}$ с учетом температуры $t_{\text{в}}$ (рис. 2,б) методами полиномиальной аппроксимации и кусочно-линейной интерполяции. Основным недостатком предложенной методики коррекции является применение методов кусочно-линейной интерполяции, что приводит к снижению точности расчетов по описанной

методике. Следующим недостатком является необходимость хранения в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) МК большого количества коэффициентов и поиска среди них коэффициентов, соответствующих температурному диапазону, которому принадлежат измеренные температурные коды ПИП N_{Π}^t и ВИП $N_{\text{В}}^t$. Это приводит к уменьшению свободного пространства памяти ПЗУ, а также к снижению скорости обработки данных.

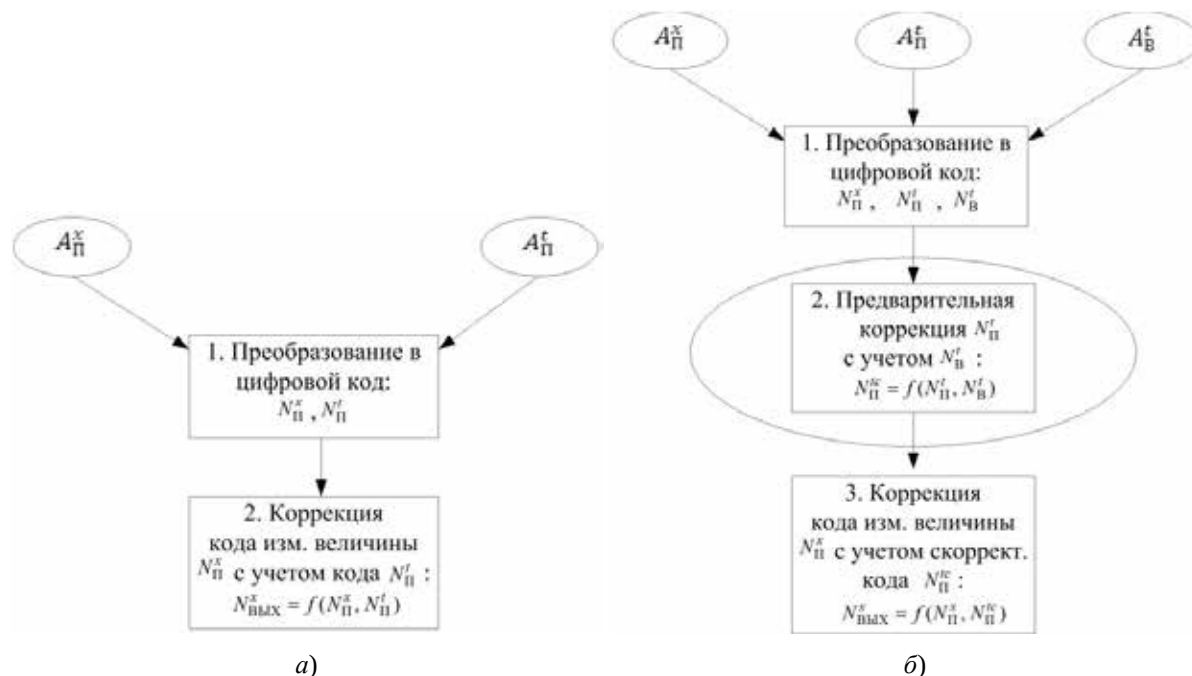
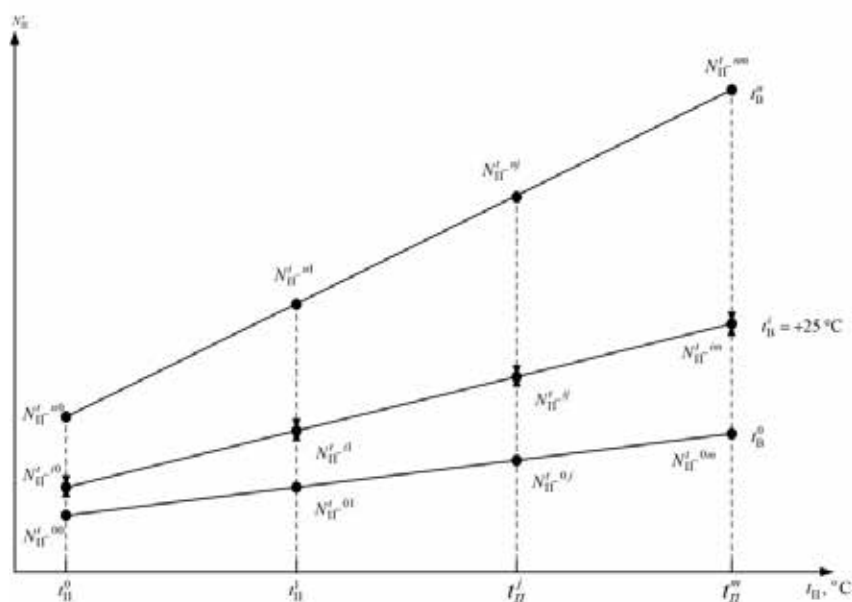


Рис. 2. Методики температурной коррекции кода измеряемой величины

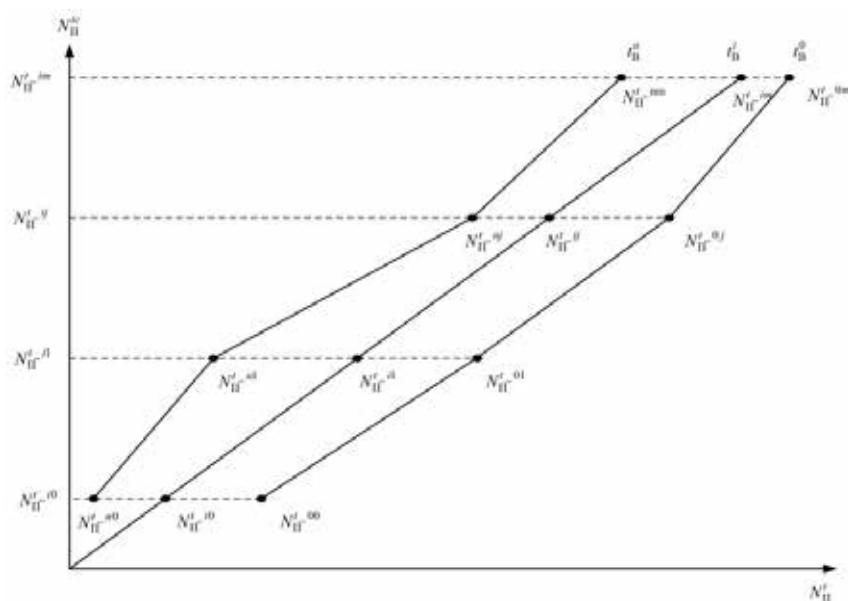
Целью настоящей работы является усовершенствование методики температурной коррекции, описанной в [6], а именно: повышение быстродействия и уменьшение объема памяти, занимаемого необходимыми для выполнения коррекции коэффициентами в ПЗУ МК, при сохранении последовательности операций, показанной на рис. 2,б. Одной из составляющих, необходимых для выполнения поставленной задачи, является отказ от кусочно-линейной интерполяции и, следовательно, применение только полиномиальной аппроксимации. Это будет иметь большое значение при обработке сигнала ограниченными вычислительными ресурсами микроконтроллера, так как степенные многочлены легко вычислить за конечное число шагов и проводить операции дифференцирования и интегрирования с применением только основных арифметических операций [7–10].

Основной задачей методики коррекции температурной погрешности является приведение значения зависимостей $N_{\Pi}^t = f(t_{\Pi})$ при $t_{\Pi} \neq +25^{\circ}\text{C}$ к зависимости $N_{\Pi}^t = f(t_{\Pi})$ при $t_{\Pi} = +25^{\circ}\text{C}$. Для выполнения этой задачи необходимым условием является проведение предварительных температурных испытаний датчика с заданием температур воздействия как на ПИП, так и на ВИП с целью получения исходных данных для проведения последующих расчетов. Количество точек температурной настройки определяется исходя из требований к температурной погрешности, но при этом следует учитывать, что увеличение числа точек ведет как к повышению точности аппроксимации, так и к усложнению методики и, как следствие, увеличению времени вычислений, осуществляемых МК. При осуществлении температурной коррекции кода выходного сигнала ПИП при температуре t_{Π}^j (где $j \in [0...m]$ – номер точки температурной настройки ПИП) температура $t_{\text{В}}^i$, воздействующая на измерительные цепи ВИП (где $i \in [0...n]$ – номер точки температурной настройки ВИП), вносит погрешность измерения как измеряемой величины x , так и температуры окружающей среды ПИП t_{Π} .

Первым этапом методики коррекции температурной погрешности измерения входной величины x и температуры окружающей среды ПИП является формирование массивов, содержащих следующие данные: значения кода АЦП температуры ПИП N_{Π}^t , полученные с ДТ1 в точках температурной настройки ПИП и значения кода АЦП температуры ВИП $N_{\text{В}}^t$, полученные с ДТ2 (см. рис. 1), в точках температурной настройки ВИП. Эта операция необходима для выявления и анализа зависимости между величинами N_{Π}^t , t_{Π} и $t_{\text{В}}$. Всего предусматривается создание n массивов с использованием полученных данных, соответствующих числу точек температурной настройки $t_{\text{В}}$ и содержащих точки N_{Π}^{t-ij} , по m точек N_{Π}^{t-ij} в массиве, где m – число точек температурной настройки ПИП, показанных на рис. 3,а. Для определенности выберем значения $n = 3$ и $m = 4$.



а)



б)

Рис. 3. Графики температурных зависимостей:

$$a - N_{\Pi}^t = f(t_{\Pi}); \quad б - N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$$

Следующим этапом методики температурной коррекции температурной погрешности преобразования измеряемой величины x и температуры окружающей среды ПИП является переход из одной системы координат в другую, а именно: $(t_{\Pi}; N_{\Pi}^t) \rightarrow (N_{\Pi}^t; N_{\Pi}^{tc})$, где N_{Π}^{tc} – скорректированный код АЦП температуры ПИП, значения которого численно равны N_{Π}^t при $t_{\Pi} = +25^{\circ}\text{C}$ (рис. 3,б). Этот переход дает возможность исключить из методики процедуру поиска участка температурной зависимости кода температуры ПИП и ВИП, что приводит к повышению быстродействия интеллектуального датчика. Степень полинома, который будет аппроксимировать зависимости $N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$ для каждой из t_B^i в новой системе координат, будет зависеть от количества точек температурной настройки t_B^i . При числе точек температурной настройки $m > 4$, $n > 4$ лучшим решением будет являться применение интерполяции сплайнами, так как, хотя увеличение степени полинома снижает неадекватность модели заданной функции преобразования, оно приводит к вычислительным сложностям, что является важным требованием при ограниченных вычислительных ресурсах микроконтроллера.

Массивы данных, сформированные на предыдущих этапах, с учетом смены системы координат позволяют записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} N_{\Pi}^{t-i0} = a_{03}(N_{\Pi}^{t-00})^3 + a_{02}(N_{\Pi}^{t-00})^2 + a_{01}N_{\Pi}^{t-00} + a_{00} \text{ для } t_B^0; \\ \dots \\ N_{\Pi}^{t-i0} = a_{i3}(N_{\Pi}^{t-i0})^3 + a_{i2}(N_{\Pi}^{t-i0})^2 + a_{i1}N_{\Pi}^{t-i0} + a_{i0} \text{ для } t_B^i; \\ \dots \\ N_{\Pi}^{t-i0} = a_{n3}(N_{\Pi}^{t-n0})^3 + a_{n2}(N_{\Pi}^{t-n0})^2 + a_{n1}N_{\Pi}^{t-n0} + a_{n0} \text{ для } t_B^n. \end{cases} \quad (1)$$

Выполняя аналогичные действия для каждого массива, аппроксимирующего зависимости $N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$ для каждой из t_B^i , возможно записать аналогичные системы уравнений, которые можно представить в общем виде как

$$N_{\Pi}^{tc} = N_{\Pi}^{t-ij} = \sum_{j=0}^{m-1} a_{ij}(N_{\Pi}^t)^j \text{ для } i \in [0 \dots n-1], j \in [0 \dots m-1]. \quad (2)$$

Решая систему нелинейных уравнений (1), получаем значения коэффициентов a_{ij} . Процесс решения может упростить тот факт, что при определенных выше условиях все коэффициенты полинома, интерполирующего зависимость $N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$ при $t_B = +25^{\circ}\text{C}$, представленного на рис. 2,б, будут равны 0, кроме множителя при первой степени полинома, который равен 1.

Из системы (1) можно увидеть зависимость коэффициентов a_{ij} от кода температуры ВИП N_B^t . Эта зависимость представлена на рис. 4. На данном этапе методики формируется n массивов, каждый из которых содержит n элементов – коэффициентов полинома a_{ij} , находящиеся при члене полинома одной и той же степени для каждой из m точек температурной настройки ВИП t_B^i .

Каждую из представленных зависимостей можно аппроксимировать полиномом второй степени; эти полиномы составляют систему уравнений:

$$\begin{cases} a_{i3} = b_{23}(N_B^{t-i})^2 + b_{13}N_B^{t-i} + b_{03}, \\ a_{i2} = b_{22}(N_B^{t-i})^2 + b_{12}N_B^{t-i} + b_{02}, \\ a_{i1} = b_{21}(N_B^{t-i})^2 + b_{11}N_B^{t-i} + b_{01}, \\ a_{i0} = b_{20}(N_B^{t-i})^2 + b_{10}N_B^{t-i} + b_{00}. \end{cases} \quad (3)$$

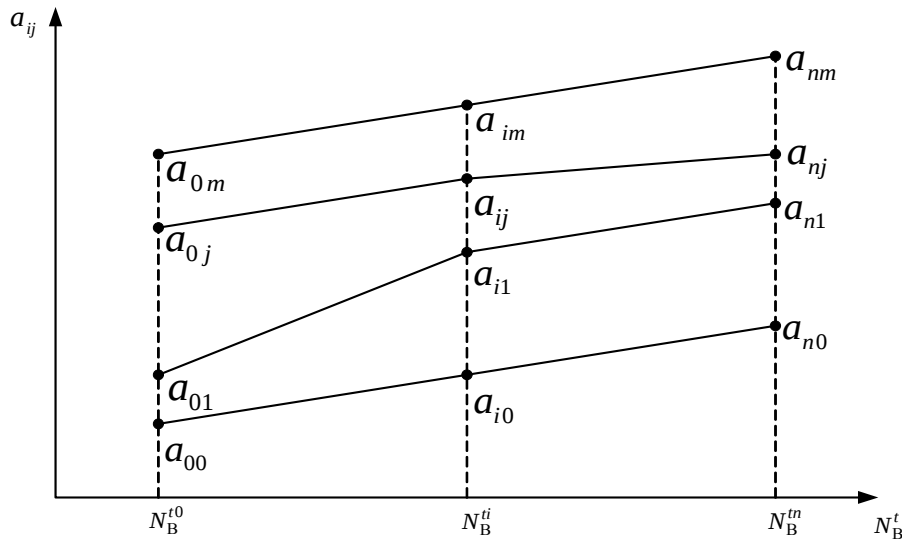


Рис. 4. Зависимость коэффициентов полиномиальной зависимости $N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$ от кода температуры ВИП N_B^t

В общем виде эта система уравнений записывается как

$$a_{ij} = \sum_{i=0}^{n-1} b_{ij} (N_B^t)^i \text{ для } j \in [0 \dots m]. \quad (4)$$

Решая систему нелинейных уравнений (3), получаем значения коэффициентов b_{ij} .

Процесс решения систем (1), (3) может быть оптимизирован, если принять во внимание тот факт, что в системах уравнений (1), (3) неизвестные – коэффициенты полинома – находятся в первой степени, а известные нам данные являются степенными членами уравнения. То есть решается не система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), а система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). В этом случае коэффициенты уравнения достаточно легко отыскать, применяя метод Гаусса, программная реализация которого больше подходит для ограниченных вычислительных ресурсов МК.

Выполнив подстановку выражения (4) в выражение (2), получим уравнение для выполнения температурной коррекции N_{Π}^t на последнем этапе методики:

$$N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t, N_B^t) = \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{i=0}^{n-1} b_{ij} (N_B^t)^i (N_{\Pi}^t)^j. \quad (5)$$

Оценим приведенную погрешность вычислений, выполненных согласно шагам описанной методики. Приведенная погрешность рассчитывается по следующей формуле:

$$\gamma_{\text{прив}} = \frac{N_{\Pi}^{t-i} - N_{\Pi}^{t-im}}{N_{\Pi}^{th} - N_{\Pi}^{tl}} \cdot 100 \%,$$

где N_{Π}^{t-i} – код АЦП температуры ПИП в нормальных климатических условиях; N_{Π}^{t-im} – измеренный код АЦП температуры ПИП; N_{Π}^{th} – код АЦП температуры ПИП при максимальной рабочей температуре ПИП; N_{Π}^{tl} – код АЦП температуры ПИП при минимальной рабочей температуре ПИП. После применения методики коррекции температурного воздействия t_B для одинаковых наборов данных приведенная погрешность достигает не более 0,01 % от общего диапазона кодов АЦП против 4,29 % для методики температурной коррекции [6].

Заключение

Из формулы (5) следует, что предложенная методика температурной коррекции позволяет осуществлять температурную коррекцию с применением лишь текущих значений N_B^t и N_{II}^t . Таким образом, из процесса температурной коррекции исключаются операции поиска участка характеристики, к которому принадлежат измеренные значения N_B^t и N_{II}^t , что позволяет повысить частоту обработки измеряемой величины и уменьшить занимаемый коэффициентами объем памяти ПЗУ МК, так как сокращено число данных, вносимых в ПЗУ. Также по сравнению с предыдущим вариантом методики снижена приведенная погрешность обработки измеряемой величины.

Список литературы

1. Маланин, В. П. Устройство коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков давления / В. П. Маланин, А. Л. Шамраков, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 3 (9). – С. 71–75.
2. Измерительные цепи высокотемпературных емкостных датчиков давления / В. П. Арбузов, М. А. Мишина, П. Н. Бельнцева, И. Ю. Ананьина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1 (11). – С. 81–87.
3. Маланин, В. П. О применимости метода импедансного анализа для коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков / В. П. Маланин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 52–56.
4. О полиномиальной коррекции температурных погрешностей акселерометрических датчиков / Д. Г. Миловзоров, Е. С. Морозова, Г. Н. Ковшов, А. В. Ужеловский // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18, № 1 (62). – С. 79–83.
5. Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления / А. Ю. Николаенко, А. А. Львов, П. А. Львов и др. – Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (77). – С. 154–160.
6. Алгоритм температурной коррекции первичного измерительного преобразователя // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. (Пенза, 19–21 мая 2015). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – С. 237–239.
7. Самарский, А. А. Введение в численные методы / А. А. Самарский – М. : Наука, 1982. – 272 с.
8. Волков, Е. А. Численные методы / Е. А. Волков. – М. : Наука, 1987. – 248 с.
9. Хемминг, Р. В. Численные методы / Р. В. Хемминг. – М. : Наука, 1972. – 400 с.
10. Каханер, Д. Численные методы и математическое обеспечение : пер. с англ. / Д. Каханер, К. Моулера, С. Нэш ; под ред. Х. Д. Икрамова. – М. : Мир, 1998. – 575 с.

Исанбаев Олег Николаевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ingen.ole@yandex.ru

Isanbaev Oleg Nikolaevich

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

Куликов Дмитрий Сергеевич

инженер-программист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: kulikovdmitriy@rambler.ru

Kulikov Dmitriy Sergeevich

engineer-programmer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.3.088.7

Исанбаев, О. Н.

Методика предварительной температурной коррекции показаний первичного измерительного преобразователя интеллектуального датчика перемещений / О. Н. Исанбаев, Д. С. Куликов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 58–65.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 517.977: 519.21: 621.396: 621.37

*А. К. Гришко, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков***УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
УСТОЙЧИВОСТЬЮ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИКИ
ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА¹***A. K. Grishko, A. S. Zhumabaeva, N. K. Yurkov***THE ELECTROMAGNETIC RESISTANCE OF ELECTRONIC
SYSTEMS BASED ON PROBABILISTIC ANALYSIS
OF THE DYNAMICS OF THE INFORMATION CONFLICT**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Приведено исследование процессов функционирования радиоэлектронной системы, состоящих из множества различных радиоэлектронных средств, подвергающихся в процессе работы непреднамеренным и преднамеренным помехам. Предметом исследования являются модели обеспечения электромагнитной совместимости совокупности радиоэлектронных средств. Цель работы состоит в том, чтобы выбрать оптимальный план работы множества различных радиоэлектронных систем и средств с целью повышения эффективности их совместного функционирования путем перестройки параметров излучений. *Материалы и методы.* Предлагается применение вероятностного подхода к анализу динамики состояний модели функционирования радиоэлектронных средств, построенной на основе теории полумарковских процессов. *Результаты.* Получены модели для расчета и анализа эффективности функционирования радиоэлектронных средств, отличающиеся системным учетом всех факторов, влияющих на их совместную работу, и достоверностью формализации описания процесса. *Выводы.* На основе предложенных моделей можно осуществлять оптимальное планирование частотного ресурса с целью уменьшения уровня помех для радиоэлектронных средств, а это значит сформировать эффективную радиоэлектронную систему, оснащенную разнотипными радиоэлектронными средствами. Предложенные модели позволяют не только анализировать эффективность функционирования системы радиоэлектронных средств, но и решать обратные задачи по совершенствованию их защищенности до необходимого уровня.

¹ Статья подготовлена в рамках проектной части государственного задания выполнения государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» (№ 8.389.2014/К) по теме «Информационные технологии анализа конструкций радиоэлектронных средств при воздействии внешних факторов».

A b s t r a c t. *Background.* The article studies the processes of functioning of electronic system, consisting of a variety of electronic means, subject to the process of unintentional and intentional interference. Object of research are models of the electromagnetic compatibility of the totality of radio electronic means. The aim of this work is to choose the optimal plan for the operation of multiple different electronic systems and tools with the aim of improving the efficiency of their joint operation by adjustment of parameters of radiation. *Materials and methods.* It is proposed to use a probabilistic approach to the analysis of the dynamics of States in the model of functioning of electronic equipment built on the basis of the theory of semi-Markov processes. *Results.* The result of this approach the resulting model to calculate and analyze the efficiency of the electronic means, wherein the system into account all the factors that affect their joint work and the accuracy of the formalization of the description of the process. *Conclusions.* Based on the proposed models to implement the optimal scheduling of the frequency resource with the aim of reducing the level of interference for radio-electronic means, and it means to create an effective electronic system, equipped with a including, different types of radio-electronic means. The proposed model allows not only to analyze the effectiveness of the system of radio-electronic means, but also to solve the inverse problem for improving security to the required level.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиотехническая система, радиоэлектронные средства, помехи, электромагнитная совместимость.

К e y w o r d s: radio systems, electronic warfare, interference, electromagnetic compatibility.

Введение

Сравнительный анализ современных методов и моделей функционирования сложных радиоэлектронных систем, состоящих из множества радиоэлектронных средств (РЭС), к тому же, как правило, разнотипных, показал, что во многих случаях они являются несовершенными [1–3]. Связано это с тем, что методика построения моделей не учитывает ряд особенностей и факторов, влияющих на эффективность функционирования.

Радиоэлектронные системы специального назначения имеют высокую плотность компоновки РЭС и их отдельных узлов, функционируют в тяжелых условиях, их эксплуатация должна учитывать одновременное использование и применение разнотипных РЭС различного назначения [3, 4].

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) проводят определенные организационно-технические мероприятия:

1. Отключают одну из однотипных радиосистем или передачу информации разнотипными средствами, работающими в одном диапазоне частот, разносят во времени.
2. Ранжируют приоритеты РЭС по важности работы для возможного дальнейшего отключения менее важных из них в целях выполнения конкретных задач.
3. Ужесточают нормы частотно-территориального разнесения, в том числе увеличивают расстояния между группами и подразделениями, оснащенными РЭС.
4. Стараются применять радиосистемы, в которых автоматически блокируется прием или излучение конфликтного РЭС на время работы приоритетных.

Вышеперечисленные методы устранения проблем ЭМС достаточно эффективны в радиосистемах гражданского назначения и допустимы в специальных радиосистемах в период мирного времени. Во время чрезвычайных ситуаций и военного противоборства решение проблемы ЭМС обычным отключением РЭС, снижающим боевую эффективность действий подразделений и групп, недопустимо.

Постановка задачи

Методы и модели, которые используют в настоящее время, ориентируются в первую очередь на наличие большого статистического материала, низкую динамику смены состояний внешних воздействий, а также низкую динамику состояний самой радиоэлектронной системы.

Поэтому разработка методик расчета оценки эффективности функционирования сложных радиоэлектронных систем в условиях деструктивных внешних воздействий и в реальном масштабе времени является важной и актуальной.

Полумарковские процессы являются естественным и важным обобщением цепей и процессов Маркова, а также теории восстановления, что, в свою очередь, позволяет естественным образом моделировать широкий класс реальных систем. Полумарковский случайный процесс – это случайный процесс с конечным счетным множеством состояний, у которого, в отличие от марковского процесса, вероятность перехода из одного состояния в другое зависит от времени, которое он уже провел в первом состоянии [2, 4]. Оптимизируемая система осуществляет переход в новое состояние в соответствии с матрицей вероятностей перехода:

$$P = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{vmatrix}$$

Элемент матрицы p_{ij} несет информацию о вероятности перехода рассматриваемой системы в состояние S_i из состояния S_j . Таким образом, каждая строка матрицы соответствует предыдущим состояниям, а каждый столбец – новым состояниям системы. Сумма элементов в любой строке равна единице. Предполагается, что после перехода модели в очередное состояние процесс ведет себя в дальнейшем так, как будто она в этом состоянии находилась в начальный момент времени, и для дальнейшей эволюции модели не имеет значения, каким образом она в это состояние попала.

Эти свойства полумарковских процессов являются важными для обеспечения высокой динамичности разрабатываемой модели, а сравнительная простота и наглядность являются одними из определяющих для методологического выбора. Задача оптимизации поведения построенного ориентированного графа в случайной среде заключается в варьировании переменных параметров, при которых минимизируется определенная заранее заданная величина.

1. Синтез модели обеспечения ЭМС

Для расчета среднего времени успешной работы РЭС при воздействии радиопомех представим модель функционирования в виде полумарковской системы [5, 6]. Предположим, что РЭС с заданной эффективностью функционирует с момента t_0 до момента времени t_1 . Будем считать, что на этом временном интервале РЭС не подвергается воздействию преднамеренных помех.

В момент наступления времени t_2 приемные тракты РЭС начинают подвергаться воздействию непреднамеренных или преднамеренных помех, и с этого момента начинаются мероприятия по защите РЭС путем перестройки его параметров.

Для построения графа выделяем два состояния РЭС в условиях воздействия помех – это успешное выполнение поставленной задачи и отстройка РЭС от помех. Динамику состояний полумарковского процесса, описывающую процесс функционирования радиоэлектронной системы в условиях воздействия помех с возможностью управления параметрами сигнала излучения РЭС с целью снижения влияния радиопомех, представим в виде ориентированного графа на рис. 1.

Полумарковский процесс будет находиться в состоянии e_1 , пока не наступит какое-нибудь из двух случайных событий: либо РЭС успешно выполнит поставленное задание до того, как появятся помехи и полумарковский процесс перейдет в состояние e_4 , либо произойдет обнаружение помехи на входе РЭС в процессе его функционирования до выполнения задания и полумарковский процесс перейдет в состояние e_2 . Полумарковский процесс также перейдет в состояние e_2 , если мощность помехи превысит пороговое значение мощности полезного сигнала в приемном тракте РЭС и при совпадении частот работы РЭС и помехи.

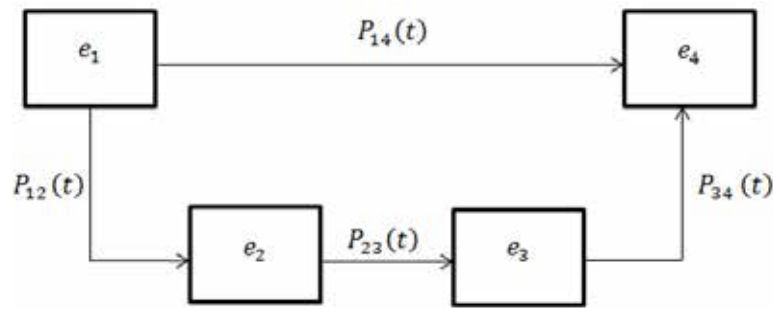


Рис. 1. Динамика состояний полумарковского процесса, описывающего функционирование радиоэлектронной системы в условиях воздействия помех: e_1 – РЭС не подвергается воздействию помех; появление помех возможно; e_2 – переход РЭС в защищенное состояние с восстановлением работоспособности в условиях воздействия преднамеренных помех; e_3 – РЭС функционирует в защищенном (восстановленном) режиме; e_4 – РЭС завершает выполнение поставленного задания

Полумарковский процесс будет находиться в состоянии e_2 , пока не будет достигнут требуемый уровень защищенности и работоспособность РЭС в условиях помех полностью восстановится. После чего полумарковский процесс перейдет в состояние e_3 .

В состоянии e_3 полумарковский процесс будет находиться, пока не будет решена поставленная задача РЭС после восстановления ее работоспособности в условиях помех. После этого полумарковский процесс перейдет в состояние e_4 .

2. Система интегральных уравнений для расчета вероятностей выполнения задачи

Система интегральных уравнений для описания полумарковского процесса функционирования РЭС в условиях помех выглядит следующим образом [5, 6]:

$$\begin{aligned}\Psi_1(t) &= \int_0^t \Psi_2(t-u) dP_{12}(u) + P_{14}(t), \quad i=1 \dots (n-1), \\ \Psi_2(t) &= \int_0^t \Psi_3(t-u) dP_{23}(u), \\ \Psi_3(t) &= P_{34}(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где $\Psi_i(t)$ является функцией распределения времени успешного завершения процесса с условием его начала в состоянии e_i ($i=1, 2, 3$); P_{ij} – вероятности переходов полумарковского процесса из состояния e_i в состояние e_j , если полумарковский процесс в состоянии e_j находился в течение времени t .

Если численно или аналитически с помощью преобразования Лапласа решить систему интегральных уравнений относительно $\Psi_i(t)$, то можно получить функцию распределения времени успешной работы РЭС в условиях действия помех [7, 8], а, значит, значение вероятности выполнения поставленной задачи за период времени составит не более t .

3. Система алгебраических уравнений для расчета среднего времени управления параметрами РЭС в условиях воздействия помех

Для расчета среднего времени управления параметрами РЭС в условиях радиоэлектронного противодействия система алгебраических уравнений будет принимать следующий вид [1, 2, 9]:

$$\tau_1 = \zeta_1 + p_{12}\tau_2,$$

$$\tau_2 = \zeta_2 + p_{23}\tau_3, \quad (2)$$

$$\tau_3 = \zeta_3,$$

где τ_i – значение среднего времени успешного завершения процесса с условием его начала в состоянии e_i ($i=1, 2, 3$); p_{ij} – вероятности переходов из состояния e_i в состояние e_j ; ζ_i – математическое ожидание времени нахождения полумарковского процесса в состоянии e_i .

Если численно или аналитически решить систему алгебраических уравнений относительно τ_1 , то можно определить среднее время успешной работы РЭС в условиях воздействия помех.

4. Расчет вероятности совпадения частот и вероятности превышения мощности помехи над пороговым сигналом

При определении вероятности перехода $P_{12}(t)$ из состояния e_1 в состояние e_2 также необходимо учитывать дополнительно вероятность возможного совпадения частот РЭС и вероятности возможного превышения над пороговым сигналом мощности помех [1, 6].

Вероятность возможного совпадения частот РЭС, подчиненной нормальному закону с параметрами m и σ , можно рассчитать по формуле

$$\rho_f = \rho^* \left(\left(\tilde{f}_c - \tilde{f}_n \right) < \xi \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\xi} e^{-\frac{(u-m)^2}{2\sigma^2}} d(u),$$

$$m = \left(\bar{f}_c - \bar{f}_n \right),$$

$$\sigma = \frac{km}{3}, \quad (3)$$

где ρ_f – вероятность совпадения частот РЭС; $\tilde{f}_c, \bar{f}_c$ – значение случайной величины частоты сигнала и среднее значение частоты полезного сигнала; $\tilde{f}_n, \bar{f}_n$ – значение случайной величины частоты помехи и среднее значение частоты помехи; ξ – минимальное допустимое рассогласование частот РЭС, при котором сказывается влияние помехи; k – максимальное возможное рассогласование частот от m .

Вероятность превышения значения мощности помехи над пороговым значением мощности сигнала [1, 2, 6]:

$$\rho_P = \rho^* \left(\tilde{P}_n \geq K_n \tilde{P}_c \right) = \int_0^{\infty} G_{K_n C}(u) dG_n(u), \quad (4)$$

где ρ_P – вероятность превышения случайного значения мощности помехи $\tilde{P}_n$, подчиненной нормальному закону распределения $G_{K_n C}$, над случайным значением мощности сигнала $\tilde{P}_c$ и умноженному на коэффициент подавления K_n (пороговое значение мощности сигнала) на входе РЭС; P_c и P_n – соответственно математические ожидания мощности полезного сигнала и помехи.

5. Расчет вероятностей перехода полумарковского процесса функционирования РЭС в условиях воздействия помех

Вероятности переходов рассчитываются по формулам полумарковского процесса [1, 2, 10–12]:

$$P_{12}(t) = \left[1 - (1 - \rho_f)(1 - \rho_P) \right] \int_0^t G_n(u) dG_P(t),$$

$$P_{14}(t) = \int_0^t G_P(u) dG_{\Pi}(t) + (1 - \rho_f)(1 - \rho_p) \int_0^t G_{\Pi}(u) dG_P(t) \quad P_{23}(t) = G_B(t), \quad (5)$$

$$P_{34}(t) = G_P(t),$$

где G_P – функция распределения времени работы РЭС; G_{Π} – функция распределения времени до появления помехи; G_B – функция распределения времени восстановления работоспособности РЭС в условиях действия помех. Значения ρ_f и ρ_p берем из выражений (3) и (4).

Подстановка выражений (5) в систему интегральных выражений (1) позволяет решить ее и определить функцию распределения времени выполнения поставленной перед РЭС задачи $\Psi_i(t)$.

При $t = \infty$ из уравнений (5) получаются значения вероятностей перехода:

$$p_{12} = P_{12}(t = \infty),$$

$$p_{14} = 1 - p_{12}, \quad (6)$$

$$p_{23} = P_{23}(t = \infty) = 1.$$

Эти значения подставляются в систему алгебраических уравнений полумарковского процесса (2).

6. Определение значений математических ожиданий пребывания полумарковского процесса в состояниях e_1 и e_2

Математические ожидания времени пребывания полумарковского процесса в состояниях e_1 и e_2 рассчитываются по формулам [1, 2, 11–13]:

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \int_0^{\infty} [1 - G_P] [1 - G_{\Pi}] d(t), \\ \zeta_2 &= \int_0^{\infty} [1 - G_B] d(t), \\ \zeta_3 &= \int_0^{\infty} [1 - G_P] d(t), \end{aligned} \quad (7)$$

их значения (7) также подставляются в систему алгебраических уравнений полумарковского процесса (2).

7. Определение среднего времени восстановления работоспособности РЭС и вероятности выполнения задания за время не более t

Система алгебраических уравнений имеет аналитическое решение, результирующее выражение которого относительно τ_1 , учитывая, что значение вероятности перехода полумарковского процесса из состояния e_2 в состояние e_3 равно единице (6), будет иметь следующий вид [1, 2, 6]:

$$\tau_1 = \zeta_1 + p_{12}(\zeta_2 + \zeta_3). \quad (8)$$

Для каждого конкретного образца РЭС существует определенный алгоритм, по которому осуществляется процесс восстановления его работоспособности в условиях воздействия

помех и перестройка параметров его излучений [12, 13]. Случайное время, затрачиваемое на восстановление работоспособности РЭС, будет определяться электронными схемами, а также будет зависеть от входных случайных параметров помехи. При дальнейших расчетах функцию распределения случайного времени целесообразно аппроксимировать с помощью нормального закона. Функция распределения при условии успешного выполнения задания РЭС будет иметь следующее выражение [1, 2, 12, 13]:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(u-\tau_1)^2}{2\sigma^2}} d(u), \quad (9)$$

где значение τ_1 находится по формуле (8).

Таким образом, выражения полученного математического аппарата позволяют оценивать эффективность функционирования РЭС – вероятность успешного выполнения поставленного задания за время не более t .

Соответственно дополнительно появляется возможность исследовать зависимости этого показателя эффективности от параметров процесса, например, математического ожидания времени функционирования радиоэлектронного средства в процессе выполнения задания, математического ожидания времени до момента действия помех, математического ожидания времени восстановления работоспособности радиоэлектронного средства [6–8]. Также можно исследовать, как зависит показатель эффективности от того, что мощность помехи превысит порог значения над мощностью полезного сигнала и вероятность того, что совпадут частоты радиоэлектронных средств.

8. Построение оптимального плана управления частотным ресурсом РЭС с учетом ограничений

Построение системы оптимального управления параметрами РЭС возможно на основе любой подходящей методики [9, 11–17]. Метод переборных применен для этих целей как самый простой и наглядный. Из множества возможных способов обеспечения эффективного функционирования каждого РЭС выбираются такие, которые будут обеспечивать [6, 9]:

$$\min \Delta = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{S_i} \Delta_{ij} \delta_{ij},$$

$$\Delta_{ij} = \ln(P_{ij\text{нпп}}(t) P_{ij\text{пп}}(t)),$$

$$P_{ij\text{нпп}}(t) = P^* \left(\left(\frac{P_c}{P_{\text{нпп}}} \right) < K_{\text{нпп}} \right) = \int_0^{K_{ij\text{нпп}}} g \left(\frac{P_c}{P_{\text{нпп}}} \right) d \frac{P_c}{P_{\text{нпп}}},$$

$$P_{ij\text{пп}}(t) = P^* \left(\left(\frac{P_c}{P_{\text{пп}}} \right) < K_{\text{пп}} \right) = \int_0^{K_{\text{пп}}} g \left(\frac{P_c}{P_{\text{пп}}} \right) d \frac{P_c}{P_{\text{пп}}},$$

где Δ_{ij} – интегральный логарифмический показатель уровня помех РЭС; $P_{\text{нпп}}(t)$ – значение вероятности возникновения непреднамеренных помех; $P_{\text{пп}}(t)$ – значение вероятности возникновения преднамеренных помех; $g \left(\frac{P_c}{P_{\text{п}}} \right)$ – значение плотности вероятности отношения мощности сигнала к помехе; $d \frac{P_c}{P_{\text{п}}}$ – дифференциал отношения мощности сигнала к помехе;

$K_{\text{п}}$ – коэффициент подавления; i – число РЭС; j – количество изменяемых параметров i -го РЭС; δ_{ij} – способ изменения j -го параметра i -го РЭС.

Необходим учет определенных ограничений [6, 9, 12]:

$$\sum_{i=1}^{S_i} C_i^k \delta_{ij} \leq \max C_i^k, k = \overline{1, \omega_i}, i = \overline{1, l},$$

$$\sum_{i=1}^{S_i} C_i^k \delta_{ij} \geq \min C_i^k,$$

$$\sum_{i=1}^{S_i} \delta_{ij} = 1, i = \overline{1, l},$$

где C_i^k – k -й параметр для i -го РЭС при использовании j -го способа обеспечения его функционирования; S_i – количество способов изменения параметров в i -м РЭС; l – количество РЭС, интегрированных в общий комплекс; ω_i – количество параметров в i -м устройстве, которые учитываются в ограничениях; $\sum_{i=1}^{S_i} \delta_{ij} = 1$ – показывает для i -го устройства обязательное применение одного из S_i способов.

Таблица вариантов настройки параметров РЭС (табл. 1) формируется путем включения в нее номиналов рабочих частот для каждого РЭС и значений вероятностей появления помех на входных трактах РЭС для конкретного набора частот [6, 12, 13]. На основе заполненных данных таблицы переборов определяется оптимальный план функционирования каждого РЭС радиоэлектронной системы.

Таблица 1

Таблица вариантов настройки параметров РЭС

Параметры РЭС	Варианты настройки РЭС 1				
	1	2	3	4	5
Δ	–0,5	–0,9	–0,7	–0,3	–0,4
$f_{\text{раб}}$	27	28	29	30	31
Параметры РЭС	Варианты настройки РЭС 2				
	1	2	3	4	5
Δ	–0,6	–0,1	–0,5	–0,3	–0,5
$f_{\text{раб}}$	27	28	29	30	31
Параметры РЭС	Варианты настройки РЭС 3				
	1	2	3	4	5
Δ	–0,2	–0,1	–0,2	–0,7	–0,4
$f_{\text{раб}}$	27	28	29	30	31
Параметры РЭС	Варианты настройки РЭС 4				
	1	2	3	4	5
Δ	–0,5	–0,4	–0,7	–0,3	–0,8
$f_{\text{раб}}$	27	28	29	30	31

В табл. 1 рассмотрен пример выбора оптимального частотного плана работы четырех радиолокационных РЭС, имеющих возможность перестройки на пяти рабочих частотах. Таблица заполнена данными в соответствии с рассчитанными совпадениями частот по основным или побочным излучениям. На основании занесенных в таблицу переборov данных получаем оптимальный частотный план функционирования в виде:

- для РЭС 1 варианта настройки № 2;
- для РЭС 2 варианта настройки № 1;
- для РЭС 3 варианта настройки № 4;
- для РЭС 4 варианта настройки № 5.

Выбор оптимального частотного плана для сложных интегрированных радиоэлектронных комплексов или их групп и группировок будет определяться для гораздо большего количества РЭС. Автоматизация предложенной методики расчета исходных данных и сама процедура перебора данных таблицы не будет затрачивать много времени.

Заключение

Предложенные математические модели, построенные на основе теории полумарковских процессов, позволяют произвести расчет среднего времени эффективной работы РЭС в условиях помех, расчет вероятности успешного функционирования двух РЭС с учетом их взаимного влияния, а также позволяет оптимально управлять частотным ресурсом с целью уменьшения уровней помех для РЭС. Таким образом, методика построения оптимального плана функционирования совокупности радиоэлектронных средств будет формировать эффективную систему управления разнотипными РЭС.

Разработанный математический аппарат позволяет не только анализировать эффективность функционирования системы радиоэлектронных средств, но и решать обратные задачи по совершенствованию их защищенности до необходимого уровня.

Список литературы

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятности / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 2005. – 576 с.
2. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
3. Гришко, А. К. Системный анализ параметров и показателей качества многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Д. В. Артамонов, В. А. Канайкин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 77–84.
4. Гришко, А. К. Динамическая оптимизация управления структурными элементами сложных систем / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Т. В. Жашкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 134–141.
5. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
6. Гришко, А. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 35, № 2-1. – С. 16.
7. Гришко, А. К. Цифровая обработка ансамблей сигналов в радиотехнических системах на основе обобщенной функции неопределенности / А. К. Гришко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2009. – Т. 1. – С. 220–221.
8. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 265–271.
9. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели / А. К. Гришко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 85–90.
10. Гришко, А. К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2. – С. 51–57.
11. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111.
12. Гришко, А. К. Метод последовательного анализа моделей радиолокационных систем в процессе эксперимента / А. К. Гришко, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 178–179.
13. Andreyev, P. The Temperature Influence on the Propagation Characteristics of the Signals in the Printed Conductors / P. Andreyev, A. Grishko, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science

- (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 376–378. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452063.
14. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
 15. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations / A. Grigor'ev, A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov, A. Mischev // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
 16. Grishko, A. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
 17. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.

Гришко Алексей Константинович

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

Grishko Aleksey Konstantinovich

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

Жумабаева Асель Сагнаевна

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

Zhumabaeva Asel' Sagnaevna

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

Юрков Николай Кондратьевич

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

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

doctor of technical sciences, professor,
honoured worker of science of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 517.977: 519.21: 621.396: 621.37

Гришко, А. К.

Управление электромагнитной устойчивостью радиоэлектронных систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта / А. К. Гришко, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 66–75.

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 681.2.082

*Е. А. Данилова***ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРОВОДЯЩЕГО
РИСУНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ***E. A. Danilova***BUILDING INFORMATION MEASUREMENT SYSTEM
DETECTING DEFECTS DE-CONDUCTIVE PATTERN
OF PRINTED CIRCUIT BOARDS**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Современные электронные средства – сложные системы с иерархической структурой, одним из элементов которой являются печатные платы. Их надежность закладывается как на этапе проектирования, так и на этапе технологического контроля. Целью работы является усовершенствование информационно-измерительной системы контроля печатных плат с оценкой влияния технологических отклонений и внешних эксплуатационных факторов на развитие обнаруженных дефектов. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи используются методы морфологической обработки изображения, компьютерного имитационного моделирования, в частности метод конечных элементов и методы нечеткой логики. Для численного решения применяется программный пакет ANSYS. *Результаты.* Предложено понятие латентного дефекта печатных плат. Усовершенствована фасетная классификация дефектов печатных плат. Описывается методика обнаружения латентных дефектов печатных плат. Предложена структурная схема информационно-измерительной системы контроля печатных плат. *Выводы.* Введение понятия латентного дефекта позволяет расширить диапазон допусков отклонений размеров печатных дорожек. Методика обнаружения дефектов, включающая анализ, классификацию типа дефекта и блок математического моделирования, позволяет определять дальнейшее развитие латентного дефекта. Предложенная структурная схема информационно-измерительной системы реализует предложенную методику.

A b s t r a c t. *Background.* Modern electronic media are complex systems with a hierarchical structure, one of which elements are printed circuit boards. Their reliability is laid both at the design stage, and the stage of technological control. The aim of the work is to improve the information-measuring PCB control system with the assessment of the impact of technological variations and external factors on the development of operational defects found. *Materials and methods.* To solve this problem uses morphological image processing techniques, computer simulation, in particular, the finite element method and the methods of fuzzy logic. For the

numerical solution using software package ANSYS. *Results.* The concept of latent defect PCBs. Improved facet classification PCB defects. A technique of detection of latent defects in printed circuit boards. A block diagram of the information-measuring PCB control system. *Conclusions.* Introduction of the concept latent defect allows you to extend the range of tolerance deviations of the printed track sizes. Methods of detection of defects, including analysis, defect type classification unit and mathematical modeling allows to determine the further development of a latent defect. The proposed structural information measurement scheme implements the proposed method.

К л ю ч е в ы е с л о в а: печатные платы, латентные дефекты, внешние воздействующие факторы, математическая модель, методика контроля, информационно-измерительная система.

К е у w o r d s: printed circuit boards, latent defects, external influencing factors, mathematical model, control technique, information-measuring system.

На сегодня практически все электронные средства (ЭС) создаются на основе печатных плат (ПП). Условия эксплуатации ЭС и объекты их установки различны, но неизменно к ПП предъявляются высокие требования по надежности. Надежность ЭС закладывается на этапе проектирования и должна обеспечиваться на этапе производства за счет применения современного оборудования и контроля качества на всех стадиях технологического процесса. Однако даже самое совершенное автоматизированное оборудование производства ПП не может гарантировать полное отсутствие дефектов.

В российской радиоэлектронной промышленности действует группа стандартов по печатным платам, в которых определены различные виды дефектов. В соответствии с ГОСТами в зависимости от класса точности нормируются такие параметры, как ширина печатного проводника и предельные отклонения его размеров.

Дефекты, размеры которых превосходят предельные отклонения размеров, установленные стандартом, признаются критическими. Существующие системы контроля качества печатных плат нацелены именно на обнаружение критических дефектов [1]. Наличие критических дефектов приводит либо к отбраковке печатных плат, либо (в редких случаях) к последующим работам по устранению дефекта. ПП с дефектами, отклонения размеров которых находятся в пределах допуска, признаются системой контроля как малозначимые и ПП переходят на следующую стадию технологического процесса [2]. Однако среди них возможно существование дефектов, которые при внешних воздействиях перерастают в критические.

Все дефекты печатных проводников можно представить в виде множества (D), состоящего из подмножеств малозначимых дефектов (D_m) и критических дефектов (D_k). При различных векторах внешних воздействий происходит процесс расширения области малозначимых дефектов (D_m), в результате которого возможно пересечение области малозначимых дефектов с областью критических (D_k) (рис. 1). В качестве внешних воздействий могут быть рассмотрены следующие виды воздействий: механические, климатические, электрические, радиационные, химические.

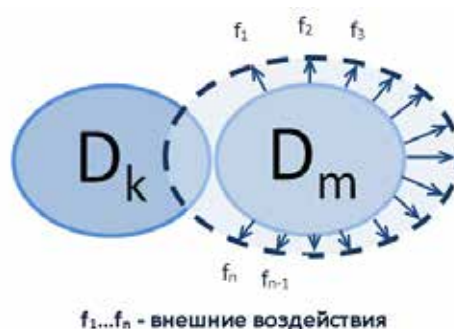


Рис. 1. Соотношение областей критических и малозначимых технологических дефектов

Принимаем, что:

$D = D_k \cup D_m$ – множество отклонений параметров печатной платы;

D_k – подмножество критических отклонений параметров печатной платы (критические дефекты), $D_k \subset D$;

D_m – подмножество малозначительных отклонений параметров печатной платы, $D_m \subset D$.

При этом считаем для любого дефекта, задаваемого отклонением параметра d , следующее:

- если $d \in D_k$, то производится отбраковка печатной платы;
- если $d \in D_m$, то печатная плата переходит на следующую стадию технологического процесса;
- если $d \in D_m \cap D_k$, то данный дефект считаем латентным дефектом, к которому применяется методика математического моделирования.

Таким образом, критерием перехода дефектов в подмножество латентных можно считать величину и характер воздействий [3, 4], т.е. условия эксплуатации.

Под латентными будем понимать такие дефекты, которые не выходят за допуски, установленные ГОСТом для данного класса печатных плат на этапе производства, но при эксплуатации ПП за счет внешних воздействий они переходят в критические и могут привести к отказу ПП. Таким образом, предлагается разбиение всех дефектов ПП на три группы: критические технологические дефекты, малозначимые дефекты, латентные технологические дефекты (рис. 2).

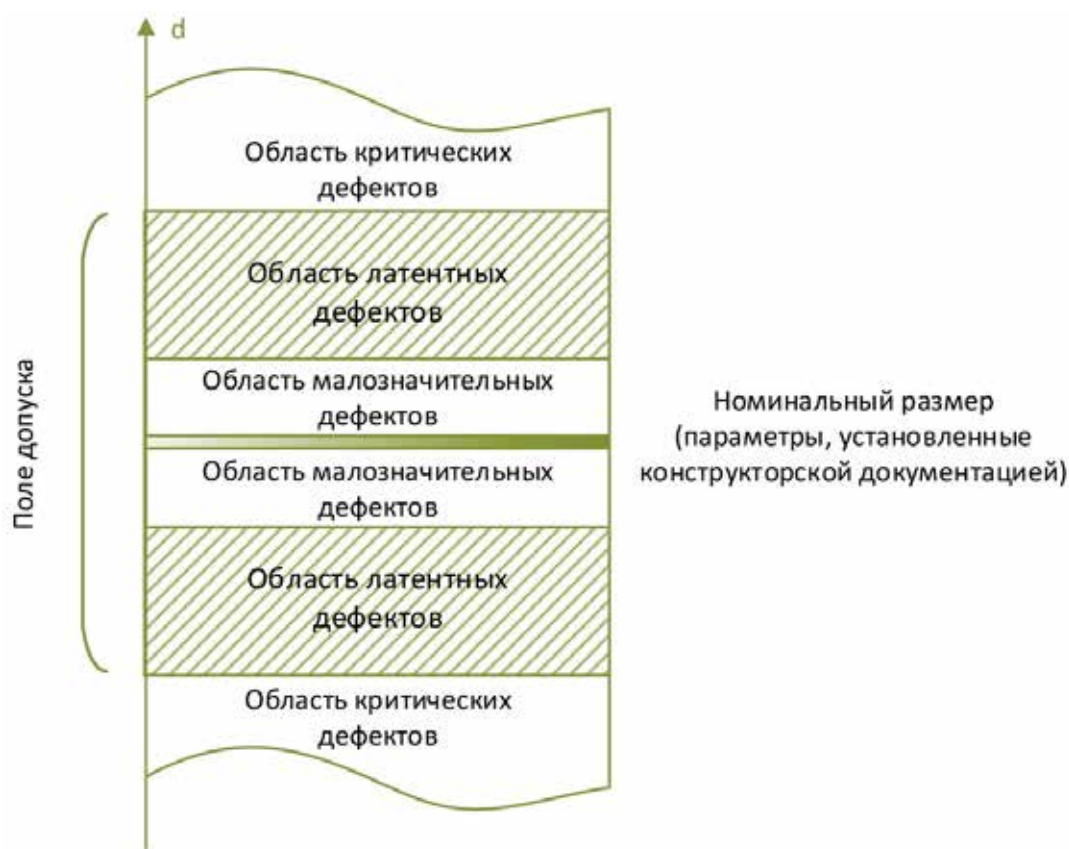


Рис. 2. К определению латентных технологических дефектов

На рис. 2 показана область латентных дефектов, которые при влиянии внешних воздействий могут либо перерасти в критические, либо будут оставаться незначительными для данных условий эксплуатации.

Положение границы областей латентных дефектов, примыкающих к области малозначимых, будет определяться условиями эксплуатации, т.е. величиной и характером внешних воздействий.

В общем виде практическая задача анализа печатной платы на наличие латентных технологических дефектов решается следующим образом. Определяется множество дефектов, проводится их классификация (в зависимости от типа дефекта) и производится оценка их развития при введении внешних воздействий, оценивается влияние дефектов на работоспособность всего устройства.

Имеющиеся дефекты ПП можно классифицировать по различным признакам. На рис. 3 представлена фасетная классификация технологических дефектов ПП, особенностью которой является добавление группы латентных дефектов, которые при воздействии эксплуатационных факторов могут приводить к отказу печатной платы.



Рис. 3. Фасетная классификация технологических дефектов печатных плат

Многоаспектная классификация технологических дефектов печатных плат учитывает условия эксплуатации, что позволяет обоснованно выбрать класс объектов и математические модели развития дефектов. За счет фасетной структуры классификация дает полную характеристику каждому дефекту печатной платы и обеспечивает добавление классификационных признаков при поступлении новых данных о дефектах.

Существующие системы обнаружения дефектов построены по следующему принципу [5]. Если отклонение параметра $d = 0$, то принимается решение о годности печатной платы. Ненулевое значение величины d свидетельствует о наличии дефекта. ГОСТ Р 53429–2009 «Платы печатные. Основные параметры конструкции» устанавливает предельные отклонения размеров проводящего рисунка для каждого класса точности. Они служат некоторым пороговым значением (d_{np}) для информационно-измерительной системы при принятии решения о годности печатной платы. Для классов точности 1–4 верхняя и нижняя границы предельных отклонений равны по модулю. Таким образом, при $|d| < d_{np}$ дефект не критический (печатная плата признается годной), при $|d| \geq d_{np}$ дефект критический (печатная плата отбраковывается). Для классов точности 5–7, имеющих различные по модулю границы верхнего и нижнего предельных отклонений, пороговые значения задаются отдельно. Соответственно для верхней и нижней границ: при $d < d_{np+}$ и $d > d_{np-}$ – дефект не критический (печатная плата признается годной), при $d > d_{np+}$ и $d < d_{np-}$ – дефект критический (печатная плата отбраковывается).

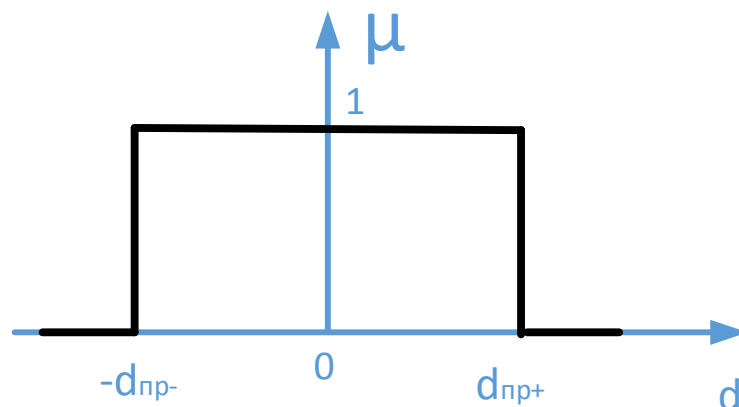


Рис. 4. Критерий обнаружения дефекта с четким порогом при принятии решений

Однако такое бинарное правило (рис. 4) не учитывает влияние условий эксплуатации, вызывающих развитие дефектов. Даже малозначимые дефекты с течением времени и под действием внешних воздействий (накоплении повреждений, усталости элементов печатной платы) переходят в критические, сокращая срок службы (эксплуатации).

Поэтому при построении информационно-измерительной системы обнаружения дефектов печатных плат следует использовать нечеткий порог при принятии решения о годности печатной платы (рис. 5) и включать блок моделирования развития дефектов.

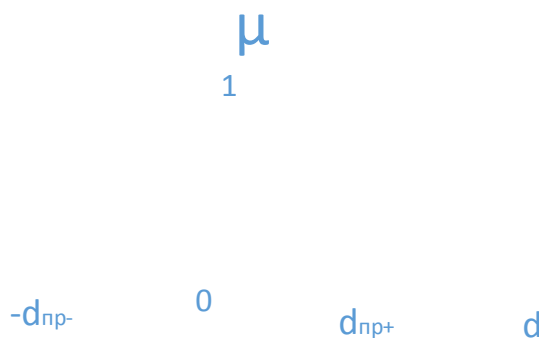


Рис. 5. Критерий обнаружения дефекта с нечетким порогом при принятии решений

Функция принадлежности в данном случае задается как

$$\mu(d) = \begin{cases} 0 & \text{при } d \geq d_{\text{пр}+}, \\ 0 & \text{при } d \leq d_{\text{пр}-}, \\ \frac{-d + d_{\text{пр}+}}{d_{\text{пр}+}} & \text{при } 0 < d < d_{\text{пр}+}, \\ \frac{d + d_{\text{пр}-}}{d_{\text{пр}-}} & \text{при } d_{\text{пр}-} < d < 0, \\ 1 & \text{при } d = 0. \end{cases}$$

Методика обнаружения технологических дефектов печатных плат рассмотрена в [6–9] и в общем виде может быть представлена следующими действиями:

1. Получение цифрового изображения печатной платы.
2. Преобразование изображения в черно-белое (пороговая бинаризация).
3. Морфологические преобразования черно-белого изображения (допусковый контроль).
4. Выделение индикаторных кластеров (ИК) и определение их связанности.

5. Классификация ИК по их связанности и выделение дефектов.

6. Классификация дефектов.

Выполним оценку погрешности измерения площади дефекта, которая будет вноситься на этапах 1 и 2. В процессе оцифровки изображение преобразуется в массив пикселей. Будем считать, что площадь одного пикселя равна одной квадратной растровой единице (run^2). При этом истинная элементарная погрешность дискретизации изображения дефекта ε_{pix} равномерно распределена между предельными значениями $\pm\Delta_{pix}$, где $\Delta_{pix} = 0,5run^2$. В результате, дисперсия D_{pix} истинной элементарной погрешности ε_{pix} равна

$$D_{pix} = \frac{(2\Delta_{pix})^2}{12} = \frac{\Delta_{pix}^2}{3} = \frac{(0,5run^2)^2}{3} = \frac{0,25run^4}{3}.$$

Дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме дисперсий этих случайных величин [10–12], поэтому

$$DS_{imt} = D_{pix}N_{pit} = \frac{0,25run^4}{3}N_{pit}. \quad (1)$$

Выразим количество периферийных пикселей N_{pit} изображения дефекта

$$N_{pit} = \frac{2\pi r_{imt}}{Ml_{pix}}. \quad (2)$$

Отметим, что длина сечения периферийного пикселя контуром изображения метки l_{pix} распределена симметрично между двумя предельными значениями ноль и корень из двух run , поэтому среднее, ожидаемое, значение l_{pix} равно

$$Ml_{pix} = \frac{\sqrt{2}}{2}run. \quad (3)$$

Учитывая формулы (2) и (3) и подставляя их в (1), получим значение дисперсии результатов измерения площади изображения метки DS_{imt} :

$$DS_{imt} = \frac{0,25run^4}{3} \cdot 2\pi\sqrt{2} run^{-1}r_{imt} = \frac{0,5\pi\sqrt{2}}{3}run^3r_{imt}.$$

Отсюда имеем среднеквадратичное отклонение этих результатов:

$$\sigma S_{imt} = \sqrt{DS_{imt}} = \sqrt{\frac{0,5\pi\sqrt{2}}{3}run^3r_{imt}}.$$

В соответствии с законом больших чисел закон распределения погрешности измерения площади изображения дефекта S_{imt} является нормальным [13–16]. Нормально распределенная случайная величина ε находится в пределах $\pm 3\sigma\varepsilon$, где $\sigma\varepsilon$ – среднеквадратичное отклонение случайной величины ε с доверительной вероятностью 0,9973. Поэтому принимаем:

$$\Delta S_{imt} = 3\sigma S_{imt} = 3\sqrt{\frac{0,5\pi\sqrt{2}}{3}run^3r_{imt}} = k_{\Delta S_{imt}}\sqrt{r_{imt}},$$

где ΔS_{imt} – предельная абсолютная погрешность измерения площади изображения дефекта; $k_{\Delta S_{imt}}$ – константа дискретизации.

На основе изложенных положений разработана структурная схема информационно-измерительной системы (ИИС) обнаружения дефектов ПП, представленная на рис. 6.

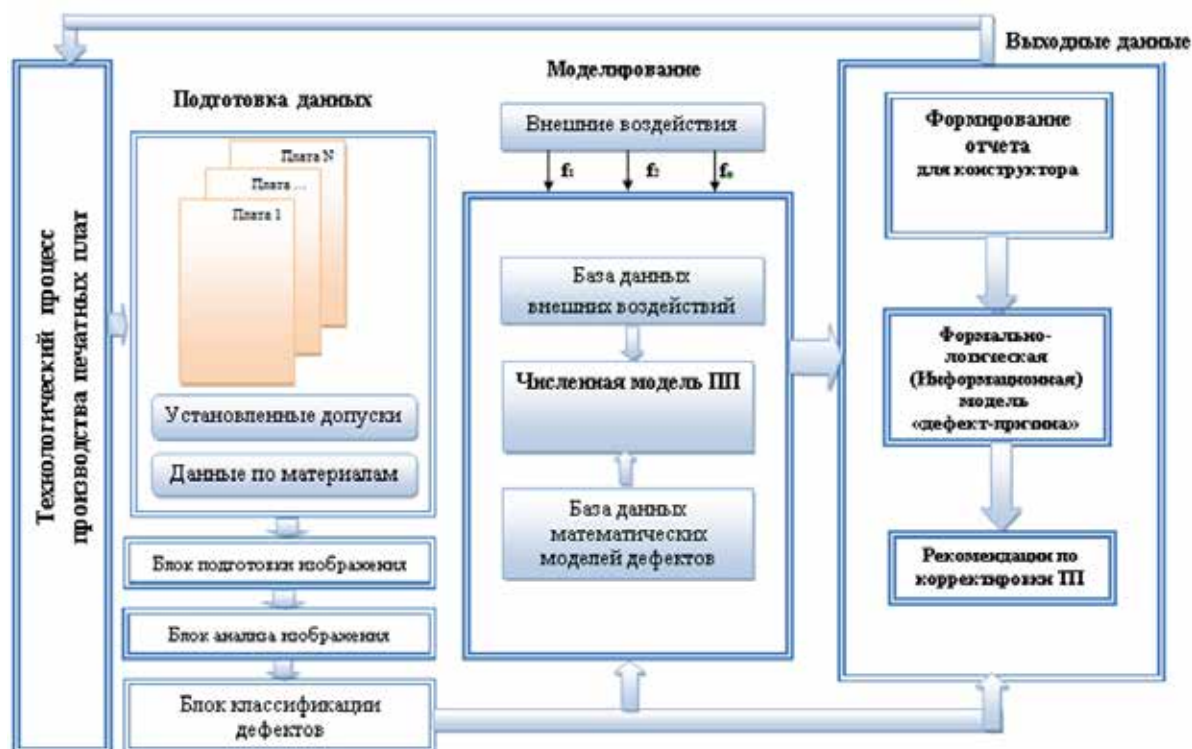


Рис. 6. Структурная схема информационно-измерительной системы

ИИС представляется частью технологического процесса производства ПП. В блоке «Подготовка данных» получаем изображение печатной платы, устанавливаем значение допусков и вводим (или выбираем материал) данные по материалам. Далее осуществляем обработку изображения и отнесение дефекта к определенному виду. В зависимости от принадлежности дефекта к классу критических или малозначимых осуществляется переход либо к моделированию, либо к формированию отчета. В блоке моделирования при взаимодействии с системой ANSYS проводится имитационное моделирование с учетом внешних воздействий [8, 15]. В качестве моделей развития дефектов используются модели, заложенные в базу данных. По результатам моделирования формируется отчет и выдача рекомендаций по корректировке технологического процесса за счет подключения информационной модели «дефект – причина».

Включение блока моделирования развития дефектов является отличительной особенностью данной ИИС. Необходимость данного блока вызвана тем, что в процессе эксплуатации ПП подвергается различным (дестабилизирующим) воздействиям, которые приводят к постепенному накоплению повреждений в элементах платы, в частности печатных проводниках. Пример результатов моделирования в системе конечно-элементного анализа ANSYS показан на рис. 7.

Эти результаты позволяют повысить информативность системы контроля за счет расчета усталостной прочности (числа циклов до разрушения и коэффициента запаса усталостной прочности). Варьируя размеры дефекта при фиксированном внешнем воздействии, можно заранее получить пороговые значения для системы оптического контроля и выполнять оценку печатного узла без дополнительного моделирования [14–16]. Таким же образом можно для фиксированного размера дефекта определить допустимые внешние воздействия и оценить запас прочности изделия.

Информационно-измерительная система обнаружения дефектов реализована в виде лабораторного макета, включающего камеру для получения изображения ПП, систему фиксации ПП и систему обработки данных в интерактивном режиме.

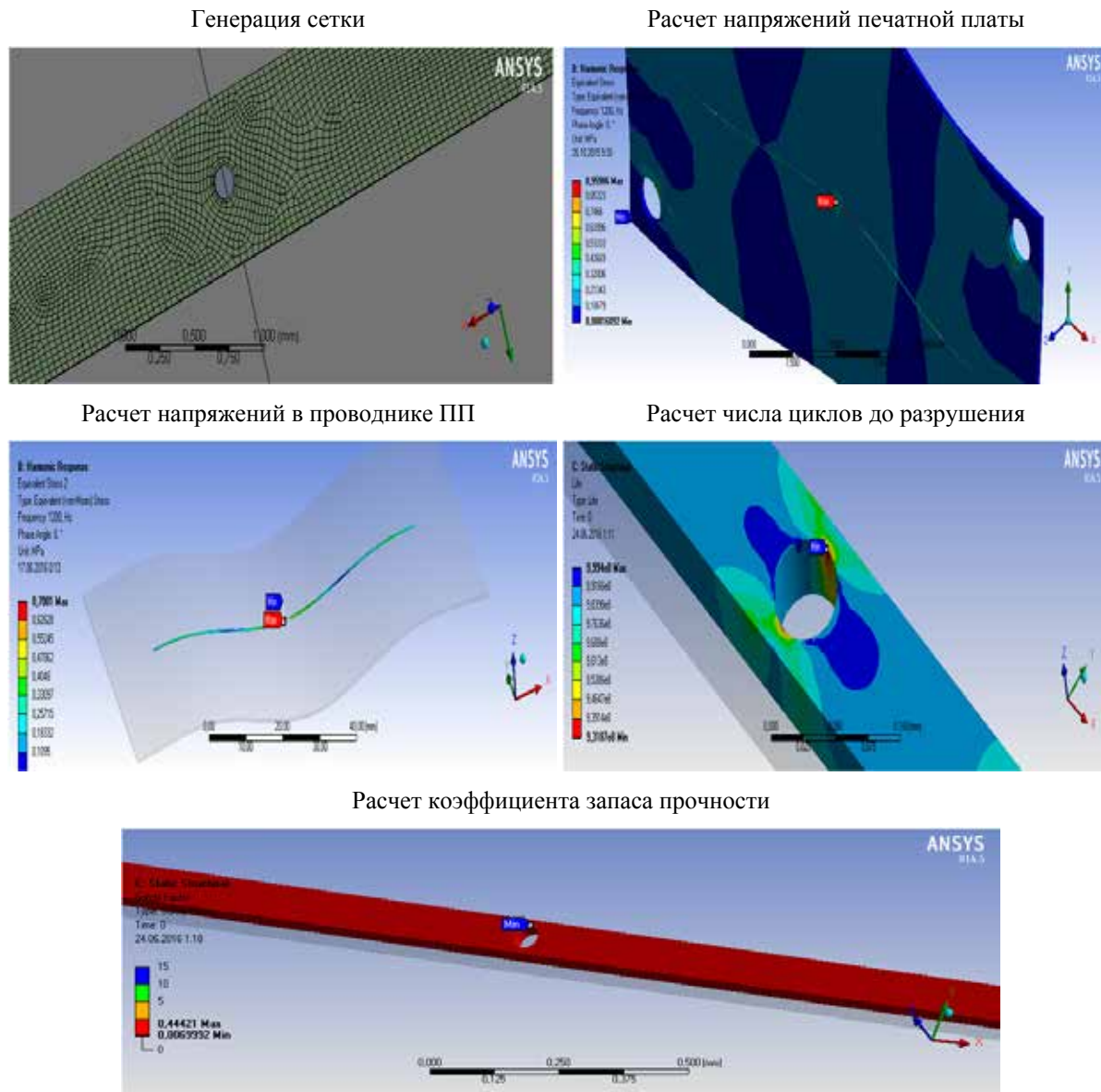


Рис. 7. Порядок проведения расчетов в блоке моделирования и прогнозирования развития дефектов

Список литературы

1. Кочегаров, И. И. Особенности исследования динамических характеристик печатных узлов в двухмерных задачах / И. И. Кочегаров, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 13–22.
2. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2014. – 474 с.
3. Kochegarov, I. Dynamic Characteristics of Printed Circuit Assembly under the Influence of Temperature / I. Kochegarov, G. Tankov, E. Danilova // XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – SPb, 2016. – С. 131–134.
4. Увайсов, С. У. Метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры и ее тепловая диагностическая модель / С. У. Увайсов, С. П. Сулейманов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 109–118.
5. Герасимов, О. Н. Способ организации производственного контроля и диагностики РЭС с заданным уровнем остаточного ресурса // О. Н. Герасимов, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1. – С. 94–98.
6. Структурное обнаружение и различие вырывов проводящего рисунка печатных плат / А. В. Григорьев, Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, Е. А. Данилова, А. Л. Држевецкий // Из-

- вестия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 97–108.
7. Алгоритм выявления латентных технологических дефектов печатных плат методом оптического контроля / И. И. Кочегаров, И. В. Ханин, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков, В. Б. Алмаметов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 105–114.
 8. Кочегаров, И. И. Межсистемное взаимодействие систем САД и САЕ при моделировании / И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, В. Б. Алмаметов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 161–166.
 9. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
 10. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
 11. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели / А. К. Гришко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 85–90.
 12. Гришко, А. К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 51–57.
 13. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111.
 14. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
 15. Grishko, A. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
 16. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.

Данилова Евгения Анатольевна

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

Danilova Evgeniya Anatol'evna

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

УДК 681.2.082

Данилова, Е. А.

Построение информационно-измерительной системы обнаружения дефектов проводящего рисунка печатных плат / Е. А. Данилова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 76–84.

УДК 681.3

В. А. Лоскутов, В. А. Клыков, О. Л. Шестопалова

**СИНТЕЗ МИНИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ
КОНЕЧНО-АВТОМАТНОЙ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО ОБОБЩЕННЫМ
ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ**

V. A. Loskutov, V. A. Klykov, O. L. Shestopalova

**SYNTHESIS OF MINIMAL FORMS OF FINITE-AUTOMATON
MODEL OF FUNCTIONING OF ONBOARD ELECTRONIC
SYSTEMS OF SPACE VEHICLES ACCORDING
TO THE DIAGNOSTIC CRITERIA**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является бортовая радиотелеметрическая система (БРТС) космического аппарата (КА). Предметом исследования являются процессы идентификации и технического диагностирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов. Целью работы является разработка способов оптимизации алгоритмов контроля бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов за счет семантического анализа телеметрической информации и нахождения обобщенных диагностических признаков. *Материалы и методы.* В качестве БРТС рассмотрена система БР-9ЦК-1, используемая на современных объектах ракетно-космической техники. В качестве математической модели для отдельных логических подсистем, описывающих основные режимы работы БРТС БР-9ЦК-1, выбран конечный автомат Мура. Введено понятие семантически обобщенного признака, позволяющего минимизировать количество состояний конечного автомата, а также синтезировать минимальную форму конечно-автоматной модели. *Результаты.* Осуществлена постановка задачи синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели функционирования БА КА для разработки алгоритмов контроля. Представлена методика синтеза минимальной формы конечного автомата по обобщенному диагностическому признаку. Приведен пример синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели функционирования БА КА. *Выводы.* Представленная методика синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели БА КА показывает возможность синтеза оптимизированных алгоритмов контроля по обобщенным диагностическим признакам, которые могут быть применены в автоматических бортовых системах диагностирования автономных космических аппаратов.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is on-board radio telemetry system of the spacecraft. The subject of research is the process of identification and diagnosis of on-board equipment of autonomous spacecraft. The aim is to develop ways to optimize onboard equipment control algorithms for spacecraft by semantic analysis of telemetry data and finding the generalized diagnostic features. *Materials and methods.* As an on-board system reviewed system

BP-9ЦК-1 used in the modern facilities of rocket and space technology. As a mathematical model for the individual logic subsystems describing the basic operation of the BP-9ЦК-1, the state machine of Moore selected system. The concept of a generalized semantic feature, which allows to minimize the number of states of a finite state machine, as well as to synthesize a minimal form of finite automaton model. *Results.* Has staged synthesis problem minimal form finite automaton model of the functioning of on-board unit for the development of control algorithms. A procedure for the synthesis of minimal form of a finite automaton by the generalized diagnostic features. An example of the synthesis of the minimum forms of finite automaton model KA BA operation. *Conclusions.* The presented method of synthesis of the minimum forms of finite automaton model of the onboard spacecraft equipment, shows the possibility of the synthesis of optimized control algorithms for generalized diagnostic features that can be used in automated systems onboard diagnostics autonomous spacecraft.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бортовая аппаратура, конечно-автоматная модель, алгоритм контроля, идентификация, диагностический признак, автономность.

К e y w o r d s: onboard equipment, final and automatic model, algorithm of control, identification, diagnostic sign, autonomy.

Введение

Современный этап развития объектов ракетно-космической техники (РКТ) характеризуется повышением требований к эффективности их функционирования. В свете данных требований увеличение срока активного существования и автономности космических аппаратов является важной задачей, связанной не только с развитием элементной базы, но и с совершенствованием специального математического обеспечения (СМО) функционирования бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата (КА), в том числе бортовых систем диагностирования.

Из литературы [1, 2] известно, что основным направлением совершенствования процессов контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов с целью повышения автономности их функционирования является передача бортовому контрольно-диагностическому комплексу функции принятия решений о виде технического состояния (ТС) бортовой аппаратуры КА в каждый момент времени до ситуации отказа резервной аппаратуры. Эффективность решения задач идентификации и диагностирования автономной бортовой системой диагностирования зависит от оптимизации алгоритмов контроля. Таким образом, для перспективных КА необходимо разработать и использовать в составе БА автоматическую бортовую систему диагностирования с соответствующим математическим обеспечением для эффективного решения задач идентификации и технического диагностирования БА КА. Под эффективностью подразумевается: во-первых, использование оптимальных алгоритмов контроля при обеспечении максимально возможного уровня достоверности и ресурсоемкости контроля ТС БА КА в рамках выбранной математической модели; во-вторых, минимизация временных затрат как на синтез, так и на применение данных алгоритмов.

Постановка задачи синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели для разработки алгоритмов контроля

Из работы [3] известно, что задачами технического диагностирования БА КА являются контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности) и прогнозирование технического состояния. Формализованное описание этих задач предполагает наличие математической модели объекта, вид представления которой зависит от свойств объекта, целей контроля и условий его проведения. В этом случае удобным является подход, позволяющий рассматривать объект контроля в виде конечного автомата, достоинствами которого являются развитость их теории, относительная простота и адекватность описания дискретных объектов (во времени и по состояниям), использование для их изучения финитных методов логики и алгебры.

Обычно конечный автомат описывается в виде упорядоченной пятерки [4]:

$$A = \langle X, Y, Q, f, \varphi \rangle, \quad (1)$$

где X – множество входных воздействий (алфавит входных символов); Y – множество выходных переменных (алфавит выходных символов); Q – множество состояний; $f: Q \times X \rightarrow Q$ – функция переходов; $\varphi: Q \times X \rightarrow Y$ – функция выходов для автомата Мили (автомата 1-го рода).

Каждое состояние конечно-автоматной модели характеризуется своим образом $q_i = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, где $i = \overline{1, n}$ в n -мерном пространстве. Из литературы [5] известно, что одним из направлений оптимизации решения задачи диагностирования является сокращение размерности пространства состояний путем нахождения обобщенных диагностических признаков:

$$h: Y \rightarrow Y^1 \Rightarrow Q^1: |Q| \rightarrow \min, |Y^1| < |Y|.$$

В результате чего математическая конструкция (1) примет вид

$$A = \langle X, Y^1, Q^1 | Q_{\min}, f, \varphi \rangle. \quad (2)$$

Известно [6], что под контролем технического состояния, как одной из подзадач технического диагностирования, понимается определение вида технического состояния объекта. В зависимости от этапа эксплуатации и решаемых целевых задач в качестве цели контроля могут рассматриваться проверка функции исправности, работоспособности или правильности функционирования. На стадии изготовления КА бортовая аппаратура проходит наиболее полный контроль как элементов, блоков, систем, так и самого КА в целом, что требует синтеза адекватной математической модели объекта контроля. Однако на стадии эксплуатации КА, особенно в условиях его автономного функционирования, наличие различного рода ресурсных ограничений (временных, энергетических) обуславливает невозможность проведения контроля технического состояния БА в том объеме, что и на стадии изготовления. Минимальным по объему является контроль правильности функционирования БА КА в заданный момент времени при его применении по назначению. На этом этапе более полный контроль (проверка исправности или работоспособности), как правило, не осуществляется. В связи с этим возникает необходимость синтеза моделей вида (2) как объектов, так процессов контроля, удовлетворяющим требованиям достоверности и оперативности. Одним из направлений выхода из сложившейся ситуации является использование подхода, основанного на семантическом анализе телеметрической информации.

На практике при решении задач контроля технического состояния БА КА рассматривается модель объекта контроля в конечно-автоматной форме (1). Вопрос синтеза модели (2) может быть реализован поиском семантически обобщенного параметра на множестве телеметрируемых параметров $\{y_i\}$, где $i = \overline{1, m}$, и построением минимальной формы конечного автомата за счет вновь образованных классов эквивалентности по обобщенному параметру. Каждому параметру из Y^1 необходимо сопоставить класс всех тех телеметрических сообщений $S_k \in Y$, которые могут быть отображены в данный параметр, за счет некоего отображения. Построение такого класса является обобщением входящих в него телеметрических сообщений по индивидуальным (семантическим) признакам, присущим только данному классу. Процесс определения обобщенного параметра можно представить в виде коммутативной диаграммы (рис. 1).

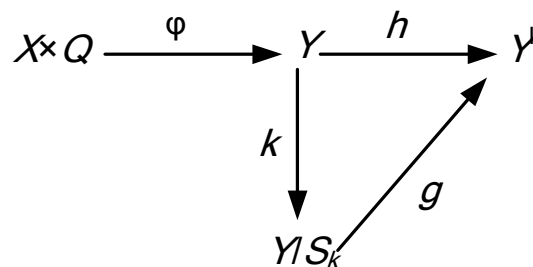


Рис. 1. Коммутативная диаграмма нахождения обобщенных диагностических признаков

Функция выхода представляет собой последовательность отображений φ и h , которые позволяют преобразовывать множества текущих состояний в множество обобщенных параметров Y^1 . Последнее отображение в свою очередь также является композицией двух отображений. В общем случае определение обобщенного параметра можно разделить на несколько этапов:

1. На первом этапе в результате отображения φ происходит определение исходного множества телеметрируемых параметров Y из текущих состояний Q :

$$\varphi: Q \times X \rightarrow Y. \quad (3)$$

2. На втором этапе в результате семантического анализа вектора телеметрических данных $q_j = \{y_i\}$, где $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, происходит определение классов телеметрических сообщений $S_k = \{q_f\}$, где $f = \overline{1, r}$, по семантически общему признаку, присущему данному классу сообщений, т.е. осуществляется факторизация исходного множества Y . Данная операция представляется в виде отображения:

$$k: Y \rightarrow Y/S_k. \quad (4)$$

По своему смыслу данное отображение является наложением (сюръекцией) и называется естественным отображением [7].

2. Далее осуществляется определение обобщенных диагностических признаков $y_i^1 \in Y^1$, которые будут индивидуальны для каждого класса S_k . Данная операция представляется в виде взаимно-однозначного отображения:

$$g: Y/S_k \rightarrow Y^1. \quad (5)$$

В общем случае поиск обобщенного диагностического признака представляет собой композицию отображений g и k :

$$h = k \circ g. \quad (6)$$

Из литературы [4] известно, что минимизация числа состояний автомата связана с анализом эквивалентности его состояний. Два состояния q_i и q_j эквивалентны, если $\varphi(q_i) = \varphi(q_j)$, т.е. состояния q_i и q_j имеют одинаковые выходные символы. Определение обобщенного диагностического признака по отображению h приведет к образованию классов эквивалентности и соответственно минимизации числа состояний.

Методика синтеза минимальной формы конечного автомата по обобщенному диагностическому признаку

Приведем методику, которая позволяла бы строить минимальную форму конечного автомата по обобщенному диагностическому признаку.

Будем считать, что модель объекта испытаний может быть представлена в виде N -значного автомата A , где N – число телеметрируемых параметров. Вначале определим понятия влияния команд на параметры и параметров на параметры. Команда x влияет на параметр Y_i , если существуют состояния автомата A $q, s \in Q$ такие, что $f(x, q) = s$, причем $\varphi(q[i]) \neq \varphi(s[i])$, т.е. команда x меняет значение i -го параметра.

В работе [8] приведена методика, которая позволяет по неформальному описанию N -значного автомата строить его формальную декомпозицию. Применительно к задаче синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели с учетом нахождения обобщенных параметров методика будет выглядеть следующим образом:

1. Определяется множество управляющих воздействий (команд), подаваемых на объект испытаний $x_j \in X, j = \overline{1, r}$.

2. Определяется множество выходных переменных (телеметрируемых параметров), позволяющих контролировать работу объекта испытания $y_i \in Y, i = \overline{1, n}$.

3. Формируется таблица влияния команд на параметры. Для каждого параметра определяется множество команд $\tilde{x}_i$, влияющих на данный параметр $y_i \in Y$.

4. Осуществляется разбиение множества параметров на классы $R_1 \dots R_2$ по правилу: параметры Y_i и Y_j принадлежат к одному и тому же классу только в том случае, если множества команд, которые на них влияют, совпадают:

$$Y_i, Y_j \in R_t, \text{ если } X_i = X_k = X_t, t = \overline{1, k}, i, k = \overline{1, N}.$$

5. Строятся автоматы, описывающие работу каждой из логических подсистем (ЛПС), которые описывают принципы работы каждой из подсистем БА. На данном этапе происходит выделение семантически обобщенных параметров и поиск эквивалентных состояний с дальнейшим синтезом минимальной формы конечной автоматной модели по выражениям (3) и (6).

5.1. Для каждой ЛПС выделяется множество содержательных состояний, формируется таблица состояний.

5.2. Для каждой ЛПС строится таблица допусков, т.е. каждому из содержательно выделенных состояний ЛПС сопоставляется набор допусков параметров, которые принадлежат этой ЛПС.

5.3. Исходя из структуры содержательных состояний, определяются классы параметров $S_k (k = \overline{1, m})$ на основании семантически обобщенных признаков.

5.4. На основании выделенных классов телеметрируемых сообщений определяются обобщенные диагностические признаки (присущие определенным группам телеметрических сообщений) следующим образом:

$$Y^I = \left\{ y_i^I \mid y_i^I = \bigcap_1^m q_i, q_i = \{y_n^j\}^T, \prod_1^r y_n^j = 1, Y^I \in S_k \right\}. \quad (7)$$

5.5. Производится анализ эквивалентности формируемых классов ТМП:

$$q_i \sim q_j \in S_k \text{ при } y_i^I = y_j^I, \text{ где } k = \overline{1, m} \text{ и } i, j = \overline{1, n}. \quad (8)$$

6. Осуществляется синтез минимальной формы конечного автомата (ЛПС) по обобщенному параметру. Для каждой минимальной формы ЛПС строится граф переходов.

7. Из графов переходов ЛПС удаляются петлевые дуги.

8. По отдельным ЛПС для выбранных систем может быть синтезирована полная конечно-автоматная модель.

Пример синтеза минимальной формы конечного автомата по обобщенным диагностическим признакам

На основе примера синтеза декомпозированной конечно-автоматной модели бортовой радиотелеметрической системы БР-9ЦК-1 [8] рассмотрим ЛПС₂ режимов функционирования бортовой радиотелеметрической системы (БРТС).

В табл. 1 представлены управляющие воздействия, подаваемые на БРТС в процессе наземных испытаний [9].

Таблица 1

Управляющие воздействия, подаваемые на БРТС

x_i	Обозначение команды	Время Δt , с	Наименование команды
1	2	3	4
x_1	«Питание вкл»	3	Подача питания на систему
x_2	«Питание выкл»	3	Снятие питания с системы
x_3	«НП256»	10	Включение режима непосредственной передачи с информативностью 25600 изм/с
x_4	«НП32»	10	Включение режима непосредственной передачи с информативностью 3200 изм/с
x_5	«НП32 + ЗАП32»	10	Включение совмещенного режима непосредственной передачи и записи с информативностью 3200 изм/с

Окончание табл. 1

1	2	3	4
x_6	«ЗАП8»	10	Включение режима записи с информативностью 800 изм/с
x_7	«НП8 + ЗАП8»	10	Включение совмещенного режима непосредственной передачи и записи с информативностью 800 изм/с
x_8	«В32»	10	Включение режима воспроизведения с информативностью 3200 изм/с
x_9	«В8»	10	Включение режима воспроизведения с информативностью 800 изм/с
x_{10}	«НОВ»	3	Обнуление датчика времени и запуск схемы программно-временного устройства с нулевой отметки
x_{11}	«СТОП ЗУ»	3	Остановка запоминающего устройства
x_{12}	«ИСХ.ЗУ»	3	Приведение запоминающего устройства в исходное состояние (подготовка к записи)
x_{13}	«ВЫКЛ. ПРД»	3	Выключение передатчиков (технологическая команда)
x_{14}	«ВЫКЛ. ТМ»	3	Выключение системы, кроме схемы датчика времени (ДВ) и программно-временного устройства (ПВУ)
x_{15}	«ТК»	3	Работа схемы программно-временного устройства в ускоренном режиме (технологическая команда)

Содержательные состояния и допуски ЛПС₂ представлены в табл. 2 [8].

Таблица 2

Содержательные состояния у ЛПС₂

Состояние	Допуск параметра
q_0^2 – дежурный режим	0 0 0 0 0 0 0 0
q_1^2 – режим непосредственной передачи с информативностью 25600 изм/с (НП256)	0 1 0 0 0 0 1 1
q_2^2 – режим непосредственной передачи с информативностью 3200 изм/с (НП32)	0 1 0 0 0 0 0 1
q_3^2 – совмещенный режим записи и непосредственной передачи с информативностью 3200 изм/с (ЗАП32 + НП32)	0 1 1 0 0 0 0 1
q_4^2 – режим записи с информативностью 800 изм/с (ЗАП8)	0 0 1 1 0 0 1 0
q_5^2 – режим непосредственной передачи с информативностью 800 изм/с (НП8)	0 1 0 0 0 0 1 0
q_6^2 – совмещенный режим записи и непосредственной передачи с информативностью 800 изм/с (НП8 + ЗАП8)	0 1 1 1 0 0 1 0
q_7^2 – режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после записи с информативностью 800 изм/с (В32 (от ЗАП8))	0 0 1 1 0 1 0 1
q_8^2 – режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после совмещенного режима ЗАП32 + НП32 (В32 (от ЗАП32 + НП32))	0 1 1 0 0 1 0 1
q_9^2 – режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после совмещенного режима НП8 + ЗАП8 (В32(от НП8 + ЗАП8))	0 1 1 1 0 1 0 1
q_{10}^2 – режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после записи с информативностью 800 изм/с (В8 (от ЗАП8))	0 0 1 1 0 1 1 0
q_{11}^2 – режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после совмещенного режима ЗАП32 + НП32 (В8(от НП32 + ЗАП32))	0 1 1 0 0 1 1 0
q_{12}^2 – режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после совмещенного режима НП8 + ЗАП8 (В8 (от НП8 + ЗАП8))	0 1 1 1 0 1 1 0
q_{13}^2 – технологический режим, непосредственная передача по низкой частоте (НП-НЧ (после ЗАП32))	0 0 0 0 0 0 1 0
q_{14}^2 – технологический режим после воспроизведения с информативностью 800 изм/с (Нулевой режим (после В8))	0 0 0 0 0 1 1 0
q_{15}^2 – технологический режим после воспроизведения с информативностью 3200 изм/с (Нулевой режим (после В32))	0 0 0 0 0 1 0 1

Граф перехода ЛПС₂ представлен на рис. 1. По результатам анализа циклограмм проведения испытаний с участием БРТС при построении графа переходов для ЛПС₂ были не отображены некоторые переходы. Так, например, принцип работы БРТС позволяет осуществлять переходы из состояний $q^2_8, q^2_9, q^2_{10}, q^2_{11}, q^2_{12}, q^2_{13}$ в состояния $q^2_1, q^2_2, q^2_3, q^2_4, q^2_6$ по командам $x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ для каждого из рассмотренного q^2_i в отдельности, что существенно усложнит представленный граф и окажет влияние на восприятие синтезированной модели. К тому же в процессе наземной подготовки разгонного блока «Фрегат» согласно циклограммам испытаний указанные переходы по перечисленным командам не осуществляются.

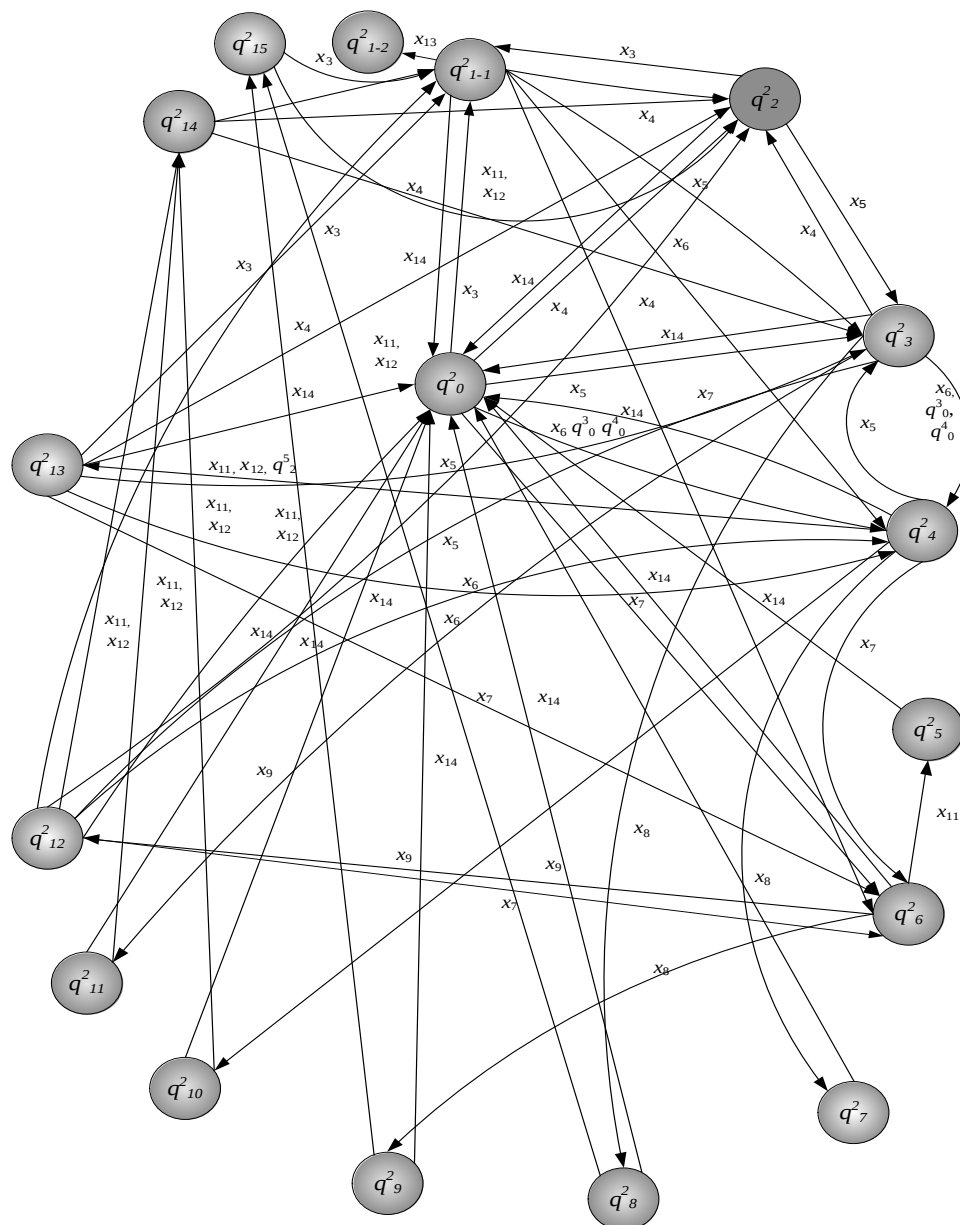


Рис. 1. Граф переходов для ЛПС₂

Рассмотрим возможность синтеза минимальной формы конечного автомата на примере ЛПС₂ режимов функционирования БРТС БР-9ЦК-1 в соответствии с пунктами 5.3–5.5 методики:

1 (п. 5.3). Семантически все 15 режимов, представленных в табл. 2, можно разделить на 6 классов: класс режимов «непосредственная передача информации» (S_1); класс «запись информации» (S_4); класс «непосредственная передача и запись информации» (S_2); класс «воспро-

изведения информации» (S_3); класс «технологические режимы» (S_5). Отдельным классом выделим «дежурный режим», или «режим ожидания команды» (S_0). Данный режим реализуется после подачи питания на бортовую систему, при этом начальные установки следующие: питание приборов системы и передатчиков выключено, запоминающее устройство находится в режиме «СТОП». Переход в дежурный режим осуществляется также после подачи команды « x_{14} », при этом происходит сброс текущих установок и выключение питания приборов.

2 (п. 5.4). В общем виде бинарную последовательность командно-служебного слова можно представить в полиномиальном виде:

$$p_{si}(y) = h_j y^j \oplus \dots \oplus h_2 y^2 \oplus h_1 y^1 \oplus h_0, \quad (9)$$

где $h_j \in \{0,1\}$ – значения разрядов КСС, $j = \overline{1, n}$.

Из анализа структуры командно-служебного слова (КСС) (табл. 3) можно сделать вывод, что для каждой группы режимов существуют разряды, значения которых являются одинаковыми для всего рассматриваемого класса.

Таблица 3

Структура КСС БРТС БР-9ЦК-1

№	Режим	КСС							
		y^7	y^6	y^5	y^4	y^3	y^2	y^1	y^0
1	НП 256	0	1	0	0	0	0	1	1
2	НП32	0	1	0	0	0	0	0	1
3	НП8	0	1	0	0	0	0	1	0
4	НП32+ЗАП 32	0	1	1	0	0	0	0	1
5	НП8+ЗАП8	0	1	1	1	0	0	1	0
6	В32 (от ЗАП8)	0	0	1	1	0	1	0	1
7	В32(от НП32+ЗАП32)	0	1	1	0	0	1	0	1
8	В32(от НП8+ЗАП8)	0	1	1	1	0	1	0	1
9	В8 (от ЗАП8)	0	0	1	1	0	1	1	0
10	В8(от НП32+ЗАП32)	0	1	1	0	0	1	1	0
11	В8 (от НП8+ЗАП8)	0	1	1	1	0	1	1	0
12	ЗАП8	0	0	1	1	0	0	1	0
13	НП-НЧ	0	0	0	0	0	1	0	0
14	Нулевой режим (В8)	0	0	0	0	0	1	1	0
15	Нулевой режим (В32)	0	0	0	0	0	1	0	1

Так, например, для режимов «непосредственная передача информации» общим будет разряд 7 КСС, значение которого должно быть «1». Применяя для нахождения обобщенного признака выражение (7) и (9), получим

$$p_{s1} = y^6.$$

При наличии «1» в разрядах 7 и 6 можно сделать вывод о работе БРТС в одном из режимов класса «непосредственная передача и запись информации»:

$$p_{s2} = y^6 \oplus y^5.$$

Для режима «воспроизведения информации» наличие «1» в разрядах 6 и 3 соответственно будет сигнализировать о соответствующем классе.

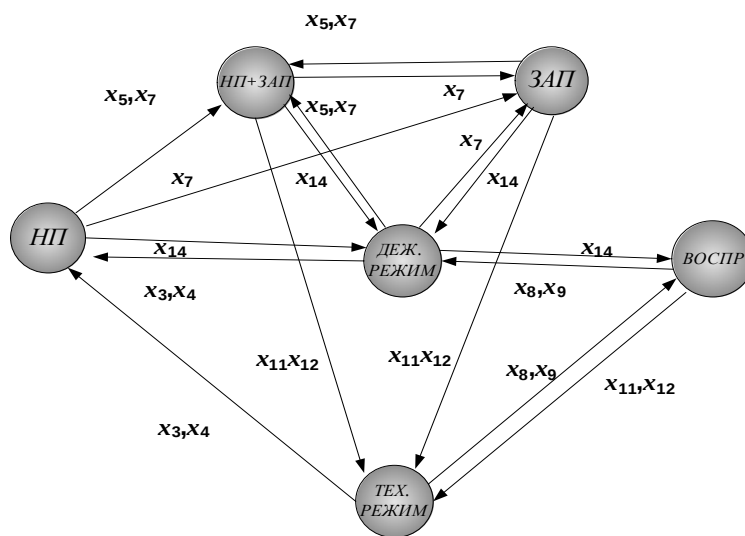
3 (п. 5.5). Относительно данных отличительных разрядов можно говорить об эквивалентности рассматриваемых классов, что в свою очередь дает возможность для синтеза минимальной формы конечного автомата [8] в соответствии с выражением (8). В табл. 4 представлены общие разряды для эквивалентных режимов.

Таблица 4

Эквивалентные классы ЛПС₂ БРТС.

Режим	КСС							
	y^7	y^6	y^5	y^4	y^3	y^2	y^1	y^0
s_0 (ДЕЖ. РЕЖИМ)	0	0	0	0	0	0	0	0
s_1 (НП)	0	1	0	0	0	0	0	0
s_2 (НП + ЗАП)	0	1	1	0	0	0	0	0
s_3 (ВОСПР)	0	0	1	0	0	1	0	0
s_4 (ЗАП)	0	0	1	0	0	0	0	0
s_5 (ТЕХ. РЕЖИМ)	0	0	0	0	0	1	0	0

На рис. 2 представлена минимальная форма конечного автомата ЛПС₂ БР-9ЦК-1 в соответствии с определенными классами эквивалентности. Петлевые дуги в данной модели не обозначены.

Рис. 2. Минимальная форма конечной автоматной модели ЛПС₂ БРТС БР-9ЦК-1

Таким образом, представленная методика позволила сократить количество состояний почти в три раза. Созданные на основе данного подхода алгоритмы контроля могут быть использованы при решении задач идентификации и технического диагностирования в условиях автономного функционирования, когда объект контроля обладает обширным спектром ресурсных ограничений (временных, энергетических).

Заключение

Представленная модель показывает возможность синтеза оптимизированных алгоритмов контроля на основе обобщенных диагностических признаков. Однако, как отмечалось выше, максимально возможная достоверность в рамках использованной математической модели может достигаться за счет биективного преобразования множества всевозможных контролируемых параметров в множество диагностических признаков меньшей мощности. Это, в свою очередь, подразумевает решение обратной задачи, которая может быть решена за счет синтеза оптимальной в рамках выбранных критериев программы диагностирования. При разработке специального математического обеспечения процессов идентификации и технического диагностирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов критериями оптимизации будут являться: обеспечение максимально возможного уровня достоверности контроля ТС БА КА в рамках рассматриваемой математической модели, а также минимизация временных затрат как на синтез, так и на применение оптимальных алгоритмов контроля и диагностирования БА КА.

Список литературы

1. National Aeronautics and Space Administration. NASA Technology Roadmaps TA 4: Robotics and Autonomous Systems. – Draft, 2015. – P. 50–58.
2. Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges / A. Wander, R. Förstner. – Deutscher Raumfahrtkongress, 2012. – P. 9.
3. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1990.
4. Лоскутов, А. И. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем / А. И. Лоскутов, Г. И. Козырев. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 158 с.
5. Лоскутов, А. И. Идентификация и техническое диагностирование бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе биективного преобразования множества диагностических признаков / А. И. Лоскутов, В. А. Клыков // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 4. – С. 57–63.
6. Кочелаев, Ю. С. Автоматизированные испытательные комплексы / Ю. С. Кочелаев. – Вып. 3. Оптимизация алгоритмов автоматизированного тестового контроля. – М. : МО РФ, 1992. – 119 с.
7. Дунаев, В. В. Занимательная математика. Множества и отношения / В. В. Дунаев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 336 с.
8. Лоскутов, А. И. Методика синтеза математической модели функционирования бортовых систем изделий ракетно-космической техники на основе логической декомпозиции / А. И. Лоскутов, В. А. Клыков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 5. – С. 7–18.
9. Телеметрические системы разгонного блока «Фрегат». – М. : ФГУП НПО им. С. А. Лавоочкина, 2007. – 127 с.

Лоскутов Андрей Иванович

доктор технических наук, доцент,
начальник кафедры телеметрических систем
и комплексной обработки информации,
Военно-космическая академия
им. А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: rujenz@mail.ru

Loskutov Andrey Ivanovich

doctor of technical sciences, associate professor,
chief of sub-department of telemetric systems
and complex information processing,
Military space Academy
named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Клыков Владимир Алексеевич

адъюнкт,
кафедра телеметрических систем
и комплексной обработки информации,
Военно-космическая академия
им. А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: v.klikoff86@mail.ru

Klykov Vladimir Alekseevich

graduated,
sub-department of telemetric systems
and complex information processing,
Military space Academy
named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Шестопалова Ольга Львовна

кандидат технических наук, доцент,
декан факультета «Испытание летательных
аппаратов»,
Филиал «Восход» Московского авиационного
института
(Казахстан, г. Байконур, ул. Гагарина, 5)
E-mail: neman2004@mail.ru

Shestopalova Olga L'vovna

candidate of technical sciences, associate professor,
dean of faculty «Test of aircraft»,
Moscow Aviation Institute
(5 Gagarina street, Baikonur, Kazakhstan)

УДК 681.3

Лоскутов, В. А.

Синтез минимальной формы конечно-автоматной модели функционирования бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов по обобщенным диагностическим признакам / В. А. Лоскутов, В. А. Клыков, О. Л. Шестопалова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 85–95.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 53.082:004.9

А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, А. Н. Тычкова, О. В. Абросимова

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО МЕДИЦИНСКОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИМУЛЯТОРА ИЗМЕРЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

A. Yu. Tychkov, P. P., Churakov, A. N. Tychkova, O. V. Abrosimova

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL MEDICAL DIAGNOSTIC SIMULATOR FOR BLOOD PRESSURE MEASUREMENT

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Виртуальные медицинские диагностические симуляторы измерения артериального давления предназначены для регистрации, обработки и экспресс-анализа состояния здоровья человека с использованием специализированного программного обеспечения LabVIEW. **Материалы и методы.** Для разработки виртуальных медицинских диагностических симуляторов измерения артериального давления используется среда LabVIEW 2013. **Результаты.** Приведен обзор известных виртуальных приборов измерения артериального давления, обозначены достоинства и недостатки. Разработан виртуальный медицинский диагностический симулятор измерения артериального давления, позволяющий регистрировать, генерировать, обрабатывать и анализировать результаты систолического и диастолического давления. **Выводы.** Разработан виртуальный медицинский диагностический симулятор в среде программирования LabVIEW для измерения артериального давления, который позволяет продемонстрировать процесс измерения артериального давления, отображения результатов в виде пульсовой волны и прогноза состояния пациента в зависимости от возраста, и может быть использован в качестве медицинского диагностического симулятора измерения артериального давления.

A b s t r a c t. Background. Virtual medical diagnostic simulators for blood pressure measurement are used for registration, processing and rapid analysis of a human health status using the specialized software LabView. **Materials and methods.** LabVIEW 2013 is used for the development of virtual diagnostic simulators for blood pressure measurement. **Results.** A review of known virtual blood pressure measurement devices is given, their advantages and disadvantages are specified. A virtual medical diagnostic simulator for blood pressure measurement has been developed that allows to record, produce, process and analyze the results of the systolic and diastolic pressure. **Conclusions.** A virtual medical diagnostic simulator for blood pressure measurement has been developed in the LabVIEW programming environment, which can demonstrate the process of blood pressure measuring, display the results in the form of a pulse wave, and the patient's prognosis depending on his/her age, and can be used as a medical diagnostic simulator for blood pressure measurement.

К л ю ч е в ы е с л о в а: виртуальный симулятор, LabView, артериальное давление.

К e y w o r d s: virtual simulator, LabView, blood pressure.

Введение

Биомедицинские сигналы являются основой для диагностики состояния организма человека. Устройства для регистрации и анализа биомедицинских сигналов становятся все более функциональными, интеллектуальными и сложными. Большинство таких приборов позволяют, кроме непосредственно регистрации сигнала, осуществлять предварительную обработку, анализ данных и представление предварительных результатов в удобном для пользователя виде.

Для проектирования и моделирования приборов медицинского назначения предложено использовать среду LabVIEW 2013.

LabVIEW (LV) – это универсальный пакет, разработанный фирмой National Instruments. [1, 2]. Пакет LV тесно связан с аппаратным обеспечением National Instruments. Возможности пакета могут быть успешно использованы при создании и исследовании систем регистрации и обработки биомедицинских сигналов.

В данной статье рассматриваются построенные в пакете LV 13 виртуальные приборы, или виртуальные медицинские диагностические симуляторы (ВМДС) измерения артериального давления (АД).

Работа осуществлялась при поддержке регионального центра технологий National Instruments кафедры «Радиотехника и радиоэлектронные системы» Пензенского государственного университета [3] и Российского фонда фундаментальных и прикладных исследований РФФИ мол_а № 16-31-00194.

Актуальность разработки ВМДС измерения АД

Обработка сигналов типа пульсовых колебаний или артериальной пульсации крови лежит в основе принципа действия современных устройств измерения артериального давления (УИАД).

Артериальное кровяное давление является одним из важнейших показателей состояния здоровья человека. АД есть величина, показывающая, с какой силой движется кровь по сосудам сердца и какое давление она оказывает на стенки и кровеносные сосуды.

Регистрация пульсовой волны происходит по четырем последовательным фазам, описанным Н. С. Коротковым [4]. Первая фаза (рис. 1) начинается от момента возникновения колебаний. Вторая фаза следует после первой фазы и отсчитывается от момента ослабления или исчезновения первичных колебаний. Третья фаза следует после второй фазы и отсчитывается от момента нарастания звуковых явлений. Четвертая фаза следует после третьей фазы и отсчитывается от момента выраженного ослабления и исчезновения звуковых явлений.

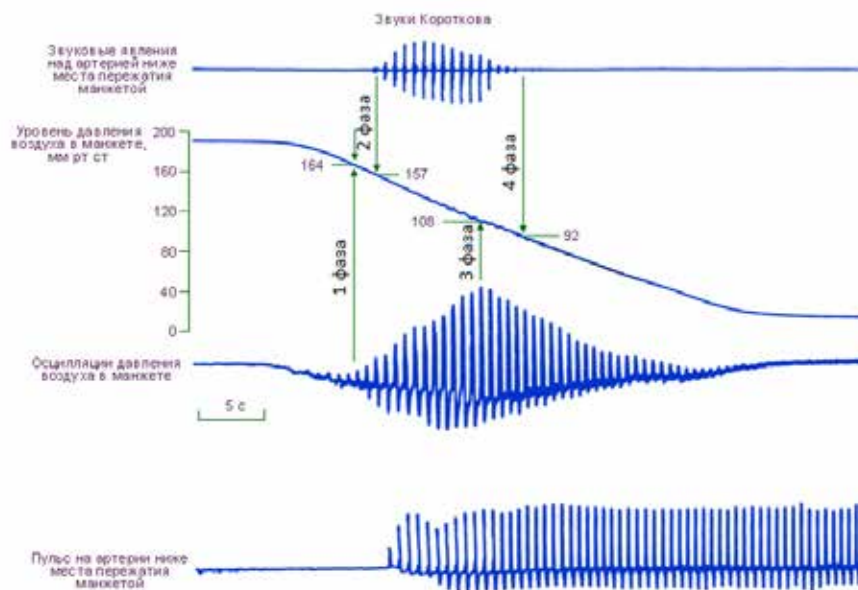


Рис. 1. Кривые измерения АД

На рис. 2 приведена обобщенная структурная схема УИАД.



Рис. 2. Обобщенная структурная схема УИАД

Аналитический обзор известных ВМДС измерения АД

Известен виртуальный прибор (ВП) для измерения АД (рис. 3) [5], выполняющий задачи регистрации и обработки сигналов пульсовой волны.

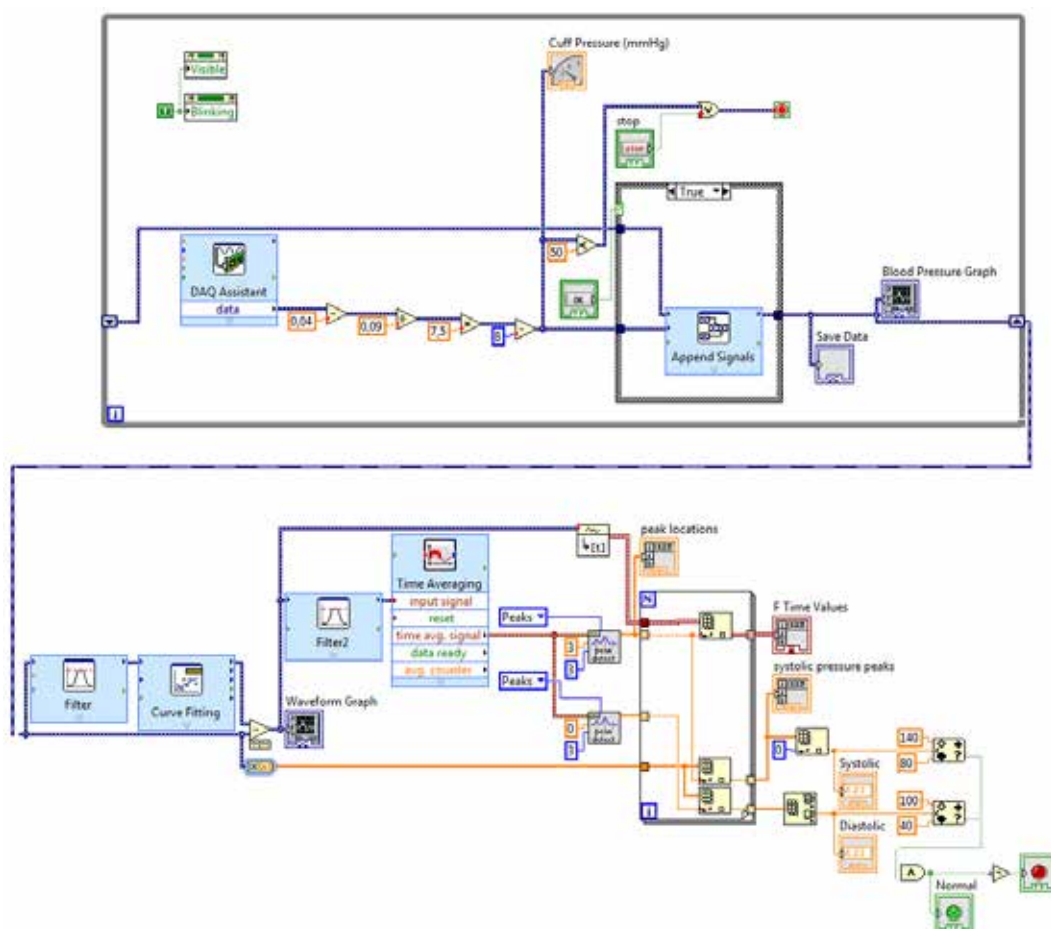


Рис. 3. Известный ВП для измерения АД

Известный ВП [4] состоит из следующих основных узлов:

- узел накачки и регулирования давления в манжете;
- узел обработки и анализа сигнала пульсовой волны;
- узел сброса результатов измерения.

Первый узел осуществляет процесс накачки давления в манжету (рис. 4). В узле сигнал снимается с датчика АД и поступает на датчик обработки сигналов. Устройство сбора данных состоит из датчика артериального давления и интерфейса сбора данных.

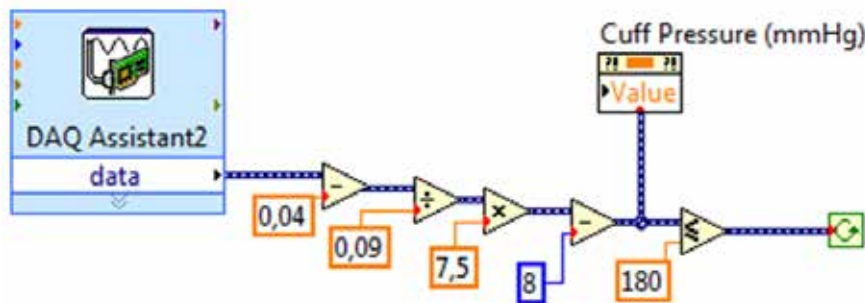


Рис. 4. Узел накачки и регулирования давления в манжете

Второй узел реализует этап обработки сигнала пульсовой волны (рис. 5). На данном этапе считываются значения с датчика давления и сводятся в таблицу. Процесс обработки сигнала начинается с удаления шума, что достигается путем использования фильтра Баттерворта 2-го порядка. По отфильтрованному сигналу строится кривая, аппроксимированная по полиному второй степени порядка. Построенная кривая вычитается из поступающих данных, вычисляя пики сигнала. По результатам обработки измеряются значения систолического и диастолического давления по методу Котельникова и заносятся в таблицу.

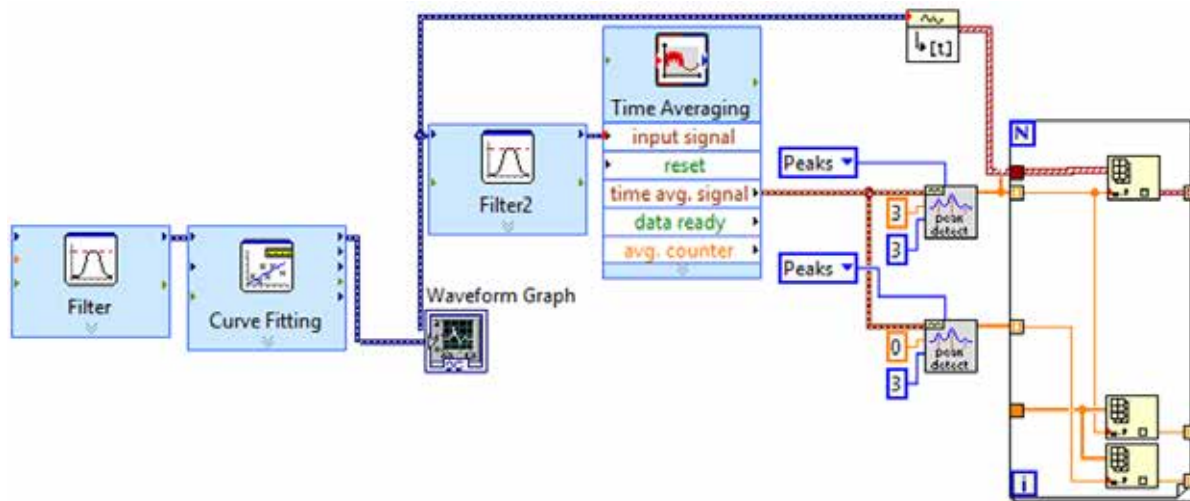


Рис. 5. Узел обработки и анализа сигнала пульсовой волны

Третий узел известного ВП измерения АД [4] выполняет сброс результатов измерения. Схема узла ВП сброса данных приведена на рис. 6. Данный узел ВП необходим для принудительного завершения процесса измерения и аварийных ситуациях работы устройства.

Недостатками известного ВП измерения АД [6, 7] является использование аппроксимированных функций, позволяющих только приближенно к реальным данным вывести результаты измерения. Кроме того, в известном ВП не учитываются погрешности измерений, связанные с выбором пороговых значений АД и амплитудно-частотными характеристиками фильтра.

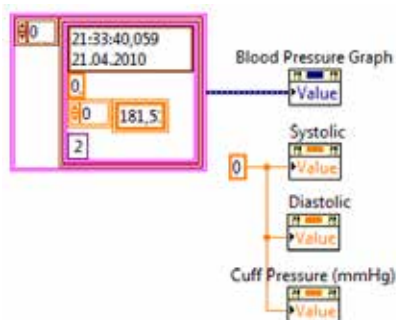


Рис. 6. Узел сброса результатов измерения

Разработка ВМДС измерения АД

В рамках статьи разработан новый ВМДС измерения АД [8–10]. ВМДС приведен на рис. 7, а, б и состоит из следующих основных узлов:

- узел сброса результатов измерения;
- узел загрузки сигнала пульсовой волны;
- узел измерения значений АД;
- узел отображения сигнала пульсовой волны.

Узел сброса результатов измерения аналогичен узлу известного ВП [6, 7], приведенного на рис. 5.

Узел загрузки сигнала пульсовой волны при разработке ВМДС измерения АД начинается с построения узлов While Loop и Case, которые позволяют загружать сигналы пульсовой волны в режимах загрузки из файла (рис. 7, а) и при непосредственном снятии сигнала в реальном масштабе времени (рис. 7, б). Для загрузки сигнала пульсовой волны из файла в ВМДС измерения АД используется узел Read Biosignal.

В режиме регистрации сигнала в реальном времени используется узел Simulate. Данный узел задает параметры сигнала пульсовой волны: значения систолического и диастолического давления, пульса, наличия или отсутствия помех различного вида.

Фильтр Filter signal, используемый при разработке ВМДС, выполняет фильтрацию сигнала, подаваемого с узла Simulate или Read Biosignal.

Узел Filter signal задает следующие параметры фильтра:

- Filtering Type (Тип фильтра): Lowpass (нижних частот);
- Cutoff Frequency (Hz) (частота среза, Гц): 50;
- Topology (тип конструкции): Elliptic (эллиптический);
- Order (порядок): 3.

Узел измерения значений АД обозначается как Analysis и позволяет произвести обработку сигнала и выделить в нем информативные параметры: систолическое давление (Systolic pressure), диастолическое давление (Diastolic pressure) и среднее артериальное давление (МАР). Узел позволяет задать пороговые значения (уровни нормы) для систолического и диастолического давления. Для систолического давления по умолчанию используется пороговое значение – 0,5, для диастолического – 0,78.

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения нормальное давление у людей разного возраста отличается. Для расчета нормального давления в зависимости от возраста пациента приняты формулы:

- для людей в возрасте от 7 до 20 лет значение уровня АД определяется следующим образом:

$$\text{САД} = 1,7 \times \text{возраст} + 83 \pm 5 \text{ мм рт.ст.};$$

$$\text{ДАД} = 1,6 \times \text{возраст} + 42 \pm 5 \text{ мм рт.ст.};$$

- для людей в возрасте от 20 до 80 лет значение уровня АД вычисляется как

$$\text{САД} = 0,4 \times \text{возраст} + 109 \pm 5 \text{ мм рт.ст.};$$

$$\text{ДАД} = 0,3 \times \text{возраст} + 67 \pm 5 \text{ мм рт.ст.}$$

В рамках исследования разработан узел определения значения уровня АД в зависимости от возраста (рис. 8).

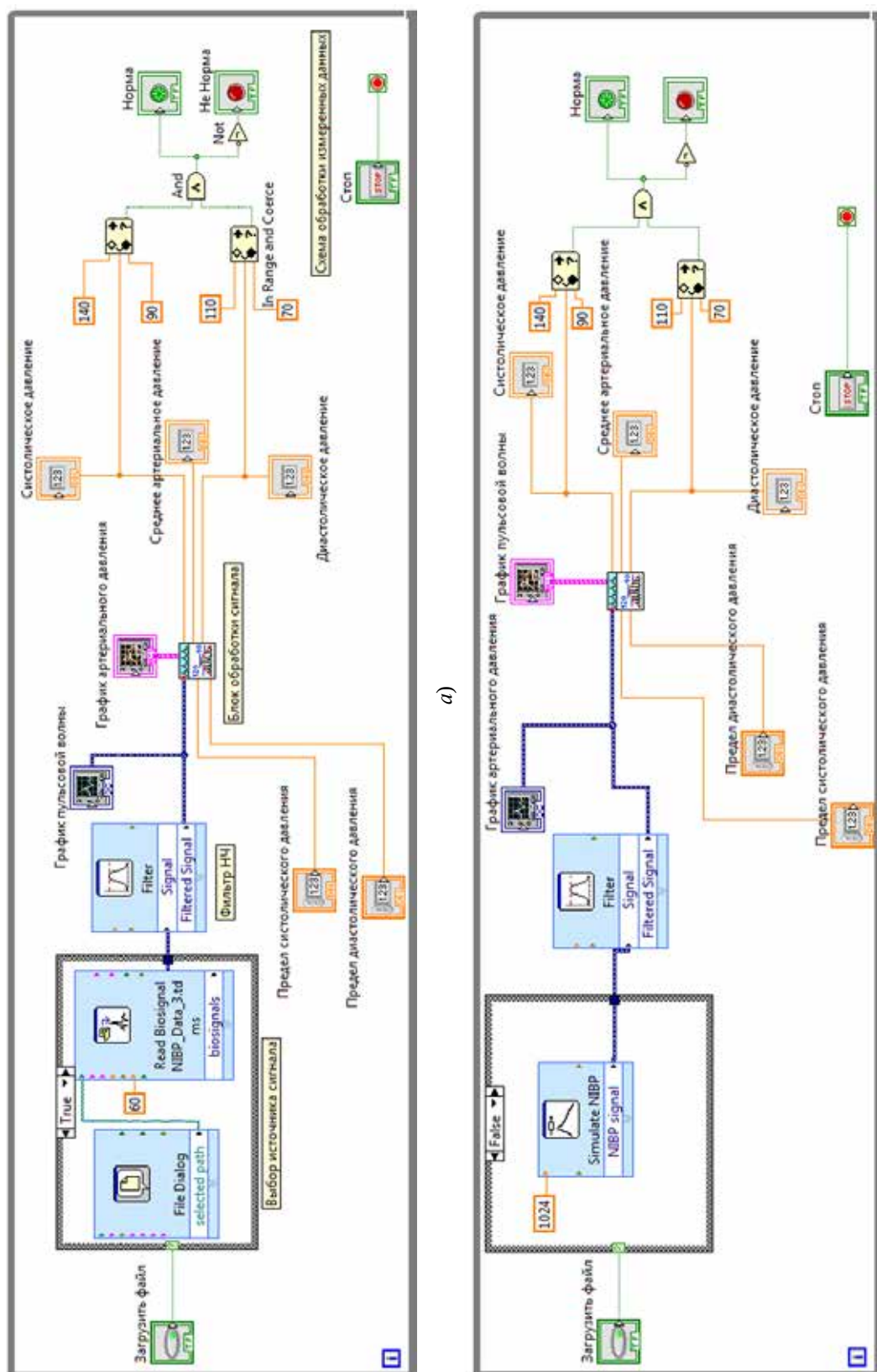


Рис. 7. ВМДС измерения АД:

а – ВМДС в режиме загрузки сигнала пульсовой волны из файла; б – ВМДС в режиме генерирования сигнала пульсовой волны

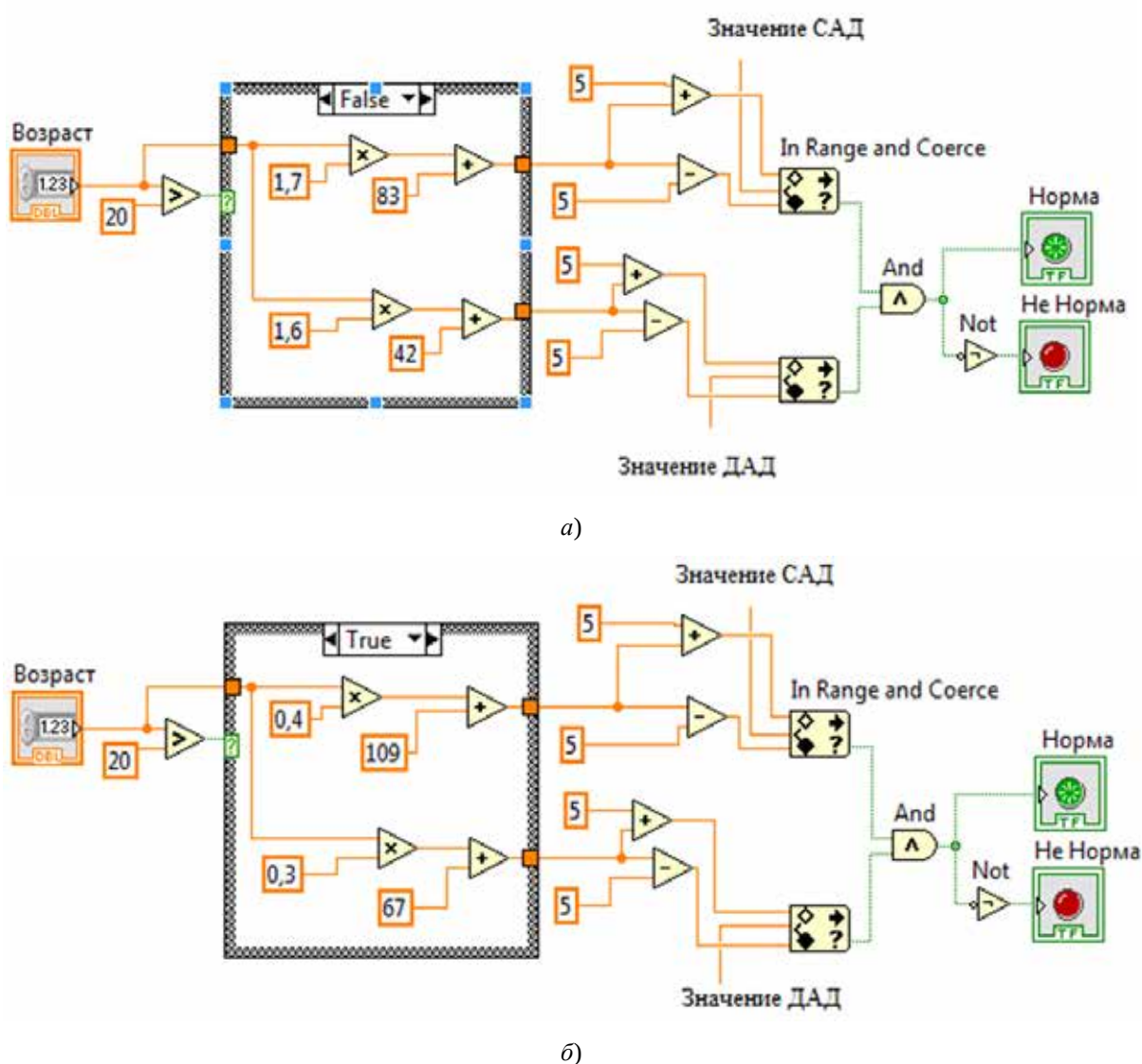


Рис. 8. Узел определения уровня АД по возрасту:
 а – узел ВМДС вычисления АД для людей младше 20 лет;
 б – узел ВМДС вычисления АД для людей старше 20 лет

Для отображения сигнала пульсовой волны используется узел Waveform Graph, который выводит график сигнала пульсовой волны на лицевую панель ВМДС (рис. 9). На лицевой панели также выводятся значения систолического и диастолического АД, число полных лет пациента и сигнализатор критических состояний, который срабатывает при превышении порога АД у пациентов соответствующей возрастной группы.

Таким образом, в статье разработан ВМДС в среде программирования LV для измерения АД [7, 8], который позволяет продемонстрировать процесс измерения АД, отображения результатов в виде систолического, диастолического давления, пульсовой волны и прогноза состояния пациента в зависимости от возраста, сохранять результаты измерений; обладает удобным и понятным интерфейсом для людей с ослабленным зрением; сопровождается звуковой сигнализацией, может передавать данные по различным каналам связи (в том числе через Internet), и может быть использован в качестве медицинского диагностического симулятора измерения АД.

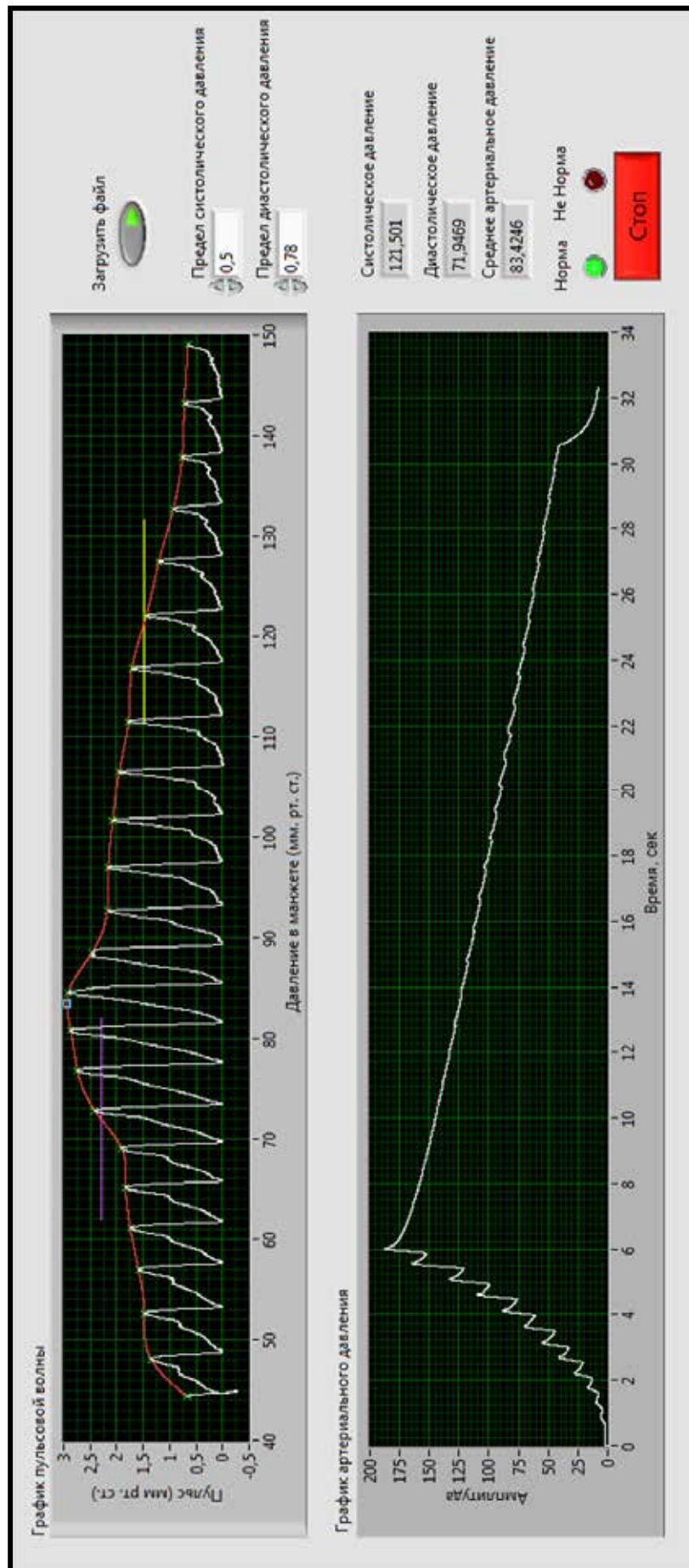


Рис. 9. Лицевая панель ВМДС измерения АД

Список литературы

1. Тревис, Дж. LabVIEW для всех / Дж. Тревис. – М. : ДМК пресс, 2005. – 537 с.
2. Климентьев, К. Е. Основы графического программирования в среде LabVIEW : учеб. пособие / К. Е. Климентьев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2003. – С. 69.
3. Официальный сайт Пензенского государственного университета. – URL: <http://www.pnzgu.ru> (дата обращения: 02.06.2014).
4. ГОСТ Р 30324.30–2002 (МЭК 60601-2-30-95). Изделия медицинские электрические. Часть 2. Частные требования безопасности к приборам автоматического контроля давления крови косвенным методом. – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 45 с.
5. Иванов, С. Ю. Точность измерения артериального давления по тонам Короткова / С. Ю. Иванов, Н. И. Лившиц // Вестник аритмологии. – 2005. – № 40.
6. Blood pressure sensor: user manual. – Vernier : Software & Technology, 2014. – С. 8.
7. Датчики пульсовой волны для диагностики сердечно-сосудистой системы / С. А. Тараканов, В. И. Кузнецов, Н. И. Рыжаков, А. А. Рассадина, В. С. Гайдуков // Вестник новых медицинских технологий. – 2013. – № 1.
8. Tyckov, A. Yu. The development of the arterial pressure registration device with the increased efficiency of work / A. Yu. Tyckov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 9, № 23. – P. 19729–19740.
9. Tyckov, A. Yu. The software solution of the problems of the biomedical information processing / A. Yu. Tyckov // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе : сб. тр. 4-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – С. 51–54.
10. Абросимова, О. В. Разработка информационно-измерительного устройства регистрации артериального давления с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром / О. В. Абросимова, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 119–127.

Тычков Александр Юрьевич

кандидат технических наук,
заместитель директора
научно-исследовательского института
фундаментальных и прикладных исследований,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tyckov_a@pnzgu.ru

Tyckov Aleksandr Yur'evich

candidate of technical sciences,
deputy director of Scientific-research Institute
of fundamental and applied research,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Чураков Петр Павлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Churakov Petr Pavlovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Тычкова Анна Николаевна

начальник инновационно-аналитического отдела,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: shiringuchi@mail.ru

Tyckova Anna Nikolaevna

head of innovations and analytics department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Абросимова Олеся Валерьевна

соискатель,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Snrbi-pgu@mail.ru

Abrosimova Olesya Valer'evna

applicant,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 53.082:004.9

Тычков, А. Ю.

Разработка виртуального медицинского диагностического симулятора измерения артериального давления / А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, А. Н. Тычкова, О. В. Абросимова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 96–105.

УДК 681.2.08:57.087

*М. С. Геращенко, С. И. Геращенко, С. М. Геращенко***ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ГИДРОМАНЖЕТНОГО
ТОНОМЕТРА***M. S. Gerashhenko, S. I. Gerashhenko, S. M. Gerashhenko***HYDROCUFF TONOMETER ERROR ASSESSMENT**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность приведенных исследований обусловлена необходимостью повышения точности оценки значений артериального давления (АД) тонометрами. Контроль АД является важнейшим параметром, который оценивается при различных формах артериальной гипертензии. В результате проведенных исследований разработана гидроманжетная технология получения осцилляций, позволяющая существенно увеличить амплитуду формируемых осцилляций. Это позволяет производить оценку АД с погрешностью, соизмеримой с механическими тонометрами. *Материалы и методы.* В качестве методов проектирования узлов и блоков тонометра, реализующего гидроманжетную методику формирования осцилляций, использовалась среда LabVIEW. *Результаты.* В результате проведенных исследований разработан микропроцессорный автоматический гидроманжетный тонометр с погрешностью оценки АД, не превышающей погрешность механического тонометра. *Выводы.* Решена задача разработки основ гидроманжетной технологии получения и обработки осцилляций для реализации ее преимуществ в тонометрах. На современной элементной базе изготовлен макетный образец, произведена оценка его погрешности.

A b s t r a c t. Background. The actuality of the research is due to the need of improving the estimation accuracy of the blood pressure values (BP) by blood pressure monitors. BP control is the most important parameter measured in various forms of hypertension. As a result of research, the hydrocuff technology of oscillations formation allows to significantly increase the amplitude of the generated oscillations. This enables the BP assessment with accuracy comparable to manual blood pressure monitors. *Materials and methods.* The LabVIEW environment has been used for designing of units and blocks of the blood pressure monitor which implements the hydrocuff method of oscillations formation. *Results.* The microprocessed automatic hydrocuff BP monitor, with BP error assessment which is not exceed the error of the mechanical tonometer is developed as a result of research. *Conclusions.* The work has solved the task of developing of basics for hydrocuff technology of obtaining and processing the oscillations for the realization of its benefits in BP monitors. The breadboard of device has been made with its error estimation using a modern element base.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тонометры, осцилляторы, методы оценки давления, гидроманжетная технология формирования осцилляций.

K e y w o r d s: blood pressure monitors; the pressure evaluation oscillometric methods; the hydrocuff technology of oscillations formation.

Введение

Артериальная гипертензия (АГ) является в настоящее время величайшей в истории человечества неинфекционной пандемией. Она определяет структуру кардиоваскулярной заболеваемости и смертности. Среди трудоспособного населения России показатели смертности

катастрофичны. Они в 5–7 раз превышают аналогичные показатели в других странах. Причем до 30–45 % общей популяции страдает артериальной гипертензией без каких-либо системных тенденций к изменению артериального давления (АД). По статистическим данным Всемирной Организации здравоохранения, в странах Запада отмечается тенденция к снижению смертности от инсультов, в отличие от восточно-европейских стран, где смертность от инсульта явно растет [1].

Среди населения для оценки АД в последнее время наиболее популярны полуавтоматические и автоматические приборы, воспроизводящие алгоритм аускультативного или осциллометрического методов измерения. Приводимая производителями в Руководстве по эксплуатации на приборы погрешность измерения давления (менее 3 мм рт.ст.) пользователями ошибочно принимается за погрешность измерения артериального давления, на самом деле является погрешностью измерения давления воздуха в манжете [2, 3].

Объективная диагностика и успешное лечение АГ зависят от точного измерения АД. В противном случае могут совершаться неправильные действия и приниматься неверные решения, приводящие к критическим последствиям. Повышенное АД является важнейшим фактором риска основных сердечно-сосудистых заболеваний – инфаркта миокарда и мозгового инсульта. Оперативная фиксация момента повышенного давления в домашних условиях и принятие мер по его снижению является эффективной профилактикой от инсульта и инфаркта.

В настоящее время существуют различные способы измерения АД, традиционно делящиеся на инвазивные и неинвазивные. Неинвазивные методы измерения АД получили наибольшее распространение в медицинской практике. Данный способ реализуется путем использования косвенных методов измерения параметров давления крови с помощью окклюзионной манжетки в плечевой артерии. Обнаружение пульсаций давления крови на дистальном участке артерии наиболее часто производится осциллометрическими методами [4].

Осциллометрическая методика заключается в определении параметров АД по характерным изменениям осцилляций воздуха в манжете при плавной компрессии (декомпрессии). Значение давления воздуха в манжетке, при котором появляется пульс, принимается за систолическое АД. Определение минимального давления данным способом сопряжено со значительными погрешностями. За критерий равенства давления воздуха в манжетке минимальному давлению может быть принято уменьшение амплитуды пульсаций при декомпрессии воздуха. Однако этот критерий не является достаточно точным и однозначным для автоматического определения параметров АД. Только при реографической записи и ручной расшифровке данных могут быть получены удовлетворительные результаты.

Осциллометрическая методика применяется в 80 % электронных автоматических и полуавтоматических тонометров. Ее преимуществами перед аускультативной являются большая устойчивость к шумовому воздействию, перемещению манжеты по руке, возможность измерения через тонкую одежду, а также при наличии выраженного «аускультативного провала» и слабых тонах Короткова. В современных приборах имеется возможность регистрации уровня АД в фазе компрессии, когда отсутствуют местные нарушения кровообращения, появляющиеся в период сдвигания воздуха. Осциллометрический метод в меньшей степени, чем аускультативный, зависит от эластичности стенки сосудов, что снижает частоту выявления псевдорезистентной гипертензии у больных с выраженным атеросклеротическим поражением артерий [5].

Сохранение преимуществ тонометров осцилляторного типа с повышением точности оценки значений АД возможно с применением гидроманжетной технологии формирования осцилляций [6, 7].

Отличительная особенность данного варианта конструкции тонометра – наличие резервуара для жидкости и системы клапанов, обеспечивающей за счет груши нагнетание жидкости в манжету и декомпрессию давления с заданной скоростью. В модели используется осцилляторный метод оценки давления. По сравнению с существующими тонометрами осцилляторного типа, данный вариант усложняется незначительно за счет добавления резиновой груши и насосов для жидкости.

Внешний вид автоматического гидроманжетного тонометра приведен на рис. 1.

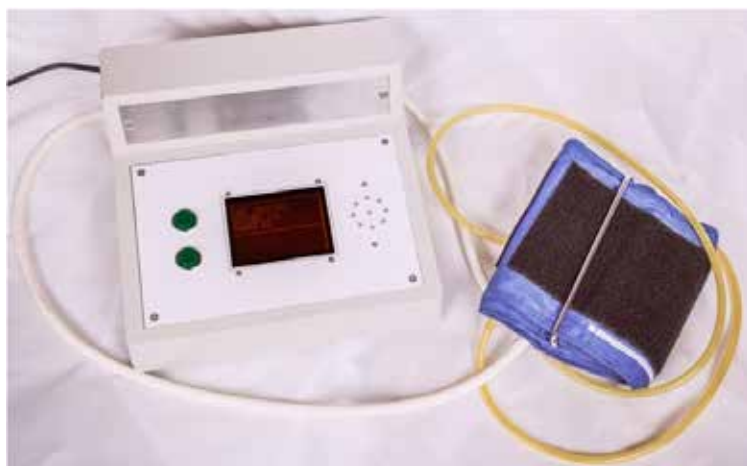


Рис. 1. Внешний вид автоматического гидроманжетного тонометра.

Конструктивными элементами макетного образца тонометра является основной модуль цифровой обработки сигнала, приведенный на рис. 2. К модулю подключаются: модуль индикации, модуль гидросистемы, обеспечивающий формирование давления в камере манжеты.



Рис. 2. Основной модуль цифровой обработки сигнала

Испытания разработанного варианта тонометра были разделены на два этапа. На первом была произведена оценка погрешности определения давления в манжете по методике поверки «Сфигмоманометры неинвазивные механические» Р50.2.020-2002 [8]. Согласно данной методике основная погрешность определяется как разность между показаниями проверяемого тонометра с действительным значением измеряемого давления, определяемого по ртутному манометру.

В соответствии с методикой значение основных погрешностей проверяемого тонометра на любой отметке шкалы как при компрессии, так и при декомпрессии не должны превышать ± 4 мм рт.ст.

Для проверки значения оценки давления в гидроманжете использовалась схема, приведенная на рис. 3. Камера манжеты заправляется в жесткое кольцо и соединяется с гидросистемой тонометра. Гидросистема обеспечивает нагнетание требуемого значения давления жидкости в камере манжеты. Система оцифровки значений давления тонометра производит преобразование значений давления в цифровой вид. В качестве эталонного измерителя давления использовался ртутный тонометр.



Рис. 3. Схема проверки значений давления в манжете

Проверка тонометра показала, что погрешность оценки давления в манжете не превышает ± 4 мм рт.ст.

На втором этапе осуществлялось исследование погрешности оценки значений систолического (САД) и диастолического давлений (ДАД) разработанными тонометрами. При аттестации приборов в настоящее время наиболее популярны протоколы Национального института стандартов США AAMI/ANSI и протокол Британского общества исследования гипертонии – BHS 90.

По протоколу BHS после испытаний прибору присваивается класс точности в соответствии с таблицей частоты наблюдаемых различий между показаниями прибора и экспертными значениями АД (табл. 1).

Таблица 1

Процент отличий приборного и экспертного АД (BHS 93)

Класс	<5 мм рт.ст.	<10 мм рт.ст.	<15 мм рт.ст.
A	60 %	85 %	95 %
B	50 %	75 %	90 %
C	40 %	65 %	85 %

Для полного удовлетворения требованиям BHS прибор должен иметь класс не ниже «B» для САД и «B» для ДАД (B/B), а приборы с характеристиками хуже C (D) не рекомендуются для применения [9].

Необходимо также отметить, что даже при самом высоком классе точности приборов по протоколу BHS 1993 – «A» допускается расхождение в показаниях прибора и данных экспертов более 15 мм рт.ст. в 5 %, более 10 мм рт.ст. в 15 % и более 5 мм рт.ст. – в 40 % измерений.

Измерялось систолическое АД и диастолическое АД с расположением манжеты на предплечье на уровне сердца представленными образцами гидроманжетных тонометров и стандартным ртутным сфигмоманометром.

В эксперименте участвовало 35 пациентов. Для них производился замер значений давления гидроманжетным тонометром. После чего опытные врачи-терапевты производили измерение давления по методу Короткова механическим тонометром. Затем осуществлялось сравнение полученных результатов.

По результатам эксперимента подсчитывалось количество измерений, отличающихся на ≤ 5 , ≤ 10 , ≤ 15 мм рт.ст. для САД и ДАД.

Результаты обработки данных для автоматического тонометра приведены в табл. 2. Гистограммы величины отличий в показаниях САД и ДАД приведены на рис. 4 и 5.

Таблица 2

Статистическая обработка данных для величины отличий в показаниях САД и ДАД для автоматического тонометра.

Параметр	САД, число/%	ДАД, число/%
Количество измерений, отличающихся на ≤ 5 мм рт.ст.	28/80	27/77
Количество измерений, отличающихся на ≤ 10 мм рт.ст.	35/100	35/100
Количество измерений отличающихся на ≤ 15 мм рт.ст.	35/100	35/100
Среднее	1,4	0,57
Ст. ошибка	0,64	0,76
Ст. отклонение	3,80	4,51
Дисперсия	14,48	20,36
Мин	-5	-8
Мах	8	8

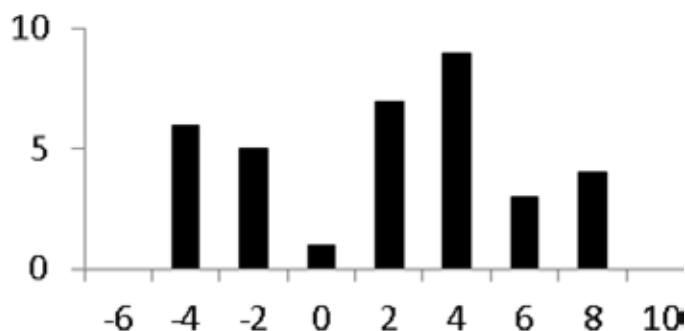


Рис. 4. Гистограмма величины отличий в показаниях САД для автоматического тонометра

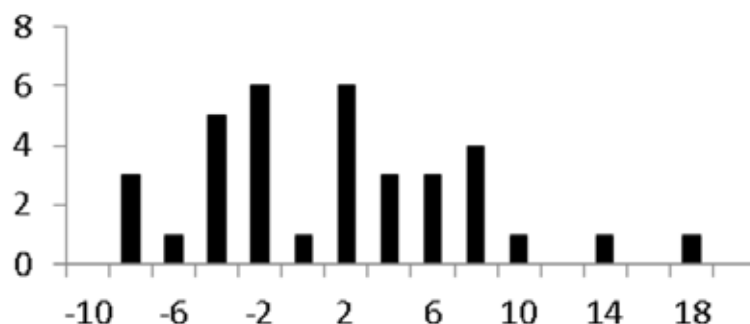


Рис. 5. Гистограмма величины отличий в показаниях ДАД для автоматического тонометра

Анализ данных говорит о том, что гидроманжетный автоматический тонометр завышает значения САД на 1,4 мм рт.ст. и ДАД на 0,57 мм рт.ст. По САД количество измерений, отличающихся на ≤ 10 мм рт.ст., составляет 100 %. Для ДАД количество измерений, отличающихся на ≤ 10 мм рт.ст., также составляет 100 %.

В целом результаты говорят о том, что автоматический гидроманжетный тонометр, соответствует требованиям, указанным в IP-стандарте, и, по протоколу BHS, может быть классифицирован как класс «А», для оценки САД и ДАД.

Заключение

В результате проведенных исследований спроектирован и изготовлен макет гидроманжетного тонометра. Произведена оценка погрешности разработанного макетного образца. Результаты сравнительных испытаний показали, что погрешность гидроманжетного тонометра не превышает погрешность механических тонометров и он может быть классифицирован как класс «А» тонометров.

Список литературы

1. Рекомендации по лечению артериальной гипертонии. ESH/ESC 2013 // Российский кардиологический журнал. – 2014. – № 1 (105). – С. 5–92.
2. Возможности и перспективы способов и приборов для измерения уровня артериального давления / О. П. Родина, И. Я. Моисеева, С. И. Геращенко, М. С. Геращенко, О. А. Водопьянова, А. Н. Митрошин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 10-1. – С. 166–169.
3. Диагностика и лечение артериальной гипертензии (Рекомендации Российского медицинского общества по артериальной гипертонии и Всероссийского научного общества кардиологов) // Кардиология. – 2010. – № 3. – С. 5–26.
4. Иванов, С. Ю. Точность измерения артериального давления по тонам Короткова в сравнении с осциллометрическим методом / С. Ю. Иванов, Н. И. Лившиц // Вестник аритмологии. – 2005. – № 40. – С. 55–58.
5. Голиков, В. А. Анатомия тонометров / В. А. Голиков // Ремедиум. – 1999. – № 1. – URL: http://www.remedium.ru/catalog/detail.php?ID=5265&phrase_id=162216

6. Пат. № 104437 Российская Федерация. Тонометр Геращенко / Геращенко М. С. 2011. – URL: <http://bankpatentov.ru/node/78436> (дата обращения: 05.05.2016).
7. Геращенко, М. С. Использование гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров с повышенной точностью / М. С. Геращенко, Н. А. Волкова, С. М. Геращенко. Известия высших учебных заведений // Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 116–125.
8. Сфигмоманометры неинвазивные механические. Методика поверки Р50.2.020-2002 БЗ 9-2001-19. – М. : Изд-во стандартов, 2001.
9. Рогоза, А. Н. К вопросу о точности измерения АД автоматическими приборами / А. Н. Рогоза // Функциональная диагностика. – 2003. – № 1. – С. 2–10.

Геращенко Михаил Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mifon1@yandex.ru

Gerashchenko Mikhail Sergeevich

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

Геращенко Сергей Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mpo@list.ru

Gerashchenko Sergey Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of medical cybernetics
and informatics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Геращенко Сергей Михайлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра медицинской кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gsm@pnzgu.ru

Gerashchenko Sergey Mihailovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of medical cybernetics and informatics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.2.08:57.087

Геращенко, М. С.

Оценка погрешности гидроманжетного тонометра / М. С. Геращенко, С. И. Геращенко, С. М. Геращенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 106–111.

УДК 681.2.08:57.087

М. С. Геращенко, С. И. Геращенко, С. М. Геращенко

РАЗРАБОТКА ГИДРОМАНЖЕТНОГО ПРИБОРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

M. S. Gerashhenko, S. I. Gerashhenko, S. M. Gerashhenko

HEMODYNAMIC PARAMETERS HYDROCUFF MONITORING DEVICE DEVELOPMENT

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является разработка гидроманжетной технологии формирования осцилляций для мониторинга гемодинамических параметров у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Целью исследования является разработка устройства, реализующего использование гидроманжетной технологии для определения основных гемодинамических параметров. *Материалы и методы.* При разработке гидроманжетной технологии получения осцилляций использовались методы схемотехнического проектирования измерительных устройств в среде LabVIEW. *Результаты.* Произведен анализ основных погрешностей, свойственных осцилляционным методам, основанным на использовании воздушной компенсационной манжеты. Показана перспективность применения гидроманжетной технологии формирования осцилляций для оценки гемодинамических параметров. *Выводы.* Показана возможность и пути реализации нового класса приборов для решения актуальной задачи оценки гемодинамических параметров.

A b s t r a c t. *Background.* The object of the study is in developing of the hydrocuff technology of oscillation formation for hemodynamic parameters monitoring in patients with cardiovascular disease (CVD). The aim of the study is to develop a device that implements the use of hydrocuff technology for determining the main hemodynamic parameters. *Materials and methods.* The methods of circuit design of measuring devices at LabVIEW have been used. *Results.* The analysis of the basic errors inherent to oscillatory methods based on the use of air compensation cuffs is evaluated. The prospect of hydrocuff technology of oscillations formation for the assessment of hemodynamic parameters is shown. *Conclusions.* The possibility and ways of a new class device realization to solve the relevant task of hemodynamic parameters evaluation are shown.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тонометры, осцилляционные методы оценки давления, гидроманжетная технология формирования осцилляций.

К e y w o r d s: blood pressure monitors; pressure evaluation oscillometric methods; the hydrocuff technology of oscillations formation.

Введение

Оценка гемодинамических параметров широко применяется в настоящее время при интенсивной терапии [1]. Однако в основном их получение основано на применении инвазивных методов диагностики. В первую очередь это связано с требованиями по точности представления гемодинамических параметров. В инвазивных методах высокая точность представления

данных обеспечивается за счет применения для оценки ряда параметров прямых методов. Кроме того, при обработке сигналов используются реально снимаемые значения пульсовой волны.

Травматичность инвазивного метода оценки гемодинамических параметров существенно ограничивает его применение и делает практически невозможным использование в бытовых условиях.

В этой связи актуальными являются разработки, позволяющие производить оценку гемодинамических параметров неинвазивными методами. Широкое внедрение методов оценки гемодинамических параметров связано с разработкой недорогих, компактных, простых в обращении комплексов.

Анализ предметной области

Современные компьютерные системы позволяют решать ряд задач, связанных с получением и обработкой сигналов [2], однако, задача получения и преобразование исходных сигналов для оценки гемодинамических параметров при неинвазивных методах остается нерешенной.

Одним из методов получения данных при оценке гемодинамических параметров является объемная компрессионная осциллометрия. Однако применение воздушной манжеты вследствие сжимаемости воздуха существенным образом изменяет форму осциллометрической кривой. Кроме того, значительную неопределенность в нахождении характерных точек вносят шумы, механические колебания, различного рода артефакты.

В данной статье в качестве исходных сигналов предлагается использовать осциллометрическую кривую, получаемую на основе гидроманжетной технологии. Данная технология для решения задач оценки гемодинамических параметров ранее не применялась и, как показали предварительные исследования, обладает уникальностью.

Основные преимущества гидроманжетной технологии связаны с существенным увеличением амплитуды и малыми искажениями формы осцилляций. Это создает предпосылки к существенному увеличению точности оценки гемодинамических параметров для неинвазивных методов их оценки.

Гемодинамические процессы связаны с циркулированием крови в сердечно-сосудистой системе (ССС). В медицинском плане в задачу оценки гемодинамических параметров входит нахождение взаимосвязи между оцениваемыми параметрами гемодинамики и определенными видами патологий, вызванных наличием заболеваний ССС. В целом гемодинамические параметры характеризуют артериальное давление (АД), сердечную деятельность и состояние сосудистой системы.

В настоящее время разработано множество систем, способных прямым или косвенным методом оценивать гемодинамические параметры.

Одним из приборов, наиболее близко совпадающих по целям и задачам, поставленным в настоящей статье, является неинвазивный аппаратно-программный КАП ЦГосм-«Глобус» [3, 4].

В основу работы комплекса положен метод объемной компрессионной осциллометрии. Согласно алгоритму обработки сигнала находят точки, соответствующие основным значениям артериального давления [5].

Основной проблемой объемной компрессионной осциллометрии является низкая точность оценки значений давления и плохая воспроизводимость получаемых данных. Эти факторы обусловлены незначительной амплитудой осцилляций (1–2 мм рт.ст. для стандартной компрессионной манжеты), формируемых в воздушной компрессионной манжете. При давлении в манжете 100 мм рт.ст. осцилляции составляют 1–2 %, при 200 мм рт.ст. 0,5–1 %. В этих условиях значительную неопределенность в нахождении характерных точек вносят шумы, механические колебания, различного рода артефакты. В целом погрешность оценки значений давления в характерных точках от указанных факторов может составлять 5–6 %.

Точность определения точек перегиба существенно образом зависит от скорости компрессии. Определенную долю погрешности вносят датчики давления и цифроаналоговые преобразователи. В среднем для датчиков давления, используемых в компенсационной осциллометрии, с учетом преобразования погрешность составляет 2–3 %.

Оценивая суммарную погрешность от перечисленных выше факторов можно сказать, что погрешность оценки значений различных типов АД составляет от 10 до 30 %.

Важное значение для показателей кровообращения представляют параметры, характеризующие сердечную деятельность. Отличительная особенность этих параметров с метрологической точки зрения заключается в том, что они являются расчетными. При их оценке учитывается форма, фазовая структура кривой пульсовой волны и ее изменения в динамике. Формирование пульсовой волны происходит в зависимости от временного интервала между прямой и отраженной волной. Прямая волна формируется ударным объемом крови во время систолы и направляется от центра к периферии. В местах разветвлений крупных артерий формируется второй компонент пульсовой волны – отраженная волна. Она распространяется от периферических артерий к сердцу. Воздух является сжимаемой средой. Вследствие этого происходит существенное изменение формы пульсовой волны по сравнению с ее формой в сонной артерии. Этот факт практически исключает возможность использования формы пульсовой волны, формируемой воздушной компрессионной манжетой, при оценке основных показателей сердечной деятельности.

В Национальных рекомендациях по диагностике и лечению артериальной гипертензии (ВНОК, РМОАГ, 2008 г.) и в Национальных рекомендациях по кардиоваскулярной профилактике (ВНОК, 2011 г.) в список представленных гемодинамических параметров вошла скорость распространения пульсовой волны (СПВ, PWV) как интегральный показатель повышения сосудистой жесткости и лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ, ABI) [6].

Для оценки скорости пульсовой волны используется методика, основанная на оценке временного интервала пройденного пульсовой волной на определенном расстоянии [7]. Наряду с оценкой сосудистой жесткости важность точной оценки скорости пульсовой волны заключается в том, что ее значение учитывается при расчете многих основных показателей сердечной деятельности состояния сосудов.

Погрешности оценки значения скорости пульсовой волны существенно зависят от шумов, механических колебаний и различного рода артефактов.

Следует также отметить, что на скорость пульсовой волны влияет механическое изменение площади поперечного сечения артерий. Этот факт требует минимальных значений давления компрессионной манжеты при оценке временного интервала. Максимальная амплитуда осцилляций соответствует среднему значению АД. При этих значениях происходит существенное сужение сечения артерии. При значениях давления, приближенного к значению диастолического давления, амплитуда осцилляций практически исчезает и соизмерима с амплитудой шумов 0,1–0,2 мм рт.ст.

В качестве недостатка рассмотренного комплекса следует отметить его высокую стоимость и необходимость использования персонального компьютера. Этот факт практически исключает возможность широкого применения комплекса в домашних условиях для индивидуального пользования.

Разработка гидроманжетной технологии формирования осцилляций

В настоящей статье предлагается гидроманжетная технология формирования осцилляций, позволяющая существенно увеличить их амплитуду [8, 9]. На рис. 1 приведен график изменения амплитуды осцилляций при использовании в компрессионной плечевой манжете в качестве рабочего тела жидкости.

По оси Y (10 мВ / 1 мм рт.ст.) представлены оцифрованные значения давления при декомпрессии. Из графика видно, что амплитуда осцилляций, получаемых на основе гидроманжетной технологии, достигает 17 мм рт.ст. Такая амплитуда практически снимает проблему влияния шумов и позволяет производить измерения при значениях давления, близких к диастолическому. То есть устраняет влияние изменения сечения артерии при оценке скорости пульсовой волны.

Следующее преимущество гидроманжетной технологии связано с совпадением формы и фазовой структуры осцилляций с фазовой структурой давления в сонной артерии. Это позволяет получать качественные показатели сердечной деятельности на основе оценки дифференциальных и интегральных характеристик пульсовой волны [10].

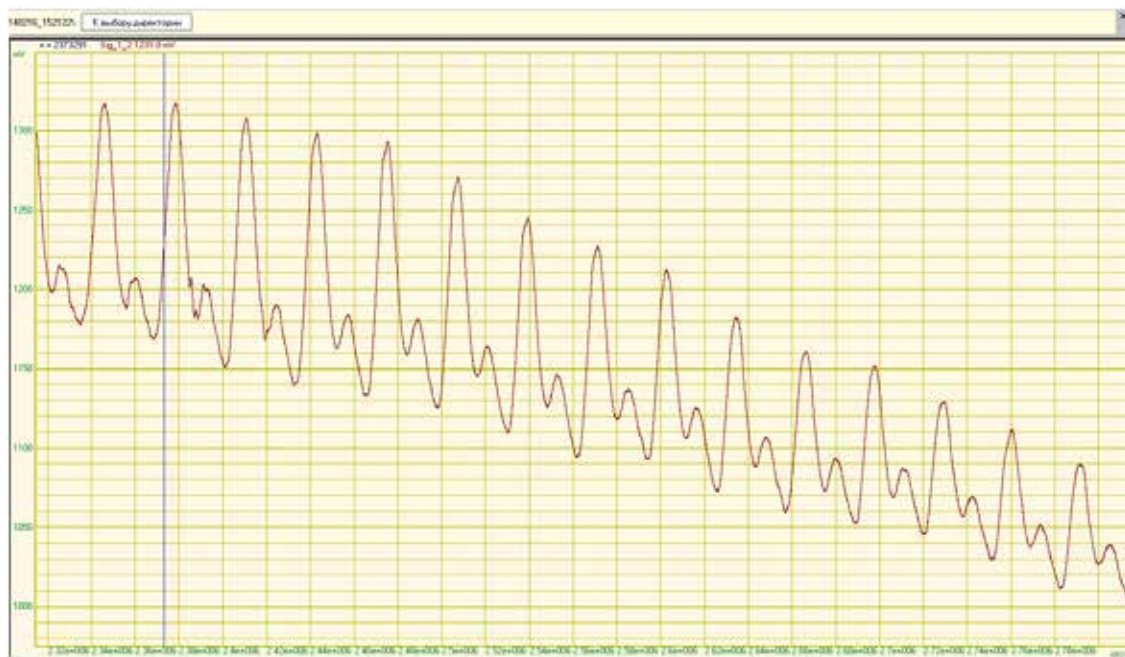


Рис. 1. График изменения амплитуды осцилляций при использовании в компрессионной плечевой манжете в качестве рабочего тела жидкости

Немаловажное преимущество гидроманжетной технологии связано с повышением точности оценки значений АД. При наличии двух манжет гидроманжетная технология позволяет определять значения систолического и диастолического давлений по моментам, соответствующим появлению и исчезновению пульсаций в нижней манжете. На рис. 2 представлены осциллограммы осцилляций. Появление пульсаций в нижней манжете наступило при давлении в верхней манжете, равном 160 мм рт.ст. Это значение соответствует систолическому давлению. Аналогично определяется диастолическое давление. Данная технология при использовании тарированных прецизионных датчиков давления, 16-разрядных аналого-цифровых преобразователей и скорости декомпрессии 0,2–0,3 мм рт.ст. позволяет получать погрешность оценки давления не хуже 1 мм рт.ст.

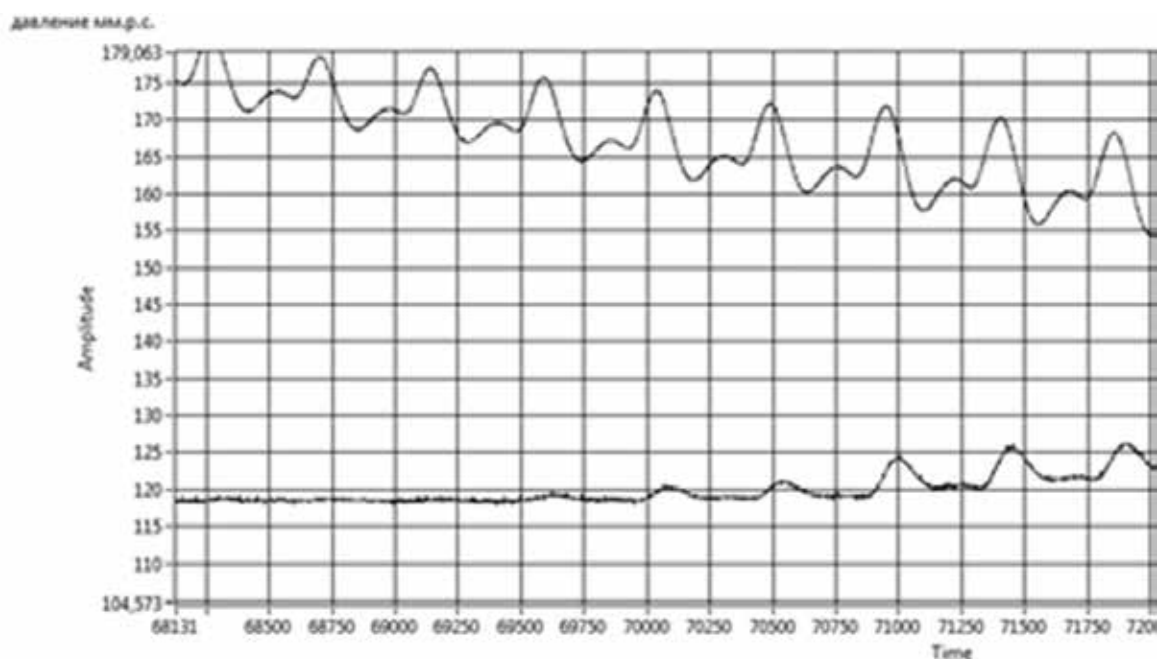


Рис. 2. Осциллограммы осцилляций в компрессионных жидкостных манжетах

Несомненным преимуществом гидроманжетной технологии является возможность реализации методики адаптивной компрессии и декомпрессии.

Анализ графика формы осцилляций показывает, что изменения значения давления в промежутке между интервалами сердечных сокращений прямыми методами осуществить невозможно. В этой связи возникают погрешности, значения которых могут изменяться в пределах от нуля до значения падения давления в промежутке между интервалами сердечных сокращений. Например, при частоте 60 ударов в минуту и скорости декомпрессии 3 мм рт.ст./с, погрешность может достигать 3 мм рт.ст.

С целью повешения точности определения верхней и нижней границ значений артериального давления в соответствии с предлагаемой методикой вводится адаптивный алгоритм декомпрессии. Его суть заключается в уменьшении скорости декомпрессии на порядок вблизи характерных точек.

Реализация методики адаптивной декомпрессии поясняется временной диаграммой, представленной на рис. 3.

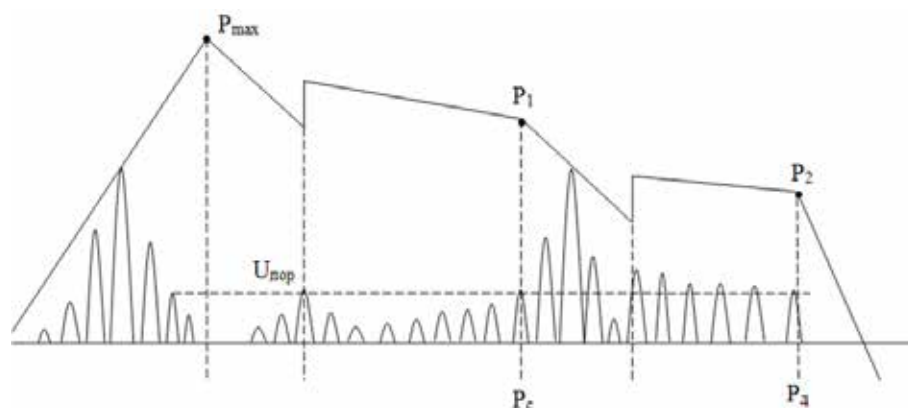


Рис. 3. Временная диаграмма методики адаптивной декомпрессии

Метод осуществляется следующим образом. После нагнетания в манжете давления, превышающего уровень систолического давления, начинается процесс декомпрессии с обычной скоростью (например, 3 мм рт.ст./с). В момент появления пульсаций, значение которых превышает $U_{пор}$, производится автоматическая подкачка давления на 3–4 мм рт.ст. Затем начинается режим медленной декомпрессии со скоростью 0,1–0,3 мм рт.ст./с. Процесс медленной декомпрессии продолжается до момента появления значения сигнала, не превышающего пороговое значение (P_1).

Далее начинается декомпрессия с обычной скоростью либо ускоренной и продолжается до исчезновения осцилляций, лежащих ниже порогового значения. Как только пульсации превышают $U_{пор}$, снова происходит подкачка давления в манжете и снижение скорости декомпрессии. Процесс медленной декомпрессии продолжается до того момента, когда значение пульсаций будут ниже $U_{пор}(P_2)$. Затем происходит быстрое снижение давления.

Заключение

С целью повышения точности оценки гемодинамических параметров предложена гидроманжетная технология формирования осцилляций. Ее преимущество, по сравнению с воздушной компенсационной манжетой, заключается в существенном повышении амплитуды осцилляций и меньшими искажениями амплитудно-фазовых характеристик пульсовой волны.

Предложен адаптивный алгоритм декомпрессии, который можно применить при использовании гидроманжетной технологии формирования пульсовой волны и обработки сигналов.

Список литературы

1. Системная гемодинамика. – URL: <http://Medical/Physiology/358.html>
2. Инновационные технологии в проектировании медицинских диагностических комплексов / Н. Л. Прохоров, А. Я. Олейников, Г. Г. Знайко, В. Е. Красовский, И. Д. Стулин, А. А. Швейн // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 2008. – Вып. 2.

3. Метод объемной компрессионной осциллометрии. – URL: <http://gemodinamika.ru/metod-objemnoj-kompressionnoj-oscillometrii.html>
4. Комплекс аппаратно-программный неинвазивного исследования центральной гемодинамики методом объемной компрессионной осциллометрии. – URL: <http://gemodinamika.ru/>
5. КАП ЦГосм-Глобус комплексы аппаратно-программные. – URL: <http://www.tdconcord.ru/items/011926.html>
6. Национальные рекомендации по кардиоваскулярной профилактике // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2011. – № 10 (6). – Приложение 2.
7. Малышев, В. Д. Интенсивная терапия / В. Д. Малышев, И. В. Веденина, Х. Т. Омаров и др. ; под ред. В. Д. Малышева. – М. : Медицина, 2002. – 584 с.
8. Пат. № 104437 Российская Федерация. Тонометр Геращенко / Геращенко М. С. 2011. – URL: <http://bankpatentov.ru/node/78436> (дата обращения: 05.05.2016).
9. Gerashchenko, M. S. Application of the hydrocuff technology for blood pressure evaluation / M. S. Gerashchenko, S. M. Gerashchenko, S. I. Gerashchenko, N. N. Yankina // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Т. 11, № 4. – С. 2271–2274.
10. Принципы проектирования компьютеризованных диагностических комплексов для неинвазивной оценки параметров системы кровообращения // Г. Г. Знайко, И. Д. Стулин, А. А. Швейн, В. Ю. Соловьев, В. Е. Красовский, А. А. Робинзон. – URL: <http://pandia.ru/text/80/014/25454.php>

Геращенко Михаил Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mifon1@yandex.ru

Gerashchenko Mikhail Sergeevich

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

Геращенко Сергей Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mpo@list.ru

Gerashchenko Sergey Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of medical cybernetics
and informatics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Геращенко Сергей Михайлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра медицинской кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gsm@pnzgu.ru

Gerashchenko Sergey Mikhaylovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of medical cybernetics and informatics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.2.08:57.087

Геращенко, М. С.

Разработка гидроманжетного прибора для мониторинга гемодинамических параметров /
М. С. Геращенко, С. И. Геращенко, С. М. Геращенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 112–117.