

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Рязанцев Д. А.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ
УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

5

Щербакова А. А., Чувькин Б. В.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ
КОНЦЕНТРАЦИЙ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА
В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

10

Кисляков С. В.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

16

Ревунов М. С.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА БУМАЖНОЙ МАССЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРОССКОРРЕЛЯЦИОННОГО
АЛГОРИТМА

24

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Коноваленко А. А., Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И.

ДАТЧИК СЕЛЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ФАКЕЛА ГОРЕЛКИ

32

Глубоков А. В., Ястребова Т. С.

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА УНИВЕРСАЛЬНЫХ
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ

37

Филатова О. С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ В ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДЕ
НА УДАРНОЙ ТРУБЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

43

Ларкин М. С., Поспелов А. В.

КОМПЕНСАЦИЯ ВРЕМЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
УГЛОВ ТАНГАЖА И КРЕНА

48

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗМЕРЕНИЯХ

Алимурадов А. К., Квитка Ю. С., Чураков П. П., Тычков А. Ю.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ
ОСНОВНОГО ТОНА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ
ПРОЦЕССА ДЕКОМПОЗИЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ
НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ

53

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Шамин А. А., Печерская Е. А., Николаев К. О.,

Зинченко Т. О., Головяшкин А. А.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ
СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ
ГИБРИДНЫХ ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ

66

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Колдов А. С., Родионова Н. В., Светлов А. В.

ОЦЕНИВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

76

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Ryazantsev D. A.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MEASURING
ANGULAR DISPLACEMENTS

5

Shcherbakova A. A., Chuvykin B. V.

INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF CONTROL
OF CONCENTRATIONS OF FUEL COMPONENTS
IN EMERGENCY SITUATIONS

10

Kislyakov S. V.

PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC PHASE TURNS
IN INFORMATION AND MEASURING SYSTEM

16

Revunov M. S.

IMPROVEMENT THE SYSTEMS FOR STABILIZATION
PARAMETERS OF THE FLOW OF PAPER PULP USING
A CROSS-CORRELATION ALGORITHM

24

MECHANICAL MEASUREMENTS

Konovalenko A. A., Nefed'ev A. I., Nefed'ev D. I.

SELECTIVE CONTROL SENSOR OF THE BURNER FLAME

32

Glubokov A. V., Yastrebova T. S.

PROBLEMS OF AUTOMATION OF THE SELECTION
OF UNIVERSAL MEASURING INSTRUMENTS
OF LINEAR DIMENSIONS

37

Filatova O. S.

DETERMINATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS
OF PIEZOELECTRIC SENSORS OF DYNAMIC PRESSURES
IN GAS-MEDIUM ON THE SHOCK TUBE OF HIGH PRESSURE

43

Larkin M. S., Pospelov A. V.

COMPENSATION OF TEMPORARY INSTABILITY OF SHIFT
OF ZERO DEVICE OF MEASUREMENT OF PITCH AND POLL

48

INFORMATION TECHNOLOGY IN MEASUREMENTS

Alimuradov A. K., Kvitka Yu. S., Churakov P. P., Tychkov A. Yu.

INCREASING THE ACCURACY OF MEASURING
THE PITCH FREQUENCY BASED ON THE OPTIMIZATION
OF THE PROCESS OF DECOMPOSITION
OF SPEECH SIGNALS ON EMPIRICAL MODES

53

MEASUREMENTS OF ELECTRICAL AND MAGNETIC QUANTITIES

Shamin A. A., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O.,

Zinchenko T. O., Golovyashkin A. A.

QUALITY CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES
OF SYNTHESIS OF FUNCTIONAL LAYERS OF SOLAR CELLS
BASED ON HYBRID ORGANIC-INORGANIC PEROVSKITES

66

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Koldov A. S., Rodionova N. V., Svetlov A. V.

ESTIMATION OF RANDOM ERRORS OF MEASURING CONVERTERS

76

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.714.2

DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-1

Д. А. Рязанцев

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

D. A. Ryazantsev

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MEASURING ANGULAR DISPLACEMENTS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность разрабатываемой системы измерения угловых перемещений определяется постоянно растущими требованиями по точности измерения и стойкости к внешним воздействующим факторам, предъявляемыми к информационно-измерительным управляющим системам. Целью данной работы является обобщение результатов разработки системы измерения угловых перемещений и описание ее применения в информационно-измерительной системе управления валом поворотного устройства. **Материалы и методы.** При разработке системы измерения угловых перемещений применены методы программной коррекции дополнительной погрешности от температуры, а также основной приведенной погрешности. **Результаты.** Представлены результаты разработки системы измерения угловых перемещений. Приведены значения основной приведенной погрешности и дополнительной погрешности от воздействия температуры, полученные при разработке системы измерения угловых перемещений. **Выводы.** Разработанная система измерения угловых перемещений по результатам испытаний соответствует предъявляемым требованиям по точности измерения и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также успешно применяется в информационно-измерительной системе управления валом поворотного устройства.

A b s t r a c t. Background. The relevance of the developed system for measuring angular displacements is determined by the ever-growing requirements for measurement accuracy and resistance to external influencing factors to information-measuring control systems. The purpose of this work is to summarize the results of the development of a system for measuring angular displacements and to describe its use in an information-measuring control system for a shaft of a rotary device. **Materials and methods.** When developing a system for measuring angular displacements, methods of program correction of an additional error on temperature as well as the main reduced error were applied. **Results.** The results of the development of a system for measuring angular displacements are presented. The values of the basic reduced error and the additional error from the effects of temperature, obtained by developing a system for measuring angular displacements are given. **Conclusions.** The results of the development of a system for measuring angular displacements are presented. The values of the basic reduced error and the additional error from the effects of temperature, obtained by developing a system

for measuring angular displacements are given. An information-measuring control system is described in which the developed system for measuring angular displacements is used.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-измерительная и управляющая система, система измерения угловых перемещений, датчик угла поворота, вращающийся трансформатор, дифференциальная схема включения, основная приведенная погрешность, дополнительная погрешность от температуры.

Key words: information-measuring and control system, system for measuring angular displacements, angle of rotation sensor, rotating transformer, differential switching circuit, basic reduced error, additional error of temperature.

Введение

В современном информационном обществе трудно сказать, в какой сфере деятельности человека еще не используются информационно-измерительные управляющие системы (ИИУС). ИИУС с развитием техники и микроэлектроники постоянно совершенствуются. Новые ИИУС находят применение в таких направлениях, как ракетно-космическая техника (РКТ) и авиационная техника (АТ), если их характеристики соответствуют предъявляемым в этих отраслях требованиям по безопасности, надежности и точности.

При создании сложных механических систем позиционирования объекта в настоящее время широко используются системы измерения перемещений [1]. В ИИУС, РКТ и АТ новейшие системы измерения перемещений применяются при измерении угловых и линейных перемещений.

АО «НИИФИ» обладает большим опытом в проектировании систем измерения, в том числе и систем измерения перемещений для РКТ и АТ. В последние годы в НИИФИ разработан целый ряд систем измерения перемещений: система контроля параметров шасси (СКПШ) [2]; система контроля физических параметров ракетных двигателей с 100; система контроля высокочастотных радиальных и осевых биений валов турбонасосных агрегатов двигательных установок с 099; система измерения линейных перемещений без механической связи с объектом измерения с 085 [3, 4]. Основываясь на имеющемся опыте, сотрудники предприятия разработали систему измерения угловых перемещений (СИУП) с повышенными метрологическими характеристиками, предназначенную для применения в управлении двигательными установками поворотных устройств точного позиционирования ИИУС, РКТ и АТ.

Основная часть

Системы измерения перемещений применяются для измерения параметров движущейся части объекта, поэтому к таким системам предъявляются жесткие требования по стойкости к таким механическим факторам, как механический удар, вибрация, линейное ускорение. Разработанная СИУП планируется к использованию в ИИУС изделий РКТ и АТ для управления устройств поворотных, предназначенных для регулирования подачи топлива и измерения наклона механических и гидравлических приводов, где к жестким требованиям по стойкости к механическим факторам добавляются жесткие требования по стойкости к климатическим факторам.

Разработанная СИУП в соответствии с требованиями заказчика должна измерять угол поворота устройств поворотных в вертикальной и горизонтальной плоскостях с основной приведенной погрешностью не более 0,1 %, передавать информацию в бортовое радиоэлектронное оборудование последовательным кодом, тем самым осуществляя управление валом поворотного устройства. СИУП должна работать в условиях следующих внешних воздействующих факторов (ВВФ): синусоидальной вибрации до 120 g в частотном диапазоне 32–3000 Гц; механического удара одиночного действия до 980 g; линейного ускорения до 5 g; температуры от 60 до –60 °С; пониженной влажности 20 % (при температуре 30 °С); повышенной влажности 98 % (при температуре 35 °С). С учетом требований, предъявляемых к СИУП, перед разработчиком формируется сложная задача обеспечения высокой точности измерения в жестких условиях эксплуатации.

СИУП состоит из: первичного преобразователя – датчика угла поворота (ДУП) трансформаторного типа; вторичного преобразователя, осуществляющего обработку и преобразование аналогового сигнала ДУП в цифровой код, передающийся по интерфейсу ARINC. Для выполнения требований заказчика по точности измерения при разработке СИУП был принят ряд нестандартных конструктивных, схемных и программных решений. Информативным параметром ДУП является разность выходных сигналов измерительных обмоток чувствительного элемента (ЧЭ). Такая схема включения измерительных обмоток ЧЭ называется дифференциальной и позволяет исключить влияние температуры на измерительные обмотки ЧЭ. Конструктивно схема была отработана на датчике линейных перемещений (ДЛП) [5]. При разработке ДЛП было достигнуто значение основной приведенной погрешности 0,11 %, что недостаточно для выполнения заданных требований.

Для достижения значения основной приведенной погрешности менее 0,1 % в СИУП предусмотрена линейаризация выходной характеристики ДУП с помощью установки поправочных коэффициентов в памяти цифрового процессора вторичного преобразователя. Такая настройка позволяет достигнуть значения основной приведенной погрешности 0,05 % (рис. 1).

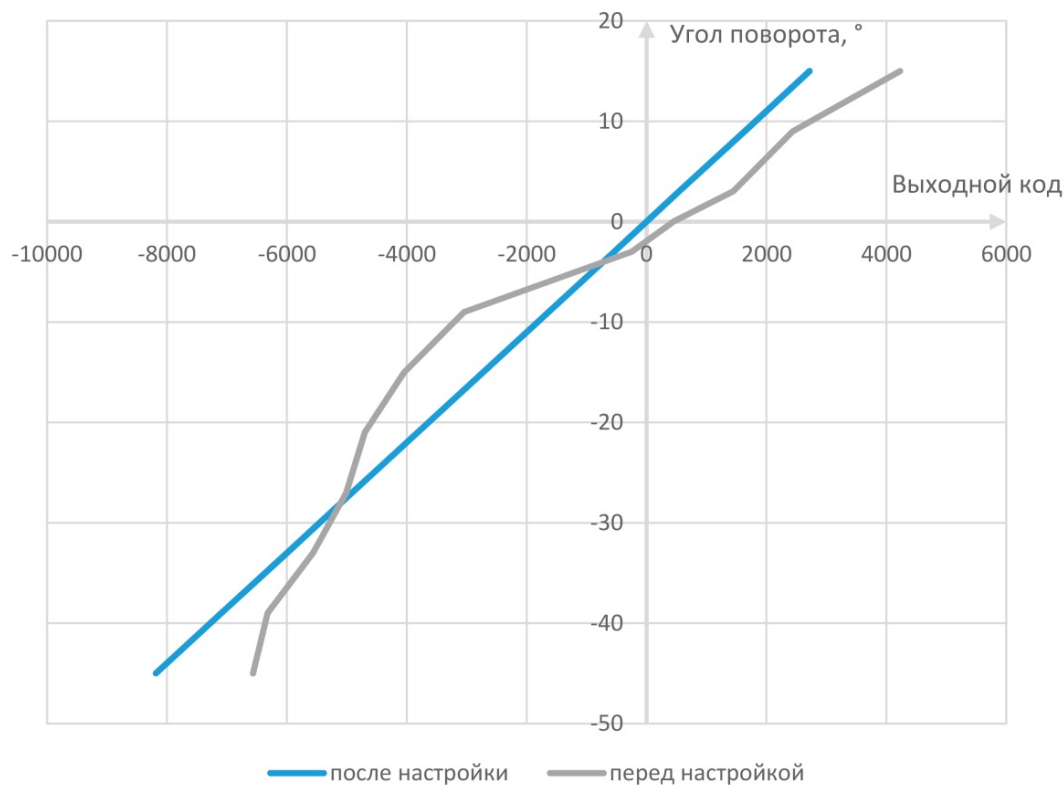


Рис. 1. Градуировочная характеристика СИУП до и после линейаризации выходной характеристики ДУП

Кроме основной погрешности, на результат измерений существенное влияние оказывает дополнительная погрешность, вызванная воздействием температуры [6]. Под действием температуры изменяются параметры питающей и измерительной обмоток ЧЭ, АЦП, генератора сигналов [7]. Для уменьшения влияния на результат измерения изменения параметров ЧЭ от температуры вводится температурная коррекция посредством записи в памяти микропроцессора поправочных коэффициентов на основании показаний канала измерений температуры. Каналом измерения температуры служит суммарный сигнал с измерительных обмоток ЧЭ. Для исключения уходов параметров АЦП от воздействия температуры применен стабильный источник опорного напряжения. Для повышения стабильности параметров сигнала питающей обмотки ЧЭ используется встроенный генератор сигналов фиксированной формы и частоты.

На рис. 2 представлены результаты испытаний СИУП по определению дополнительной погрешности от температуры без термодаткоррекции и после введения термодаткоррекции.

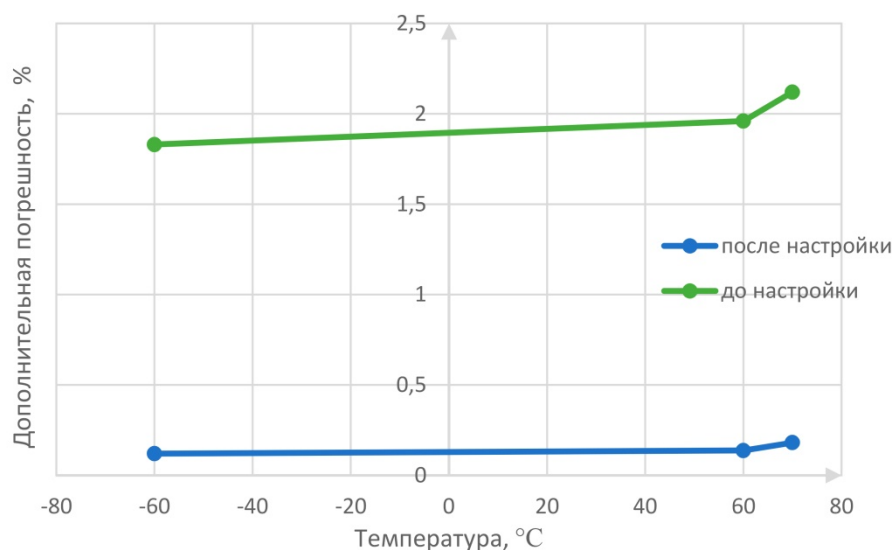


Рис. 2. Дополнительная погрешность от температуры до и после введения термокоррекции

Разработанная СИУП прошла успешно предварительные и межведомственные испытания, по результатам последних ей присвоена литера О₁, что позволяет ее использовать в ИИУС РКТ и АТ.

Разработанная СИУП нашла применение в ИИУС управления валом поворотного устройства (рис. 3). ИИУС имеет в своем составе СИУП; механический привод (П), обеспечивающий механический контакт СИУП и вала двигателя (ДВ) с устройством пусковым поворотным (УПП); блок обработки и сравнения (БОС) и блок управления двигателем (БУ), которые осуществляют обработку измеренного сигнала и управление валом двигателя.

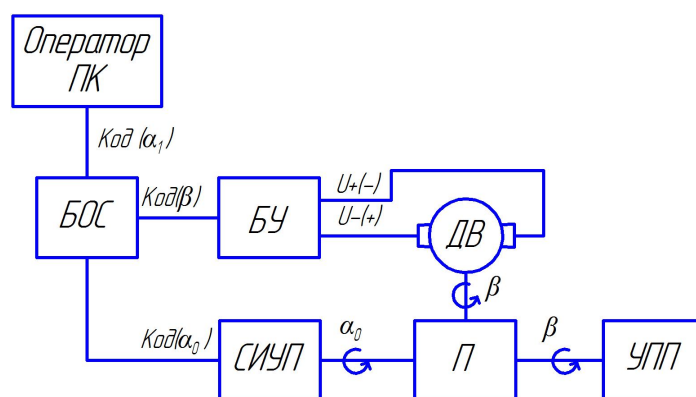


Рис. 3. Структурная схема ИИУС управления валом поворотного устройства

ИИУС управления валом поворотного устройства работает следующим образом: с ПК на БОС поступает команда о повороте на угол α_1 , БОС по информации о текущем положении угла поворота α_0 с СИУП высчитывает угол β , на который следует повернуть УПП для задания угла α_0 . Далее БОС выдает управляющую команду на БУ. БУ переводит код угла поворота β в напряжение соответствующей полярности $u+(-)$, оно подается на ДВ. ДВ осуществляет через П поворот УПП на угол β , соответствующий заданному оператором углу поворота α_1 .

Рассмотренная ИИУС управления валом поворотного устройства благодаря применению разработанной СИУП отличается высокой точностью задания угла поворота.

Заключение

По результатам проведенных испытаний СИУП удовлетворяет требованию по основной приведенной погрешности измерения угла поворота, предъявляемого заказчиком. При воздействии температуры окружающей среды от -60° до 60° C на СИУП достигнуто значение до-

полнительной погрешности от температуры 0,2 %. По результатам успешного применения в новейших образцах ИИУС АТ можно сделать заключение о высоких эксплуатационных характеристиках разработанной СИУП.

В представленной статье не рассмотрен вопрос влияния механических факторов на работоспособность и эксплуатационные характеристики разработанной СИУП. Для всестороннего рассмотрения вопроса воздействия ВВФ на СИУП следует продолжить работу в части определения влияния механического воздействия на работоспособность и эксплуатационные характеристики составных частей СИУП.

Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетной техники / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 4–6.
2. 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. 55–57.
3. Гаврилов, В. А. Система измерения линейных перемещений / В. А. Гаврилов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 44–46.
4. Трофимов, А. А. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений / А. А. Трофимов, Н. Д. Конаков // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 8–10.
5. Рязанцев, Д. А. Датчик линейных перемещений для систем измерения ракетно-космической техники / Д. А. Рязанцев, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 42–48.
6. Усольцев, А. А. Электрические машины / А. А. Усольцев. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.
7. Трофимов, А. А. Моделирование воздействия пониженного давления на датчик линейных перемещений / А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев, Р. М. Тимонин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 67–73.

Рязанцев Дмитрий Андреевич

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

Ryazantsev Dmitriy Andreevich

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

УДК 531.714.2

Рязанцев, Д. А.

Разработка системы измерения угловых перемещений / Д. А. Рязанцев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 5–9. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-1.

А. А. Щербакова, Б. В. Чувькин

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

A. A. Shcherbakova, B. V. Chuvykin

INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF CONTROL OF CONCENTRATIONS OF FUEL COMPONENTS IN EMERGENCY SITUATIONS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является информационно-измерительная система (ИИС) контроля концентраций компонентов топлива. Предметом исследования является ИИС идентификации компонентов, определения состава и детонационной стойкости топлива, построенная на основе анализа спектров поглощения в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. Целью работы является совершенствование ИИС контроля концентраций компонентов топлива в аварийных ситуациях, что позволит увеличить быстродействие измерений в искро-взрыво-пожароопасных условиях эксплуатации. **Материалы и методы.** Для решения поставленных задач использовались методы теории измерений, принцип развертки в измерительной технике, статистической обработки данных. **Результаты.** Предложена ИИС оперативного контроля концентраций компонентов топлива в режиме реального времени, интегрированная в единую систему управления технологическим процессом приготовления топлива. Вычисление концентраций компонентов бензина производится в соответствии с разработанным блоком обработки информации, что позволит в режиме реального времени управлять процессом производства бензинов и поддерживать качество продукции на заданном уровне, улучшить производственную эффективность, а именно: уменьшить отходы при производстве бензинов, экономичное использование ресурсов, снизить затраты и обеспечить взрывобезопасную работу ИИС. **Выводы.** В ИИС используется принцип измерения спектров поглощения топлива в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн. ИИС предназначена для уменьшения временного лага, связанного со временем отбора пробы. Структура включает перестраиваемый квантовый генератор с диапазоном перестройки 335...2500 нм, соединенный волоконно-оптическим кабелем с проточными кюветами. Сформулированы требования и рекомендации по разработке ИИС, построенной на основе анализа спектров поглощения в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне с использованием блока обработки информации, в основе которого лежит принцип искусственных нейронных сетей.

A b s t r a c t. Background. The authors suggests of the study is the information-measuring system (IMS) of control of fuel component concentrations. The subject of the study is the identification of components, determining the composition and detonation resistance of the fuel, based on the analysis of absorption spectra in the near infrared (IR) range. The aim of the work is to improve the control of the concentration of fuel components in emergency situations. it will increase the speed of measurements in the spark-explosion-fire hazardous operating conditions. **Materials and methods.** Methods of measurement theory, the principle of scanning in measuring technology, statistical data processing were used to solve the problems. **Results.** The proposed IMS operational control of fuel component concentrations in real time,

integrated into a single control system of the technological process of fuel preparation, calculates the concentrations of gasoline components in accordance with the developed information processing unit, which will allow to control the process of gasoline production in real time and maintain the quality of products at a given level and improve production efficiency, namely: reduce waste in the production of gasoline, economical use of resources, reduce costs and ensure explosion-proof operation of the IMS. **Conclusions.** The IMS uses the principle of measuring the absorption spectra of fuel in the near infrared (IR) wavelength range. The IMS is designed to reduce the time lag associated with the sampling time. The structure includes a tunable quantum generator with a tuning range of 335–2500 nm, connected by a fiber-optic cable with flow cuvettes. The requirements and recommendations for the development of the IMS based on the analysis of absorption spectra in the near infrared (IR) range using the information processing unit built on the principles of artificial neural networks are formulated.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-измерительная система (ИИС), концентрация компонентов, бензин, детонационная стойкость, октановое число.

К e y w o r d s: information-measuring system (IMS), concentration of components, gasoline, detonation resistance, octane number.

Одним из главных нефтяных топлив является бензин. По данным Международного энергетического агентства (МЭА) и Института энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН), бензин составляет примерно 46 % всего нефтяного потребления и 62 % всей энергии, используемой для транспорта. За последние 2 года потребление бензина в мире увеличилось на 5,1 % и составило 397,4 млн т [1].

Показателем, характеризующим марку и качество бензинов, является значение октанового числа, которое измеряется по моторному (ОЧМ) (ГОСТ 511-2015) и исследовательскому (ОЧИ) (ГОСТ 8226-2015) методам. Существует нормативно-техническая документация, устанавливающая нормативные показатели качества бензинов (ГОСТ Р 32513-2013). В технический паспорт бензинов входят 15 показателей, которые опреляют значения октановых чисел с допусками, представленными в табл. 1, и максимальное содержание примесей в бензине.

Таблица 1

Нормы показателей качества топлива в соответствии с экологическим классом К5

Показатель	АИ-92		АИ-95		АИ-98	
	Номинальное значение	Допуск	Номинальное значение	Допуск	Номинальное значение	Допуск
1. ОЧМ, ед.ОЧ	92,6	±2,1	96,6	±2,3	99,8	±0,9
2. ОЧИ, ед.ОЧ	93,6	±2,3	98,3	±2,4	103,8	±0,9

Начиная с 2006 г. в России, согласно Постановлению Правительства РФ № 609 от 12.10.2005, технический регламент «О требованиях к выбросам автомобильной техникой», каждые несколько лет обновляется стандарт, характеризующий экологический класс топлива. Так, для второго класса (К2) массовая доля серы допускается 500 мг/кг и по мере увеличения класса до пятого (К5) значение уменьшается до 10 мг/кг.

В основу нумерации экологического класса топлива положены Европейские стандарты Евро, которые обновляются в Европе каждые три-пять лет, начиная с 1988 г. (Евро-0), а в 2015 г. произведен переход на новый стандарт Евро-6. В России переходы на новые технологические уклады осуществляются с некоторым запаздыванием, окончательный переход на стандарт Евро-5 произведен в июле 2016 г., однако уже в 2018 г. на территории России две крупные нефтегазовые компании «Лукойл» и «Роснефть» реализовали выпуск бензинов класса К5 (Евро-6) [2]. Введение нового класса ужесточает требования к качеству бензинов. За период совершенствования экологического стандарта бензинов без изменения осталось значение октанового числа, изменены нормы по следующим показателям: «Массовая доля серы», «Объемная доля олефиновых и ароматических углеводородов», «Массовая доля кислорода», «Объемная доля оксигенатов», их количественное значение уменьшилось.

Таким образом, в настоящее время стоит задача совершенствования информационно-измерительной системы идентификации компонентов и определения состава и детонационной стойкости топлива.

Структура информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) измерения концентраций компонентов и детонационной стойкости топлива представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура информационно-измерительной и управляющей системы определения состава и детонационной стойкости топлива

ИИУС состоит из: подсистемы измерения концентраций компонентов, подсистемы измерения показателей качества топлива, подсистемы анализа результатов измерений топлива, подсистемы управления технологическим процессом смешения компонентов.

Анализ показал, что существующие методы построения информационно-измерительных систем можно классифицировать по физическому принципу измерения, погрешности измерений, времени измерений, вида измерений, стоимости оборудования (табл. 2). Наиболее точные измерения обеспечиваются ИИС на основе дорогостоящих эталонных методов лабораторного анализа, использующие специальные химические реактивы. ИИС на основе поверенных приборов измерений – менее точные с более низкой стоимостью. Мобильные ИИС обладают небольшой точностью, однако могут проводить оперативные измерения показателей качества бензинов.

Таблица 2

Сравнительный анализ измерительного оборудования

Физический принцип измерения	Название измерительного оборудования	Погрешность измерения, %	Время измерения, мин	Вид измерения	Стоимость, млн.р.
ИИС на основе бензинового двигателя внутреннего сгорания	УИТ-85	0,01	120	Эталонный	5,88
ИИС на основе метода хроматографии	Хроматэк-Кристалл	0,02	120	Поверенный	1,63
ИИС на основе Фурье-спектрометра	Фурье-спектрометр ФСМ 2203	0,05	1	Поверенный	0,87
ИИС на основе реакции холодно-пламенного окисления	Октанометр ОК-2м	0,5	0,5	Поверенный	1,24
ИИС на основе измерения диэлькометрических свойств топлива	Shatox SX-100M	0,5		Мобильный	0,065
ИИС на основе измерения спектров поглощения в ближней ИК области	Октанометр САТ-1100	1,5	1	Мобильный	0,035
ИИС на основе измерения спектров поглощения топлива в среднем ИК диапазоне длин волн	ZX-101XL	2	0,4	Мобильный	0,09

Одна из задач, которая возникает при совершенствовании ИИС, заключается в необходимости обеспечить минимальное время идентификации аварийной ситуации, связанной с превышением допустимого порога концентрации компонентов топлива. Аварийная ситуация приведет к сбою технологического процесса смешения топлива и производству некондиционного (бракованного) топлива. Типовое время для идентификации аварийной ситуации при использовании лабораторных методов измерения составляет порядка 1 ч. Такая задержка по времени при возникновении аварийной ситуации приводит к производству большого количества некондиционного топлива (4000 м³ при производстве бензина 3000 т/ч). Минимизировать потери можно за счет уменьшения оперативного измерения предельных концентраций компонентов в режиме реального времени.

Техническими требованиями к такой системе являются обеспечение: измерения предельных значений концентраций компонентов и примесей в режиме реального времени; требований искро-взрыво-пожаробезопасности; принятие решения о возникновении аварийной ситуации и передача информации в интегрированную систему технологического управления.

Для решения задачи оперативного измерения в режиме реального времени необходимо в ИИС уменьшить временной лаг, связанный со временем отбора пробы. Известным решением является волоконно-оптический принцип построения ИИС, рассмотренный, например, в работе [3] для измерения уровня пожароопасных жидкостей. Тогда структура ИИС включает перестраиваемый квантовый генератор с диапазоном перестройки 335...2500 нм, соединенный волоконно-оптическим кабелем с проточными кюветами.

Предлагается следующая структура ИИС (рис. 2), обеспечивающая решение данной задачи. Она включает перестраиваемый квантовый генератор с диапазоном перестройки 335...2500 нм, соединенный волоконно-оптическим кабелем с проточными кюветами, которые волоконно-оптическим кабелем соединены с фотодиодами и микроконтроллером (МК). МК формирует управляющие воздействия на модуль ввода/вывода для открытия и закрытия гидравлических клапанов с тестовыми и анализируемыми компонентами и бензинами [4].

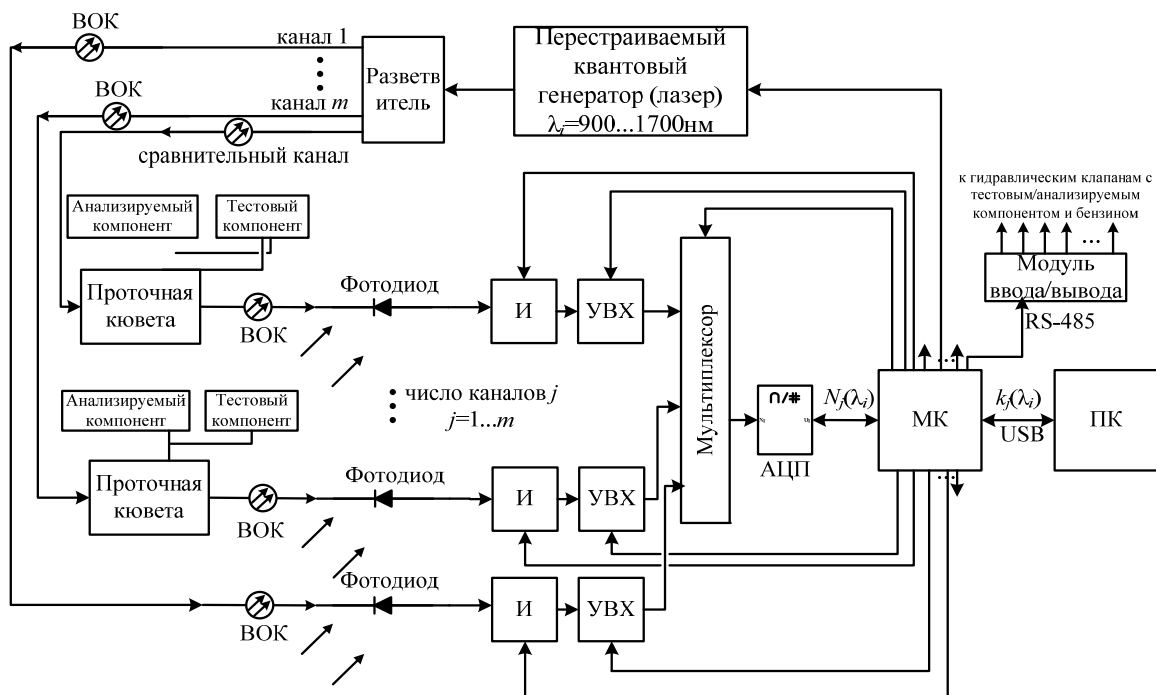


Рис. 2. Структура ИИС на основе перестраиваемого квантового генератора

Перестраиваемый квантовый генератор задает излучение необходимой длины волны и через волоконно-оптический кабель излучение направляется в кювету. После по волоконно-оптическому кабелю попадает в блок обработки информации, откуда по интерфейсу RS-485 формируются управляющие воздействия на модуль ввода/вывода для открытия и закрытия гидравлических клапанов с тестовыми и анализируемыми компонентами и бензинами.

Для подтверждения реализуемости предложенного технического решения была смоделирована ИИС и проведен энергетический расчет оптического тракта ИИС в соответствии с рекомендациями, представленными в литературе [5]. Проверка функционирования измерительной части ИИС проводилась по оценке потерь, вносимых волоконно-оптическими элементами. При этом учитывалась рабочая длина волны, длина волоконно-оптического кабеля, потери, вносимые разъемными и неразъемными соединениями, дополнительные потери [6]. Результатом оценки является нормальное функционирование ИИС, если затухание волоконно-оптического кабеля будет не более 0,3 Дб/км. Низкое затухание волоконно-оптического кабеля в широком диапазоне длин волн 900–1700 нм достигается применением набора волоконно-оптических кабелей для разных диапазонов длин волн либо использованием широкополосного волоконно-оптического кабеля.

Проведена экспериментальная проверка с использованием макета, включающего лазер, кювету с исследуемым образцом, спектрометр, волоконно-оптический кабель. Измерены спектры поглощения бензинов АИ-92 и АИ-95, приобретенных на одной из автозаправочных станций г. Пензы. Решалась задача идентификации четырех компонентов (*n*-гептана, изооктана, толуола и бензола), спектры поглощения которых взяты из справочной литературы [7], в измеренных бензинах. Идентификация компонентов и определение их состава в исследуемых жидкостях проводились в соответствии с математическими моделями, подробно описанными в работе [8]. В результате чего определено, что допустимое отклонение спектрального коэффициента поглощения составит не более 3 %, а достоверность качественной и количественной оценки идентификации компонентов топлива равна 0,9972.

В результате работы установлены требования к ИИС: рабочий диапазон длин волн 900–1700 нм, быстродействие ИИС не более 2 мин, погрешность результатов измерений ИИС не должна превышать 3 %, достоверность идентификации компонентов – не менее 0,98, погрешность определения состава бензина – не более 2 %, погрешность определения октанового числа бензинов – не более 0,5 %, измерение предельных концентраций компонентов топлива в режиме реального времени, возможность подключения нескольких измерительных каналов (более 16), возможность работы ИИС в искровзрывоопасных условиях, управление технологическим процессом смешения компонентов топлива, возможность автоматической калибровки ИИС, возможность автоматизированного анализа спектров поглощения, удаленность анализатора от технологических линий, установка пробоотборной системы в ИИС рядом с технологическим трубопроводом.

Библиографический список

1. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. – М. : ИНЭИ РАН, АЦ, 2014. – 168 с.
2. Комаров, В. В. О разработке национального стандарта «Единое обозначение автомобильных бензинов и дизельных топлив, находящихся в обращении на территории Российской Федерации» / В. В. Комаров, Ф. В. Туровский, В. В. Булатников // Журнал автомобильных инженеров. Стандартизация и сертификация. – 2010. – № 6 (65). – С. 40–44.
3. Назарова, И. Т. Волоконно-оптические системы измерения уровня пожароопасных жидкостей : дис. ... канд. техн. наук / Назарова И. Т. – Пенза, 2014. – 220 с.
4. Щербакова, А. А. Информационно-измерительная система определения состава и октанового числа бензинов в промышленных условиях на основе параметрического квантового генератора / А. А. Щербакова // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 4 (14). – С. 38–42.
5. Мурашкина, Т. И. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических измерительных приборов и систем / Т. И. Мурашкина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 1999. – 132 с.
6. Щербакова, А. А. Моделирование оптического тракта ИИС идентификации компонентов, определения состава и октанового числа топлива / А. А. Щербакова // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сб. ст. IV Всерос. науч.-техн. конф. для молодых ученых и студентов с междунар. участием / под общ. ред. В. В. Салмина. – Пенза, 2018. – С. 223–227.
7. Спектральные характеристики химических веществ в ИК области. – URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/name-ser.html> (дата обращения 17.05.2018).

8. Щербакова, А. А. Искусственная нейронная сеть для идентификации компонентов, определения состава топлива по спектральным коэффициентам поглощения / А. А. Щербакова, В. А. Соловьев, Д. В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 3 (35). – С. 36–45.

Щербакова Анна Алексеевна

программист,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: anutka7790@mail.ru

Shcherbakova Anna Alekseevna

programmer,
sub-department of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Чувькин Борис Викторович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chuvykin_bv@mail.ru

Chuvykin Boris Viktorovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information-computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.518

Щербакова, А. А.

Информационно-измерительная система контроля концентраций компонентов топлива в аварийных ситуациях / А. А. Щербакова, Б. В. Чувькин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 10–15. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-2.

С. В. Кисляков

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

S. V. Kislyakov

PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC PHASE TURNOVERS IN INFORMATION AND MEASURING SYSTEM

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является фазовый датчик линейных перемещений, преобразующий вращающий момент в угловое перемещение. Предметом исследования является система для измерения угловых перемещений, позволяющая увеличить чувствительность датчиков. Целью работы является изменение электрических параметров фазовращателей в зависимости от измеряемых линейных или угловых перемещений. **Материалы и методы.** Для измерения угловых перемещений на валу разработана структурная схема системы, позволяющей на порядок увеличить чувствительность датчиков угловых перемещений. **Результаты.** Представлены результаты экспериментального исследования электромагнитных фазовращателей. Приведены некоторые соотношения для датчиков угловых перемещений с электромагнитной редукицией. **Выводы.** Решена задача разработки информационно-измерительной системы с повышенной точностью и быстродействием. Из полученных результатов следует, что использование принципа локального взаимодействия обмоток расширяет возможности применения бегущих магнитных полей.

A b s t r a c t. Background. The object of the study is a phase linear displacement transducer that converts the torque into angular displacement. The subject of study is a system for measuring angular displacements, which allows to increase the sensitivity of sensors. The aim of the work is to change the electrical parameters of phase shifters depending on the measured linear or angular displacements. **Materials and methods.** To measure the angular displacements on the shaft, a structural scheme of the system has been developed, which allows an increase in the sensitivity of the angular displacement sensors by an order of magnitude. **Results.** The results of an experimental study of electromagnetic phase shifters are presented. Some relationships for angular displacement sensors with electromagnetic reduction are given. **Conclusions.** Solved the problem of developing an information-measuring system, with increased accuracy and speed. From the obtained results it follows that the use of the principle of local interaction of the windings expands the possibilities of using traveling magnetic fields.

К л ю ч е в ы е с л о в а: угловое перемещение, датчик, информационно-измерительная система, фазовращатель.

Key words: angular displacement, sensor, information-measuring system, phase shifter.

Введение

Теория электромагнитных измерительных фазовращателей проработана достаточно глубоко [1]. Соответствие параметров и характеристик реальных фазовращателей теоретическим положениям зависит от того, насколько точно теоретические выкладки учитывают особенности конструкции измерительных фазовращателей и качество изготовления их элементов.

Ранее рассмотрена зависимость погрешности фазовращателей от частоты питающего генератора, от стабильности выходных напряжений двухфазного генератора и их фазового

сдвига, от изменения электрических параметров фазовращателей при изменении положения магнитного шунта на информационной линейке, от других параметров [2].

Особый интерес для разработчиков измерительных систем представляют параметры фазовращателей с электромагнитной редукицией, позволяющие на порядок увеличить чувствительность датчиков угловых перемещений [3].

Разработка информационно-измерительных систем механических величин не потеряла своей актуальности до настоящего времени.

Частотные характеристики фазовращателей

Для исследований частотных характеристик параметров выбран фазовый датчик линейных перемещений с длиной информационной линейки 160 мм и длиной магнитного шунта 20 мм. Исследуемый фазовращатель имеет статорный магнитопровод из электротехнической стали, при этом рабочие части обмоток и торцевые части равномерной обмотки подняты над магнитопроводом на 1,5 мм с целью ослабления взаимной связи обмоток при отсутствии магнитного шунта. Пассивные стороны синусной и косинусной обмоток находятся непосредственно в пазах магнитопровода глубиной 6 мм. На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости активных и реактивных сопротивлений равномерной, синусной и косинусной обмоток.

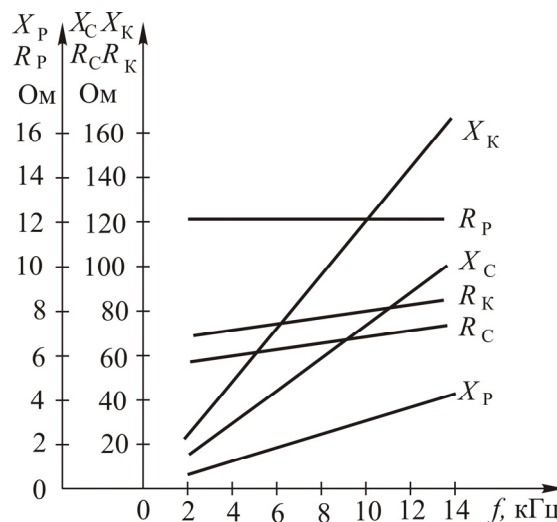


Рис. 1. Экспериментальные зависимости сопротивлений обмоток

На рисунке масштабы частотных характеристик равномерной обмотки (R_p и X_p) в десять раз больше, чем масштаб других характеристик. Из экспериментальных характеристик следует то, что эквивалентное сопротивление равномерной обмотки $R_p \approx 12$ Ом практически не зависит от частоты, что указывает на то, что магнитопровод линейки практически не оказывает влияния на равномерную обмотку. Реактивное сопротивление обмотки X_p практически линейно и ее продолжение проходит через начало координат, указывая на пренебрежительно малое влияние межвитковых емкостей.

Количество витков синусной и косинусной обмоток в среднем было больше, чем равномерной, и индуктивные сопротивления синусной X_c и косинусной X_k обмоток изменялись практически по линейному закону в диапазоне изменения частот от 2 до 14 кГц.

Из графиков следует то, что индуктивность косинусной обмотки значительно больше индуктивности синусной. Это обусловлено тем, что косинусная обмотка в первом и последнем пазу информационной линейки имеет достаточно много дополнительных пассивных проводников.

Частотные характеристики активных сопротивлений синусной и косинусной обмотки не совпадают. Их угол наклона к оси частот несколько отличается. Это объясняется тем, что обмотки имеют различное эквивалентное количество пассивных проводников, находящихся в

пазах. Линейность частотных характеристик $R_K(f)$ и $R_C(f)$ указывает на то, что потери в сердечнике информационной линейки обусловлены лишь перемагничиванием сердечника.

Измерение параметров фазовращателя производилось с помощью вольтметра с высоким разрешением, фазометра повышенной точности (5-разрядного) и образцового генератора синусоидальных колебаний. Измерение тока производилось косвенным путем.

В процессе исследований вычислялись взаимные индуктивности синусных и косинусных обмоток при отсутствии магнитного шунта. Коэффициенты взаимной индукции находились в пределах 0,1 мкГн при частоте 6 кГц и уменьшались почти в полтора раза при увеличении частоты до 14 кГц. Рабочее же максимальное значение индуктивностей фазовращателя, как будет показано ниже, составило 120 мкГн, что позволяет говорить о его хороших метрологических характеристиках даже без дополнительной балансировки фазовращателя.

Электрические параметры фазовращателя

Для исследования характеристик фазовращателей в качестве базового выбран линейный фазовращатель [4]. Это обусловлено тем, что именно в линейном фазовращателе сочетаются все противоречия и проблемы. В случае фазовращателей с угловыми перемещениями синусная и косинусная обмотки абсолютно идентичны [5]. С другой стороны, у угловых фазовращателей нет краевого эффекта. Однако их объединяет единая фазовая теория и единый путь улучшения характеристик [6].

Датчик линейных перемещений или линейный фазовращатель, частотные характеристики параметров которого представлены в предыдущем разделе, был подвержен испытанию в рабочем режиме, т.е. изменялось положение магнитного шунта и производились измерения индуктивностей и взаимных индуктивностей обмоток. Испытуемый датчик не подвергался дополнительной балансировке после изготовления [7]. Диапазон измеряемых перемещений датчика составил 150 мм при длине информационной линейки фазовращателя 180 мм.

На рис. 2 представлены графики зависимости реактивных сопротивлений равномерной X_p , синусной X_C и косинусной X_K обмоток в той же зависимости от положения шунта на статоре датчика. Графиками подтверждается синусоидальная зависимость реактивных сопротивлений равномерной, синусной и косинусной обмотки от положения шунта на информационной линейке. Обе индуктивности обмоток имеют большие постоянные составляющие.

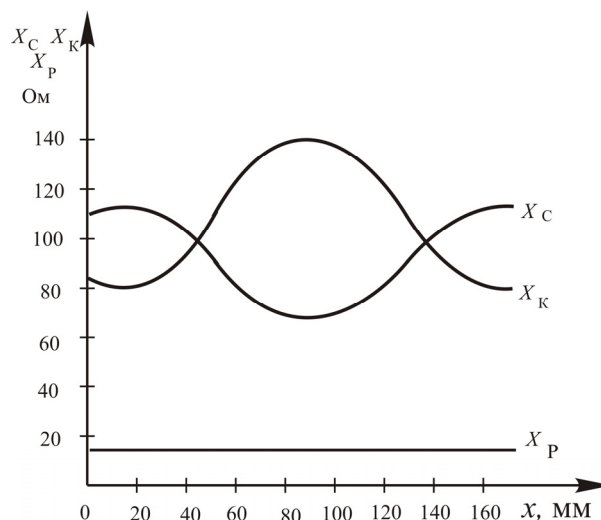


Рис. 2. Зависимость реактивных сопротивлений от положения шунта на статоре датчика

Но постоянная составляющая косинусной обмотки больше составляющей реактивного сопротивления синусной обмотки. Это объясняется наличием большого количества пассивных проводников косинусной обмотки в крайних пазах информационной линейки.

Резистивные сопротивления синусной и косинусной обмоток отличаются друг от друга примерно на 10 Ом. Это обусловлено разностью омических сопротивлений пассивных проводников крайних пазов. При перемещении шунта резистивные сопротивления изменяются.

Это объясняется потерями в магнитопроводе. Изменение сопротивлений составляет 3–5 Ом при среднем значении сопротивления косинусной обмотки $R_K = 82$ Ом и сопротивлении синусной обмотки $R_C = 72$ Ом. Изменения сопротивлений незначительные и с учетом того, что, как правило, последовательно в их цепь включаются дополнительные сопротивления, превышающие значения R_C и R_K в сотни раз, неравенство сопротивлений синусной и косинусной обмотки и их изменение при перемещении шунта практически не влияют на погрешность измерений.

Из всех характеристик особый интерес представляют изменение взаимных индуктивностей обмоток датчика.

Графики зависимостей M_{PC} , M_{PK} , M_{CK} в функции перемещения шунта фазовращателя показаны на рис. 3 и 4.

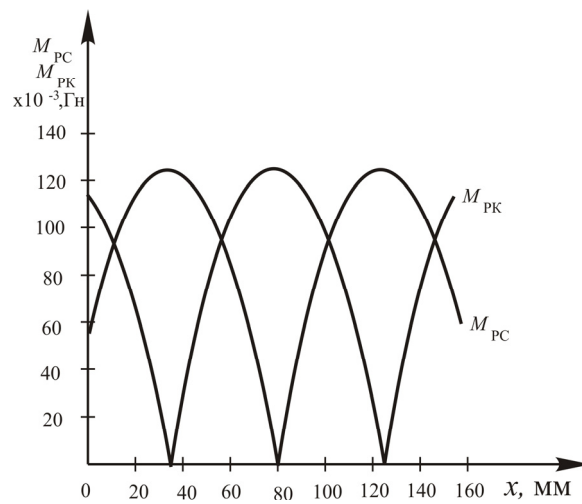


Рис. 3. Изменение взаимных индуктивностей M_{PC} , M_{PK} обмоток датчика

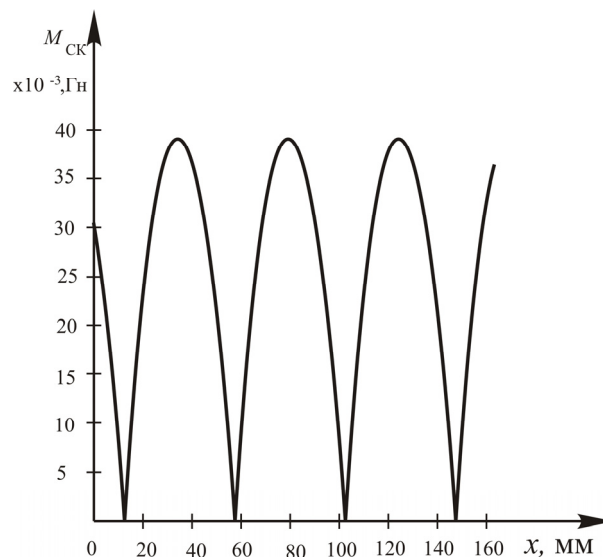


Рис. 4. Изменение взаимной индуктивности M_{CK} обмотки датчика

Теоретические соотношения, полученные ранее, подтверждаются полностью [8, 9]. «Нули» функции выражены достаточно четко.

Межвитковые емкости и изменение реактивных сопротивлений при перемещении шунта приводят к появлению дополнительных погрешностей. Однако их влияние на погрешность измерений незначительно.

Взаимные индуктивности равномерной и синусной и равномерной и косинусной обмотки составили 123 мГн. Взаимная индуктивность синусной и косинусной обмоток M_{CK} изменяется

по закону синуса, но с периодом в два раза меньшим периода изменения M_{PC} и M_{PK} . Амплитудное максимальное значение составляет 42 мГн и определяется количеством витков обмоток. Реальный диапазон перемещений шунта составил величину несколько большую 150 мм при длине активной части 180 мм. Уменьшение измеряемого диапазона объясняется реальными размерами магнитного шунта, поэтому графики M_{PC} , M_{PK} и $M_{СК}$ начинаются не с нуля.

Некоторые соотношения для магнитной системы датчика с магнитной редукцией

При описании конструкции датчика уже рассматривалась особенность магнитной системы датчика с электромагнитной редукцией [10]. Особенность конструкции заключается в том, что ширина паза и ширина зубца магнитного провода статора равны между собой. Ротор такого фазовращателя в общем случае представляет собой цилиндр из ферромагнитного материала. Высота цилиндра равна высоте магнитопровода статора. На роторе по всей окружности имеются зубцы с шириной, равной ширине зубцов статора, но их количество на единицу больше или меньше количества зубцов статора.

Ранее уже говорилось о том, что амплитуды намагничивающих сил зубцов статора одинаковы [11]. Отличие заключается в различных значениях начальных фаз намагничивающих сил. Магнитный поток каждого отдельного зубца пропорционален магнитной проводимости этого зубца, которая в свою очередь пропорциональна площади сечения зубца или площади воздушного зазора.

Если статор имеет n зубцов, тогда его зубцовое деление $\tau_1 = \frac{360}{n}$, а зубцовое деление ротора $\tau_2 = \frac{360}{n+1}$. Пусть ширина зубцов статора в пространственных градусах равна $\frac{360}{n}m$, где m – коэффициент равный отношению ширины зубцов в градусах к полюсному делению статора τ_1 . Будем предполагать, что ширина зубцов ротора равна ширине зубца статора. Очевидно то, что при площади сечения зубца статора S_z площадь воздушного зазора, или площадь перекрытия зубцов, будет зависеть от взаимного расположения осей зубцов статора и ротора.

Если ось первого зубца статора совпадает с осью зубца ротора, то ось зубца ротора сдвинута относительно оси второго зубца статора на угол $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$. Ось третьего зубца статора не совпадает с осью зубца ротора на угол $2\Delta\tau$ и т.д.

В общем случае для k -го зубца смещение осей будет составлять угол равный $\tau \cdot (k-1)$, этот прямо пропорционально номеру зубца.

Магнитный поток каждого зубца, как уже говорилось ранее, пропорционален площади перекрытия, которая в свою очередь уменьшается с увеличением угла смещения зубцов.

Определим номер последнего зубца i , у которого площадь перекрытия не будет еще равна нулю. Его можно определить как отношение ширины зубца к углу смещения осей соседних зубцов статора и ротора $\Delta\tau$

$$\Delta\tau = \frac{360}{n} - \frac{360}{n+1} = 360 \cdot \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = 360 \cdot \frac{1}{n \cdot (n+1)},$$

если ширина зубца статора $\frac{360}{n} \cdot m$, то

$$i = \frac{360 \cdot m}{n \cdot \Delta\tau} = \frac{360 \cdot m \cdot n \cdot (n+1)}{360 \cdot n} = m \cdot (n+1).$$

Искомый номер зубца получают из дробного полученного значения путем отбрасывания дробной части.

Таким образом, величина магнитного потока будет максимальной на первом зубце и будет уменьшаться при увеличении номера зубцов вплоть до зубца с номером $i = m \cdot (n+1)$. Аналогичное распределение магнитных потоков будет и у зубцов с номерами n , $(n-1)$, $(n-2)$ и так далее до зубца $(n-i)$.

Из графика следует то, что при $m = 0,5$ магнитные потоки всех n зубцов практически не равны нулю. Распределение же магнитных потоков по статору линейно в функции угла, определяющего местоположение зубца. Введя понятие удельного магнитного потока, т.е. магнитного потока на единицу пространственного угла, и устремляя n к бесконечности, получили графики зависимости распределения магнитного потока по статору для различных значений m (рис. 5).

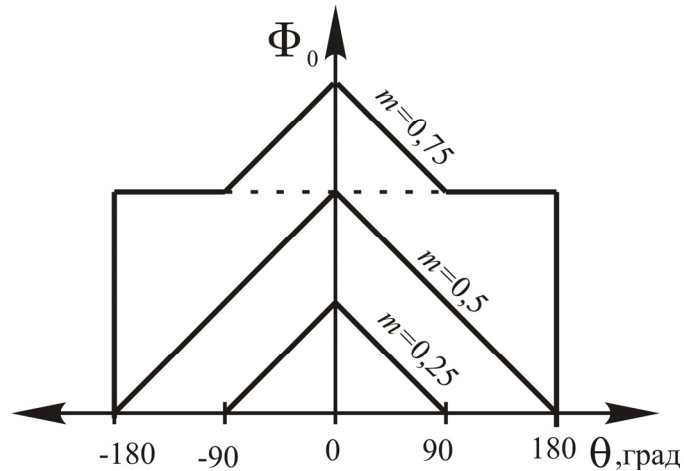


Рис. 5. Зависимость распределения магнитного потока по статору

При $m = 0,5$ все зубцы статора являются активными и создают магнитные потоки, наводящие в выходной обмотке намагничивающую силу. При уменьшении ширины зубца при сохранении зубцового деления зона активных зубцов уменьшается, и при $m = 0,25$ только половина зубцов имеет площадь перекрытия зубцов статора и ротора, не равны нулю. Это объясняется тем, что в этом случае при углах статора больших $\pm 90^\circ$ от точки «совпадения осей» зубцы статора расположены над пазами ротора и теоретически их поток равен нулю. Особый интерес представляет график при $m = 0,75$. При такой ширине зубцов активными являются лишь половина зубцов, расположенных в зоне $\pm 90^\circ$. Магнитные потоки остальных зубцов не равны нулю, но не стоит забывать о том, что при равенстве магнитных потоков всех зубцов их сумма с учетом фазового сдвига равна нулю.

Из анализа графика следует очевидный вывод о том, что увеличение ширины зубца в редукторном датчике сверх половины зубцового деления не эффективно с точки зрения увеличения выходного напряжения.

Выше было рассмотрено лишь распределение удельного магнитного потока по статору при различных значениях m . С точки зрения получения максимального напряжения на выходе необходимо учитывать не только абсолютное значение магнитного потока, но и начальную фазу этого магнитного потока.

Уравнение прямой, находящейся справа от оси удельных потоков Φ_0 при $m = 0,5$:

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \left(1 - \frac{1}{\pi} \Theta \right),$$

и слева от оси при отрицательных значениях Θ :

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \left(1 + \frac{1}{\pi} \Theta \right).$$

Уравнение прямой начальных фаз $\alpha = \Theta$. С учетом значения m уравнения магнитных потоков: $\Phi_0 = m\Phi_{0m} \left(1 - \frac{1}{2m\pi} \Theta \right)$ и $\Phi_0 = m\Phi_{0m} \left(1 + \frac{1}{2m\pi} \Theta \right)$.

Уравнения действительны при $\Theta = \pm 2m\pi$. Выходное напряжение пропорционально суммарному магнитному потоку выходной обмотки, который равен

$$\begin{aligned}
\Phi &= \int_{-2\pi m}^0 m\Phi_{0m} \left(1 + \frac{1}{2\pi m} \Theta\right) \cos \Theta d\Theta + \int_0^{2\pi m} m\Phi_{0m} \left(1 - \frac{1}{2\pi m} \Theta\right) \cos \Theta d\Theta = \\
&= m\Phi_{0m} \left[\int_{-2\pi m}^0 \cos \Theta d\Theta + \int_{-2\pi m}^0 \frac{1}{2\pi m} \Theta \cos \Theta d\Theta - \int_0^{2\pi m} \frac{1}{2\pi m} \Theta \cos \Theta d\Theta \right] = \\
&= m\Phi_{0m} \left\{ \sin \Theta \Big|_{-2\pi m}^0 + \sin \Theta \Big|_0^{2\pi m} + \frac{1}{2\pi m} (\cos \Theta \cdot \Theta \sin \Theta) \Big|_{-2\pi m}^0 - \frac{1}{2\pi m} (\cos \Theta + \Theta \sin \Theta) \Big|_0^{2\pi m} \right\} = \\
&= m\Phi_{0m} \left\{ -\sin \Theta (-2\pi m) + \sin (2\pi m) + \frac{1}{2\pi m} [1 - \cos (-2\pi m) - (-2\pi m) \sin (-2\pi m)] - \right. \\
&\quad \left. - \cos (2\pi m) - 2\pi m \sin (2\pi m) + 1 \right\} = m\Phi_{0m} \left[2 \sin (2\pi m) + \frac{1}{2\pi m} [2 - 2 \cos (2\pi m) - 4\pi m \sin (2\pi m)] \right] = \\
&= m\Phi_{0m} \left[2 \sin (2\pi m) + \frac{1}{\pi m} - \frac{1}{\pi m} \cos (2\pi m) - 2 \sin (2\pi m) \right] = \frac{1}{\pi} \Phi_{0m} [1 - \cos (2\pi m)].
\end{aligned}$$

Таким образом, суммарный магнитный поток, обеспечивающий выходное напряжение, изменяется при изменении m по следующему закону $\Phi = \frac{1}{\pi} \Phi_{0m} [1 - \cos(2\pi m)]$.

Из уравнения следует вывод о том, что наиболее эффективным является значение $m = 0,5$, так как $\cos \pi = -1$ и в этом случае $\Phi = \frac{2}{\pi} \Phi_{0m}$.

Начальная фаза этого магнитного потока, изменяющегося по синусоидальному закону, во времени определяется начальной фазой намагничивающей силы зубца с максимальным магнитным потоком.

Заключение

Развитие теории и практики применения датчиков механических величин на основе фазовращателей с бегущим магнитным полем позволяет разрабатывать информационно-измерительные системы с повышенной точностью и быстродействием. Области применения фазовращателей расширяются благодаря малым габаритам, обусловленным малой эффективной длиной магнитопроводов. Использование принципа локального взаимодействия обмоток расширяет возможности применения бегущих магнитных полей.

Библиографический список

1. Батоврин, А. А. Электромашинные фазовращатели / А. А. Батоврин. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 124 с.
2. Горячев, В. Я. Анализ систематической погрешности информационно-измерительной системы на основе датчика биений с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, О. В. Гаврина, Ю. К. Чапчиков, Ю. А. Шатова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 46–57.
3. Горячев, В. Я. Фазовые датчики механических величин с бегущим магнитным полем : моногр. / В. Я. Горячев. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 308 с.
4. Горячев, В. Я. Датчики механических величин на базе фазовращателей с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова, С. В. Кисляков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 1 (17). – С. 59–69.
5. Горячев, В. Я. Редукционные датчики угловых перемещений с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, В. И. Волчихин, Ю. А. Шатова // Новые промышленные технологии. – 2007. – № 2. – С. 45–50.
6. Горячев, В. Я. Влияние конструктивных параметров фазовых датчиков с бегущим магнитным полем на их метрологические характеристики / В. Я. Горячев, В. И. Волчихин // Датчики и системы. – 2006. – Вып. 12. – С. 18–22.
7. Экспериментальная информационно-измерительная система для проведения испытаний на воздействие вибрации / С. А. Бростилов, Д. А. Голушко, Н. В. Горячев, В. А. Трусов, Н. К. Юрков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 64–70.

8. *Осадчий, Е. П.* Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
9. *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.
10. *Конюхов, Н. Е.* Унифицированный преобразователь линейных перемещений / Н. Е. Конюхов, А. А. Курицкий // Приборы и системы управления. – 1984. – № 10. – С. 29–30.
11. *Зарипов, М. Ф.* Индуктивные преобразователи больших линейных перемещений с распределенными параметрами магнитных цепей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Зарипов М. Ф. – М., 1963.

Кисляков Сергей Вячеславович

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

Kislyakov Sergey Vyacheslavovich

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

УДК 621.314.25

Кисляков, С. В.

Параметры электромагнитных фазовращателей в информационно-измерительной системе /
С. В. Кисляков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 16–23. –
DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-3.

М. С. Ревунов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА БУМАЖНОЙ МАССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРОССКОРРЕЛЯЦИОННОГО АЛГОРИТМА

M. S. Revunov

IMPROVEMENT THE SYSTEMS FOR STABILIZATION PARAMETERS OF THE FLOW OF PAPER PULP USING A CROSS-CORRELATION ALGORITHM

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. На современных бумагоделательных машинах для целого ряда основных параметров потока бумажной массы отсутствуют какие-либо средства измерения и контроля. Более того, все контуры регулирования оснащены одномерными регуляторами, которые не учитывают влияния различных взаимосвязанных факторов друг на друга. Все это приводит к погрешностям регулирования и, соответственно, браку конечной продукции. Целью работы является повышение точности и стабильности технологического процесса производства бумаги путем совершенствования функциональных подсистем АСУТП. **Материалы и методы.** В работе использованы методы современной теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов, теории вероятностей и математической статистики, методы цифровой трассерной визуализации и компьютерное моделирование. **Результаты.** Произведен анализ факторов, влияющих на дисперсию веса бумажного полотна на стадиях подготовки и формирования; экспериментально подтверждена экстремальная зависимость неравномерности просвета бумаги от скорости напуска массы на сетку. Обоснованы принципы совершенствования систем стабилизации параметров потока бумажной массы на длинносеточных бумагоделательных машинах. Разработан алгоритм бесконтактного измерения скорости твердотельных объектов, жидких или вязких сред на основе кросскорреляционного метода. **Выводы.** Экспериментальные исследования скорости напуска бумажной массы на сетку подтверждают применимость указанных подходов в вопросах совершенствования систем стабилизации плотности бумажного полотна.

A b s t r a c t. Background. On modern paper machines for a number of parameters of the paper mass flow there are no any means of measurement and control. All control circuits are equipped with one-dimensional regulators that do not take into account the influence of various interrelated factors on each other. All this leads to regulatory errors and, accordingly, the marriage of the final product. The aim of the work is to improve the accuracy and stability of the paper production process by improving the functional subsystems of ACSTP. **Materials and methods.** The article uses the methods of modern theory of automatic control and automation, probability theory and mathematical statistics, methods of digital tracer visualization and computer modeling. **Results.** An algorithm for contactless measurement of the velocity of objects based on the cross-correlation method has been developed. **Conclusions.** Studies confirm the applicability of these approaches to the improvement of ACSTP.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бумагоделательные машины, бумажная масса, системы стабилизации, совершенствование подсистем АСУТП.

Key words: paper machines, paper pulp, stabilization systems, improvement of the APCS subsystems.

Постановка задачи

Дисперсия веса бумаги и картона в продольном направлении зависит сразу от нескольких взаимосвязанных факторов, главные из которых: однородность и концентрация бумажной массы (требуемые показатели достигаются на размольно-подготовительном участке), угол и скорость напуска массы на сеточную часть бумагоделательной машины, объем бумажной массы на сеточном столе в единицу времени [1–4].

Существующие системы стабилизации веса бумажного полотна, основанные на принципах стабилизирующего [5] или экстремального регулирования [6], обладают невысоким быстродействием, обусловленным большим временным запаздыванием в объекте регулирования.

Установлено, что зависимость неравномерности просвета бумаги или дисперсии ее веса носит экстремальный характер и зависит от соотношения скоростей k_c между скоростью напуска бумажной массы и скоростью сетки, достигая минимальных значений при соотношении скоростей $k_c = 1$ [7]. Следовательно, для минимизации дисперсии веса бумажного полотна необходимо поддерживать $k_c \approx 1$, регулируя скорость напуска бумажной массы путем изменения давления воздушной подушки в напорном устройстве.

На рис. 1 приведены фотографии процесса напуска бумажной массы на сетку бумагоделательной машины.

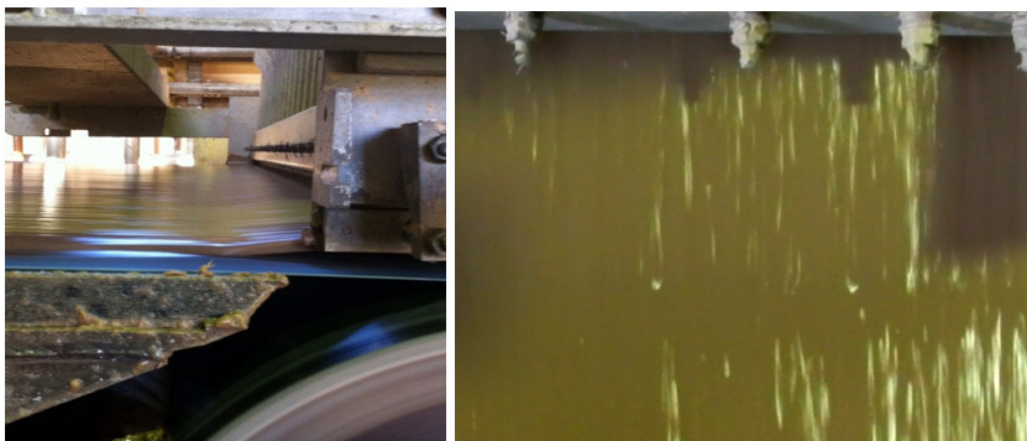


Рис. 1. Процесс напуска массы (вид сбоку и сверху)

На фотографиях видно, что измерение скорости напуска бумажной массы сводится к измерению скорости движения плоской струи жидкости, причем величина этой скорости достаточно высокая и лежит в диапазоне 200–600 м/мин. Анализ методов измерения расхода и скорости потоков жидкости [8–10] позволил остановиться на кросскорреляционном методе измерения скорости.

Измерение скорости потока жидкости с использованием кросскорреляционного алгоритма

Для определения скорости потока жидкости производится регистрация ее движения с помощью цифровой видеокамеры. Работа с полученными данными и их подготовка состоит из нескольких основных операций:

1. Выбор и чтение видеофайла; определение параметров выбранного видеофайла; ввод пользовательских настроек: шаг дискретизации, число используемых кадров, добавочный коэффициент по времени и т.д.

2. «Усечение по краям» – необходимо для того, чтобы избежать ситуаций, в которых в поле расчетной области попадают посторонние объекты или объекты, находящиеся в непо-

средственной близости от объекта исследования. Примеры таких ситуаций представлены на рис. 2 и 3.

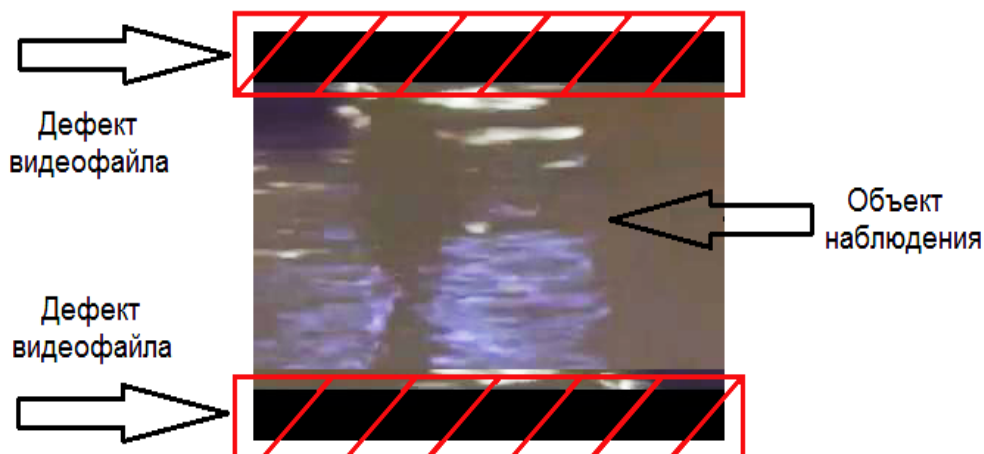


Рис. 2. Процедура «усечения по краям» из-за дефекта видеофайла

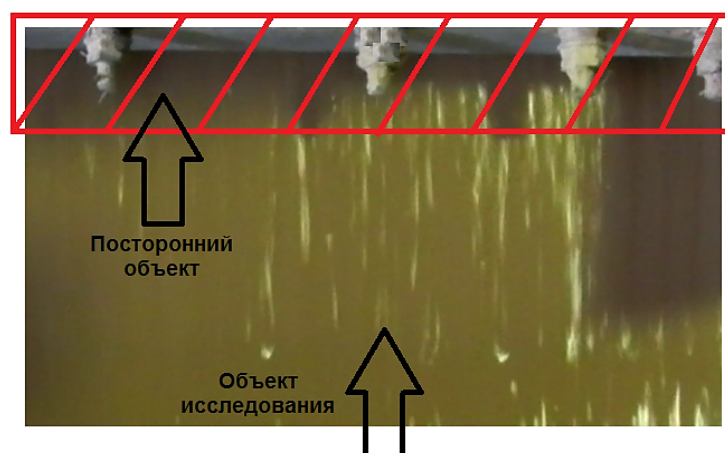


Рис. 3. Процедура «усечения по краям» из-за попадания в кадр постороннего объекта (выпускной щели напорного ящика)

3. Выбор «оптимального окна» и формирования цифровых матриц видеокadra для кросс-корреляционного анализа. При выборе размерности матриц необходимо стремиться к уменьшению их размерности до величины, при которой обеспечивается требуемая точность измерения скорости. Пример формирования матрицы видеокadra течения речной воды представлен на рис. 4.

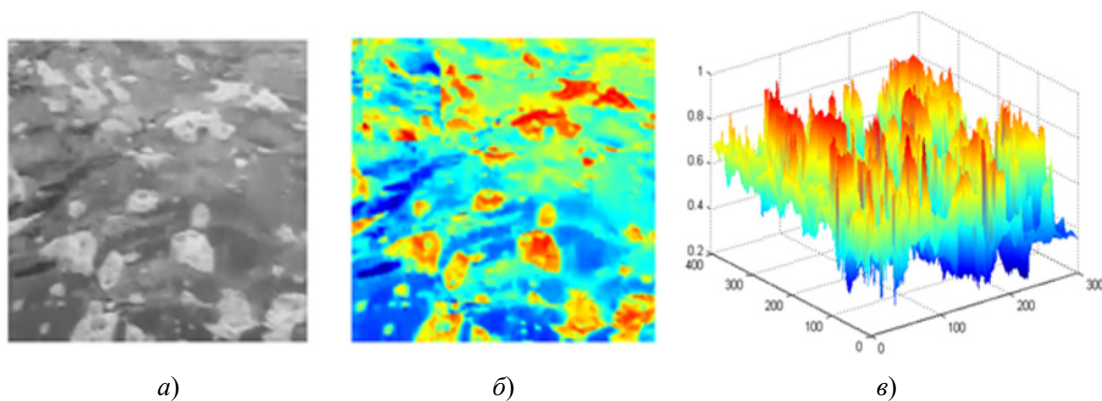


Рис. 4. Исходное изображение объекта исследования (а) и графическое отображение матрицы видеокadra (б, в)

4. Расчет кросскорреляционной функции и определение координат ее максимума. Если принять во внимание тот факт, что в цифровой обработке изображений сигналы являются дискретными, функция пространственной корреляции представляет собой свертку

$$R(m, n) = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f(i, j) g(i + m, j + n),$$

где f и g – интенсивности первого и второго кадров изображений [11]. Метод вычисления свертки зависит от конкретной реализации алгоритма обработки. Обычно используют либо непосредственное вычисление сумм, либо корреляционную теорему Винера – Хинчина

$$R(m, n) = \zeta^{-1} \left[\zeta[f] \zeta^*[g] \right],$$

где ζ и ζ^{-1} – прямое и обратное преобразования Фурье. При вычислении преобразования Фурье используется алгоритм быстрого преобразования Фурье, который дает преимущества по времени обработки перед прямым расчетом кросскорреляционной функции [11].

Корреляционная функция, записанная в терминах преобразования Фурье, будет иметь следующий вид:

$$R(m, n) = \frac{\zeta^{-1} \left[\zeta[Wf - \langle Wf \rangle] \zeta^*[Wg - \langle Wg \rangle] \right]}{\sqrt{\sigma^2(Wf) \sigma^2(Wg)}},$$

где $W = W(x, y)$ – весовая функция; σ^2 – дисперсия значений интенсивности внутри расчетной области [11].

После вычисления корреляционной функции производится поиск координат максимального корреляционного пика с подпиксельной точностью. Пример расчета кросскорреляционной функции по двум матрицам видеокadres представлен на рис. 5.

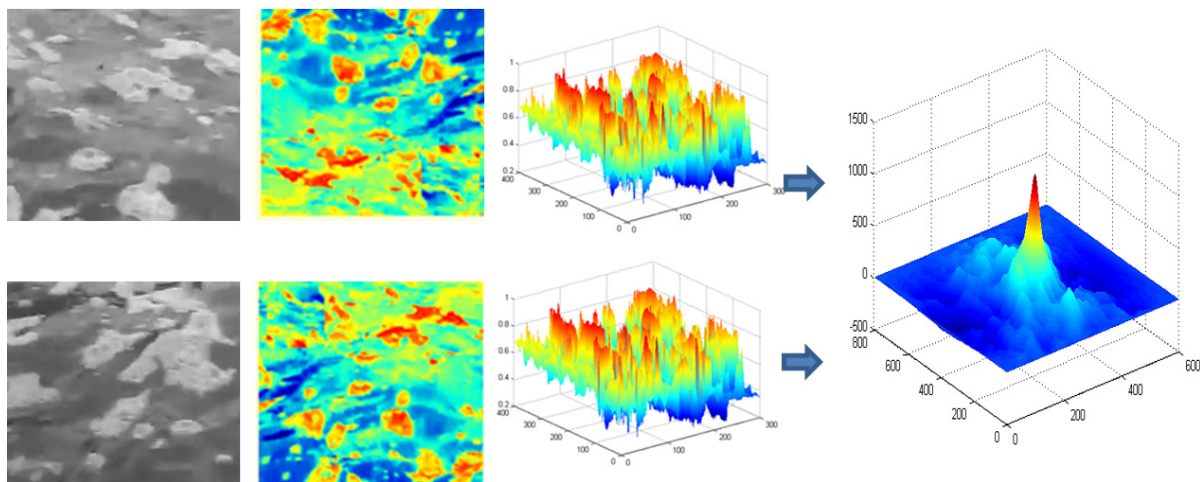


Рис. 5. Кросскорреляционная функция 42 и 43 кадров

5. Вычисление скорости движения объекта $v_{нк}$ [пиксель/кадр] и пересчет этой скорости в размерность [м/мин] происходит по формуле

$$v = v_{нк} m_l n_k,$$

где m_l – масштаб видеокadra [м/пиксель], n_k – скорость видеосъемки [число кадров в минуту].

На рис. 6 приведены графики перемещения кросскорреляционного максимума по осям абсцисс и ординат.

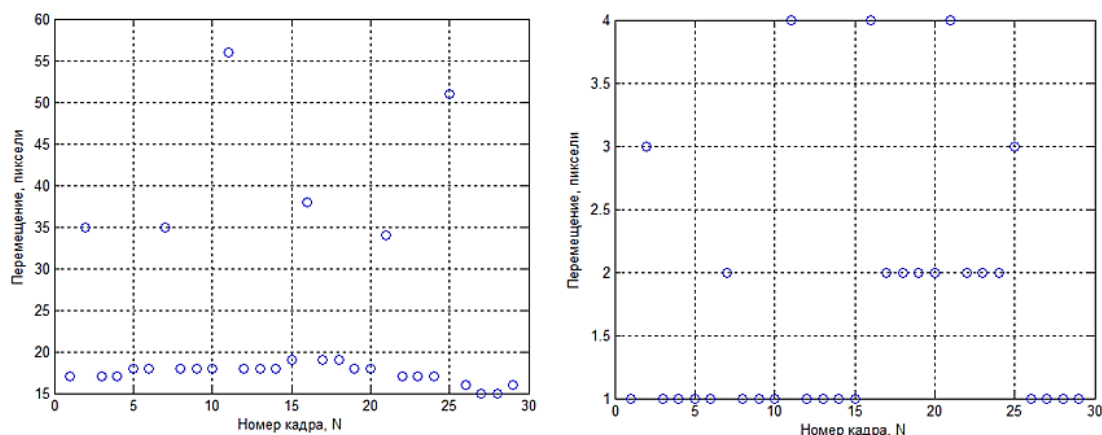


Рис. 6. Графики перемещения кросскорреляционного максимума

6. Зная скорость и направление движения исследуемого объекта, мы можем сформировать промежуточные матрицы RO, необходимые для работы алгоритма оценки свойств пикселя движущейся точки. Промежуточные матрицы RO формируются следующим образом: на первом кадре определяется исходное положение интересующего нас пикселя (или области из пикселей); полученные данные (номера строк и столбцов) записываются в матрицу RO в виде $RO(:,k)$. На втором и последующих кадрах также определяется положение интересующего нас пикселя (или области из пикселей), но уже на основе данных о его предыдущем положении, скорости и направлении движения объекта.

Стабилизация скорости напуска бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма

Изменение скорости постоянной части бумагоделательной машины (БДМ) ведет к изменению технологических режимов и влияет на все элементы и подсистемы машины. Поэтому для минимизации неравномерности просвета необходимо постоянно измерять скорость напуска бумажной массы с помощью оптико-электронных приборов (бесконтактных измерителей скорости) и изменять ее, регулируя напор в напускном устройстве.

Функциональная схема БДМ с контуром регулирования соотношения скоростей напуска бумажной массы и сеточной части бумагоделательной машины представлена на рис. 7.

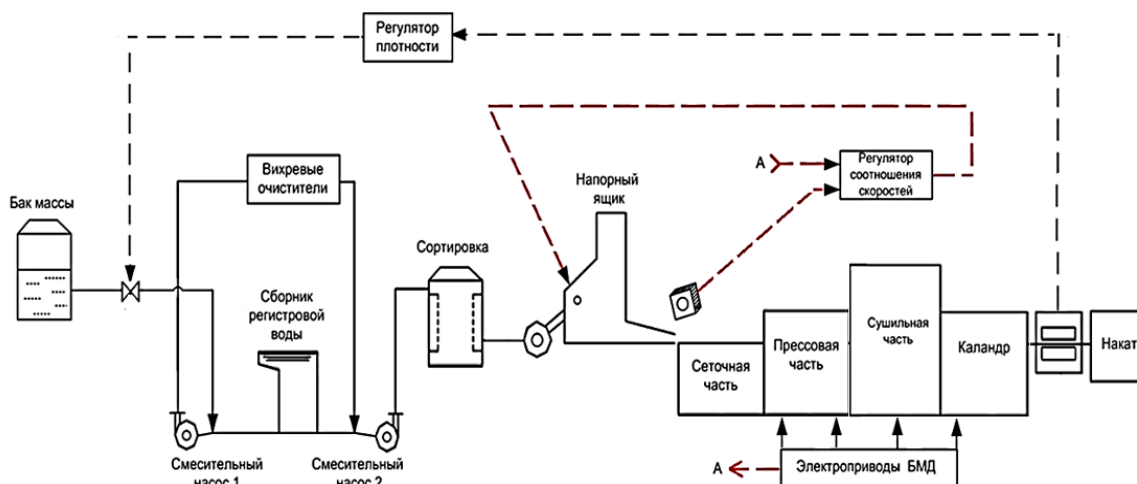


Рис. 7. Функциональная схема БДМ с дополнительным контуром регулирования

Модифицированный кросскорреляционный алгоритм (МКА) был апробирован при измерении скорости твердотельных объектов (автомобиль, промышленный конвейер и др.) и жидких сред (вода, бумажная масса). Съемка проводилась при естественном освещении с помощью камеры Nikon COOLPIX P500. В ходе экспериментов были получены видеофайлы длительностью 5–35 с с размером 1920×1080 (Full HD с частотой 30 кадров в секунду).

На рис. 8 показаны последние шесть кадров, взятые для расчета скорости напуска бумажной массы на сеточную часть БДМ (эксперимент при скорости машины 220 м/мин), а на рис. 9 и 10 – результирующие графики перемещения кросскорреляционного максимума.

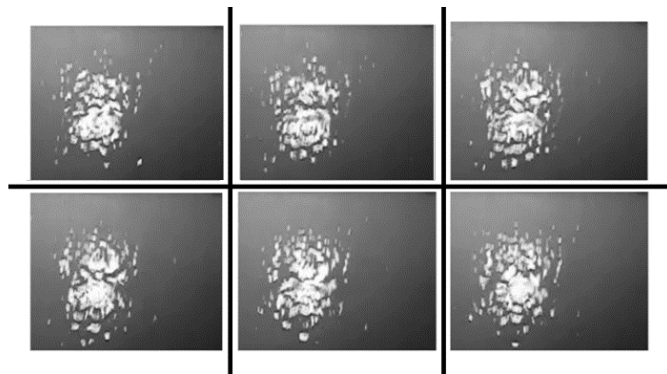


Рис. 8. Скорость напуска бумажной массы на сеточную часть БДМ

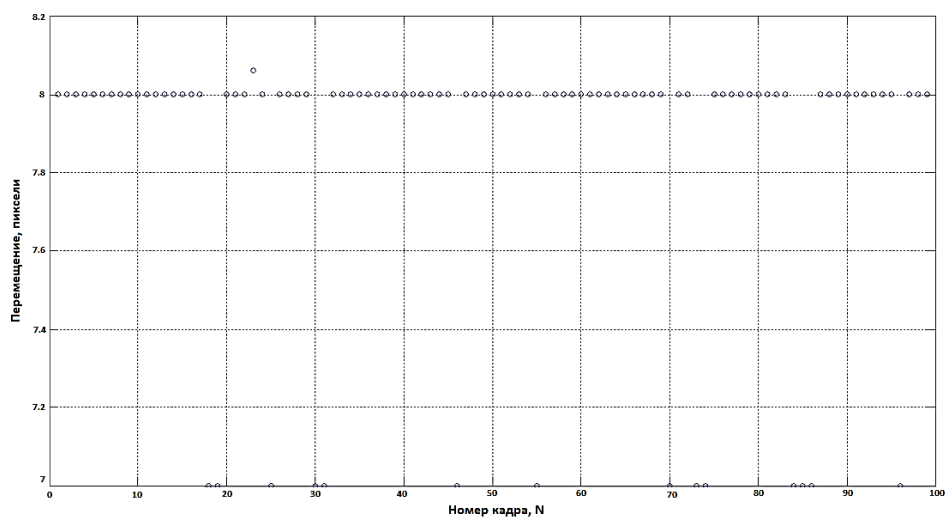


Рис. 9. Результирующий график перемещения ККМ

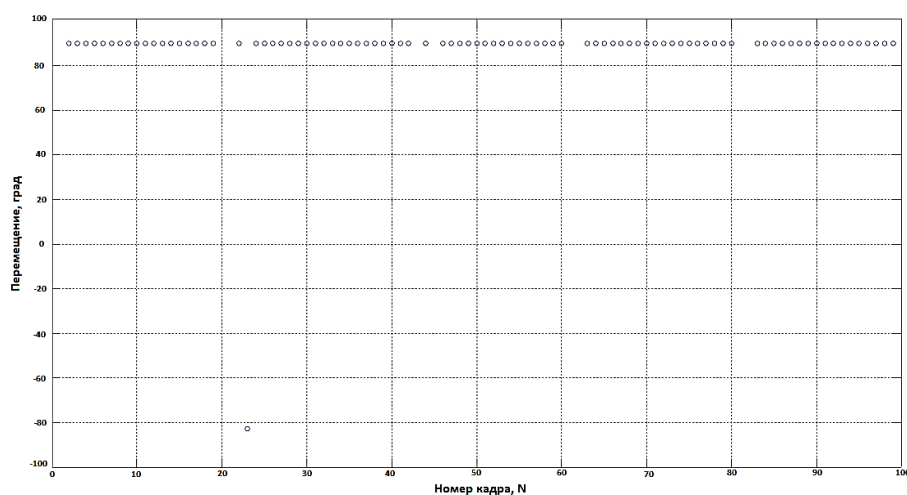


Рис. 10. Результирующий график направления движения ККМ

Для дальнейшего вычисления скорости напуска бумажной массы следует перейти от расстояния, пройденного в пикселях, к метрам и пересчитать время. Для этого понадобятся реальные размеры исследуемого объекта (рис. 11 и 12).

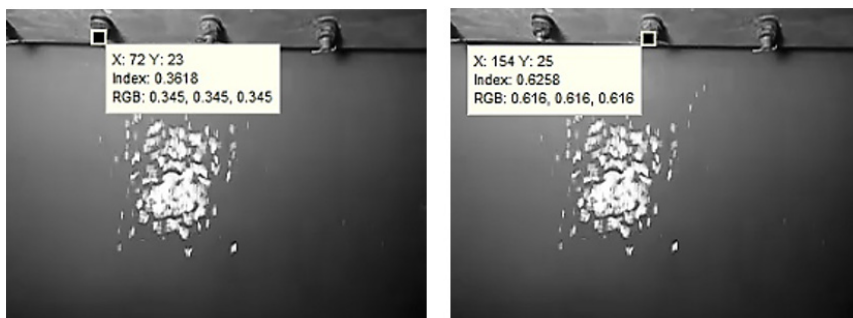


Рис. 11. Расстояние между секциями напорного ящика в пикселях



Рис. 12. Расстояние между секциями напорного ящика в сантиметрах

Таким образом, рассчитанная с помощью кросскорреляционного алгоритма скорость напуска равна ≈ 218 м/мин, что соответствует действительности (рис. 13).

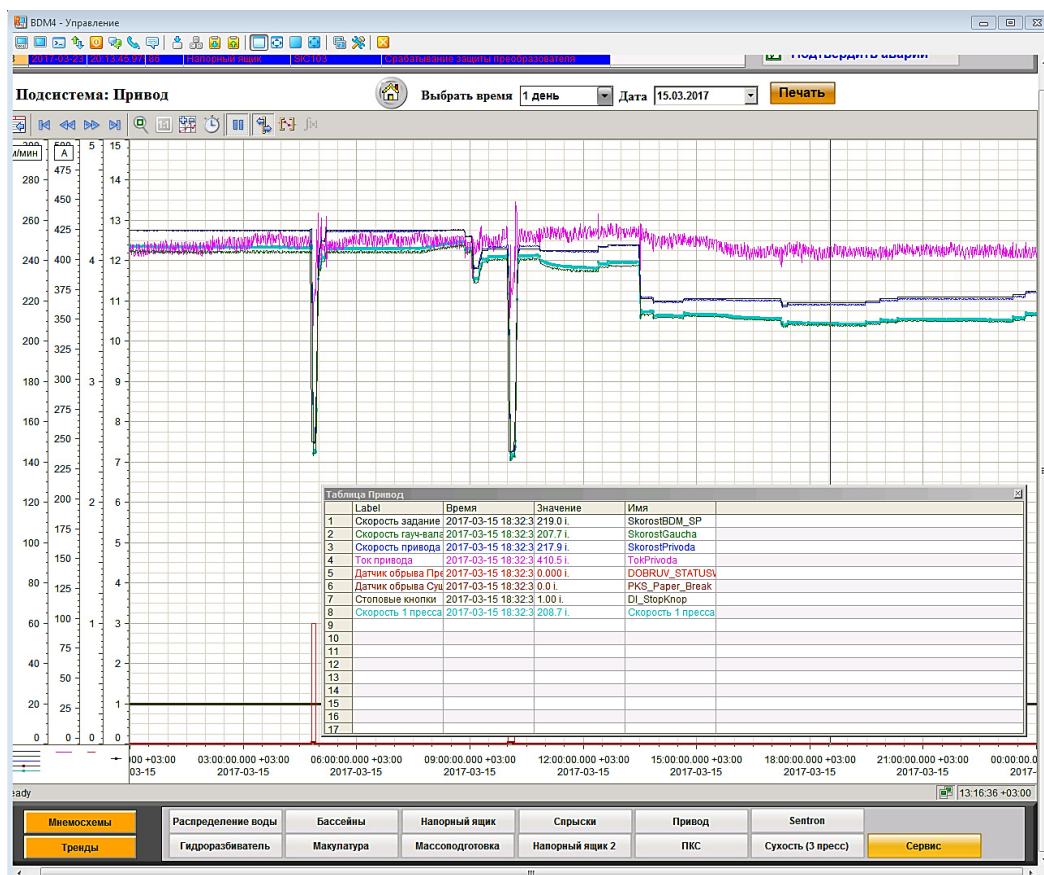


Рис. 13. Тренды скорости БДМ

Библиографический список

1. *Иванов, С. Н.* Технология бумаги / С. Н. Иванов. – М. : Школа бумаги, 2006. – 310 с.
2. *Фляте, Д. М.* Свойства бумаги : учеб. пособие / Д. М. Фляте. – Краснодар : Лань, 2012. – 384 с.
3. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 3. Производство полуфабрикатов. – СПб. : Политехника, 2004. – 315 с.
4. *Дунаев, Д. В.* Системный подход к обеспечению требуемых печатных свойств бумаги на основе информации о качестве печати : дис. ... канд. техн. наук / Дунаев Д. В. – СПб., 2006. – 148 с.
5. *Зорин, И. Ф.* Управление процессами целлюлозно-бумажного производства / И. Ф. Зорин, В. П. Петров, С. А. Рогульская. – М. : Лесная промышленность, 1981. – 272 с.
6. *Авдеева, О. В.* Экстремальное управление инерционным объектом с запаздыванием в условиях сильных помех / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, С. В. Никулин, А. Д. Семенов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 54–64.
7. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 2. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства бумаги и картона. – СПб. : Политехника, 2005. – 423 с.
8. *Кремлевский, П. П.* Расходомеры и счетчики количества веществ : справочник / под общ. ред. Е. А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2004. – Кн. 2. – 412 с.
9. *Финкелыптейн, Г. Э.* Оптический контроль бумаги / Г. Э. Финкелыптейн. – СПб. : Бумажная промышленность, 1987. – С. 21–22.
10. *Ахметбеков, Е. К.* Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках / Е. К. Ахметбеков. – М. : Вычислительные технологии, 2010. – 67 с.
11. *Прэтт, У. Н.* Цифровая обработка изображений / У. Н. Прэтт. – М. : Мир, 2000.

Ревунов Максим Сергеевич

инженер,
отдел АСУТП,
ООО «Маяктрансэнерго»
(Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 13а)
E-mail: Revunov_rabota@mail.ru

Revunov Maksim Sergeevich

engineer,
department of APCS,
LLC «Mayaktransenergo»
(13A Bumazgnikov street, Penza, Russia)

УДК 676.2.056-55**Ревунов, М. С.**

Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма / М. С. Ревунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 24–31. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-4.

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

УДК 622.78.8:558

DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-5

А. А. Коноваленко, А. И. Нефедьев, Д. И. Нефедьев

ДАТЧИК СЕЛЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ФАКЕЛА ГОРЕЛКИ

А. А. Konovalenko, A. I. Nefed'ev, D. I. Nefed'ev

SELECTIVE CONTROL SENSOR OF THE BURNER FLAME

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Статья посвящена проблеме контроля наличия стабильно горящего пламени в топках котлов. *Материалы и методы.* Рассмотрены различные методы, применяющиеся при создании датчиков контроля пламени, такие как методы прямого контроля (ультразвуковой, термометрический, ионизационный и наиболее часто применяемый фотоэлектрический) и косвенного контроля (контроль за разрежением в топке, за давлением топлива в подающем трубопроводе, за давлением или перепадом его перед горелкой и контроль за наличием постоянного источника воспламенения). Основное внимание уделено свойствам пламени и особенностям работы фотоэлектрических датчиков. *Проблема и решение.* Надежность работы котельных установок всецело зависит от правильного выбора датчиков контроля пламени. Авторы пришли к выводу, что для повышения надежности работы и уменьшения количества остановов котла из-за подачи ошибочного сигнала датчика пламени необходимо применять интеллектуальные комбинированные датчики пламени, работающие на нескольких независимых друг от друга принципах, что позволит обеспечить повышенную надежность определения наличия пламени в топке котла. *Результаты.* Для решения этой задачи был разработан датчик селективного контроля факела горелки, сочетающий в себе два принципа работы: оптический и ионизационный, приведена структурная схема датчика и его конструкция. *Выводы.* Таким образом, сочетание в одном устройстве двух датчиков, работающих на независимых друг от друга принципах, позволит обеспечить повышенную надежность определения наличия пламени в топке котла.

A b s t r a c t. *Background.* The article is devoted to the problem of controlling the presence of a stably burning flame in boiler furnaces. *Materials and methods.* various methods are considered that are used in the creation of flame monitoring sensors, such as direct control methods (ultrasonic, thermometric, ionization and most commonly used photoelectric) and indirect control (monitoring of vacuum in the furnace, pressure of fuel in the supply line, pressure or its difference in front of the burner and control over the presence of a constant source of ignition). The main attention is paid to the properties of the flame and the features of the operation of photoelectric sensors. *Problem and solution.* The reliability of the operation of boilers depends entirely on the correct choice of flame monitoring sensors. The authors concluded that in order to increase the reliability of the operation and to reduce the number of boiler shutdowns due to the error signal of the flame sensor, intelligent combined flame sensors must be used, working on several principles that are fundamentally independent of each other, which will allow for an increased reliability in determining the presence of a flame in furnace boiler. *Results.* To solve this problem, a sensor for selective control of the torch flame was developed,

combining two principles of operation: optical and ionization, a structural diagram of the sensor and its design were presented. **Conclusions.** Thus, the combination in one device of two sensors operating on principles that are fundamentally independent of each other will allow to provide increased reliability of detecting the presence of a flame in the furnace of the boiler.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оптический датчик пламени, ионизационный датчик пламени, котел, селективный контроль, комбинированный датчик.

К e y w o r d s: photoelectric flame sensor, ionization flame sensor, boiler, selective control, combination sensor.

Необходимым и важным условием для работы печей и топок является наличие стабильно горящего пламени в топках. Контроль за пламенем осуществляют специальные датчики, основное предназначение которых заключается в обеспечении безопасного функционирования различных установок по сжиганию твердого, жидкого или газообразного топлива. Датчики и приборы для контроля пламени также участвуют в автоматическом или полуавтоматическом процессе розжига пламени, осуществляют постоянный контроль за процессом сгорания топлива с учетом всех требуемых условий и мероприятий по защите. Таким образом, надежность работы котельных установок всецело зависит от правильного выбора датчиков контроля пламени [1].

Для контроля наличия пламени при сжигании в топках котлов газа и жидкого топлива применяются методы прямого контроля (ультразвуковой, термометрический, ионизационный и наиболее часто применяемый фотоэлектрический) и косвенного контроля (контроль за разрежением в топке, за давлением топлива в подающем трубопроводе, за давлением или перепадом его перед горелкой и контроль за наличием постоянного источника воспламенения) [2, 3].

В отопительных котлах отечественного производства, газовых калориферах и малых газовых нагревателях применяют приборы, которые основаны на фотоэлектрическом, термометрическом и ионизационном методах контроля. Также широко применяются методы контроля, основанные на электрическом потенциале пламени и на электрической пульсации пламени [4, 5].

Фотоэлектрический метод контроля горения топлива заключается в измерении степени видимого и невидимого излучения пламени фотодатчиками с внешним или внутренним фотоэффектом. Действие оптических датчиков основано на оптических свойствах пламени. Фотодатчики осуществляют регистрацию и реагирование на все изменения в интенсивности принимаемого ими светового потока, и отличаются они друг от друга по длине волны, принимаемой от источника излучения, так как спектральные характеристики пламени в значительной степени зависят от вида используемого топлива. Пламя излучает в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом спектре излучения. Основная часть энергии, излучаемой пламенем, соответствует инфракрасной части спектра и характеризуется длиной волны 0,8–800 мкм. Видимому излучению соответствует длина волны в диапазоне 0,4–0,8 мкм, ультрафиолетовому излучению соответствует длина волны в диапазоне 0,28–0,4 мкм (области УФ-А и УФ-В). В соответствии с выбранным чувствительным элементом фотодатчики делятся на инфракрасные, ультрафиолетовые или просто датчики светимости. Каждому диапазону излучения соответствует чувствительный элемент фотоприемного устройства [6, 7]. Серьезной проблемой при использовании оптических датчиков пламени является их низкая селективность, особенно характерная для горелочных котлов, имеющих три или более горелок. При ошибочном сигнале оптического датчика о наличии пламени возможна серьезная аварийная ситуация [5].

Термоэлектрический метод заключается в выработке термопарой ЭДС, при наличии которой электромагнитный клапан подачи газа удерживается в открытом состоянии только при наличии пламени [8, 9]. Устройство для термоэлектрического метода контроля состоит из датчика (термопары) и электромагнитного клапана. Термопара помещена в зону горения запальной горелки котла, а электромагнитный клапан установлен на газопроводе, по которому подается газ в запальную горелку. Такое устройство применяется в отопительных и пищеварочных котлах, газовых отопительных печах и емкостях водонагревателей.

Ионизационный метод контроля наличия пламени основан на использовании электрических свойств пламени, т.е. основан на фиксировании электрических процессов, возникающих

и протекающих в пламени. К таким процессам можно отнести способность пламени проводить ток, возбуждать в электродах, помещенных в пламя, собственную ЭДС, выпрямлять переменный ток, а также возбуждать периодическую пульсацию электрических колебаний в пламени, что во всех случаях обуславливается степенью ионизации пламени.

Преимуществом этого метода является безынерционность, так как при погасании контролируемого пламени ионизационные процессы сразу прекращаются, что приводит к практически мгновенному отключению подачи газа в горелки котла. Этот метод позволил разработать приборы контроля, основанные на электропроводности пламени, возникновении ЭДС пламени, его вентильном эффекте и электрической пульсации. За рубежом применяется метод контроля пламени, основанный на вентильном эффекте. В устройствах безопасности горения, где используется этот метод, не наблюдается ложного сигнала при замыкании в цепи датчиков [10]. Но ионизационный метод контроля может оказаться непригодным в агрегатах с интенсивно запыленной рабочей атмосферой, а также в агрегатах с сильным вихревым движением газов. Ионизационный контроль надежно работает в условиях прямоструйного факела, не имеющего застойных вихревых зон.

Метод контроля, использующий электрический потенциал пламени, основан на введении в факел металлических электродов, между которыми при наличии пламени возникает разность потенциалов (ЭДС), переменных по амплитуде, но постоянных по знаку. Величина ЭДС пропорциональна разности температур между электродами и достигает 2 В. При погасании пламени или замыкании в цепи датчика, ЭДС исчезнет, и устройство автоматики прекращает подачу газа в горелку [2].

Для контроля пламени применяется метод, использующий электрическую пульсацию пламени. Для любого факела, независимо от вида сжигаемого топлива и типа горелочного устройства, характерным признаком является пульсация процессов, сопровождающих горение. К таким процессам относятся температура пламени, давление в камере сгорания, интенсивность излучения и ионизация факела пламени. Частота и амплитуда пульсаций зависят как от скорости истечения газозвушной смеси из горелки, так и от условий перемешивания газа с воздухом. При неудовлетворительном перемешивании газа с воздухом горение сопровождается отдельными вспышками, что приводит к пульсациям ионизационного тока, которые можно измерить. Это свойство пламени также дает возможность обеспечить самоконтроль автоматики от замыкания в цепи датчика. При замыканиях в цепи датчика, а также при погасании факела подача управляющего сигнала на вход усилителя прекращается и автоматика срабатывает на отключение газа [2, 3].

Недостатком такой системы контроля пламени является повышенная чувствительность к помехам, частота колебаний которых близка к частоте пульсации факела, что приводит к необходимости экранировки входных цепей усилителя и линий связи, соединяющих электродный датчик с прибором.

От выбора типа датчика контроля пламени, места и направления установки зависит надежность его работы и системы защиты от погасания факела. Все типы датчиков имеют определенные достоинства и недостатки, и неправильный выбор типа датчика или его неправильная установка может вызвать возникновение ложного сигнала. Для снижения вероятности ошибки обнаружения пламени при выборе датчиков для конкретного проекта необходимо принимать во внимание все их особенности [1].

Для повышения надежности работы и уменьшения количества остановов котла из-за подачи ошибочного сигнала датчика пламени необходимо применять интеллектуальные комбинированные датчики пламени, работающие на нескольких независимых друг от друга принципах, что позволит обеспечить повышенную надежность определения наличия пламени в топке котла.

Для решения этой задачи был разработан датчик селективного контроля факела горелки, сочетающий в себе два принципа работы: оптический и ионизационный. В предложенном датчике происходит выделение и усиление переменного сигнала, характеризующего процесс горения. При горении топлива имеются пульсации яркости факела горелки, которые преобразуются в электрический сигнал с помощью фотодатчика, сигнал с которого через усилитель-формирователь поступает в устройство обработки сигнала. Второй датчик – ионизационный, сигнал на выходе которого имеется только при наличии электропроводности среды между электродами, что бывает только при наличии факела.

Конструкция оптоионизационного датчика контроля факела горелки приведена на рис. 1. Датчик состоит из корпуса 1, разъема 2, устройства обработки сигналов 3, фотодатчика 4, защитных стекол-линз 5 и жаропрочных электродов 6.

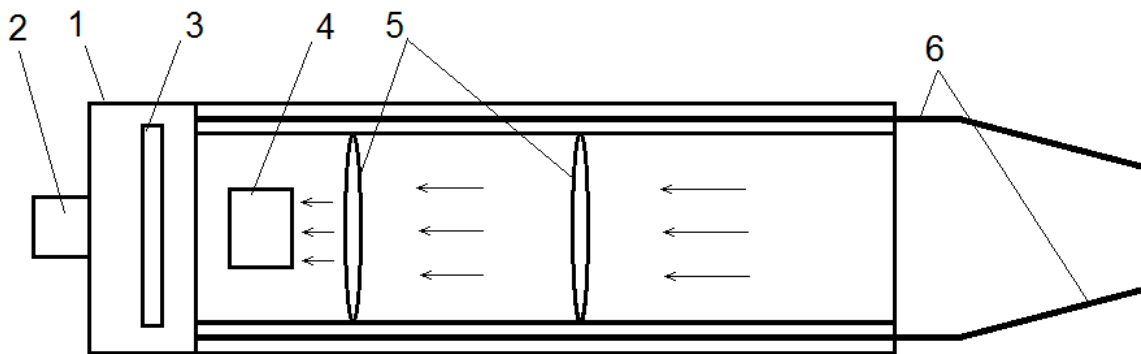


Рис. 1. Конструкция оптоионизационного датчика контроля факела горелки

Сигналы с оптического и ионизационного датчиков поступают на устройство обработки сигналов, структурная схема которого приведена на рис. 2.

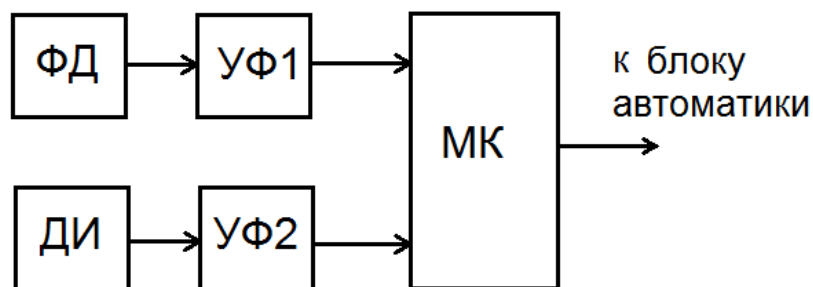


Рис. 2. Структурная схема устройства обработки сигналов

Сигналы переменной амплитуды с фотодатчика ФД и ионизационного датчика ДИ усиливаются и приводятся к логическим уровням с помощью усилителей-формирователей УФ1 и УФ2 соответственно. Микроконтроллер МК предназначен для обработки сигналов с датчиков ФД и ДИ и формирования управляющего сигнала для системы автоматики котла.

Устройство обработки сигналов обеспечивает выделение высокочастотных пульсаций факела, полученных с фотоприемника, при работающей и не работающей горелке, и формирование признака наличия и отсутствия факела, самодиагностику с выводом состояния датчика на световой индикатор.

Предложенный датчик позволяет контролировать наличие факела при сжигании газа или жидкого топлива. Для повышения надежности работы применен режим автоматической настройки чувствительности датчиков.

Основными функциями оптоионизационного датчика контроля факела являются сигнализация погасания факела горелки, что вызывает немедленное срабатывание защиты и прекращение подачи топлива, самоконтроль исправности оптоионизационного датчика, автоподстройку параметров датчика, сохранение параметров датчика в энергонезависимой памяти микроконтроллера при исчезновении питания и сбоях в работе, а также формирование дискретного выходного сигнала для устройства автоматики.

Таким образом, сочетание в одном устройстве двух различных датчиков, работающих на нескольких независимых друг от друга принципах, позволит обеспечить повышенную надежность определения наличия пламени в топке котла.

В статье представлены результаты исследования, проведенного по программе Erasmus + № 573879-EPP-1-2016-1-FREPPKA2-SBHE-JP «Интернационализация магистерских программ в России и Китае в области электротехники».

Библиографический список

1. Полтавцев, О. В. Датчики контроля пламени – один из важнейших факторов безопасной работы котельной / О. В. Полтавцев // Новости теплоснабжения. – 2016. – № 12 (196). – URL: www.rosteplo.ru/nt/196 (дата обращения: 30.10.2018).
2. Берсенов, И. С. Автоматика отопительных котлов и агрегатов / И. С. Берсенов, М. А. Волков, Ю. С. Давыдов. – М. : Стройиздат, 1979. – 376 с.
3. Зак, Е. А. Методы контроля погасания пламени горелок промышленных печей / Е. А. Зак, И. И. Касатонов, А. А. Шехурдин // Сенсор. – 2002. – № 4. – С. 46–49.
4. Приборы контроля наличия пламени. – URL: <http://prommatika.ru/staty/113-priborplameni> (дата обращения: 30.10.2018).
5. Приборы контроля пламени, сигнализаторы горения. – URL: <http://www.termonika.ru/inf/pribory-kontrolya-plameni-signalizatory-goreniya.shtml> (дата обращения: 30.10.2018).
6. Поскачей, А. А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
7. Аксененко, М. Д. Приемники оптического излучения : справочник / М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников. – М : Радио и связь, 1987. – 296 с.
8. ГОСТ Р 51983-2002. Устройства многофункциональные регулирующие для газовых аппаратов. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 01.01.2004. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 35 с.
9. ГОСТ Р 51843-2001. Термоэлектрические устройства контроля пламени. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 24.12.2001. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 20 с.
10. Луговской, А. И. Контроль за работой печей и факельного хозяйства. Сигнализаторы погасания пламени / А. И. Луговской, С. А. Логинов, Г. Д. Паршин, Е. А. Черняк // Химия и технология топлив и масел. – 2000. – № 5. – С. 50–52.

Коноваленко Артем Александрович

аспирант,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)
E-mail: artyom.konovalenko34@gmail.com

Konovalenko Artem Aleksandrovich

postgraduate student,
Volgograd State Technical University
(28 Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Нефедьев Алексей Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра электротехники,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)
E-mail: nefediev@rambler.ru

Nefed'ev Aleksey Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of electrical engineering,
Volgograd State Technical University
(28 Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

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

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

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

УДК 622.78.8:558

Коноваленко, А. А.

Датчик селективного контроля факела горелки / А. А. Коноваленко, А. И. Нефедьев, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 32–36. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-5.

А. В. Глубоков, Т. С. Ястребова

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ

A. V. Glubokov, T. S. Yastrebova

PROBLEMS OF AUTOMATION OF THE SELECTION OF UNIVERSAL MEASURING INSTRUMENTS OF LINEAR DIMENSIONS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является процедура выбора средств измерений линейных размеров согласно утвержденной нормативной документации и существующим автоматизированным системам метрологического обеспечения производства. Выбор средств измерений является одной из основных задач этапа проектирования процесса измерений, поэтому повышение производительности данного процесса является актуальной задачей. Целью работы является определение требований к работе автоматизированной системы выбора средств измерения линейных размеров.

Результаты. Предложены пути устранения недостатков утвержденной методики выбора средств измерений линейных размеров. В качестве решения проблемы предложено создание новой автоматизированной системы, которая позволит в значительной мере повысить производительность работ. Разработаны принципы построения автоматизированной системы. **Выводы.** Анализ литературных источников, нормативной документации и автоматизированных систем в отношении выбора универсальных средств измерений линейных размеров показал, что в существующей утвержденной методике выбора средств измерений имеется ряд существенных недостатков. Список средств измерения требует обновления в соответствии с современным уровнем развития измерительной техники. Необходимо определение оптимальности выбора средства измерения. Процедура выбора средств измерений не учитывает специфику измеряемой поверхности, в том числе особенности конструкции детали и средств измерений.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is the procedure for selecting measuring instruments of linear dimensions in accordance with the approved regulatory documentation and existing automated systems for metrological support of production. The choice of measuring instruments is one of the main tasks of the design stage of the measurement process, therefore, increasing the productivity of this process is an important task. The aim of the work is to determine the requirements for the operation of an automated system for the selection of measuring linear dimensions. **Results.** The ways of elimination of the found disadvantages are offered. As a solution to the problem proposed to create a new automated system that will significantly improve the productivity of the works. The principles of constructing the automated system are developed. **Conclusions.** The analysis of literature sources, normative documentation and automated systems for the selection of the universal measuring instruments of linear dimensions has been carried out, which showed that the existing approved method for selecting measuring instruments has a number of significant drawbacks. The list of measuring instruments requires updating in accordance with the current level of development of measuring technology. It is necessary to determine the optimality of the selection of the measuring instrument. The selection procedure of measuring instruments does not consider the specifics of the measured surface, details of construction and the measuring instruments as well.

К л ю ч е в ы е с л о в а: выбор средств измерений, автоматизация, метрологическое обеспечение, измерение линейных размеров.

Key words: selection of measuring instruments, automation, metrology support, measuring of linear dimensions.

В современном мире, где качество является одним из определяющих показателей конкурентоспособной продукции, предъявляются жесткие требования к процессам контроля продукции на различных стадиях ее изготовления. Наряду с высоким качеством продукции требуется сокращение временных затрат на подготовку производства. Использование автоматизированных систем способно значительно ускорить процесс выполнения ряда производственных процессов, а также снизить вероятность возникновения ошибок [1–3].

Вопросы автоматизации метрологического обеспечения производства на данном этапе решены только частично [4]. Большинство существующих автоматизированных систем метрологического обеспечения производства (АСМО) решают лишь вопросы учета средств измерений предприятия, контроля графика проведения поверок и калибровок [5]. Этапы планирования требований к измерениям, проектирования и разработки процессов измерений остаются незатронутыми. Одной из основных задач этапа проектирования процесса измерений является выбор средств измерений (СИ).

В существующих автоматизированных системах метрологического обеспечения вопросы выбора СИ практически не затрагиваются. Можно отметить систему «ОТК-Метролог», разработанную МГТУ «СТАНКИН» совместно с АО «НИИ измерения», в которой реализованы функции выбора средств измерений на основе утвержденной методики [6]. Существует также ряд программных продуктов по выбору средств измерений [7–10], но при этом нельзя говорить о комплексном решении этой проблемы.

Рассмотрим процедуру выбора универсальных СИ линейных размеров, которая предусмотрена нормативной документацией.

Национальным стандартом, устанавливающим допускаемые погрешности измерений линейных размеров до 500 мм, а также правила определения приемочных границ с учетом этих погрешностей, является ГОСТ 8.051-81 [11]. Информация о допускаемых погрешностях измерений в данном стандарте формализована в виде таблицы. Значения допускаемой погрешности заданы в зависимости от номинального размера и допуска на изготовление. При этом установленные в стандарте значения допускаемых погрешностей измерений учитывают не только погрешности самих СИ, но и погрешности, возникающие от других источников, которые так или иначе оказывают влияние на результат измерений (базирование, температурные деформации и т.д.). Данный стандарт довольно подробно рассматривает вопросы влияния погрешности измерения на результаты разбраковки при приемочном контроле. Определены вероятности появления неправильно принятых деталей, неправильно забракованных деталей и вероятностная величина выхода размера за предельные значения у неправильно принятых деталей.

Позднее были выпущены методические указания РД 50-98-86 по применению ГОСТ 8.051-81, предусматривающие рекомендации по выбору средств измерений линейных размеров (диаметров, длин), величин радиального и торцевого биения в диапазоне размеров до 500 мм [12].

В методических указаниях собраны сведения о предельных погрешностях измерения различными универсальными СИ внутренних размеров, наружных размеров, величин биения при разных условиях их применения. При этом приводится детальная информация об условиях проведения измерений и используемой оснастке (температурный режим, шероховатость поверхности, необходимость использования штативов, стоек и т.д.). В методических указаниях рассмотрены основные составляющие погрешности измерений: погрешности, зависящие от самих СИ; погрешности от измерительного усилия; погрешности от температурных деформаций; различные специфические погрешности от измерения внутренних размеров; субъективные погрешности или погрешности от оператора. Это та информация, которой необходимо обладать при проведении измерений, с тем, чтобы погрешности, получаемые при измерениях, не превышали допускаемых значений. Выбор СИ осуществляется по таблицам исходя из номинального размера и допуска на изготовление детали.

В ходе рассмотрения РД 50-98-86 был выявлен ряд недостатков методических указаний. Одним из недостатков является то, что в нормативном документе приведен ограниченный список типовых СИ без учета специальных. Существует несовпадение диапазонов номинальных размеров при нормировании точности с типоразмерами СИ. Это в свою очередь приводит к наличию в таблицах методических указаний СИ, которые могут не полностью обеспечивать диапазон номинальных размеров. По итогу выбора предлагается весьма ограниченный список подходящих СИ. При условии, что чаще всего подходящих СИ оказывается несколько, встает вопрос оптимальности выбора СИ, который также не рассмотрен в рекомендациях. И наконец, самым важным недостатком является то, что данная процедура выбора СИ не учитывает специфику измеряемой поверхности, особенности конструкции детали и СИ.

Проведем анализ обнаруженных недостатков и сформулируем возможные пути их устранения.

Таблица, в которой перечислены СИ, содержит в себе ограниченный список типовых СИ. Такое резкое сокращение количества типов СИ, приведенных в РД 50-98-86, было вызвано тем, что все расчеты и обработка большого объема информации проводились вручную. Острая необходимость в минимизации объема информации была неизбежна. При разработке нормативного документа это было оправдано. Применялись в основном отечественные СИ, и их номенклатура была ограничена. На современном этапе используется большое количество СИ зарубежных фирм, которые могут значительно отличаться друг от друга по метрологическим характеристикам. Кроме того, с момента ввода РД 50-98-86 список типовых СИ значительно расширился за счет современных, обладающих более широкими техническими возможностями, имеющими более высокую точность. К примеру, наряду с нониусными штангенциркулями появились штангенциркули с цифровым отсчетом, погрешность измерения которых существенно ниже. В табл. 1 приведены метрологические характеристики нониусного штангенциркуля ШЦ-I производства ООО Научно-производственного предприятия «Челябинский инструментальный завод» и цифрового штангенциркуля SHAN производства Guilin Measuring & Cutting Tool Co. Ltd, KHP.

Таблица 1

Метрологические характеристики штангенциркулей

Метрологические характеристики	Нониусный штангенциркуль	Цифровой штангенциркуль
Цена деления или дискретность отсчета, мм	0,05	0,01
Диапазон измерений, мм	0–150	0–150
Погрешность, мм	±0,05	±0,02

Увеличение номенклатуры СИ возможно учесть двумя путями.

При первом подходе необходимо обновить список типовых СИ, перечисленных в РД 50-98-86, при этом создать отдельный список для специализированных СИ. Для близких по точности СИ следует определять средние значения погрешности измерений.

При втором подходе следует отказаться от обезличенных типовых СИ, а использовать реально существующие СИ. В качестве информационной базы СИ можно использовать типы СИ, внесенные в Государственный реестр средств измерений. Поскольку данный подход приводит к резкому увеличению объема информации, то возникает необходимость проведения анализа погрешности измерений для всех типов СИ. Определение значений предельной погрешности измерений возможно с использованием информации со стороны производителей или из нормативной документации. Для отечественных СИ информация достаточна [13–15], но во многих случаях, особенно для иностранных СИ, эта информация не полна. Для типовых СИ, приведенных в РД 50-98-86, подобный анализ проведен, и его результаты можно использовать при определении значений погрешности различных СИ, так как значения во многих случаях отличаются незначительно.

Одним из недостатков таблиц выбора СИ является несовпадение диапазонов номинальных размеров при нормировании точности размеров с типоразмерами СИ. При ручном выборе СИ, пользуясь таблицами выбора СИ, есть вероятность, что результатом выбора станут СИ, не полностью обеспечивающие возможность измерения диапазона номинальных размеров. Такие

СИ были отмечены символом «*». Причиной такого намеренного увеличения интервалов номинальных размеров авторами методических указаний также стала необходимость минимизации итоговой информации, приводимой в самом нормативном документе.

В качестве решения данной проблемы предлагается увеличить количество интервалов номинальных размеров, чтобы привести в соответствие интервалы номинальных размеров, приведенных в таблицах выбора СИ, с типоразмерами СИ. Это увеличит объем хранимой информации, но при разработке автоматизированной системы упростит структуру базы данных и снизит неопределенность выбора СИ.

Еще одним из недостатков является весьма ограниченный набор СИ, которые рекомендованы для измерений при заданных параметрах согласно таблицам выбора. При этом имеется комментарий о том, что возможно использование без ограничений более точных СИ. Реальное же количество СИ, которые подошли бы для тех или иных измерений, гораздо больше. И нужно отметить, что в ряде случаев выбор более точного СИ является нецелесообразным с экономической точки зрения, а в некоторых ситуациях, наоборот, более точное СИ может быть удобнее и проще в эксплуатации.

При разработке автоматизированной системы не существует проблемы вывода всех СИ, которые подходят для заданных требований. При этом возникает вопрос о том, как группировать подходящие СИ по итогам подбора, какие параметры выделять в качестве основы для группирования СИ.

Поскольку подходящих СИ чаще всего оказывается несколько, встает вопрос об оптимальности выбора. Понятие оптимальности выбора не рассмотрено в методических указаниях, поэтому возникает необходимость проведения исследования на эту тему с целью выделения параметров, определяющих оптимальность выбора СИ при конкретных условиях проведения измерений.

В методических рекомендациях выбор СИ осуществляется исходя из требований точности размера детали (калитета) и номинального размера. Важным недостатком при этом является то, что особенности конструкции детали и СИ не учитываются.

Рассмотрим процесс выбора СИ согласно методическим рекомендациям на примере измерения с помощью штангенциркуля.

В рекомендациях учитывается только погрешность измерения штангенциркулем исходя из цены деления. В то же время при некоторых измерениях данным СИ, к примеру, измерениях диаметра цилиндрической поверхности, необходимо учитывать вылет губок штангенциркуля. Если диаметр измеряемой детали будет больше, чем $2 \cdot a$ (рис. 1), то проведение измерения невозможно. В качестве примера также можно привести измерения ступенчатых отверстий, при которых важным является размер «с» (рис. 1). Если измеряемый параметр будет находиться на глубине, превышающей размер «с», то проведение измерения также невозможно.

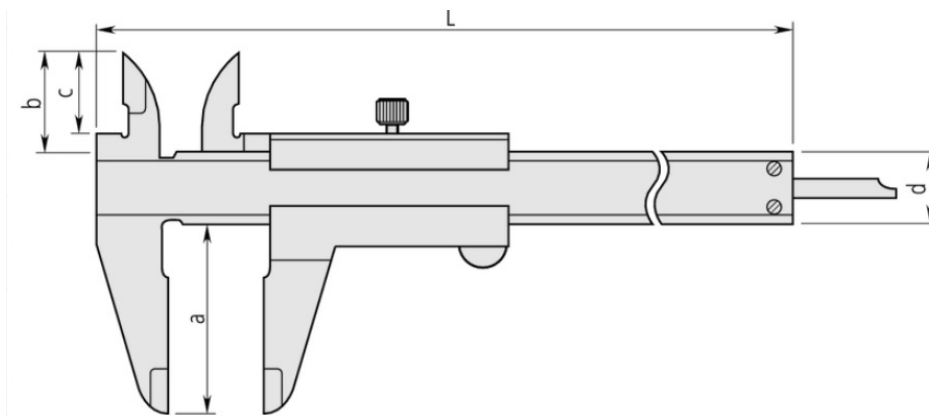


Рис. 1. Эскиз штангенциркуля

На данном этапе существует огромное количество специализированных СИ, значительно расширяющих функциональные возможности типовых СИ. Появилось огромное количество специальных СИ, которые имеют конструкцию, позволяющую проводить измерения в труднодоступных местах.

В связи с этим возникает необходимость учета специфики измеряемой поверхности и ограничений, накладываемых на особенности конструкции выбираемого средства измерения. Для этого необходимо решить задачи выделения и классификации параметров измеряемой поверхности и СИ, которые могут повлиять на дальнейший выбор СИ.

Для приведенного выше примера измерений штангенциркулем определяющими параметрами объекта измерений будут: вид измеряемого размера (наружный, внутренний, выступ, глубина); форма измеряемой поверхности (цилиндрическая, плоская, сферическая); номинальный размер; наличие и размеры ограничивающих поверхностей. В качестве параметров средства измерений, способных повлиять на выбор СИ, будут выступать: тип СИ, диапазон измерений, погрешность измерений, особенности конструкции СИ (в данном случае высота губок).

Анализ утвержденной в виде нормативного документа методики выбора универсальных СИ линейных размеров, а также ряда ее реализующих автоматизированных систем показал, что на данном этапе проблема автоматизации выбора средств измерений линейных размеров до конца не решена. Существует необходимость создания новой автоматизированной системы, которая будет основываться не на обезличенных средствах измерения, а на реально существующих, включать в себя блок специализированных СИ. Итогом работы системы должен быть полный список СИ, подходящих для измерения с рекомендациями по оптимальности выбора СИ из приведенного списка. Автоматизированная система должна содержать дополнительный модуль, позволяющий определять специфику измеряемой поверхности и ограничения, накладываемые на особенности конструкции выбираемого СИ. Выполнение указанных требований позволит значительно снизить неопределенность выбора СИ при увеличении производительности работ.

Библиографический список

1. *Капитанов, А. В.* Автоматизированные управленческие системы в промышленности / А. В. Капитанов, В. И. Мишатин, Е. Г. Семячкова // Вестник МГТУ Станкин. – 2012. – Т. 2, № 1. – С. 82–84.
2. *Гришина, Т. Г.* Факторы, влияющие на оперативность управления технологическими системами / Т. Г. Гришина // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 3. – С. 167–170.
3. *Гришина, Т. Г.* Обоснованность принятия решений при управлении автоматизированным производством / Т. Г. Гришина // Вестник МГТУ Станкин. – 2012. – № 3. – С. 145–148.
4. Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении / С. Н. Григорьев, В. И. Телешевский, А. В. Глубоков, С. Е. Педь, С. В. Глубокова // Измерительная техника. – 2012. – № 5. – С. 27–29.
5. *Телешевский, В. И.* Измерительная информатика в машиностроении / В. И. Телешевский // Вестник МГТУ Станкин. – 2008. – № 1. – С. 33–38.
6. *Телешевский, В. И.* Построение компьютеризированной системы метрологического обеспечения производства на базе CALS-технологий / В. И. Телешевский, П. Н. Емельянов, Е. А. Пашкин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 5. – С. 42–47.
7. *Глубоков, А. В.* Автоматизированная система метрологического обеспечения производства / А. В. Глубоков, Е. В. Ромаш, П. В. Панфилов, С. В. Глубокова // Вестник МГТУ Станкин. – 2018. – № 3. – С. 70–75.
8. *Телешевский, В. И.* Автоматизированный выбор методов и средств измерения отклонений расположения / В. И. Телешевский, А. В. Глубоков, С. В. Глубокова // Измерительная техника. – 2012. – № 6. – С. 30–33.
9. *Глубокова, С. В.* Применение нейронных сетей в задачах выбора методов измерений отклонений ориентации геометрических элементов деталей / С. В. Глубокова // Вестник МГТУ Станкин. – 2014. – № 2 (29). – С. 63–67.
10. *Глубокова, С. В.* Построение нейросетевой автоматизированной системы выбора методов измерений отклонений ориентации поверхностей детали : дис. ... канд. техн. наук / Глубокова С. В. – М., 2015. – 157 с.
11. ГОСТ 8.051-81. Погрешности, допускаемые при измерении размеров от 1 до 500 мм. – М. : Издательство стандартов, 1982. – 10 с.
12. РД-50-98-86. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 83 с.

13. *Телешевский, В. И.* Повышение точности измерений линейно-угловых размеров изделий в интеллектуальной компьютерной микроскопии / В. И. Телешевский, А. В. Шулепов, Е. М. Роздина // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 4. – С. 35–38.
14. *Телешевский, В. И.* Методы повышения точности линейных измерений на измерительных микроскопах с помощью цифровой обработки оптических изображений / В. И. Телешевский, А. В. Шулепов, А. П. Есин // Вестник МГТУ Станкин. – 2009. – № 1. – С. 102–107.
15. *Емельянов, П. Н.* Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ / П. Н. Емельянов, С. Е. Педь, И. Е. Холин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – Т. 10, № 8. – С. 68–73.

Глубоков Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных измерительных систем
и технологий,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
(Россия, г. Москва, Вадковский пер., 1)
E-mail: al-glubokov@yandex.ru

Glubokov Alexandr Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information measuring systems
and technologies,
Moscow State Technological University "STANKIN"
(1 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Ястребова Татьяна Сергеевна

аспирант,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
(Россия, г. Москва, Вадковский пер., 1)
E-mail: tatiana.yastrebova.ar.2013@yandex.ru

Yastrebova Tatiana Sergeevna

postgraduate student,
Moscow State Technological University "STANKIN"
(1 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

УДК 681.518.3

Глубоков, А. В.

Проблемы автоматизации выбора универсальных средств измерений линейных размеров /
А. В. Глубоков, Т. С. Ястребова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). –
С. 37–42. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-6.

О. С. Филатова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ В ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДЕ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

O. S. Filatova

DETERMINATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC SENSORS OF DYNAMIC PRESSURES IN GAS-MEDIUM ON THE SHOCK TUBE OF HIGH PRESSURE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Решается задача определения динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков динамических давлений в газобразной среде на ударной трубе высокого давления. Целью работы является разработка прямого метода оценки динамических характеристик пьезодатчиков путем регистрации реакции датчика на перепады давления газа с дальнейшим программным расчетом амплитудно-частотной характеристики и экспериментальным определением периода и собственной частоты колебаний датчика. **Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи используется экспериментальная установка, основу которой составляет ударная труба высокого давления, формирующая единичные ступенчатые воздействия, поступающие на вход датчика, установленного в ее торце. Расчет амплитудно-частотной характеристики датчика проводится программным способом на основе информации об экспериментальной переходной характеристике. **Результаты и выводы.** Представлена методика определения динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков в воздушной среде на ударной трубе высокого давления. Проведен программный расчет амплитудно-частотной характеристики по данным о переходной характеристике. Экспериментально определены значения периода и частоты собственных колебаний пьезоэлектрических датчиков. Предложен метод, позволяющий уменьшить погрешность при проведении измерений динамических процессов.

A b s t r a c t. Background. The problem of determining the dynamic characteristics of piezoelectric sensors of dynamic pressures in a gas-medium on a high-pressure shock tube is solved. The aim of this work is to develop a direct method for estimating the dynamic characteristics of piezoelectric sensors by registering the sensor response to gas pressure drops with further software calculation of the amplitude-frequency characteristic and experimentally determining the period and natural frequency of the sensor oscillations. **Materials and methods.** To solve this problem, an experimental setup is used, which is based on a high-pressure shock tube that forms single step influences that come to the input of a sensor installed at its end. The calculation of the amplitude-frequency characteristics of the sensor is carried out in a software way based on information about the experimental step response. **Results and conclusions.** A method for determining the dynamic characteristics of piezoelectric sensors in air on a high-pressure shock tube is presented. A software calculation of the amplitude-frequency characteristic according to the data on the step response is carried out. The values of the period and the natural frequency of piezoelectric sensors were experimentally determined. The proposed method allows to reduce the error when measuring dynamic processes.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пьезоэлектрический датчик, переходная характеристика датчика, динамическая характеристика датчика, ударная труба высокого давления, амплитудно-частотная характеристика датчика, собственная частота датчика.

Key words: piezoelectric sensor, step response of the sensor, dynamic response of the sensor, high-pressure shock tube, amplitude-frequency response of the sensor, natural frequency of the sensor.

Введение

Абсолютное большинство датчиков характеризуется как статическими, так и динамическими характеристиками (ДХ). Статические характеристики дают оценку параметрам датчика в установившемся состоянии. По ним определяют порог чувствительности, коэффициент преобразования и т.д. Динамические характеристики датчика проявляются в том, что на его выходной сигнал влияют значения входного сигнала и любые изменения этих значений во времени. ДХ оценивают показатели качества переходных процессов, к числу которых относят: время переходного процесса, дающее представление о быстродействии датчика; перерегулирование, показывающее, на сколько динамическая ошибка больше по сравнению с установившимся состоянием; степень колебательности и т.д.

Потребность в измерительных устройствах с наименьшими искажениями выходного сигнала порождает повышенный интерес к оценке динамических характеристик датчиков, поскольку и заказчики, и разработчики заинтересованы в средствах измерения с такими ДХ, при которых при известном характере входного сигнала динамические погрешности не превосходили бы допустимых значений. Именно поэтому необходимы новые и усовершенствованные методы их оценки.

Выделяют следующие методы определения ДХ датчиков:

- экспериментальный;
- аналитический;
- экспериментально-аналитический.

Экспериментальные методы реализуются с помощью прямых методов определения ДХ средств измерений (СИ) и требуют использования системы или установки для проведения соответствующего эксперимента.

Аналитические методы предусматривают построение или разработку математической модели процессов, происходящих в СИ во время измерения. Как правило, это система дифференциальных уравнений, порядок которой зависит от степени детализации описания процессов, происходящих в СИ. Недостатками аналитических методов являются невысокая точность и достоверность определения ДХ СИ, вызванная невозможностью полного математического описания всех физических процессов, происходящих в исследуемом СИ в процессе его эксплуатации, поэтому аналитические методы применяются в основном для прогнозирования ДХ средства измерения на этапе его разработки и проектирования и (или) исследования поведения ДХ в зависимости от вносимых конструктивных изменений.

Наибольшее распространение получили экспериментально-аналитические методы определения ДХ СИ, которые используют соответствующее испытательное оборудование (систему или установку для экспериментального определения ДХ СИ) и методы обработки экспериментальных ДХ.

Учитывая, что датчик эксплуатируется в условиях воздействия различных сред (жидких, газообразных), возникает проблема оценки ДХ датчиков. В статье предложен один из экспериментально-аналитических методов определения ДХ датчиков в газообразной среде на ударной трубе высокого давления (УТВД).

Методика определения динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков на ударной трубе высокого давления

На УТВД проводится определение переходной характеристики (ПХ) прямым методом – путем регистрации реакции датчика на перепад давления газа амплитудой до 6–7 МПа, при этом датчик установлен в торце УТВД.

По графику ПХ, получаемому в ходе испытаний, определяются предварительные значения периода T_0 и нулевой частоты f_0 датчика. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) рассчитывается на основе информации об экспериментальной ПХ, хранящейся на персональном компьютере (ПК). Важность определения АЧХ состоит в отображении относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении его частоты. Как правило, для описания ДХ датчиков используется граничная частота, соответствующая снижению выходного сигнала на 3 дБ, показывая, на какой частоте происходит 30-процентное уменьшение выходного сигнала.

Схема испытательной установки приведена на рис. 1.

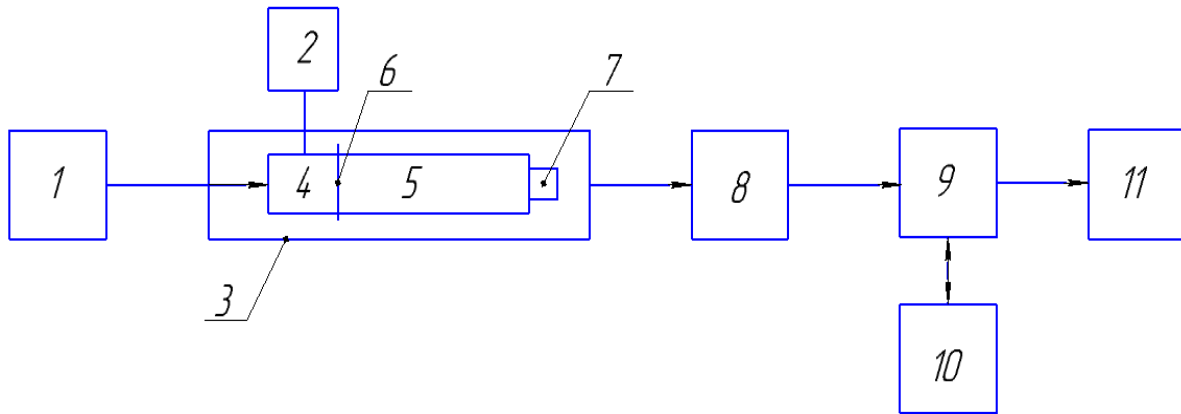


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – система подачи высокого давления воздуха; 2 – манометр; 3 – ударная труба высокого давления; 4 – камера высокого давления (КВД); 5 – камера низкого давления (КНД); 6 – мембрана; 7 – испытуемый датчик; 8 – усилитель; 9 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 10 – ПК; 11 – запоминающий осциллограф

В ходе испытаний регистрируются импульсные переходные характеристики (ИПХ) датчиков. УТВД формирует ступенчатое воздействие, реакцией на которое является переходная характеристика, описываемая следующим выражением:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq 0; \\ 1, & \text{если } t > 0. \end{cases}$$

Здесь $h(t)$ – переходная характеристика датчика.

Импульсная и переходная характеристики связаны интегральной зависимостью

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dh(t)}{dt} dt = h(t) = h(t) \Big|_{-\infty}^{\infty} = 1,$$

где $\delta(t)$ и $h(t)$ – импульсная и переходная характеристики датчика соответственно.

После нахождения ИПХ определяются значения периода T_0 и частоты f_0 их собственных колебаний. Графики переходных характеристик, полученных с испытуемого датчика ВТ 306 в ходе эксперимента, приведены на рис. 2, а, б.

Отклик пьезоэлектрических датчиков на ударную волну имеет сложный спектр. Он состоит из ряда низкочастотных и высокочастотных составляющих. Низкочастотные составляющие чаще всего не проявляются при определении АЧХ на пульсаторах и являются следствием волновых процессов в многослойной конструкции пьезоэлектрического датчика. Поэтому при определении рабочего диапазона частот датчика, предназначенного для измерения переменного пульсирующего давления, их не следует принимать во внимание и использовать только высокочастотные пики. Однако при измерении импульсных и ударно-волновых давлений низкочастотные пики следует учитывать при анализе измерительной информации или при определении рабочего диапазона частот.

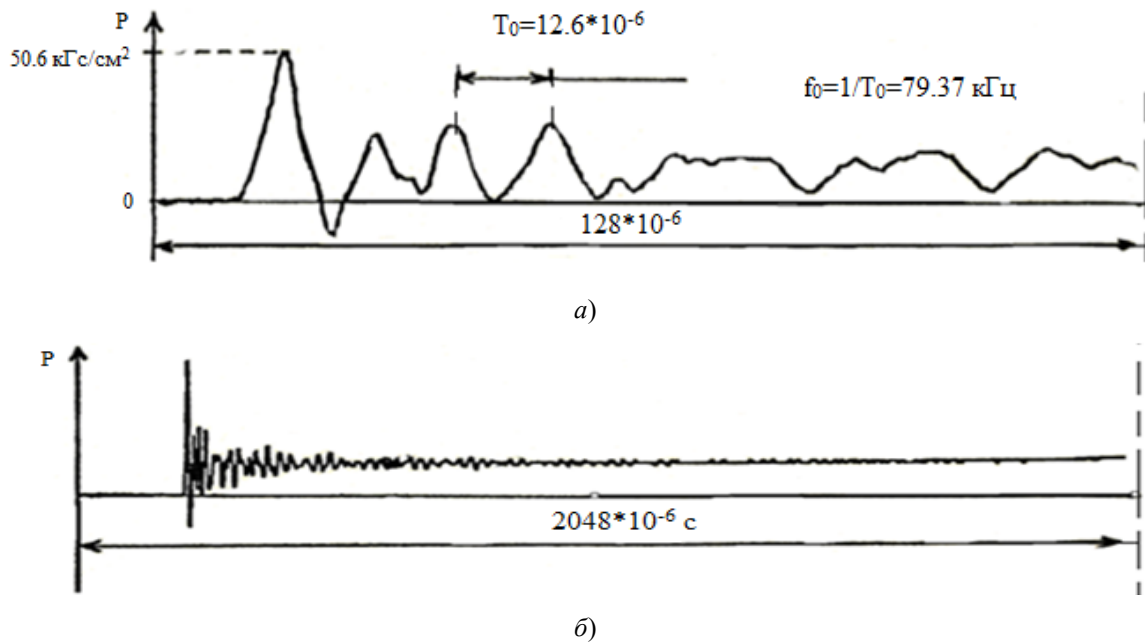


Рис. 2. Характеристики, снятые с испытуемого датчика ВТ 306 экспериментальным способом: а – полная реализация; б – начальный участок

Расчет АЧХ по полученным значениям ПХ проводится программным способом. Основу программного расчета составляет одно из положений теории линейных систем, согласно которому выходной сигнал системы может быть представлен как свертка входного сигнала и импульсной характеристики системы. В частотной области это соотношение преобразуется в произведение спектральных характеристик:

$$Y(f) = H(f)X(f). \quad (1)$$

Здесь $Y(f)$, $H(f)$, $X(f)$ – фурье-образы выходного сигнала $y(t)$, импульсной характеристики системы $h(t)$ и входного сигнала $x(t)$ соответственно.

Для определения значения частотной характеристики из выражения (1) выводится соотношение

$$G_{yy}(f) = |H(f)|^2 G_{xx}(f), \quad (2)$$

где $G_{yy}(f)$ и $G_{xx}(f)$ – спектральные плотности входного и выходного процессов; $H(f)$ – искомая частотная характеристика.

Выражение (2) дает простой алгоритм определения передаточной функции системы. Для этого достаточно взять в качестве входного сигнал с равномерным спектром в частотной области (или дельта-импульс во временной). Тогда частотный спектр выходного сигнала совпадет с частотным спектром исследуемого датчика.

Программа включает в себя сервисные операции по считыванию отсчетов ПХ, формированию массивов и т.д., вычислительные операции преобразования Фурье. Учитывая, что вместо непрерывного сигнала используются его цифровые отсчеты, в программу заложено обратное дискретное преобразование Фурье, определяемое выражением

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn},$$

где $n = 0, \dots, N-1$, N – количество значений сигнала, измеренных за период; x_n – измеренные значения сигнала в дискретных временных точках; X_k – комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, составляющих исходные сигналы (обозначают одновременно амплитуду и фазу); k – частота k -й синусоиды, измеренная в колебаниях за период.

Программа предусматривает операции по формированию и выводу результатов расчета на дисплей и память ПК.

Заключение

Предложен метод определения динамических характеристик датчиков в газообразной среде на ударной трубе высокого давления с наименьшими затратами. Экспериментально получены переходные и частотные характеристики, а также частоты собственных колебаний датчиков. Определение ДХ пьезоэлектрических датчиков динамических давлений позволяет уменьшить погрешность при проведении измерений динамических процессов.

Библиографический список

1. *Авдеева, О. В.* Основы управления техническими системами (Теория линейных систем) : учеб. пособие / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 246 с.
2. *Бушуев, О. Ю.* Экспериментальная оценка динамических характеристик тензопреобразователей давления / О. Ю. Бушуев, А. С. Семенов, А. Л. Шестаков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 88–97.
3. *Мясникова, Н. В.* Система для исследования характеристик датчиков динамического давления / Н. В. Мясникова, А. П. Панов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Контроль. Управление. – 2013. – № 4 (6). – С. 32–36.
4. *Бушуев, О. Ю.* Исследование динамических характеристик тензометрического преобразователя давления с целью диагностики его состояния / О. Ю. Бушуев, А. С. Семенов, А. О. Чернявский // Датчики и системы. – 2010. – № 4. – С. 53–68.
5. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Бастрегин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.

Филатова Ольга Сергеевна

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

Filatova Olga Sergeevna

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

УДК 681.586.773

Филатова, О. С.

Определение динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков динамических давлений в газообразной среде на ударной трубе высокого давления / О. С. Филатова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 43–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-7.

М. С. Ларкин, А. В. Поспелов

КОМПЕНСАЦИЯ ВРЕМЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ ТАНГАЖА И КРЕНА

M. S. Larkin, A. V. Pospelov

COMPENSATION OF TEMPORARY INSTABILITY OF SHIFT OF ZERO DEVICE OF MEASUREMENT OF PITCH AND ROLL

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрена конструкция устройства измерения углов тангажа и крена производства АО «НИИФИ». Одной из проблем устройства является неустойчивость выходных значений в зависимости от времени. Предметом исследования является временная неустойчивость устройства измерения углов тангажа и крена. **Материалы и методы.** Рассмотрены варианты уменьшения временной неустойчивости устройства измерения углов тангажа и крена за счет изменения конструкции устройства, оснастки и коррекции выходных значений в микроконтроллере, входящем в конструкцию устройства. **Результаты.** Расчетным и опытным путем было подтверждено уменьшение временной неустойчивости устройства. **Выводы.** Подтверждено снижение временной неустойчивости устройства измерения углов тангажа и крена за счет изменения конструкции устройства, оснастки и коррекции выходных значений.

A b s t r a c t. Background. The design of the device of measurement of corners of pitch and a list of production of JSC "RI PM" is considered. One of problems of the device is the instability of output values depending on time. An object of research is the temporary instability of the device of measuring device pitch and roll angles. **Materials and methods.** The option of reduction of temporary instability of the device of measuring device pitch and roll angles due to change of a design of the device, the equipment and correction of output values in the microcontroller entering a device design are considered. **Results.** Settlement reduction of temporary instability of the device has also been by practical consideration confirmed. **Conclusions.** Decrease in temporary instability of the device of measuring device pitch and roll angles due to change of a design of the device, the equipment and correction of output values is confirmed.

К л ю ч е в ы е с л о в а: устройство измерения углов тангажа и крена, устройство измерения углов тангажа и крена, временная неустойчивость.

Key words: flow measuring device pitch and roll angles, device of measurement of corners of pitch and list, temporary instability.

Управление движением летательных аппаратов и объектов, устанавливаемых на подвижные шасси, осуществляется с помощью систем горизонтирования и наведения. Процессы установки объекта в заданное положение называют горизонтированием, а измерения траектории подвижного объекта, направленные на уменьшение расстояния между объектом и целью, – наведением. В процессе эксплуатации данные измерений, полученные системой управления положением платформы, используются для компенсации начальных ошибок и определения абсолютных координат подвижного объекта. Принципы автономного наведения применяются также для формирования команд для рулей управления летательных аппаратов [1, 2]. Неотъемлемой частью систем горизонтирования и наведения являются инерциальные системы,

предназначенные для измерения углов крена, тангажа, угловой скорости и формирования управляющих воздействий для устройств установки платформ в заданное положение. Инерциальные системы наведения могут иметь различный состав, но в основном включают в себя гировертикали на основе трех акселерометров, датчики угловой скорости и вычислительные блоки. При этом эффективность работы систем напрямую связана с точностью измерения углов тангажа и крена [3, 4].

Системы горизонтирования для наземных условий эксплуатации строятся на основе двух акселерометров уравнивающего преобразования [4, 5]. В отличие от традиционных датчиков угла использование акселерометра не требует механической связи между чувствительным элементом и подвижным основанием. Акселерометры измеряют углы наклона конструкций относительно вектора гравитационного ускорения g на основе энергетического взаимодействия с ним (рис. 1). При измерении углов тангажа и крена два акселерометра устанавливаются на платформу измерительными осями X перпендикулярно. При этом они измеряют проекции вектора гравитационного ускорения, равные $g_\theta = g \sin \theta$ и $g_\gamma = g \sin \gamma$. Для каждого из них выходной сигнал без учета смещения нуля будет равен

$$U_{\text{вых}(\theta)} = K_g \arcsin \frac{g_\theta}{g}, U_{\text{вых}(\gamma)} = K_g \arcsin \frac{g_\gamma}{g}.$$

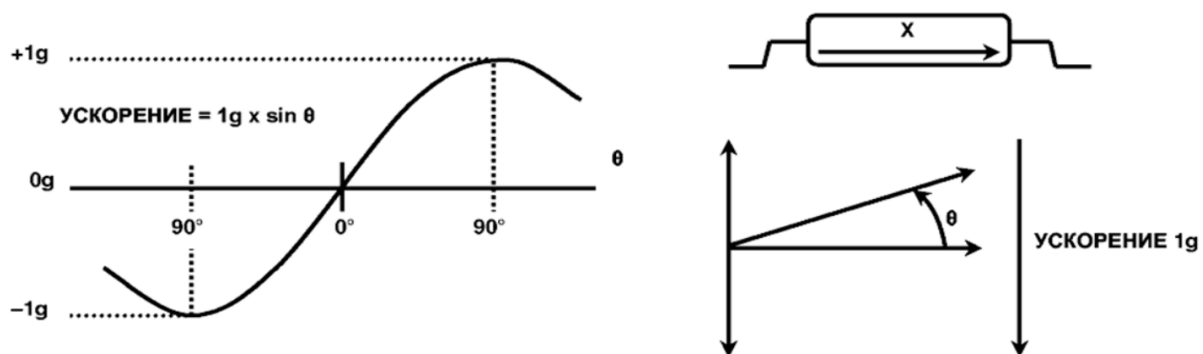


Рис. 1. Измерение крена и тангажа с использованием акселерометра

Устройство горизонтирования разработки АО «НИИФИ» – устройство измерения углов тангажа и крена УИТК – состоит из двух акселерометров и микроконтроллера, применяемого для организации цифрового канала приема и передачи данных. Производится два варианта устройства с различным диапазоном измерения: 3° и 6° . Основное требование к устройству: значения абсолютной среднеквадратической погрешности измерений для каналов тангажа и крена должны быть не более ± 20 угл. мин для исполнения с диапазоном измерения 3° и ± 40 угл. мин для исполнения с диапазоном 6° .

Одним из контролируемых параметров устройства является стабильность смещения нуля устройства во временном диапазоне. Для произведения испытаний устройство устанавливается на установочную плоскость, закрепленную в делительной головке в камере тепла и холода (в горизонтальном положении), и производится запись выходных значений на жесткий диск ПК, начиная с момента включения в течение 30 мин.

При проведении испытаний было выявлено, что в устройстве происходит скачок значения нуля при запуске устройства, а также изменяется ноль в течение заданного промежутка времени ($\approx 8,4$ угл. мин). График зависимости смещения нуля от температуры представлен на рис. 2.

Для компенсации нестабильности самым подходящим вариантом было применение таймера в конструкции устройства. Получение значения времени работы после момента включения позволяет анализировать и корректировать отклонение значений, начиная с момента включения и в течение всего времени работы устройства. Наличие встроенного в микроконтроллер таймера позволяет корректировать нестабильность смещения нуля программным путем без внесения изменений в конструкцию устройства. Данная корректировка требует выявления зависимостей смещения нуля от времени. Проверка на допустимую точность коррекции смещения нуля подтверждалась пересчетом исходных данных по выведенным функциям.

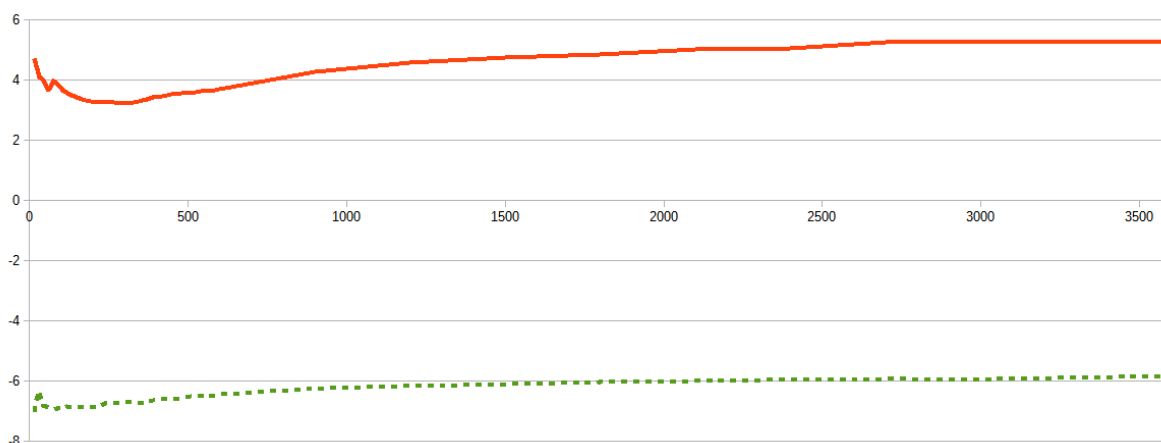


Рис. 2. Зависимость смещения нуля в течение 30 мин:
 ось X – значение времени (секунда); ось Y – смещение нуля (угл. секунда);
 — смещение нуля по каналу крена; ■ ■ ■ — смещение нуля по каналу тангажа

Для получения зависимости было произведен первичный замер, по которому построены графики. Полученные кривые подвергаются аппроксимации полиномом со степенью, позволяющей более значительно уменьшить разность между максимальным и минимальным значением, и были подставлены в формулу

$$MO = MO_0 - (at + b),$$

где MO – пересчитанное математическое ожидание для заданной температуры; MO_0 – полученное математическое ожидание с акселерометра (до преобразования); $at + b$ – полином, наиболее приближенный к исходным данным, зависящий от времени.

В первом устройстве с диапазоном измерения 3° аппроксимация позволила повысить точность коррекции смещения нуля до $\approx 0,54$ угл. мин, что удовлетворяет требованиям к устройству. График и аппроксимирующие кривые для первого устройства представлены на рис. 3.

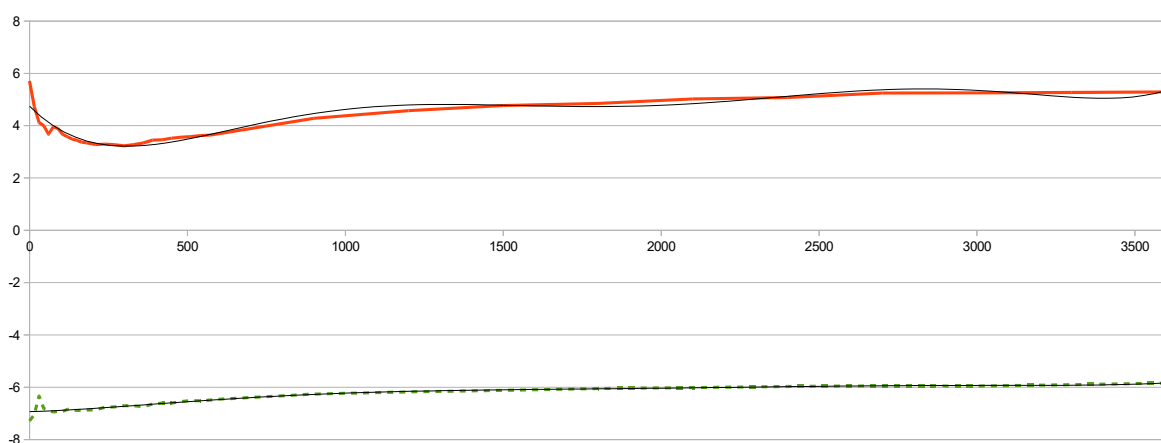


Рис. 3. Зависимость смещения нуля от времени для устройства № 1

Для подтверждения возможности применения рассмотренного метода для других устройств данный алгоритм был применен на втором устройстве с диапазоном измерения 6° . Данная аппроксимация полиномом 2-й степени позволила наиболее минимизировать разницу между максимумом и минимумом, это повысило точность коррекции смещения нуля до $\approx 0,66$ угл. мин, данное отклонение полностью удовлетворяет требованиям к устройству. График разбиения и аппроксимирующие кривые для второго устройства представлены на рис. 4.

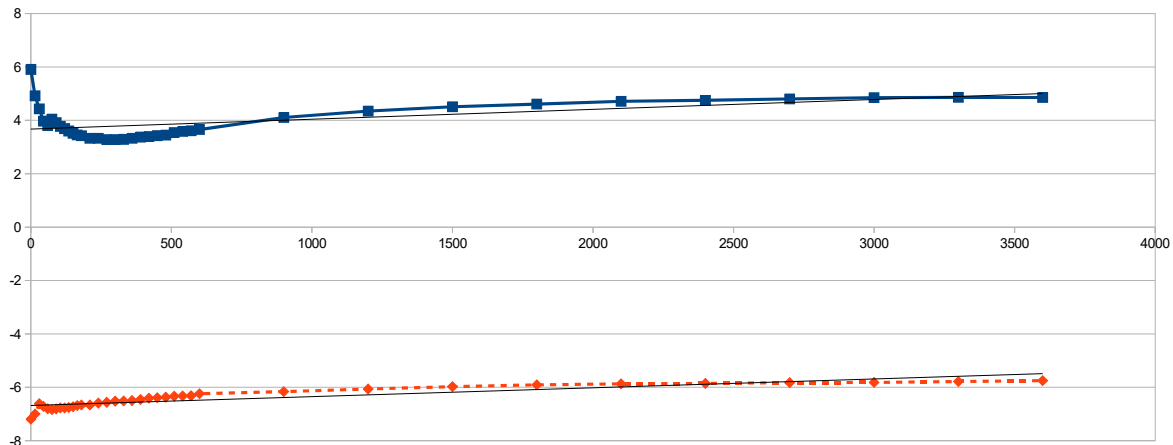


Рис. 4. Зависимость смещения нуля от времени для устройства № 2

Для подтверждения рассмотренного метода был применен практический подход, для этого в программу микроконтроллера были записаны коэффициенты коррекции зависимости выдаваемого значения от времени и произведены замеры выдаваемых устройством значений в течение 30 мин. Практический метод подтвердил расчетный с максимальным отклонением от него не более чем на 0,5 угл. мин, что позволяет применять в дальнейшем метод временной компенсации полиномом n -й степени на других устройствах для коррекции смещения нуля.

Выводы

Исследования, отработка и внедрение предложенных путей совершенствования устройства измерения углов тангажа и крена позволило максимально приблизить смещение нуля к минимуму, что делает стабильным устройство при изменении температуры окружающей среды и повышает точность измерений.

Библиографический список

1. Мокров, Е. А. Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники / Е. А. Мокров, А. А. Папко. – Пенза : ПАИИ, 2004. – С. 164.
2. Куприянов, М. С. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – 2-е изд., перераб. и доп. / М. С. Куприянов, Б. Д. Матюшкин. – СПб. : Политехника, 2000. – С. 592.
3. ГОСТ 32108–2013. Измерения вибрации, передаваемой машиной через упругие изоляторы. Двигатели внутреннего сгорания поршневые высокоскоростные и среднескоростные.
4. Лушпа, И. Л. Модели интенсивности отказов виброизоляторов для электронных средств / И. Л. Лушпа, В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 50–57.
5. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации.

Ларкин Максим Сергеевич

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

Larkin Maksim Sergeevich

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

Поспелов Алексей Владимирович

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

Pospelov Aleksey Vladimirovich

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

УДК 531.717.35

Ларкин, М. С.

Компенсация временной нестабильности смещения нуля устройства измерения углов тангажа и крена УИТК / М. С. Ларкин, А. В. Поспелов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 48–52. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-8.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗМЕРЕНИЯХ

УДК 004.934

DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-9

А. К. Алимуратов, Ю. С. Квитка, П. П. Чураков, А. Ю. Тычков

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ОСНОВНОГО ТОНА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДЕКОМПОЗИЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ

A. K. Alimuradov, Yu. S. Kvitka, P. P. Churakov, A. Yu. Tychkov

INCREASING THE ACCURACY OF MEASURING THE PITCH FREQUENCY BASED ON THE OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF DECOMPOSITION OF SPEECH SIGNALS ON EMPIRICAL MODES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается актуальный вопрос – повышение точности измерения частоты основного тона речевых сигналов. Объектом исследования является декомпозиция речевых сигналов на детерминистические и стохастические частотные составляющие с применением различных методов. Предметом исследования является улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом. Целью исследования является оптимизация процесса декомпозиции для повышения точности измерения частоты основного тона за счет улучшения частотно-избирательных свойств. **Материалы и методы.** Для декомпозиции речевых сигналов на частотные составляющие применялась адаптивная технология анализа нестационарных сигналов – улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом. Исследования и анализ данных были выполнены в среде математического моделирования © Matlab (MathWorks). **Результаты.** Кратко представлен обзор известных методов декомпозиции, основанных на преобразовании Фурье и вейвлет-преобразовании. Рассмотрены их преимущества и недостатки, выявлены перспективы применения метода декомпозиции на эмпирические моды. Представлено подробное математическое описание разновидностей декомпозиций и подчеркнута необходимость оптимизации улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды с адаптивным шумом. Представлен способ оптимизации улучшенной декомпозиции для повышения точности измерения частоты основного тона с кратким математическим описанием. **Выводы.** Проведены исследования способа, направленные для оптимального определения параметров функционирования улучшенной декомпозиции. Показано, что предлагаемый способ на основе улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды с адаптивным шумом успешно решает задачу повышения точности измерения частоты основного тона за счет лучших частотно-избирательных свойств.

A b s t r a c t. Background. The article considers an urgent problem – increasing the accuracy of measuring the pitch frequency of speech signals. The object of research is the decomposition of speech signals on deterministic and stochastic frequency components using various

methods. The subject of research is an improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise. The purpose of research is the optimization of process of decomposition to improve the accuracy of measuring the pitch frequency due to improvement of the frequency-selective properties. **Materials and methods.** For the decomposition of speech signals on frequency components, an adaptive technology for analyzing non-stationary signals -an improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise was used. Research and analysis of the data was performed in the environment of mathematical modeling © Matlab (MathWorks). **Results.** A brief overview of known methods of decomposition based on the Fourier transform and wavelet transform is presented. Their advantages and disadvantages are considered, prospects of applying the empirical mode decomposition method are revealed. A detailed mathematical description of the varieties of decompositions is presented and the need of optimization of improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise is emphasized. A method of optimization of improved decomposition for increasing the accuracy of measuring the pitch frequency with a brief mathematical description is presented. **Conclusions.** The research of the method aimed at optimal determination of the operating parameters for the improved decomposition is carried out. It is shown that the proposed method, based on the improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, successfully solves the problem of increasing the accuracy of measuring the pitch frequency due to the best frequency-selective properties.

К л ю ч е в ы е с л о в а: обработка речевых сигналов, полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом, частота основного тона, оптимизация.

Key words: processing of speech signals, complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, pitch frequency, optimization.

Введение

Речь состоит из вокализованных и невокализованных участков, образующихся в результате периодических и непериодических колебаний голосовых связок. Периодические колебания голосовых связок, частота которых является важным информативным параметром речи, называется частотой основного тона (ЧОТ) [1].

Измерение ЧОТ является одной из наиболее важных задач в обработке речевых сигналов, точность которой определяется временным и частотным разрешением анализа. Выбор определенного способа измерения ЧОТ представляет собой некоторый компромисс между вычислительной сложностью и устойчивостью к ошибкам. Функционально все способы измерения ЧОТ включают в себя три этапа: предварительную обработку, выделение периода и измерение значения ЧОТ [2]. Для повышения точности измерения ЧОТ наибольший интерес представляет этап предварительной обработки, в рамках которого речевой сигнал раскладывается на детерминистические и стохастические частотные составляющие с применением различных методов декомпозиции [1, 2].

Наиболее популярными методами декомпозиции являются методы, основанные на преобразовании Фурье (ПФ) и вейвлет-преобразовании (ВП), которые обладают рядом преимуществ и недостатков [3].

Несмотря на то, что ПФ обладает относительной простотой вычислений и выполняется при довольно общих условиях, существует несколько ограничений, накладываемых на исследуемые речевые сигналы [1, 4]. Сигналы должны быть строго периодическими функциями или содержать так называемые повторяющиеся, не обязательно являющиеся идентичными, фрагменты одной общей природы, так как в противном случае анализ в частотной области является малоэффективным. Для повышения эффективности анализа нестационарных речевых сигналов необходим подход, обладающий свойством адаптивности к каждому конкретному сигналу. Требованию адаптивности удовлетворяет дискретное ВП [1, 5]. В силу особенностей материнского вейвлета появляется возможность адаптивно обрабатывать сигналы путем довольно точного учета локальных временных особенностей. Но главная проблема – сложность выбора материнского вейвлета для решения конкретной задачи из их большого многообразия – полностью не решена [6–9]. Можно использовать автоматический подбор вейвлет-функций на основе априорной информации об анализируемом сигнале, однако эта процедура оказыва-

ется затратной по вычислительным ресурсам, что делает невозможной обработку нестационарных речевых сигналов сложной формы [10].

Исследования методов обработки сигналов [11] выявили перспективность использования адаптивной технологии декомпозиции нестационарных данных – декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ) [12].

Материалы и методы

Декомпозиция на эмпирические моды и ее разновидности

ДЭМ – это адаптивный метод анализа нестационарных сигналов, возникающих в нелинейных системах, который обеспечивает локальное разложение сигнала на быстрые и медленные колебательные функции. В результате разложения исходный сигнал представляется в виде суммы амплитудно- и частотно-модулированных функций – эмпирических мод (ЭМ). Аналитическое выражение ДЭМ выглядит следующим образом:

$$x(n) = \sum_{i=1}^I IMF_i(n) + r_i(n),$$

где $x(n)$ – исходный сигнал; $IMF_i(n)$ – ЭМ; $r_i(n)$ – конечный остаток; $i = 1, 2, \dots, I$ – номер ЭМ; n – дискретный отсчет времени ($0 < n \leq N$), N – количество дискретных отсчетов в сигнале).

В результате разложения речевого сигнала с помощью ДЭМ в одной ЭМ могут оказаться несоизмеримые по амплитудному и частотному масштабам колебательные функции или, наоборот, соизмеримые колебательные функции могут оказаться в разных модах. Это явление называется смешиванием ЭМ вследствие перекрытия масштабно-энергетических пространств мод. Для его снижения предложена множественная ДЭМ (МДЭМ) [13], состоящая в добавлении к исходному сигналу белого шума для создания новых экстремумов функции

$$x_j(n) = x(n) + w_j(n),$$

где $x_j(n)$ – шумовые копии исходного сигнала; $w_j(n)$ – реализации белого шума с нулевой средней единичной дисперсией.

Аналитическое выражение МДЭМ выглядит следующим образом:

$$x_j(n) = \sum_{i=1}^I IMF_{ji}(n) + r_{ji}(n),$$

где $j = 1, 2, \dots, J$ – количество реализаций белого шума.

В результате разложения получаются более регулярные ЭМ с соизмеримыми масштабами колебательных функций. Основной недостаток МДЭМ – декомпозиция не является полной, и каждая шумовая копия исходного сигнала $x_j(n)$ разлагается независимо от других реализаций, а каждый остаток $r_{ji}(n) = r_{j,i-1}(n) - IMF_{ji}(n)$ вычисляется без связи между различными реализациями. Кроме этого, в ЭМ наблюдается остаточный белый шум, а различные реализации шумовых копий порождают разное количество ЭМ, что затрудняет окончательное усреднение.

Другая разновидность ДЭМ – комплементарная МДЭМ [14], которая решает проблему остаточного шума, добавляя и вычитая пары шумов с прямыми и инверсными значениями амплитуды. Однако проблема усреднения остается нерешенной, поскольку разные шумовые копии исходного сигнала также могут производить разное количество ЭМ:

$$\begin{bmatrix} x_j(n) \\ x_j^*(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x(n) \\ w_j(n) \end{bmatrix},$$

где $x_j(n)$ – шумовые копии исходного сигнала; $x_j^*(n)$ – шумовые копии исходного сигнала с инверсными значениями амплитуды шума.

Учитывая эти недостатки, в работе [15] предлагается новый метод, называемый полной МДЭМ с адаптивным шумом (ПМДЭМАШ). Основная идея метода заключается в добавлении к исходному сигналу контролируемого шума для создания новых экстремумов. Первая ЭМ извлекается по методике МДЭМ, усредняя первые моды сигнала с белым шумом:

$$\overline{IMF}_1(n) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J IMF_{j1}(n) = \widetilde{IMF}_1(n).$$

Затем вычисляется первый остаток, независимый от реализации шума:

$$r_1(n) = x(n) - \widetilde{IMF}_1(n),$$

Для дальнейшего извлечения мод к текущему первому остатку добавляется конкретный шум. Этот шум представляет собой ЭМ белого шума, полученную по методике ДЭМ.

Несмотря на вышеупомянутые достоинства метода ПМДЭМАШ, в работе [14] авторы отмечают следующие недостатки данного метода: ЭМ содержат остаточный шум; информативные моды о сигнале при разложении извлекаются «позже», чем при МДЭМ с некоторыми «паразитными» модами на ранних этапах декомпозиции.

В работе [16] авторы решают и предлагают улучшенную ПМДЭМАШ. Суть уменьшения остаточного шума заключается в использовании локальных средних значений вместо значений ЭМ. Метод МДЭМ независимо разлагает каждую реализацию сигнала с шумом, поэтому на первом этапе каждой реализации декомпозиции имеется одно локальное среднее значение и одна мода. Учитывая, что истинная мода может быть определена как разность между текущим остатком и усредненным значением его локальных средних величин, получим следующее выражение:

$$E_1(x(n)) = x(n) - M(x(n)),$$

где $E(\cdot)$ – аппарат извлечения ЭМ методом ДЭМ; $M(\cdot)$ – аппарат, создающий локальное среднее значение применяемого сигнала.

Тогда для первых ЭМ, полученных методами МДЭМ и ПМДЭМАШ, выражение будет иметь следующий вид:

$$\widetilde{IMF}_1(n) = E_1(x_j(n)) = x_j(n) - M(x_j(n)) = x_j(n) - M(x_j(n)),$$

где $\langle \rangle$ – действие усреднения.

Оценивая только локальное среднее значение и вычитая его из исходного сигнала, получим следующее выражение:

$$\widetilde{IMF}_1(n) = x(n) - M(x_j(n)).$$

Суть устранения возникающих паразитных ЭМ на ранних этапах декомпозиции заключается в уменьшении перекрытия масштабно-энергетических пространств первых двух мод.

Алгоритм и математическое описание улучшенной ПМДЭМАШ:

Шаг 1. С помощью аппарата ДЭМ, выражая из формулы $E_1(x_j(n)) = x_j(n) - M(x_j(n))$ локальные средние значения шумовых копий исходного сигнала ($x_j(n) = x(n) + \beta_0 E_1(w_j(n))$), определяется первый остаток $r_1(n) = M(x_j(n))$.

Шаг 2. Для $i = 1$ вычисляется первая мода: $IMF_1(n) = x(n) - r_1(n)$.

Шаг 3. Вычисляется второй остаток как усредненное локальное среднее значение шумовых копий первого остатка $r_1(n) + \beta_1 E_2(w_j(n))$ и определяется вторая мода:

$$\widetilde{IMF}_2(n) = r_1(n) - r_2(n) = r_1(n) - M(r_1(n) + \beta_1 E_2(w_j(n))).$$

Шаг 4. На последующих этапах для $i = 3, \dots, I$ вычисляется i -й остаток

$$r_i(n) = M(r_{i-1}(n) + \beta_{i-1} E_i(w_j(n))).$$

Шаг 5. Вычисляется i -я мода

$$\widetilde{IMF}_i(n) = r_{i-1}(n) - r_i(n).$$

Шаг 6. Переход к шагу 4 для следующего значения i .

Константы $\beta_i = \varepsilon_i \text{std}(r_i(n))$ выбираются таким образом, чтобы получить желаемое отношение сигнал/шум между добавленным шумом и остатком, к которому добавляется шум. Для МДЭМ отношение сигнал/шум добавленного шума и остатка увеличивается на порядок i , поскольку энергия шума в i -м остатке ($i > 1$) является лишь малой энергией шума, добавленного в начале алгоритма. С учетом этого установим β_0 так, чтобы ε_0 было прямо противоположно желаемому отношению сигнал/шум между первым добавленным шумом и анализируемым сигналом. Если мы выражаем отношение сигнал/шум как фактор стандартных отклонений, то $\beta_0 = \varepsilon_0 \text{std}(x(n)) / \text{std}(E_i(w_i(n)))$. Для получения шумовых реализаций с меньшими амплитудами для последних стадий декомпозиции в остальных модах будем воспринимать шум как результат его предварительной обработки ДЭМ, т.е. без их нормализации стандартным отклонением.

Оптимизация процесса декомпозиции на эмпирические моды

Из вышеизложенного следует, что для метода улучшенной ПМДЭМАШ необходима оптимизация параметров функционирования:

- стандартного отклонения амплитуды добавляемого белого шума – N_{std} ;
- числа реализаций декомпозиций (добавлений белого шума) – NR ;
- максимально допустимого количества просеивающих итераций (критерий останова) – $MaxIter$;
- отношения сигнал/шум между добавленным шумом и остатком, к которому добавляется шум – $SNRFlag$ (если значение равно 1, тогда отношение сигнал/шум увеличивается для каждого этапа декомпозиции; если равно 2, то отношение сигнал/шум будет одинаковым для всех этапов).

Предварительные исследования выявили, что значения данных параметров настройки влияют на частотно-избирательные свойства декомпозиции [17].

Для повышения точности измерения ЧОТ требуется улучшение частотно-избирательных свойств декомпозиции. Работа является развитием ранее опубликованных трудов авторов [18, 19] и выполнена при финансовой поддержке по гранту Президента РФ, проект «Исследование информативно-значимых параметров речевых сигналов: поиск уникально новых признаков естественно выраженных эмоций для повышения точности оценки психоэмоционального состояния операторов систем управления с высокой степенью ответственности» № СП-246.2018.5, 2018–2020 гг.

Оптимизация процесса декомпозиции на эмпирические моды

На рис. 1 структурно представлен предложенный авторами способ оптимизации улучшенной ПМДЭМАШ для задачи измерения ЧОТ. Серым цветом обозначены этапы обработки речевого сигнала, синим – этапы оптимизации, зеленым – числовые данные. Суть способа заключается в оптимальной настройке параметров функционирования улучшенной ПМДЭМАШ на основе результатов оценки точности измерения ЧОТ. Для упрощения на рис. 1 представлены не все этапы обработки речевого сигнала. Рассмотрим некоторые этапы способа подробнее.

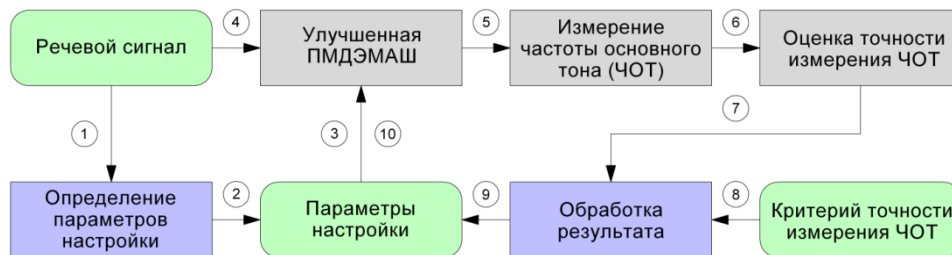


Рис. 1. Способ оптимизации улучшенной ПМДЭМАШ для задачи измерения ЧОТ

Определение параметров настройки заключается в вычислении исходного значения стандартного отклонения амплитуды речевого сигнала для дальнейшего вычисления коэффициента β_0 и установки диапазонов настройки параметров N_{std} , NR и $MaxIter$.

Разложение с помощью улучшенной ПМДЭМАШ обеспечивает [20]:

- адаптивную декомпозицию, так как базисные функции, используемые при разложении, извлекаются непосредственно из исходного речевого сигнала и позволяют учитывать только ему свойственные особенности (скрытые модуляции, области концентрации энергии и т.п.);
- минимальный уровень остаточного белого шума;
- отсутствие паразитных ЭМ, возникающих на ранних этапах декомпозиции вследствие перекрытия масштабно-энергетических пространств мод.

Измерение ЧОТ заключается в выполнении двух этапов: определение ЭМ, содержащей основной тон и непосредственное измерение частоты. В результате разложения речевой сигнал представлен набором ЭМ. Суть определения моды с основным тоном заключается в предположении, что информативные моды имеют большую энергию, чем неинформативные моды [17]. Для сжатия амплитуды сигнала ЭМ в большом динамическом диапазоне применяется логарифмирование энергии:

$$LE_i = \log_2 \sum_{n=1}^N (IMF_i(n))^2,$$

где LE_i – логарифм энергии ЭМ.

Процесс определения ЭМ с основным тоном заключается в последовательном вычислении разницы значений логарифмов энергии по модулю между текущей и последующей модами

$$d = |LE_i - LE_{i+1}|,$$

где d – разница между значениями логарифмов энергии между текущей и последующей ЭМ.

В результате из последовательности полученных значений d большему из них соответствует резкий спад энергии между информативной ЭМ, содержащей основной тон и неинформативной – трендовой [17–19].

Измерение ЧОТ осуществляется с использованием функции измерения мгновенной энергии сигнала – оператора Тигра, обладающего простотой, эффективностью и хорошей восприимчивостью к изменению амплитуды

$$T(n) = (IMF_{i,PF}(n))^2 - IMF_{i,PF}(n-1) \cdot IMF_{i,PF}(n+1),$$

где $T(n)$ – оператор Тигра; $IMF_{i,PF}(n)$ – ЭМ, содержащая основной тон.

Для измерения ЧОТ используются близкорасположенные максимум функции оператора Тигра, между которыми определяется разница в дискретных отсчетах времени, вычисляется период основного тона в секундах и частота в герцах

$$P_0 = \frac{T_{\max}(n+2) - T_{\max}(n)}{f_d}, \quad f_0 = \frac{1}{P_0},$$

где P_0 – основной тон; f_0 – ЧОТ; $T_{\max}(n)$, $T_{\max}(n+1)$ – максимумы функции оператора Тигра; f_d – частота дискретизации.

В качестве критериев оценки используются коэффициенты грубых и мелких ошибок [21]. Коэффициент грубых ошибок (*Gross Pitch Error – GPE*) – безразмерная величина, равная отношению числа фрагментов S_{GPE} с отклонением измеренного значения ЧОТ более чем на 20 % от истинного значения к общему числу фрагментов S_{f_0} , содержащих основной тон:

$$GPE = \frac{S_{GPE}}{S_{f_0}} \cdot 100 \%,$$

Усредненный коэффициент мелких ошибок (*Mean Fine Pitch Error – MFPE*) – безразмерная величина, равная среднему значению отношения разности истинного $f_{0,true}$ и измеренного значений f_0 частоты к истинному значению фрагментов, содержащих основной тон без грубых ошибок:

$$MFPE = \frac{1}{S_{FPE}} \sum_{s=1}^{S_{FPE}} \left| \frac{f_{0,true} - f_0}{f_{0,true}} \right| \times 100 \%,$$

где S_{FPE} – количество фрагментов, содержащих основной тон без грубых ошибок; s – номер фрагмента, содержащего основной тон.

Обработка результатов измерения ЧОТ заключается в сопоставлении полученных значений GPE и $MFPE$ со значениями установленных критериев точности $GPE_{crit.}$ и $MFPE_{crit.}$. Вычисляемая разница данных значений запоминается и осуществляется изменением параметров N_{std} , NR и $MaxIter$ в установленном диапазоне значений. Далее процесс продолжается по циклу, пока значения GPE и $MFPE$ не будут максимально близки к установленным критериям точности $GPE_{crit.}$ и $MFPE_{crit.}$.

Исследование способа оптимизации

Задачей исследования являлось определение оптимальных параметров настройки функционирования улучшенной ПМДЭМАШ для измерения ЧОТ. Исследования проводились с использованием 100 синтезированных мультгармонических сигналов, представляющих сумму нескольких гармонических составляющих основного тона с заранее известной частотой. Учитывая реальные условия, каждый тестовый сигнал подвергался частотному модулированию основного тона ν – изменению частоты в диапазоне 0–2,5 Гц/мс с шагом 0,5 Гц/мс. Исследования и анализ данных были выполнены в среде математического моделирования © Matlab (MathWorks).

В соответствии с методикой исследований параметры функционирования улучшенной ПМДЭМАШ подвергались настройке в следующих диапазонах:

- стандартное отклонение амплитуды добавляемого белого шума – от 0,01 до 0,1 мВ с шагом 0,01 мВ;
- количество реализаций декомпозиций – от 100 до 1000 раз с шагом 100;
- максимально допустимое количество просеивающих итераций – от 100 до 5000 раз с шагом 500;

– отношение сигнал/шум между добавленным шумом и остатком, к которому добавляется шум, если значение равно 1, тогда отношение сигнал/шум увеличивается для каждого этапа декомпозиции; если равно 2, то отношение сигнал/шум будет одинаковым для всех этапов.

Критерии точности измерения ЧОТ: $GPE_{crit.} = 20\%$ и $MFPE_{crit.} = 30\%$. В табл. 1–4 представлены результаты исследований, усредненные для 100 мультгармонических сигналов.

В табл. 1 представлены результаты исследований – зависимости значений GPE и $MFPE$ от N_{std} при первоначальных значениях $NR = 100$, $MaxIter = 100$, $SNRFlag = 1$ и различных значениях ν .

Таблица 1

Зависимость коэффициента грубых ошибок и усредненного коэффициента мелких ошибок от амплитуды добавляемого белого шума

N_{std} , мВ	ν , Гц/мс						Критерии оценки	
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5		
0,01	0	0	0	0	0	0	Значения, %	GPE
	1,82	6,04	7,12	8,44	10,76	11,87		$MFPE$
0,02	0	0	0	0	0	0		GPE
	1,77	5,56	6,91	8,11	10,21	11,56		$MFPE$
0,03	0	0	0	0	0	0		GPE
	1,68	5,31	7,03	8,01	10,43	11,98		$MFPE$
0,04	0	0	0	0	0	0		GPE
	1,46	4,25	5,98	6,81	9,12	10,96		$MFPE$
0,05	0	0	0	0	0	0		GPE
	1,44	4,53	6,11	6,97	8,82	11,20		$MFPE$
0,06	0	0	0	0	0	0		GPE
	1,37	5,27	5,87	6,92	9,21	10,90		$MFPE$
0,07	0	0	0	0	0	0		GPE
	1,31	4,61	5,31	6,39	8,83	10,24		$MFPE$
0,08	0	0	0	0	0	0		GPE
	1,21	2,65	3,82	5,34	7,65	9,82		$MFPE$
0,09	0	0	0	7,90	8,41	9,24		GPE
	1,64	2,9	4,25	6,71	8,77	12,65		$MFPE$
0,10	0	0	5,49	8,10	9,12	12,35		GPE
	2,75	4,67	6,39	8,25	11,35	17,68		$MFPE$

Примечание: Для малых значений $N_{std} = 0,01 \dots 0,08$ мВ $GPE = 0$.

В табл. 2 представлены результаты исследований – зависимость значений $MFPE$ от NR при оптимальном значении $N_{std} = 0,08$, первоначальных $MaxIter = 100$, $SNRFlag = 1$ и различных ν . Учитывая, что при оптимальном значении $N_{std} = 0,08$ коэффициент грубых ошибок равен нулю, в дальнейшем исследования проводились без вычисления GPE .

Таблица 2

Зависимость усредненного коэффициента мелких ошибок
от количества реализаций декомпозиций

NR	ν , Гц/мс						Критерий оценки	
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5		
100	1,21	2,65	3,82	5,34	7,65	9,82	Значение, %	$MFPE$
200	1,20	2,54	3,77	5,12	7,36	9,45		
300	1,18	2,53	2,75	5,02	7,35	9,39		
400	1,17	2,51	3,72	4,96	7,32	9,34		
500	1,15	2,49	3,65	4,83	7,29	9,27		
600	1,13	2,47	3,62	4,79	7,21	9,19		
700	1,12	2,41	3,56	4,75	7,12	9,12		
800	1,11	2,34	3,45	4,67	7,07	9,05		
900	1,10	2,21	3,37	4,64	6,94	8,97		
1000	1,09	2,13	3,21	4,72	6,87	8,91		

В табл. 3 представлены результаты исследований – зависимость значений $MFPE$ от $MaxIter$ при оптимальных значениях $N_{std} = 0,08$, $NR = 1000$, первоначальном значении $SNRFlag = 1$ и различных ν .

Таблица 3

Зависимость усредненного коэффициента мелких ошибок
от максимально допустимого количества просеивающих итераций

$MaxIter$	ν , Гц/мс						Критерии оценки	
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5		
100	1,09	2,13	3,21	4,72	6,87	8,91	Значение, %	$MFPE$
500	1,09	2,13	3,21	4,72	6,87	8,89		
1000	1,09	2,13	3,20	4,72	6,87	8,88		
1500	1,09	2,13	3,20	4,71	6,86	8,88		
2000	1,08	2,12	3,19	4,71	6,86	8,87		
2500	1,07	2,12	3,19	4,70	8,85	8,87		
3000	1,07	2,12	3,18	4,70	6,84	8,87		
3500	1,07	2,11	3,18	4,69	6,83	8,87		
4000	1,07	2,11	3,17	4,69	6,82	8,86		
4500	1,07	2,10	3,17	4,68	6,81	8,86		
5000	1,07	2,10	3,17	4,68	6,81	8,86		

В табл. 4 представлены результаты исследований – зависимость значений $MFPE$ от $SNRFlag$ при оптимальных значениях $N_{std} = 0,08$, $NR = 1000$, $MaxIter = 4500$ и различных ν .

Таблица 4

Зависимость усредненного коэффициента мелких ошибок от отношения сигнал/шум
между добавленным шумом и остатком

$SNRFlag$	ν , Гц/мс						Критерии оценки, %	
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5		
1	1,07	2,10	3,17	4,68	6,81	8,86	Значение, %	$MFPE$
2	1,04	2,07	3,11	4,56	6,74	8,62		

На рис. 2 представлен пример разложения вокализованного участка реального речевого сигнала на ЭМ с использованием улучшенной ПМДЭМАШ при:

- начальных значениях диапазона параметров настройки ($N_{\text{std}} = 0,01$, $NR = 100$ и $MaxIter = 100$);
- конечных значениях диапазона параметров настройки ($N_{\text{std}} = 0,1$, $NR = 1000$ и $MaxIter = 5000$);
- оптимальных значениях параметров настройки ($N_{\text{std}} = 0,08$, $NR = 1000$ и $MaxIter = 4500$).

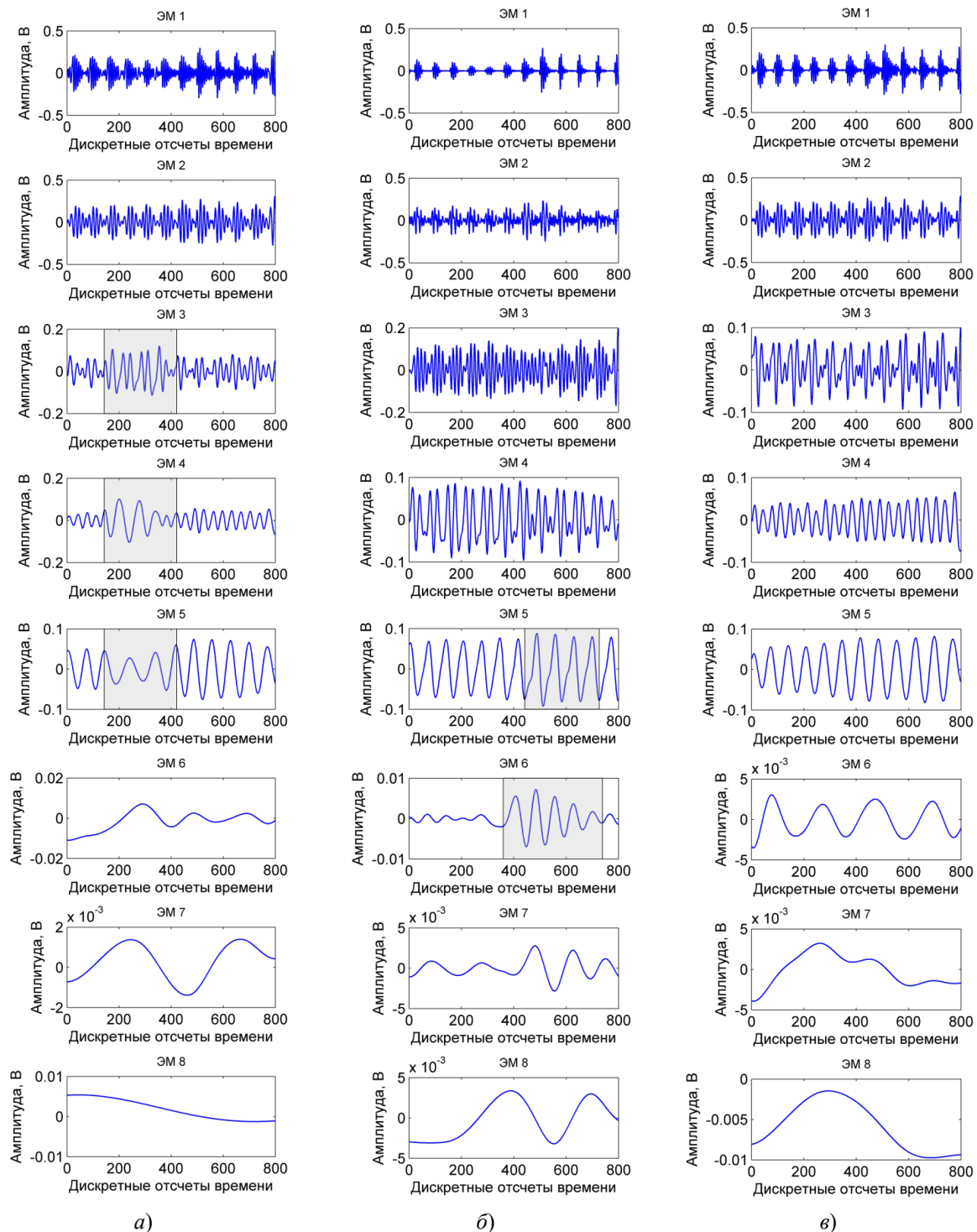


Рис. 2. Результаты разложения вокализованного участка реального речевого сигнала с использованием улучшенной ПМДЭМАШ: а – в начале диапазона; б – в конце диапазона; в – при оптимальных параметрах

Отношение сигнал/шум между добавленным шумом и остатком, к которому добавляется шум, будет одинаковым для каждого этапа декомпозиции, т.е. $SNRFlag = 2$.

На рис. 3 представлено спектральное распределение полученных мод, иллюстрирующее частотно-избирательные свойства метода улучшенной ПМДЭМАШ при начальных, конечных и оптимальных значениях параметров настройки.

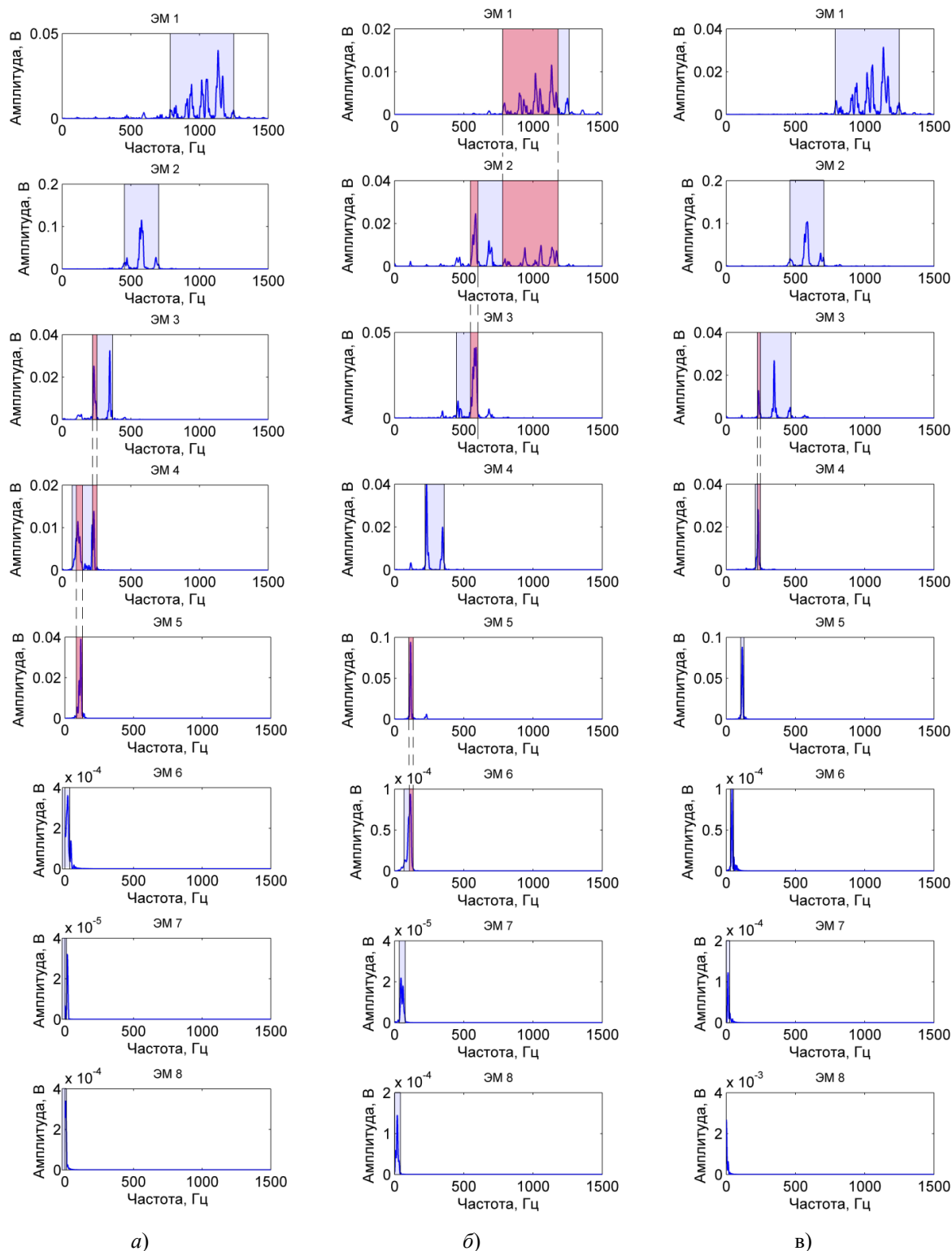


Рис. 3. Спектральное распределение полученных мод для улучшенной ПМДЭМАШ от параметров настройки:
 а – в начале диапазона; б – в конце диапазона; в – при оптимальных параметрах

Заключение

Из табл. 1 следует, что наилучшие результаты значений усредненного коэффициента мелких ошибок достигаются при стандартном отклонении амплитуды добавляемого белого шума 0,08 мВ. Причем данная закономерность прослеживается для всех значений скорости изменения ЧОТ. При увеличении амплитуды добавляемого шума процент мелких ошибок возрастает, и это объясняется чрезмерным зашумлением сигнала. При уменьшении шума усредненный коэффициент мелких ошибок также увеличивается. Это объясняется возникновением явления смешивания ЭМ, аналогично классической ДЭМ, так как при малых значениях шум не обеспечивает создание новых экстремумов функции сигнала. Что касается значений коэффициента грубых ошибок, то здесь предложенный способ управления начинает «ошибаться» при зашумлении сигнала белым шумом со стандартным отклонением амплитуды от 0,09 мВ и скоростью изменения ЧОТ от 1 Гц/мс.

Из табл. 2 следует, что при увеличении количества реализаций декомпозиций (добавлений белого шума) уменьшается усредненный коэффициент мелких ошибок для всех значений скорости изменения ЧОТ. Однако в этой ситуации нужно учесть время, затрачиваемое на каждую реализацию декомпозиции. Поэтому в зависимости от приоритетов поставленной задачи – уменьшение погрешности или увеличение быстродействия, необходимо определиться с конкретным значением количества реализаций.

По результатам проведенных исследований в табл. 3 неоднозначная картина получена при определении значения оптимального количества просеивающих итераций. Для каждого значения скорости изменения ЧОТ наилучший усредненный коэффициент мелких ошибок достигается при разном количестве просеивающих итераций. По этой причине рекомендуется определять оптимальное количество просеивающих итераций по верхней границе полученных значений усредненного коэффициента мелких ошибок. В данном случае – 4500 итераций.

Из табл. 4 следует, что при одинаковом отношении сигнал/шум между добавленным шумом и остатком на всех этапах декомпозиции достигается наилучший результат для всех значений скорости изменения ЧОТ.

Осциллограммы и спектральное распределение ЭМ на рис. 2 и 3 иллюстрируют, что полученные оптимальные значения параметров настройки улучшенной ПМДЭМАШ при использовании мультитармонических сигналов обеспечивают приемлемые результаты и для реальных речевых сигналов.

Из рис. 2,а,б следует, что вследствие перекрытия масштабно-энергетических пространств в начале и конце диапазона изменений значений параметров настройки наблюдается явление смешивания мод (выделено серым цветом). По этой же причине наблюдается перекрытие частотных полос ЭМ (см. рис. 3,а,б, выделено красным цветом). Полное отсутствие смешивания мод и минимальное перекрытие частотных полос наблюдаются при оптимальных значениях параметров настройки улучшенной ПМДЭМАШ (рис. 2,в и 3,в).

Таким образом, представленный в статье способ оптимизации процесса улучшенной ПМДЭМАШ решает задачу повышения точности измерения ЧОТ за счет улучшения частотно-избирательных свойств.

Библиографический список

1. Алимуратов, А. К. Исследование частотно-избирательных свойств методов декомпозиции на эмпирические моды для оценки частоты основного тона речевых сигналов / А. К. Алимуратов // Труды Московского физико-технического института. – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 56–68.
2. Алимуратов, А. К. Исследование частотно-избирательных свойств методов декомпозиции речевых сигналов на эмпирические моды / А. К. Алимуратов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2015. – № 3 (15). – С. 97–109.
3. Huang, X. Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development / X. Huang, A. Acero, H.-W. Hon // Prentice Hall. – New Jersey, 2001. – 980 p.
4. Рабинер, Л. Р. Цифровая обработка речевых сигналов : пер. с англ. / Л. Р. Рабинер, Р. В. Шафер. – М. : Радио и связь, 1981. – 496 с.
5. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 2000. – 214 с.
6. Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов : пер. англ. / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 212 с.

7. *Bovbel, E. I.* Speech parameters vector based on arithmetic fourier transform / E. I. Bovbel, I. E. Kheidorov // European Signal Processing Conference (EUSIPCO 1998). – 1998. – P. 1–3.
8. *Rady Speech Recognition System Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network* / R. Rady Engy, H. Yahia Ashraf, A. El-Dahshan El-Sayed, El-Borey Hatem // Egyptian Computer Science Journal. – 2013. – Vol. 37, № 3. – P. 85–96.
9. *Speech Recognition by Wavelet Analysis* / N. Trivedi, V. Dr. Kumar, S. Singh, S. Ahuja, R. Chadha // International Journal of Computer Applications. – 2011. – Vol. 15, № 8. – P. 27–32.
10. *Фант, Г. К.* Акустическая теория речеобразования / Г. К. Фант ; пер. с англ. Л. А. Варшавского и В. И. Медведева ; науч. ред. В. С. Григорьева. – М. : Наука, 1964. – 284 с.
11. *Alimuradov, A. K.* Research of Frequency-Selective Properties of Empirical Mode Decomposition Methods for Speech Signals' Pitch Frequency Estimation / A. K. Alimuradov // International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT) (Nov. 18–19, 2015, Russia, Moscow). – Moscow, 2015. – P. 77–79.
12. *Huang, N. E.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Sh. Zheng, R. L. Steven // Proc. R. Soc. Lond. – 1998. – Vol. A454. – P. 903–995.
13. *Zhaohua, Wu.* Ensemble empirical mode decomposition: A noise – assisted data analysis method / Wu Zhaohua, N. E. Huang // Advances in Adaptive Data Analysis. – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 1–41.
14. *Yeh J.-R.* Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method / J.-R. Yeh, J.-S. Shieh, N. E. Huang // Adv. Adapt. Data Anal. – 2010. – Vol. 2, № 2. – P. 135–156.
15. *Torres, M. E.* A complete Ensemble Empirical Mode decomposition with adaptive noise / M. E. Torres, M. A. Colominas, G. Schlotthauer, P. Flandrin // International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-1). – Prague (CZ), 2011. – P. 4144–4147.
16. *Colominasa, M. A.* Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing / Marcelo A. Colominasa, Gaston Schlotthauera, Maria E. Torres // Biomedical Signal Processing and Control. – 2014. – Vol. 14. – P. 19–29.
17. *Алимурадов, А. К.* Исследование частотно-избирательных свойств методов декомпозиции на эмпирические моды для оценки частоты основного тона речевых сигналов / А. К. Алимурадов // Труды Московского физико-технического института. – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 56–68.
18. *Measurement of Speech Signal Patterns under Borderline Mental Disorders* / A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, A. V. Kuzmin, P. P. Churakov, A. V. Ageykin, G. V. Vishnevskaya // Proceedings of the 21st Conference of Open Innovations Association FRUCT (Nov. 6–10, 2017, Helsinki, Finland). – Helsinki : FRUCT Oy, 2017. – P. 26–33.
19. *Алимурадов, А. К.* Разработка алгоритма обработки речевых сигналов для определения информативно-значимых параметров пограничных психических расстройств / А. К. Алимурадов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, А. В. Агейкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (47). – С. 4–25.
20. *Алимурадов, А. К.* Помехоустойчивая обработка речевых сигналов на основе комбинированной множественной декомпозиции на эмпирические моды / А. К. Алимурадов, Ю. С. Квитка, А. П. Зарецкий, А. П. Кулешов // Труды Московского физико-технического института. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 43–53.
21. *Alimuradov, A. K.* An Algorithm for Measurement of the Pitch Frequency of Speech Signals Based on Complementary Ensemble Decomposition Into Empirical Modes / A. K. Alimuradov // Measurement techniques. – 2017. – Vol. 59, № 12. – P. 1316–1323.

Алимурадов Алан Казанферович

кандидат технических наук,

директор студенческого научно-производственного
бизнес-инкубатора,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alimuradov Alan Kazanferovich

candidate of technical sciences,

director of student research and production business
incubator,

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

Квитка Юрий Сергеевич

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

Kvitka Yury Sergeyevich

postgraduate student,
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: churakov-pp@mail.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)

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: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Aleksandr Yur'evich

candidate of technical sciences,
deputy director at the Research Institute
for Basic and Applied Studies,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.934

Алимурадов, А. К.

Повышение точности измерения частоты основного тона на основе оптимизации процесса декомпозиции речевых сигналов на эмпирические моды / А. К. Алимурадов, Ю. С. Квитка, П. П. Чураков, А. Ю. Тычков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 53–65. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-9.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 620.91.51.74

DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-10

А. А. Шамин, Е. А. Печерская, К. О. Николаев, Т. О. Зинченко, А. А. Головяшкин

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ

A. A. Shamin, E. A. Pecherskaya, K. O. Nikolaev, T. O. Zinchenko, A. A. Golovyashkin

QUALITY CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF SYNTHESIS OF FUNCTIONAL LAYERS OF SOLAR CELLS BASED ON HYBRID ORGANIC-INORGANIC PEROVSKITES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Улучшение параметров качества солнечных элементов – одна из актуальных задач альтернативной энергетики, решение которой связано с анализом причин, влияющих на параметры качества функциональных слоев. Одним из перспективных типов солнечных элементов являются солнечные элементы нового поколения на основе гибридных органо-неорганических перовскитов (ГОНП). Целью является разработка и исследование методов управления качеством технологического процесса синтеза функциональных слоев солнечных элементов. **Материалы и методы.** Для решения поставленных задач применены методы контроля и управления качеством, такие как диаграммы Парето и Исикавы. С помощью данных методов исследованы прозрачные проводящие покрытия и слои металлооксида солнечных элементов на основе ГОНП. **Результаты.** Разработаны причинно-следственные диаграммы Исикавы и Парето, что позволило выявить следующие основные проблемы получения функциональных слоев солнечных элементов на основе гибридных органо-неорганических перовскитов: дефекты морфологии поверхности пленок, отклонения от заданной толщины, неисправности установок. На эти три категории приходится 80 % всех неисправностей, связанных с получением функциональных слоев солнечных элементов на основе ГОНП. **Выводы.** Доказано, что использование методов контроля качества позволяет улучшить параметры качества покрытий солнечных элементов ГОНП. Были выявлены основные причины дефектов. К ним относятся неверный выбор технологических режимов и методик получения, а также неправильное обращение с оборудованием и материалами. Действия, направленные на устранение данных причин дефектов, являются приоритетной задачей.

A b s t r a c t. Background. At present, the problem of obtaining clean and renewable energy is more acute than ever. It is well known that modern energy sources, such as oil, gas and coal, are not endless. At the moment, the main solution to such problems is the production of solar panels. One of the most promising types of solar cells are now solar cells of a new generation based on hybrid organic-inorganic perovskites. The purpose of the work is to develop and

research methods for managing the quality of the technological process of synthesizing functional layers of solar cells (based on Ishikawa diagrams and Pareto diagrams). **Materials and methods.** Methods of quality control, such as Pareto charts and Ishikawa, were used to solve the set tasks. Using these methods, transparent conductive coatings and metal oxide layers of solar cells based on perovskite were investigated. **Results.** Cause-effect diagrams of Ishikawa and Pareto have been developed, which made it possible to identify the following main problems of obtaining functional layers of solar cells based on hybrid organo-inorganic perovskites: defects in the morphology of the film surface, deviations from a given thickness, unit failures. These three categories account for 80 % of all faults associated with the production of functional layers of such solar cells. **Conclusions.** It is proved that the use of quality control methods allows to improve the quality parameters of coatings of solar cells. The main causes of defects were identified. These include the wrong choice of technological regimes and methods of obtaining, as well as improper handling of equipment and materials. Actions aimed at eliminating these causes of defects are a priority.

К л ю ч е в ы е с л о в а: качество, солнечный элемент, функциональные слои, диаграмма Ишикавы, диаграмма Парето.

Key words: quality, solar cell, functional layers, Ishikawa diagram, Pareto diagram.

Введение

В настоящее время в мире актуальна проблема получения чистой и возобновляемой энергии. Хорошо известно, что современные энергоносители, такие как нефть, газ и уголь, не бесконечны. К тому же их переработка оказывает негативное влияние на окружающую среду. На данный момент основным решением двух этих проблем является производство солнечных панелей. Одним из самых перспективных типов солнечных элементов сейчас являются солнечные элементы нового поколения на основе гибридных органо-неорганических перовскитов (ГОНП). Это объясняется тем, что такие солнечные элементы состоят из недорогих и доступных материалов, а для получения функциональных слоев рассматриваемых элементов используются низкотемпературные и дешевые технологии мокрой химии. Экстраординарная совокупность электрофизических свойств и абсорбционных характеристик солнечных элементов на основе ГОНП открывает большие перспективы их дальнейшего развития и применения. С момента открытия в 2009 г. эффективность солнечных элементов на основе гибридных органо-неорганических перовскитов выросла с 3 до 25,3 % уже в 2017 г. [1, 2].

Солнечный элемент на основе гибридных органо-неорганических перовскитов состоит из нескольких функциональных слоев. Обычно их число равно шести. В качестве слоя фотоэлектрода применяется стеклянная подложка с нанесенным на нее прозрачным проводящим покрытием (ППП). Следующий слой – это металлоксид, задача которого состоит в том, чтобы принимать электроны непосредственно от слоя перовскита. Сам по себе слой перовскита представляет собой тонкий слой метиламмония йодида свинца или метиламмония бромид свинца, которые играют роль донора электронов. В качестве второго электрода используется серебряная или золотая пленка, нанесенная на стеклянную подложку [3].

Структура такого солнечного элемента на основе ГОНП изображена на рис. 1.

Таким образом, все основные параметры солнечных элементов на основе ГОНП, такие как ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент заполнения, определяются свойствами функциональных слоев и технологиями их получения [4] и, как следствие, методами контроля качества таких функциональных слоев. Именно такая постановка задачи обуславливают поиск и внедрение новых методов получения и исследования функциональных слоев солнечных элементов на основе гибридных органо-неорганических перовскитов.

Методы получения функциональных слоев солнечных элементов проанализированы, например, в работах [5, 6]. В данной же статье авторами для каждого из упомянутых функциональных слоев солнечного элемента на основе гибридных органо-неорганических перовскитов разработаны причинно-следственные диаграммы Ишикавы, предназначение которых – поиск и устранение факторов, влияющих на качество получения соответствующих функциональных слоев при изготовлении солнечных элементов.

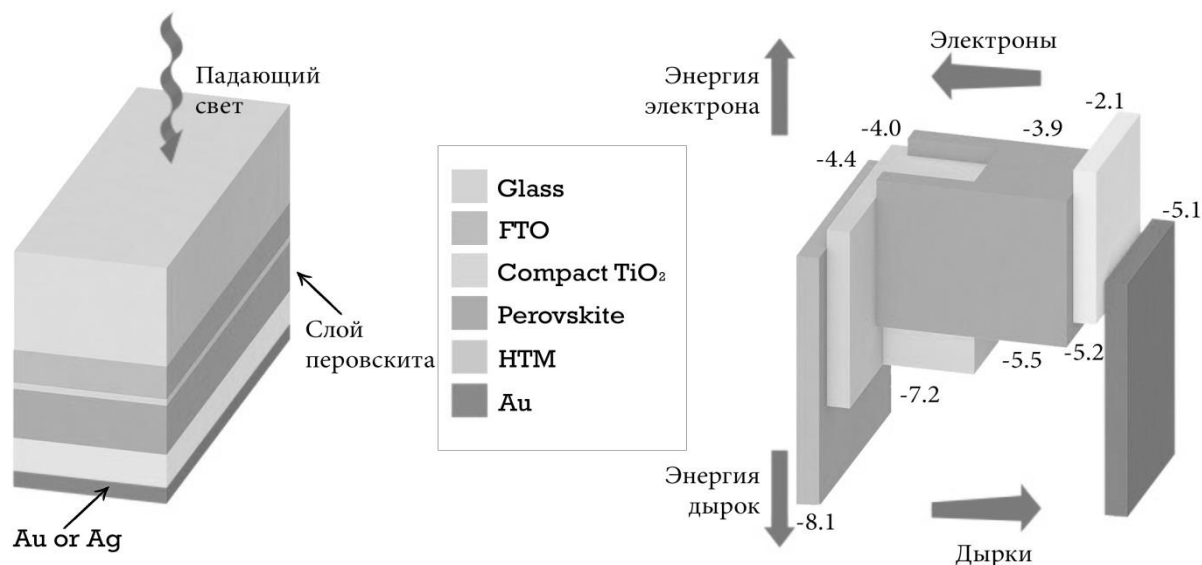


Рис. 1. Структура солнечного элемента на основе ГОНП:
Glass – стекло; FTO – прозрачное проводящее покрытие; Compact TiO₂ – диоксид титана;
Perovskite – слой перовскита; HTM – слой с дырочной проводимостью; Au – золотая пленка

Диаграммы Исикавы – эффективный инструмент контроля качества функциональных слоев

С целью выявления и систематизации причин, влияющих на параметры качества солнечных элементов, для каждого из функциональных слоев в данной работе разработаны диаграммы Исикавы. На рис. 2 представлены причинно-следственные диаграммы, используемые соответственно для контроля качества при получении прозрачных проводящих покрытий, слоя металлоксида. Факторы, наиболее значимым образом влияющие на параметры качества функциональных слоев, обведены в прямоугольную рамку. Общими для всех причинно-следственных диаграмм Исикавы функциональных слоев солнечных элементов на основе ГОНП являются следующие факторы, влияющие на параметры качества:

- 1) окружающая среда:
 - температура. Рекомендуемая температура воздуха в помещении $T = 20 - 25$ °С. Избегать перепадов;
 - влажность. Допустимая влажность в производственном помещении составляет 60 %;
 - пыль. Все производственные процессы получения функциональных слоев рекомендуется проводить в вытяжном шкафу во избежание попадания частичек пыли на поверхность функциональных покрытий;
- 2) человек:
 - квалификация работника, участвующего в технологическом процессе. Работник должен обладать дипломом о высшем образовании в соответствующей области, с ним должен быть проведен инструктаж по технике безопасности;
 - продолжительность смены. Согласно ст. 91 Трудового кодекса РФ продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю или 8 часов в сутки;
 - ручные операции. Человеческий фактор, влияющий на загрязнение подложек отпечатками пальцев, а также на их прямое или косвенное уничтожение (падения, сколы и пр.);
- 3) материал:
 - ненадлежащий уход. Все химические реагенты не должны иметь прямого взаимодействия с окружающей средой (открытые банки, забытые на столе реагенты и пр.). Кроме того, в ряде случаев должно быть полностью исключено нахождение химических реагентов на пути следования солнечных лучей;
 - средства контроля. Оборудование, используемое для взвешивания используемых веществ, должно быть откалибровано;

– срок годности реактивов. Необходимо внимательно следить за сроком годности химических реактивов.

Существует также ряд причин, которые варьируются в зависимости от метода получения конкретного функционального слоя [7, 8], что рассмотрено далее.

Причинно-следственная диаграмма Исикавы проблемы, которая заключается в низкой прозрачности пленки прозрачного проводящего покрытия (ППП), высоком поверхностном сопротивлении, представлена на рис. 2,а.

При использовании золь-гель технологии на анализируемые показатели качества помимо описанных выше факторов (окружающая среда, человек, материал [9]) оказывают влияние технологические режимы, методики получения ППП, применяемое оборудование, что детально рассмотрено ниже:

1) технологические режимы и методики получения при использовании золь-гель метода:
– толщина пленки. Образцы толщиной более 500 нм следует отбраковывать. Контроль толщины производится с использованием профилометра;

– плохая адгезия может быть вызвана дефектами стеклянных подложек, наличием загрязнений, как до начала процесса, так и во время него, а также неверно взвешенными или рассчитанными концентрациями используемых веществ;

2) оборудование (с учетом оснастки и расходных технологических материалов):
– весы должны быть откалиброваны и иметь возможность взвешивания с ценой деления не менее 0,1 мг;

– ультразвуковые ванны должны быть очищены после предыдущих экспериментов;

– следует использовать только новые пробирки;

– магнитные мешалки также должны быть очищены после предыдущих экспериментов;

– олова хлорид дигидрат не должен иметь примесей;

– концентрации жидкостей должны соответствовать требуемым значениям, иначе не произойдет нужных химических реакций.

Диаграмма Исикавы проблемы «Дефекты морфологии поверхности пленок металлооксида» представлена на рис. 2,б. Ее анализ позволил выявить следующие факторы, влияющие на дефекты их морфологии:

1) технологические режимы и методики получения (роллерный метод):

– толщина пленки. Полученные образцы должны быть исследованы с помощью лазерного микроконтурографа – профилометра. Образцы толщиной более 1000 нм следует отбраковывать;

– плохая адгезия может быть вызвана дефектами стеклянных подложек (одна из возможных причин – невнимательный предварительный осмотр инженером-технологом), наличием загрязнений, как до начала процесса, так и во время него (например, отпечатки пальцев после нанесения слоя), а также неверно взвешенными или рассчитанными концентрациями используемых веществ. Помимо упомянутых выше причин также факторами, непосредственно влияющими на неравномерность нанесения пленок роллерным методом, могут быть отсутствие крепления при нанесении (подложка скользит по столу и пр.) и спешка при выполнении технологического процесса;

2) оборудование:

– весы должны быть откалиброваны и иметь возможность взвешивания с ценой деления 0,1 мг;

– ультразвуковые ванны должны быть очищены после предыдущих экспериментов;

– электрическая плитка должна быть исправна и проверена электриком в соответствии с правилами эксплуатации электрических приборов в лаборатории;

3) материал:

– кристаллический диоксид титана не должен иметь примесей;

– растворитель *Triton X-100* должен находиться в темном закрытом месте;

– концентрации жидкостей не должны быть меньше заявленных на упаковке.

Методики получения и исследования функциональных слоев солнечных элементов нового поколения на основе органо-неорганических перовскитов рассмотрены в работе [10]. Ниже систематизированы причины, определяющие качество морфологии слоя перовскита:

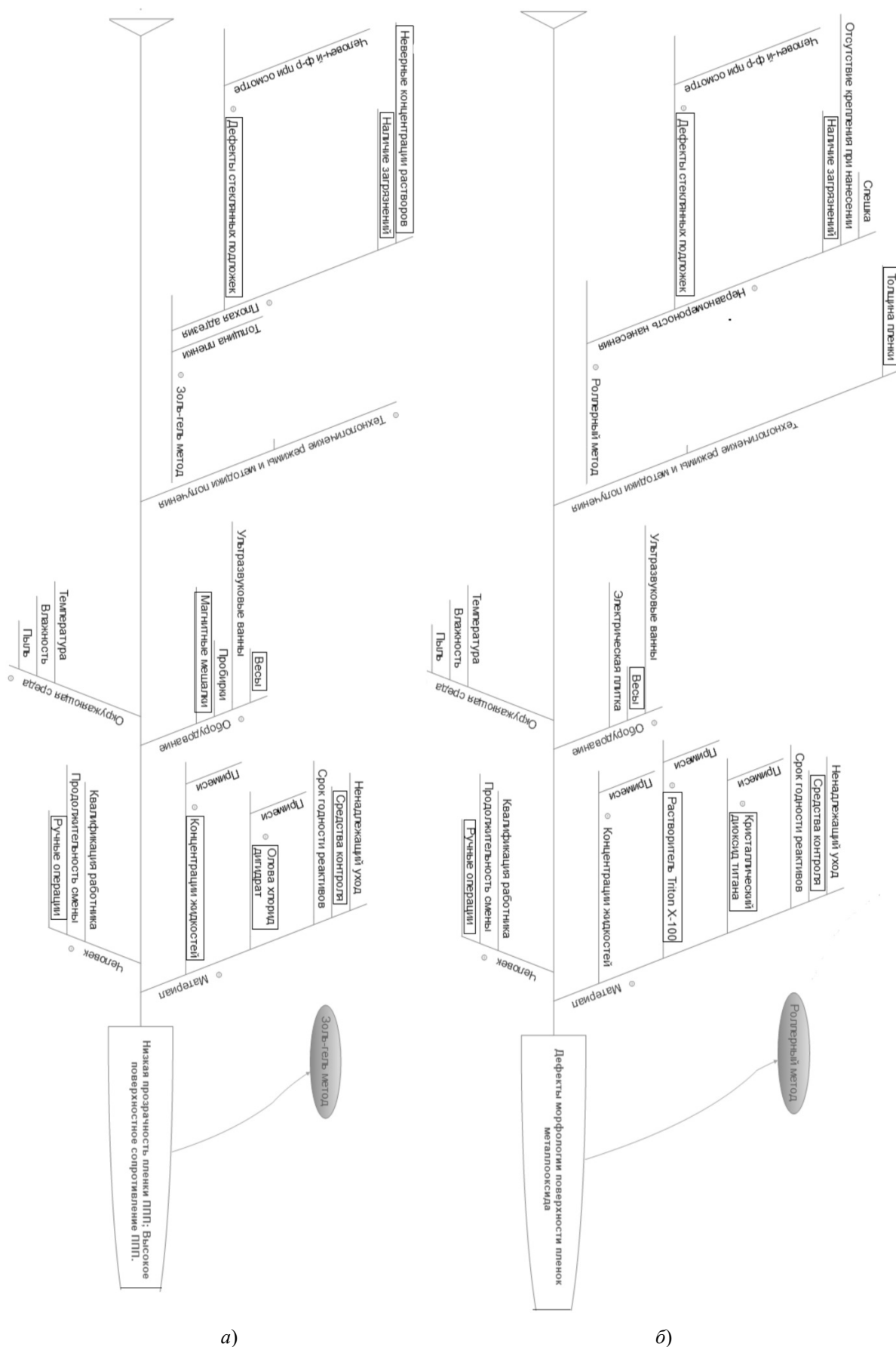


Рис. 2. Причинно-следственная диаграмма Исикавы:
 а – для получения прозрачных проводящих покрытий; б – для получения слоя металлооксида

1) технологические режимы и методики получения (метод центрифугирования):

– толщина пленки. Полученные образцы должны быть исследованы с помощью лазерного микроконтурографа – профилометра. Образцы толщиной более 500–1500 нм следует отбраковывать;

– плохая адгезия может быть вызвана дефектами стеклянных подложек, наличием загрязнений, неверно взвешенными или рассчитанными концентрациями используемых веществ;

– неравномерный градиент ускорения центрифуги непосредственно влияет на прилипание раствора к подложке;

– неверный выбор скорости нанесения раствора. При низких скоростях может наблюдаться накапливание раствора на одной из сторон подложки. При высоких скоростях может наблюдаться разбрызгивание раствора;

– неверный выбор метода нанесения пленок (статический, динамический) оказывает влияние на качество получаемого слоя и должен выбираться в зависимости от вязкости раствора;

– низкая растворимость диiodида свинца в диметилформамиде обусловливается неверными концентрациями реагирующих веществ;

2) оборудование:

– весы должны быть откалиброваны и иметь возможность взвешивания с ценой деления 0,1 мг;

– ультразвуковые ванны должны быть очищены после предыдущих экспериментов;

– магнитные мешалки также должны быть очищены после предыдущих экспериментов;

– следует использовать только новые пробирки;

– каждое последующее нанесение раствора на вращающуюся подложку должно осуществляться с помощью новой пипетки во избежание неверных концентраций раствора из-за остатка в полости предыдущей пипетки;

– центрифуга. Необходимо иметь дело с откалиброванной и работающей установкой. Должен быть хорошо фиксирующий держатель подложек, а сама камера должна быть чистой;

3) материал:

– диiodид свинца и йодид калия должны иметь минимальное количество примесей;

– растворитель диметилформамид DMF должен находиться в темном закрытом месте.

Составленная диаграмма Исикавы для анализа проблемы, заключающейся в низкой прозрачности слоя с дырочной проводимостью, содержит следующие основные причины:

1) технологические режимы и методики получения (золь-гель метод):

– толщина пленки. Полученные образцы должны быть исследованы с помощью лазерного микроконтурографа-профилометра. Образцы толщиной более 15 000 нм следует отбраковывать;

– плохая адгезия может быть вызвана дефектами стеклянных подложек (невнимательный предварительный осмотр инженером), наличием загрязнений как до начала процесса, так и во время него (отпечатки пальцев после нанесения слоя), а также неверно взвешенными или рассчитанными концентрациями используемых веществ;

2) оборудование:

– весы должны быть откалиброваны и иметь возможность взвешивания с ценой деления 0,1 мг;

– ультразвуковые ванны должны быть очищены после предыдущих экспериментов;

– вытяжной шкаф должен иметь хорошую продуваемость;

3) материал:

– оксид никеля не должен иметь примесей;

– концентрация изопропилового спирта не должна быть меньше заявленной на упаковке;

– концентрация соляной кислоты не должна быть выше заявленной на упаковке. Иначе это приведет к ускорению процесса гомогенизации и раствор золь еще до начала эксперимента превратится в гель.

Диаграмма Исикавы, дающая представление о причинах дефектов морфологии поверхности золотых покрытий, характеризуется следующими факторами:

- 1) технологические режимы и методики получения (метод вакуумного напыления):
 - толщина пленки. Полученные образцы должны быть исследованы с помощью лазерного микроконтурографа-профилометра. Образцы толщиной менее 10 нм и более 100 нм следует отбраковывать;
 - плохая адгезия, как и при нанесении других слоев может быть вызвана дефектами стеклянных подложек, наличием загрязнений (как до начала процесса, так и во время его осуществления), неверно взвешенными или рассчитанными концентрациями используемых веществ;
 - наличие пыли от предыдущих экспериментов в камере вакуумной установки может привести к неравномерному осаждению при новом испарении металла;
 - от скорости вращения держателя подложек зависит равномерность распределения вещества по стеклянным подложкам;
- 2) оборудование:
 - ультразвуковые ванны должны быть очищены после предыдущих экспериментов;
 - установка вакуумного напыления должна быть откалибрована и проверена инженером-технологом, который также должен проверить работоспособность установки в режимах низкого и сверхвысокого вакуума. Помимо этого, перед началом работы необходимо убедиться в работоспособности обоих насосов. Отсутствие оператора на рабочем месте может привести к тому, что скорость испарения будет далека от оптимальной, что приведет к браку большей части партии.

Контроль качества функциональных покрытий на основе диаграммы Парето

Для контроля причин дефектов функциональных слоев солнечных элементов на основе ГОНП по статистическим данным применен метод диаграмм Парето. Контрольный лист дефектов функциональных слоев солнечных элементов на основе ГОНП представлен в табл. 1.

Таблица 1

Типы дефектов и их частота

Тип дефекта	Воздействие (количество дефектных образцов)	Суммарное воздействие (накопленная сумма дефектов)	ABC-анализ
Морфология пленок	40	40	A
Отклонения от заданной толщины	25	65	A
Неисправности установок	16	81	B
Загрязнения	9	90	C
Трещины, сколы	8	98	C
Прочее (человеческий фактор)	2	100	C

Данные табл. 1 использованы при построении графика зависимости частоты возникновения тех или иных дефектов от общего числа дефектов (рис. 3).

Из диаграммы видно, что 80 % всех дефектов приходится на дефекты морфологии пленок, отклонения от заданной толщины, а также частично на неисправности установок (неверный выбор режима нанесения или ошибки оператора).

С целью выявления основных проблем, решение которых приведет к заметному уменьшению числа отбракованных образцов, был применен ABC-анализ. Все типы дефектов были поделены на три группы:

- группа А – типы дефектов с высоким уровнем удельного веса;
- группа В – дефекты со средним уровнем удельного веса;
- группа С – дефекты с незначительной величиной удельного веса.

Таким образом, применение инструментов контроля качества позволяет сделать вывод о том, что устранение дефектов из группы А является приоритетной задачей, а связанные с этим мероприятия будут высокоэффективны.

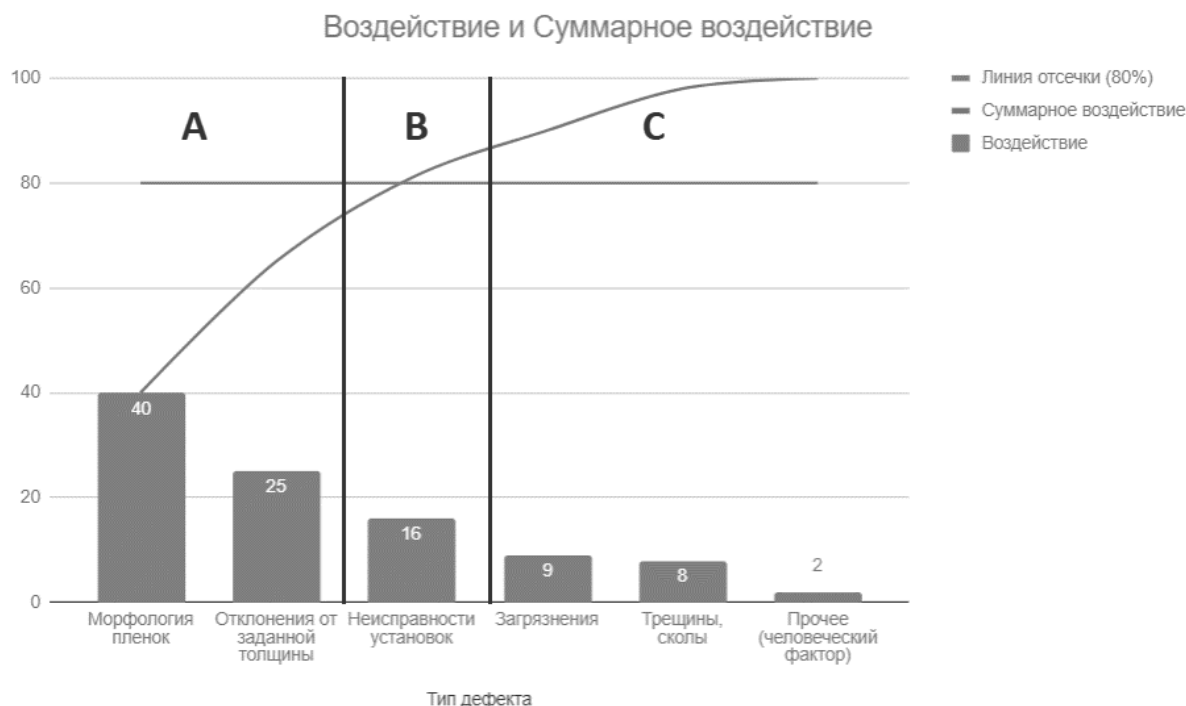


Рис. 3. Диаграмма Парето для функциональных слоев солнечных элементов

Заключение

Диаграммы Исикавы используются как аналитический инструмент для анализа действия влияющих факторов и выявления наиболее существенных причин, действие которых порождает конкретные дефекты в технологическом процессе и поддается управлению. В данной работе диаграммы использованы для анализа факторов, влияющих на параметры качества при изготовлении функциональных слоев СЭ, что позволило разработать методические рекомендации по минимизации влияния тех факторов, влияние которых негативным образом сказывается на качестве покрытий.

Установлено, что в технологических процессах изготовления функциональных слоев действенной представляется выработка корректирующих мероприятий, направленных на улучшение морфологии функциональных слоев, контроль толщины и равномерности покрытий.

Библиографический список

1. *Andrade, L.* Dye-sensitized solar cells: an overview / L. Andrade, H. A. Ribeiro, A. Mendes // Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry. – 2010. – P. 1–20.
2. Characterization of nanocrystalline and thin film TiO₂ solar cells with poly (3-undecyl-2,2-bi-thiophene) as a sensitizer and hole conductor / C. D. Grant, A. M. Schwartzberg, G. P. Smestad, J. Kowalik, L. M. Tolbert, J. Z. Zhang // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2002. – Vol. 522. – P. 40–48.
3. *Gratzel, M.* Review Dye-sensitized solar cells / M. Gratzel // Journal of Photochemistry and Photobiology: Photochemistry Reviews. – 2003. – Vol. 4. – P. 145–153.
4. Сенсibilизированные красителем солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / Р. М. Печерская, В. А. Соловьев, С. В. Ракша, К. О. Николаев, В. И. Кондрашин // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 109–119.
5. *Шамин, А. А.* Методики получения и исследование функциональных слоев солнечных элементов / А. А. Шамин, К. О. Николаев, Е. А. Печерская, А. Н. Купцов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 2 (22). – С. 279–286.

6. *Nikolaev, K. O.* Influence of technological parameters on the energy efficiency of oxide solar cells / K. O. Nikolaev, E. A. Pecherskaya, A. A. Shamin // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. – 2018. – P. 19–21.
7. *Зинченко, Т. О.* Анализ методов получения прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза, 2018. – С. 258–260.
8. *Кондрашин, В. И.* Исследование влияния концентрации примеси на поверхностное сопротивление в ППП (полученных методом спрей-пиролиза) на основе диоксида олова / В. И. Кондрашин, Е. А. Печерская // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всерос. молодежной научной школы-семинара. – Пенза, 2016. – С. 175–176.
9. *Зинченко, Т. О.* Анализ материалов, используемых для производства прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза, 2018. – С. 256–258.
10. *Шамин, А. А.* Получение и исследование функциональных слоев солнечных элементов нового поколения на основе органо-неорганических перовскитов / А. А. Шамин, К. О. Николаев, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. статей IV ежегодной межвуз. науч.-практ. конф. – Пенза, 2017. – С. 313–316.

Шамин Алексей Алексеевич

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

Shamin Alexey Alekseevich

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

Печерская Екатерина Анатольевна

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

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

Николаев Кирилл Олегович

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nikolaev_kirill10@mail.ru

Nikolaev Kirill Olegovich

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

Зинченко Тимур Олегович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Zinchenko Timur Olegovich

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

Головяшкин Алексей Алексеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: aleiika92@mail.ru

Golovyashkin Aleksey Alekseevich

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

УДК 620.91.51.74

Контроль качества технологических процессов синтеза функциональных слоев солнечных элементов на основе гибридных органо-неорганических перовскитов / А. А. Шамин, Е. А. Печерская, К. О. Николаев, Т. О. Зинченко, А. А. Головяшкин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 66–75. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-10.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.317.73

DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-11

*А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов*ОЦЕНИВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ*A. S. Koldov, N. V. Rodionova, A. V. Svetlov*ESTIMATION OF RANDOM ERRORS
OF MEASURING CONVERTERS

А н н о т а ц и я. *Цель работы.* Исследован фактор увеличения случайной погрешности измерительных преобразователей при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований. *Материалы и методы.* Проведены статистические испытания обобщенной модели преобразователя, к измерительной цепи которого последовательно подключены пять аналоговых блоков. Оценка случайной погрешности результатов измерений получена методом Монте-Карло. *Результаты.* Приведены полученные в результате моделирования значения случайных погрешностей выходных напряжений измерительного преобразователя, примеры гистограмм распределения плотности вероятностей случайной погрешности и графиков зависимостей погрешностей от различных факторов. *Выводы.* Для построения измерительного преобразователя с малой случайной погрешностью следует использовать минимальное число последовательно выполняемых аналоговых преобразований измеряемых величин.

A b s t r a c t. *Background.* The factor of accumulation of a random error of measuring transducers at consecutive performance of several analog transformations is investigated. *Materials and methods.* Statistical tests of the generalized model of the Converter to which measuring circuit five analog blocks are consistently connected are carried out. The estimation of the random error of the measurement results is obtained by the Monte-Carlo method. *Results.* The values of random errors of the output voltage of the measuring transducer, examples of histograms of the distribution of the probability density of the random error and graphs of the dependences of errors on various factors are presented. *Conclusions.* To build a measuring transducer with a small random error, the minimum number of consecutive analog transformations of the measured values should be used.

К л ю ч е в ы е с л о в а: измерительный преобразователь, оценка погрешностей, метод Монте-Карло.

K e y w o r d s: measuring converters, aggregate measurement, Monte-Carlo method.

Измерительные преобразователи параметров различных датчиков и других физических объектов, представляемых эквивалентными двухполюсными многоэлементными электрическими схемами, предполагают последовательное выполнение ряда аналоговых преобразований

измеряемых величин: выборки и хранения отсчетов напряжения, дифференцирования, интегрирования, вычитания, нахождения среднего значения за фиксированный интервал времени и др. [1–3]. Например, в измерительных преобразователях [4–6] для получения выходных напряжений, пропорциональных параметрам четырех элементов исследуемой цепи, необходимо последовательно выполнить до пяти преобразований сигналов с помощью различных аналоговых функциональных блоков. Кроме сложности аппаратной реализации, такие преобразователи имеют еще один существенный недостаток: даже при тщательной регулировке преобразователя с целью исключения систематических составляющих инструментальных погрешностей каждого аналогового функционального блока, происходит накопление случайных погрешностей аналоговых преобразований, выполняемых последовательно друг за другом.

Для оценивания фактора накопления случайной погрешности при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований проведены статистические испытания обобщенной модели преобразователя, представленного схемой вида рис. 1.

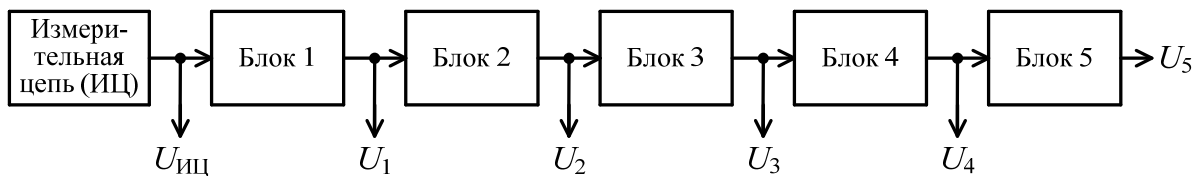


Рис. 1. Обобщенная схема измерительного преобразователя с последовательным выполнением аналоговых преобразований

Измерительная цепь (ИЦ) осуществляет преобразование сопротивления датчика измеряемой физической величины в напряжение $U_{ИЦ}$. Для получения нужной пользователю информации выходной сигнал ИЦ последовательно преобразуется с помощью пяти аналоговых блоков 1–5 с одинаковыми коэффициентами передачи K и выходными напряжениями $U_1 – U_5$. Причиной появления случайных погрешностей ИЦ и аналоговых блоков 1–5 могут являться: собственные шумы пассивных и активных элементов, нестабильность их параметров (например, напряжения смещения операционных усилителей), пульсации питающих напряжений, наводки по цепям питания и общей шине и др. Для оценивания случайной погрешности результатов измерений выбран наихудший случай, основанный на предположении о распределении погрешностей ИЦ и аналоговых блоков 1–5 по закону равномерной плотности [7].

Статистические испытания измерительного преобразователя (рис. 1) с последовательным выполнением аналоговых преобразований проведены в среде MathCAD методом Монте-Карло [8]. Для задания равномерного закона распределения плотности вероятности данных использована встроенная функция «runif»; для вычисления среднего квадратического отклонения (СКО) найденных значений искомым параметром – встроенная функция «stdev»; для вычисления среднего значения – встроенная функция «mean».

В процессе исследований задавались следующие значения параметров:

- номинальное значение постоянного выходного напряжения ИЦ $U_{ИЦ} = 1$ В;
- пределы допускаемой относительной случайной погрешности ИЦ: $\epsilon U_{ИЦ} = 0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5$ %;
- номинальные значения коэффициентов передачи K аналоговых блоков 1–5 $K = 1$;
- пределы допускаемой относительной случайной погрешности аналоговых блоков: $\epsilon K = 0,01; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0$ %.

Для каждого из пяти значений $\epsilon U_{ИЦ}$ рассчитывались выходные напряжения блоков 1–5:

$$U_{1j,i} = U_{ИЦ,j,i} K_{j,i}; \quad (1)$$

$$U_{2j,i} = U_{1j,i} K_{j,i}; \quad (2)$$

$$U_{3j,i} = U_{2j,i} K_{j,i}; \quad (3)$$

$$U_{4j,i} = U_{3j,i} K_{j,i}; \quad (4)$$

$$U_{5j,i} = U_{4j,i} K_{j,i}, \quad (5)$$

где $j = 0, 1, \dots, 20$ – номер варьируемого значения εK ; $i = 0, 1, \dots, N-1$; где $N = 10^4$ – число реализаций.

С помощью функций «mean» и «stdev» определялись средние значения и средние квадратические отклонения (СКО) полученных напряжений, а также относительные погрешности выходных напряжений блоков 1–5.

На рис. 2, 3 приведены примеры полученных гистограмм распределения плотности вероятностей случайной погрешности εU выходного напряжения аналоговых блоков-преобразователей по результатам статистических испытаний.

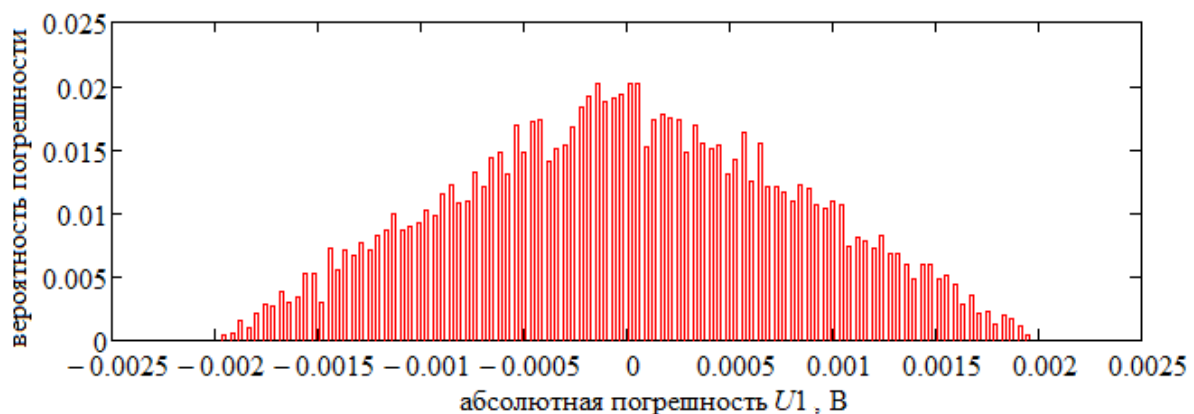


Рис. 2. Гистограмма распределения плотности вероятностей случайной погрешности напряжения U_1 при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1\%$; $\varepsilon K = 0,1\%$; $\varepsilon U_1 = 0,082\%$

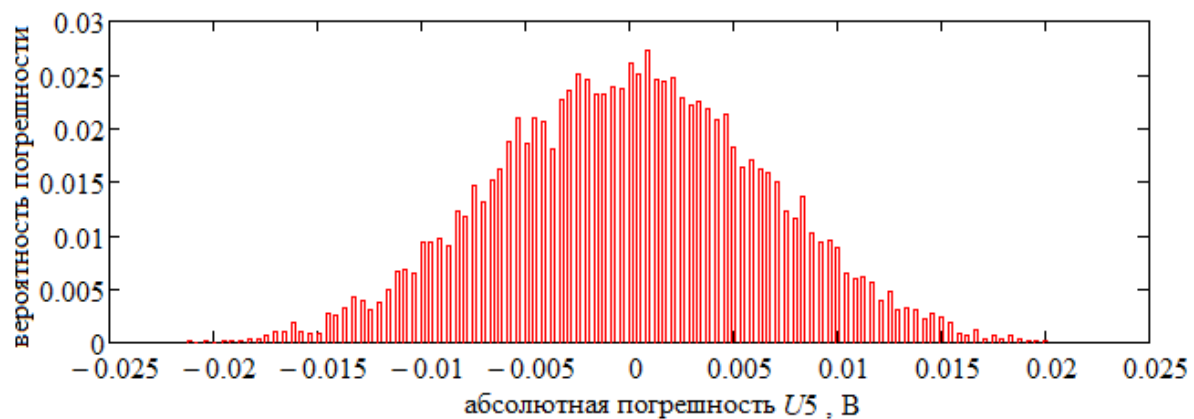


Рис. 3. Гистограмма распределения плотности вероятностей случайной погрешности напряжения U_5 при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1\%$; $\varepsilon K = 0,5\%$; $\varepsilon U_5 = 0,644\%$

При реализации предложенной авторами методики совокупных измерений [9, 10] используется только одно преобразование – получение отсчетов выходного напряжения ИЦ с помощью АЦП. Гистограмма рис. 2 для случая однократного преобразования показывает, что при малых (0,1 %) собственных случайных погрешностях ИЦ и блока 1 случайная погрешность выходного напряжения блока 1 также невелика (в рассмотренном примере не превышает 0,1 %).

Одинаковое увеличение случайных погрешностей только ИЦ или только блока 1 приводит к одинаковому увеличению случайной погрешности выходного напряжения блока 1:

- при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1 \%$; $\varepsilon K = 0,5 \%$; $\varepsilon U_1 = 0,294 \%$;
- при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,5 \%$; $\varepsilon K = 0,1 \%$; $\varepsilon U_1 = 0,295 \%$.

Одновременное одинаковое увеличение случайных погрешностей ИЦ и блока 1 приводит в рассмотренном примере к увеличению случайной погрешности выходного напряжения блока 1 в 1,4 раза.

Последовательное выполнение нескольких аналоговых преобразований (в рассмотренном примере 5 преобразований) приводит к заметному увеличению случайной погрешности выходного напряжения даже при малых собственных случайных погрешностях ИЦ и блоков 1–5. Например, при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1 \%$; $\varepsilon K = 0,1 \%$; $\varepsilon U_5 = 0,142 \%$. Увеличение случайных погрешностей блоков εK приводит к быстрому росту случайной погрешности выходного напряжения блоков (гистограмма рис. 3).

Более полная информация о характере зависимости от различных факторов случайной погрешности результатов измерений с помощью измерительных преобразователей с последовательным выполнением аналоговых преобразований измеряемых величин содержится на построенных по результатам испытаний графиках.

В качестве примера на рис. 4 приведен график зависимостей случайной погрешности εU выходного напряжения аналоговых блоков 1–5 от значений предела допускаемой относительной случайной погрешности блоков εK в диапазоне от 0,01 до 1,0 % при вариации числа аналоговых преобразований (указан номер блока) и случайной погрешности ИЦ $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1 \%$.

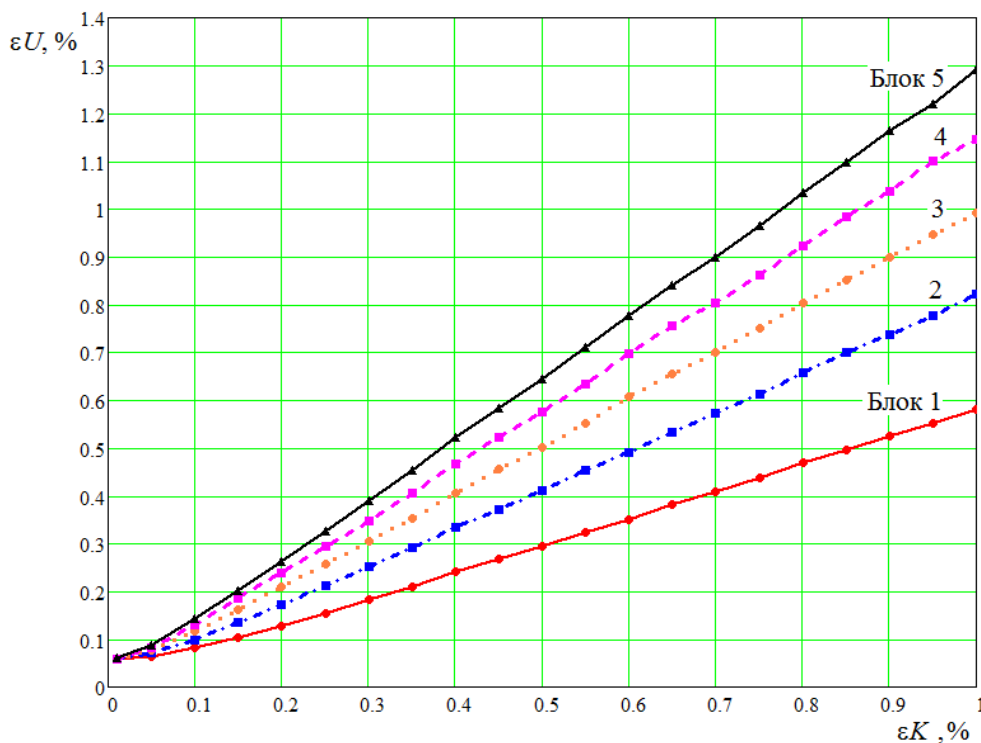


Рис. 4. График зависимостей случайной погрешности выходного напряжения εU от допускаемой случайной погрешности блоков εK при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1 \%$ и вариации числа аналоговых преобразований

На рис. 5 и 6 приведены графики зависимостей случайной погрешности εU выходного напряжения аналоговых блоков-преобразователей 1–5 от числа последовательно выполняемых аналоговых преобразований (т.е. от номера блока) при вариации значений предела допускаемой относительной случайной погрешности блоков $\varepsilon K = 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 \%$ и случайной погрешности ИЦ $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1; 0,5 \%$.

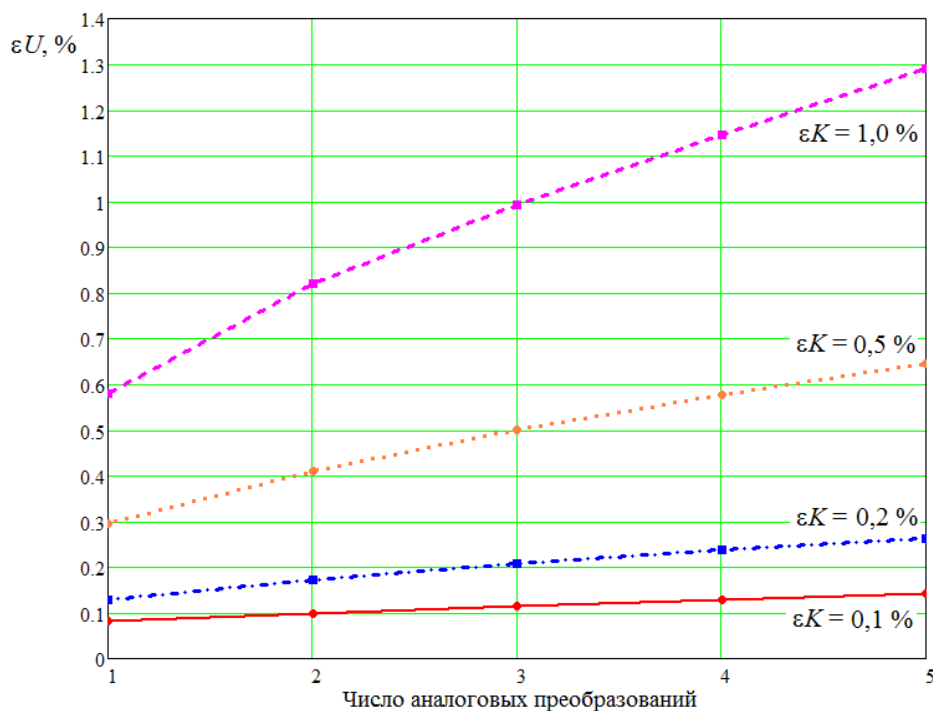


Рис. 5. График зависимостей случайной погрешности выходного напряжения εU от числа аналоговых преобразований при $\varepsilon U_{\text{изц}} = 0,1 \%$ и вариации εK

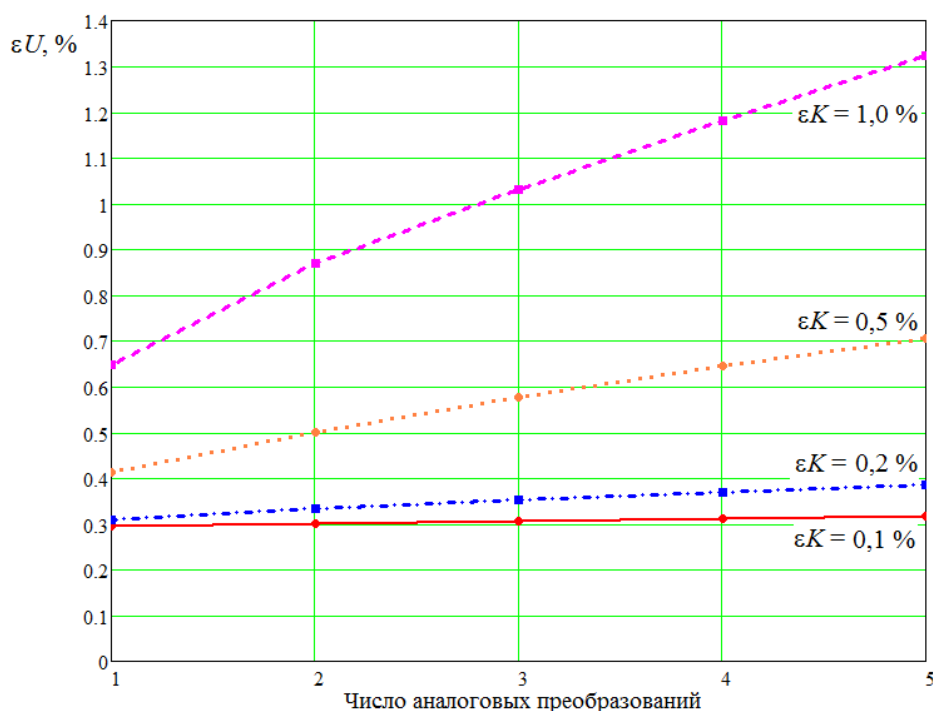


Рис. 6. График зависимостей случайной погрешности выходного напряжения εU от числа аналоговых преобразований при $\varepsilon U_{\text{изц}} = 0,5 \%$ и вариации εK

Как видно из графиков рис. 4–6, последовательное выполнение нескольких (от 1 до 5) аналоговых преобразований приводит к существенному увеличению случайной погрешности выходного напряжения.

Найдя отношения погрешностей выходных напряжений блоков 2, 3, 4, 5 к погрешности выходного напряжения блока 1, можно получить коэффициент увеличения погрешности при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований. На рис. 7–9 приведе-

ны графики зависимостей коэффициента увеличения погрешности выходного напряжения аналоговых блоков 2, 3, 4, 5 от допускаемой случайной погрешности блоков εK при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,01; 0,1; 0,5 \%$.

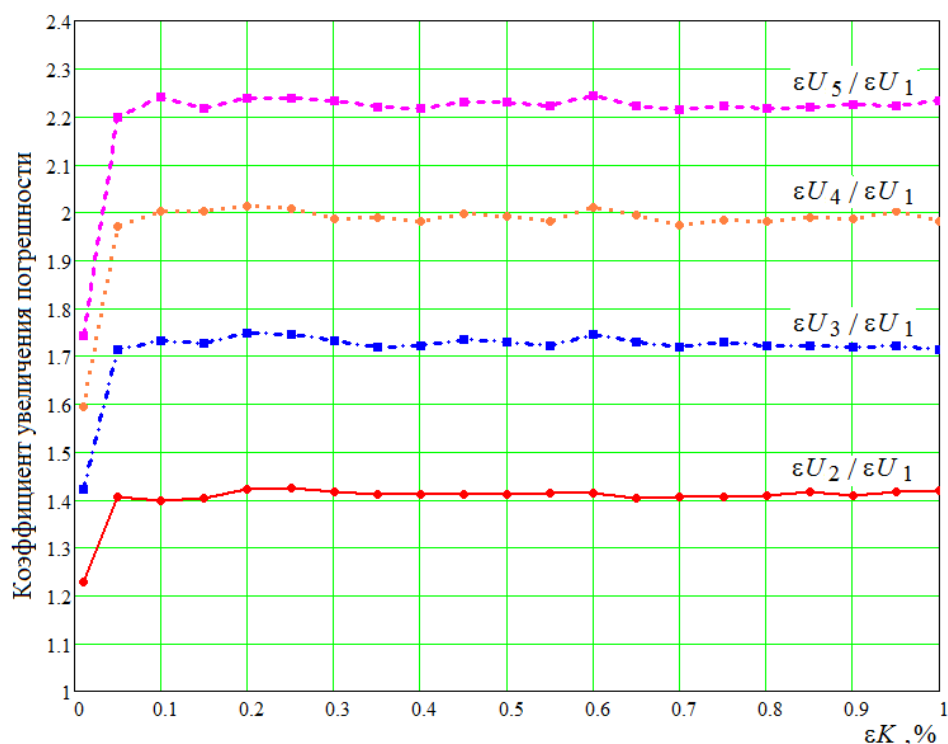


Рис. 7. График зависимостей коэффициента увеличения погрешности выходных напряжений аналоговых блоков 2, 3, 4, 5 от допускаемой случайной погрешности блоков εK при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,01 \%$

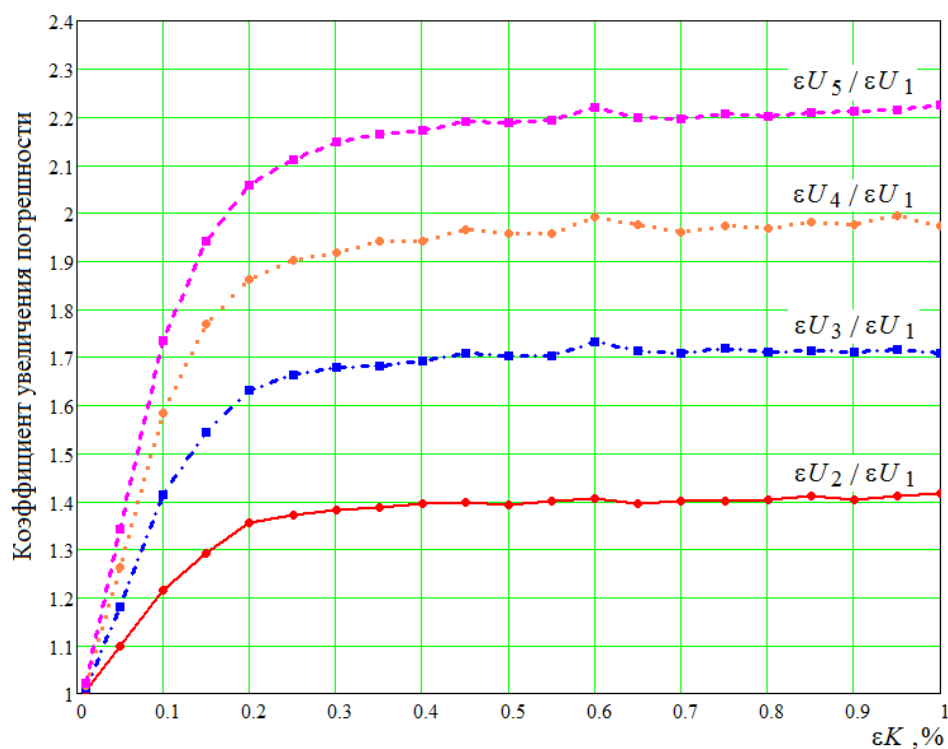


Рис. 8. График зависимостей коэффициента увеличения погрешности выходных напряжений аналоговых блоков 2, 3, 4, 5 от допускаемой случайной погрешности блоков εK при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1 \%$

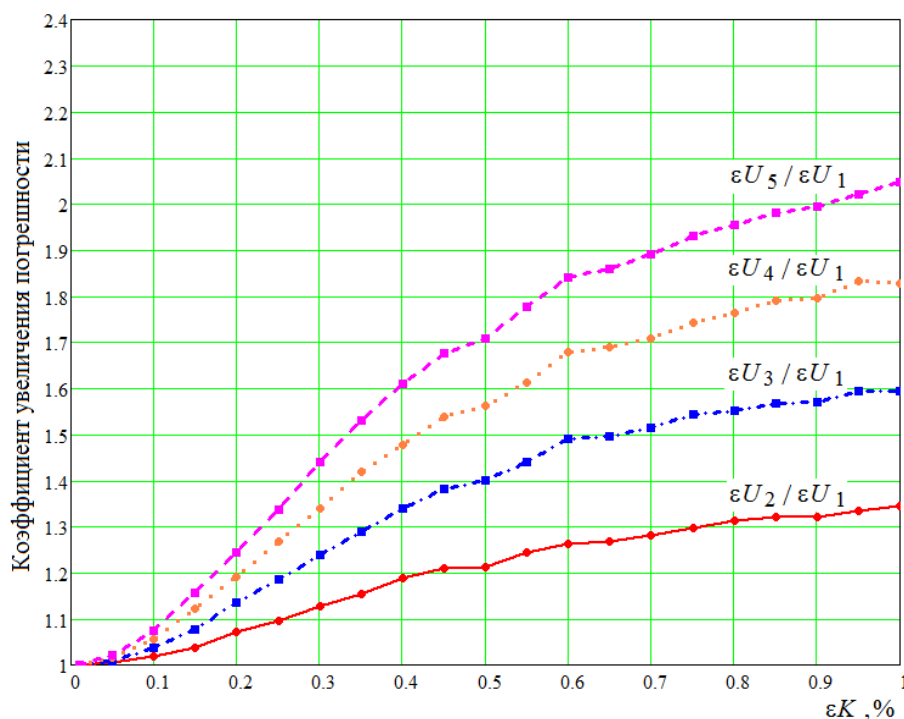


Рис. 9. График зависимостей коэффициента увеличения погрешности выходных напряжений аналоговых блоков 2, 3, 4, 5 от допускаемой случайной погрешности блоков εK при $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,5 \%$

Как видно из графика рис. 7, при малых (0,01 %) собственных случайных погрешностях ИЦ коэффициент увеличения погрешности выходных напряжений аналоговых блоков 2, 3, 4, 5, последовательно преобразующих выходной сигнал ИЦ, практически не зависит от допускаемой случайной погрешности εK этих блоков. Значения коэффициента увеличения погрешности выходных напряжений аналоговых блоков 2, 3, 4, 5 приведены в таблице:

Число аналоговых преобразований	2	3	4	5
Коэффициент увеличения погрешности	1,4	1,7	2,0	2,2

При $\varepsilon U_{\text{иц}} = 0,1 \%$ (график рис. 8) коэффициент увеличения погрешности выходных напряжений аналоговых блоков возрастает с ростом случайной погрешности блоков εK от малых значений до $\varepsilon K = 0,5 \%$, затем принимает значения, указанные в таблице.

При достаточно большой (0,5 %) погрешности ИЦ (график рис. 9) коэффициент увеличения погрешности выходных напряжений аналоговых блоков возрастает с ростом случайной погрешности блоков εK , но имеет меньшие значения, чем при малых погрешностях ИЦ.

Заключение

1. Для построения измерительного преобразователя с малой случайной погрешностью следует использовать минимальное число последовательно выполняемых аналоговых преобразований измеряемых величин. В предложенных автором измерительных преобразователях, реализующих метод совокупных измерений параметров многоэлементных электрических цепей, выходное напряжение ИЦ подвергается только одной аналого-цифровой процедуре получения отсчетов выходного напряжения ИЦ с помощью АЦП. В рассмотренном примере при малых случайных погрешностях ИЦ и аналогового блока (предел допускаемой относительной случайной погрешности 0,1 %) случайная погрешность выходного напряжения этого блока не превышает 0,1 %.

2. Последовательное выполнение нескольких аналоговых преобразований приводит к накоплению случайных погрешностей аналоговых преобразований и существенному увеличению случайной погрешности выходного напряжения аналоговых блоков. При двух аналого-

вых преобразованиях коэффициент увеличения погрешности выходного напряжения может достигать 1,4; при трех – 1,7; при четырех – 2; при пяти преобразованиях – 2,2.

Библиографический список

1. Кнеллер, В. Ю. Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. Боровских, Л. П. О преобразовании параметров многоэлементных двухполюсников при импульсном питании / Л. П. Боровских, А. М. Павлов // Приборы и системы управления. – 1978. – № 2. – С. 24, 25.
3. Мартяшин, А. И. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова ; под ред. А. И. Мартяшина. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
4. А. с. 938199 СССР. Преобразователь параметров четырехэлементных двухполюсников в напряжение / А. И. Мартяшин, В. М. Чайковский, П. П. Чураков // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 23. – С. 237.
5. А. с. 938201 СССР. Преобразователь параметров электрометрического датчика / А. И. Мартяшин, В. М. Чайковский, П. П. Чураков // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 23. – С. 237.
6. А. с. 1267290 СССР. Преобразователь параметров кондуктометрического датчика / Ю. С. Гаевский, А. И. Мартяшин, А. В. Светлов, Б. В. Цыпин // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 40. – С. 169, 170.
7. Баранов, В. А. Оценивание погрешностей измерений параметров комплексного сопротивления методом Монте-Карло / В. А. Баранов, А. А. Данилов, С. А. Шумарова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/-view?id=10205>
8. ГОСТ Р 54500.3.1-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Дополнение 1:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло.
9. Колдов, А. С. Оценка погрешностей совокупных измерений параметров многоэлементных электрических цепей / А. С. Колдов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 71–74.
10. Совокупные измерения электрических параметров пьезокерамических элементов / А. С. Колдов, Е. А. Ломтев, Н. В. Родионова, А. В. Светлов, Б. В. Цыпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 123–135.

Колдов Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Koldov Alexander Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Родионова Нина Владимировна

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

Rodionova Nina Vladimirovna

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

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Svetlov Anatoliy Vil'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.73

Колдов, А. С.

Оценивание случайных погрешностей измерительных преобразователей / А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 76–84. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-11.