

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

*Паршуков М. Ю., Родионова Н. В., Сапунов Е. В.,
Светлов А. В., Нефедьев Д. И.*

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СРЕДСТВАМ
ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

5

Паршуков М. Ю., Сапунов Е. В., Светлов А. В., Нефедьев Д. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СКОРОСТИ
НАРАСТАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ
ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ

13

*Голубинский Ю. М., Елистратова А. Г.,
Пискунова В. А., Чернова Е. С.*

ПРИМЕНЕНИЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО МЫШЛЕНИЯ
В НОВОЙ ВЕРСИИ СТАНДАРТА ISO 9001:2015

21

Демин А. Н., Смыслов В. И., Клементьев А. Т.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА
НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ С КУБИЧЕСКОЙ
СИММЕТРИЕЙ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ И $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

28

Епишин И. Г., Репин А. Ю., Фионова Л. Р.

ЭКСПЕРТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
ДЛЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

35

Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е.

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО
ЧАСТОТНОГО ДАТЧИКА

42

Гришко А. К.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ
С УЧЕТОМ ОТКАЗОВ И ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

51

Кикот В. В.

К ВОПРОСУ О ТЕНДЕНЦИЯХ РАЗВИТИЯ
ПЬЕЗОДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ
И СПОСОБАХ УМЕНЬШЕНИЯ ИХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПОГРЕШНОСТИ

58

Иванов А. И., Перфилов К. А., Малыгина Е. А.

МНОГОМЕРНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
КАЧЕСТВА БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ
НА ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫХ ВЫБОРКАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЕВ СРЕДНЕГО
ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО, ВЫЧИСЛЕННОГО
ДЛЯ АНАЛИЗИРУЕМЫХ ФУНКЦИЙ ВЕРОЯТНОСТИ

64

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Мелентьев В. С., Поздеева Е. В., Пескова А. С., Нефедьев Д. И.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
ПО ИХ МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ,
ИЗМЕРЕННЫМ ОДИН РАЗ В ТЕЧЕНИЕ ПЕРИОДА

73

Акулов В. А., Батищев В. И., Макаров И. В.,

Мякишев В. М., Видманов А. С.

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ
ГЕМОДИНАМИКИ В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК –
КОРОТКОРАДИУСНАЯ ЦЕНТРИФУГА»

81

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Трофимов А. А., Кучумов Е. В.

ВЫВОД СООТНОШЕНИЙ НА ОСНОВЕ
МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИИ
ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАСТРОВЫХ
ДАТЧИКАХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

89

Грачев А. В.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО
КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

96

Ашанин В. Н., Ларкин С. Е., Регеда О. Н.

КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

103

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Волков В. С., Французов М. В., Рыблова Е. А.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

110

Абдуллин Ф. А., Пауткин В. Е.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ФОРМИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ
АКСЕЛЕРОМЕТРОВ С РАСШИРЕННЫМ
ТЕМПЕРАТУРНЫМ ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЕНИЙ

118

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Писарев А. П., Писарев М. А.

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА
ДАТЧИКА ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ

124

Балахонова С. А., Бодин О. Н., Логинов Д. С.,

Ломтев Е. А., Сафронов М. И.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ
ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СЕРДЦА

131

Секретов М. В.

ПАРАМЕТРЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФРАКРАСНОЙ
ПОДСВЕТКИ В БИОМЕТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ
ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА КРОВЕНОСНЫХ
СОСУДОВ ЛАДОНИ

138

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.317.3

М. Ю. Паршуков, Н. В. Родионова, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ¹

М. Yu. Parshukov, N. V. Rodionova, E. V. Sapunov, A. V. Svetlov

REQUIREMENTS FOR MEASUREMENT INSTRUMENTS OF OPERATIONAL AMPLIFIER FREQUENCY PARAMETERS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В работе определены требования к разрабатываемым средствам измерений динамических параметров операционных усилителей, которые могут использоваться как самостоятельные измерительные приборы или как блоки многофункционального автоматизированного аппаратно-программного комплекса. *Материалы и методы.* Показано, что для измерения частоты единичного усиления и запаса устойчивости по фазе операционных усилителей общего применения необходимы программно управляемые устройства для определения отношения амплитуд и разности фаз синусоидальных напряжений на выходе и входе операционных усилителей. *Результаты.* Определен диапазон рабочих частот: от 0,1 до 10 МГц. Рабочий диапазон измерения отношения амплитуд сигналов: от минус 6 до + 6 дБ. Рабочий диапазон измерения разности фаз: от 30 до 150°. Относительная погрешность измерений отношения амплитуд и разности фаз сигналов не более 2 % в пределах рабочих диапазонов. *Выводы.* Сформулированы требования, предъявляемые к средствам измерений частотных параметров операционных усилителей. Определены требования к разрешению аналого-цифрового преобразователя на выходе измерителя отношения амплитуд сигналов исходя из требуемого разрешения при измерении частоты единичного усиления операционных усилителей.

A b s t r a c t. *Background.* It is determination of requirements for developed means of measuring the dynamic parameters of operational amplifiers which can be used as independent measuring devices or multipurpose units of automated hardware and software complex. *Materials and methods.* It is shown that program-controlled devices for determining the ratio of amplitudes and phase difference of sinusoidal voltages on output and input of the operational amplifiers needed for the measurement of unity gain frequency and phase margin of general purpose operational amplifiers. *Results.* The operating frequencies range was defined from 0,1 to 10 MHz. The operating range of amplitude ratio measurement is from -6 to + 6 dB. The operating range of phase difference measurement is from 30 degrees to 150 degrees. The relative measurement error of amplitude ratio and phase difference of signals is no more than 2 % within the operating range. *Conclusions.* Requirements for measurement instruments of operational amplifier frequency parameters was formulated. Requirements for the resolution of ADC on output of signals amplitude ratio meter are defined, on the basis of the required resolution in measurement of operational amplifiers unity gain frequency.

¹ Работа поддержана Грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 16-38-00233).

К л ю ч е в ы е с л о в а: операционный усилитель, измерение, частота единичного усиления, запас устойчивости по фазе, отношение амплитуд, разность фаз, рабочие диапазоны измерений, погрешность.

К е у w o r d s: operational amplifier, measurement, unity gain frequency, phase margin, amplitude ratio, phase difference, operating range of measurements, error.

Введение

Работа операционных усилителей (ОУ) в динамическом режиме характеризуется временными параметрами, имеющими размерность времени или скорости изменения напряжения во времени, а также частотными параметрами, имеющими размерность частоты или разности фаз.

В данной работе рассмотрены требования, предъявляемые к измерителям важнейших частотных параметров ОУ: частоты единичного усиления и запаса устойчивости по фазе. Частоту единичного усиления ОУ необходимо измерять, поскольку этот параметр в обязательном порядке указывается среди паспортных данных ОУ во всех справочниках и технических условиях. Запас устойчивости по фазе желательно учитывать при отборе ОУ для электронных схем, склонных к самовозбуждению. Кроме того, значение этого параметра используется при создании макромоделей ОУ для Spice-совместимых программ схемотехнического моделирования (PSpice, OrCAD, Multisim и др.).

Частота единичного усиления определяется как частота, на которой коэффициент усиления ОУ, т.е. отношение выходного и входного напряжений ОУ, равняется единице (ГОСТ 23089.13–86). Запас устойчивости по фазе ОУ определяется по разности фаз между входным и выходным напряжениями ОУ на частоте единичного усиления (ГОСТ 23089.16–90). Таким образом, для измерения частотных параметров ОУ необходимы устройства для определения отношения амплитуд и разности фаз синусоидальных напряжений на выходе и входе ОУ.

При разработке средств измерений частотных параметров ОУ целесообразно предусмотреть их универсальность, возможность использования как самостоятельных измерительных приборов или интегрирования в состав многофункционального аппаратно-программного комплекса [1] для автоматизированного измерения динамических параметров ОУ. Поэтому аппаратная часть измерителя частотных параметров ОУ должна быть программно управляемой.

1. Определение границ рабочих диапазонов измерений

Первоочередной задачей является разработка средств измерений частотных параметров наиболее широко распространенных ОУ общего применения. Для измерения параметров таких ОУ предназначен аппаратно-программный комплекс [1]. Частота единичного усиления большинства ОУ общего применения находится в диапазоне от 0,1 до 10 МГц [2], что определяет требуемый диапазон рабочих частот разрабатываемых измерителей частотных параметров ОУ и входящих в их состав измерителей отношения амплитуд и разности фаз синусоидальных напряжений на выходе и входе ОУ.

Согласно ГОСТ 23089.0–78 погрешность измерений параметров ОУ в динамическом режиме должна находиться в пределах $\pm 10\%$. Задавая для вновь разрабатываемых средств измерений частотных параметров ОУ предел результирующей допустимой погрешности $\pm 5\%$, можно установить предел допускаемых погрешностей $\pm 2\%$ для составляющих результирующей погрешности, вносимых измерителями отношения амплитуд и разности фаз напряжений.

Границы рабочего диапазона измерения отношения амплитуд выходного и входного напряжений ОУ определяются с учетом специфики используемой при построении аппаратно-программного комплекса [1] методики автоматизированного измерения частоты единичного усиления ОУ [3]. Данная методика основана на оценке коэффициента усиления ОУ при итерационном сужении диапазона поиска частоты, при которой коэффициент усиления ОУ становится меньше единицы при заданном разрешении по частоте. Высокая точность измерения отношения выходного и входного напряжений ОУ должна быть обеспечена вблизи частоты единичного усиления при отношении амплитуд, приближающемся к единице. Поэтому может быть задана ширина рабочего диапазона измерения отношения амплитуд: $U_{\text{вых ОУ}}/U_{\text{вх ОУ}} = 0,5...2$ или от минус 6 до +6 дБ.

Границы рабочего диапазона измерения разности фаз выходного и входного напряжений ОУ на частоте единичного усиления устанавливаются, исходя из того, что при значении

запаса устойчивости по фазе на частоте единичного усиления менее 45° ОУ становится потенциально неустойчивым, а уменьшение запаса устойчивости до 30 и менее градусов приводит к выходу ОУ из линейного режима. Поэтому можно установить рабочий диапазон измерения разности фаз от 30 до 150° (в неинвертирующем и инвертирующем включении ОУ).

В установленных рабочих диапазонах отношения амплитуд и разности фаз сигналов разрабатываемый измеритель должен обеспечивать требуемую точность измерений, а за пределами границ диапазонов – сохранять работоспособность без нормирования погрешностей измерений.

2. Создание макромоделей ОУ по измеренным значениям частотных параметров

С целью сокращения затрат времени на макетирование и экспериментальные исследования электронных схем и, в то же время, расширения программы исследований все более широко применяются Spice-совместимые программы схемотехнического моделирования, обеспечивающие хорошую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных при условии адекватности используемых моделей элементов схемы. Особенно остро проблема сходимости результатов моделирования и экспериментальных данных встает при реализации методик совокупных измерений параметров датчиков и многоэлементных электрических цепей, особенно резонансных [4]. В таких методиках значения отсчетов выходного напряжения измерительной схемы используются для составления и решения системы уравнений, связывающих исходные данные и искомые параметры. Примером может служить методика совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов с несколькими тестовыми синусоидальными сигналами, частоты которых соответствуют характерным точкам амплитудно-частотной характеристики измерительной схемы [5].

Для обеспечения хорошей сходимости результатов моделирования измерительной схемы с применением Spice-совместимых программ схемотехнического моделирования и результатов экспериментальных исследований требуется точное задание значения частоты единичного усиления ОУ, следовательно, необходимо использовать макромоделю, составленную для конкретного экземпляра ОУ – того же самого, с которым проводятся экспериментальные исследования. С этой целью перед установкой микросхемы ОУ в плату измерительной схемы необходимо измерить параметры этой микросхемы и составить с их учетом макромоделю ОУ.

Рассмотрим задачу моделирования измерительной схемы (рис. 1) стенда для совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов (ПКЭ) с использованием тестовых синусоидальных сигналов.

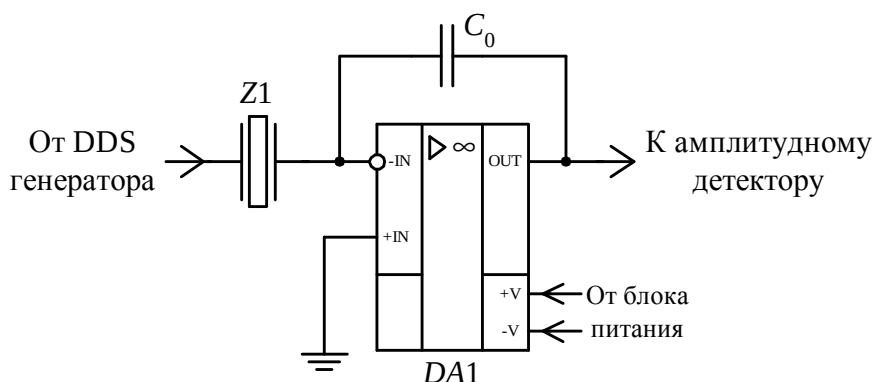


Рис. 1. Измерительная схема стенда для совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов

Исследуемый ПКЭ включается во входной цепи измерительной схемы на основе ОУ К544УД2 [6] с опорным конденсатором C_0 в цепи отрицательной обратной связи.

На предварительном этапе для экземпляра ОУ К544УД2, используемого в дальнейшем при проведении экспериментальных исследований, в соответствии с требованиями ГОСТ измерены динамические параметры:

- частота единичного усиления – 8,1 МГц;
 - запас устойчивости по фазе на частоте единичного усиления – 49°;
 - максимальная скорость нарастания выходного напряжения – 27,7 В/мкс.
- Статические параметры ОУ взяты из справочной литературы [6].

С учетом указанных динамических и статических параметров создана макромодель ОУ K544УД2 с помощью программы Model Editor системы проектирования OrCAD [7]. С помощью программы PSpice A/D OrCAD выполнено моделирование измерительной схемы, представленной на рис. 1. Установлено, что результаты моделирования имеют хорошую сходимость с результатами экспериментов. С целью исследования влияния на результаты моделирования отклонения значения частоты единичного усиления, задаваемого при создании макромодели ОУ, от фактического значения этого параметра дополнительно созданы еще две макромодели ОУ со значениями частоты единичного усиления на 5 % больше и на 5 % меньше, чем фактическое значение $f_1 = 8,1$ МГц. Соответственно $f_1' = 8,51$ МГц и $f_1'' = 7,69$ МГц.

На рис. 2 приведены полученные в результате моделирования измерительной схемы с использованием трех названных макромоделей графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) – зависимостей амплитуды выходного напряжения ОУ от частоты вблизи области последовательного резонанса пьезокерамического элемента, представляемого четырехэлементной эквивалентной электрической схемой с параметрами, указанными в [5]. Максимальные значения амплитуды выходного напряжения на частоте последовательного резонанса соответственно равны: $U_{\text{макс}} = 2,032$ В; $U'_{\text{макс}} = 2,067$ В; $U''_{\text{макс}} = 1,994$ В. Относительные погрешности оценки по результатам моделирования максимальных значений амплитуды выходного напряжения соответственно равны:

$$\delta U'_{\text{макс}} = \frac{U'_{\text{макс}} - U_{\text{макс}}}{U_{\text{макс}}} \cdot 100 \% = 1,72 \% ; \quad \delta U''_{\text{макс}} = \frac{U''_{\text{макс}} - U_{\text{макс}}}{U_{\text{макс}}} \cdot 100 \% = - 1,87 \% .$$

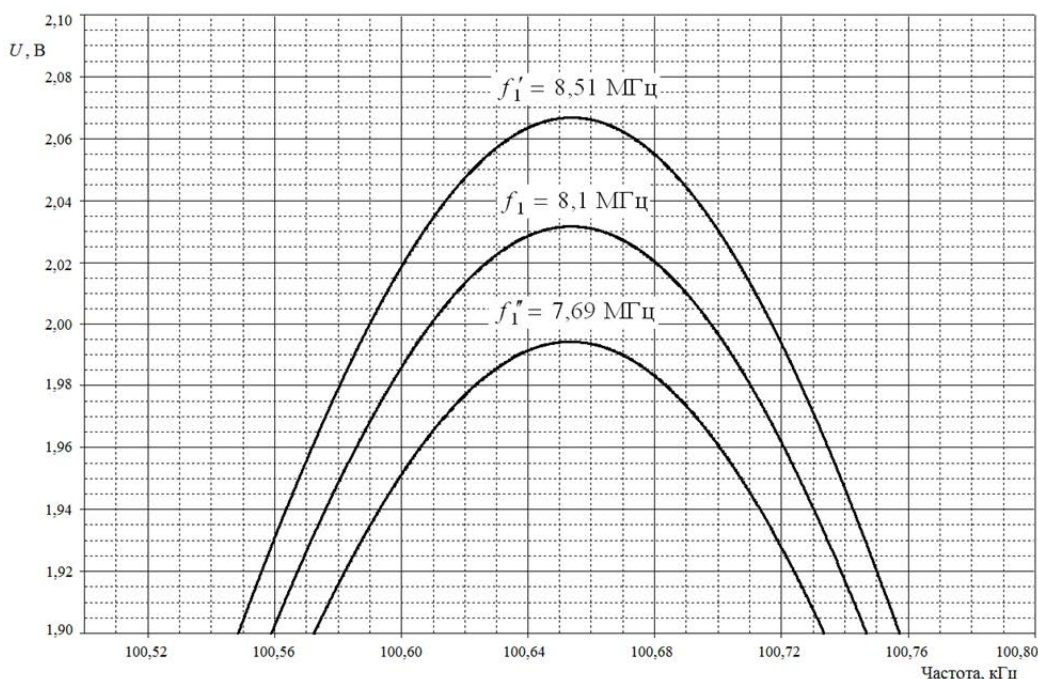


Рис. 2. Графики АЧХ измерительной схемы, представленной на рис. 1

Такие значения погрешности можно считать приемлемыми только при моделировании средств контроля работоспособности схем, но не при моделировании средств измерений.

Полученные результаты показывают, что для создания макромоделей ОУ, обеспечивающих адекватное представление их частотных свойств, необходимо измерять частоту единичного усиления ОУ с достаточно высоким разрешением, по крайней мере менее 1 % от измеряемой частоты.

3. Обеспечение требуемого разрешения по частоте средств измерений частотных параметров ОУ

При поиске частоты единичного усиления ОУ, задавая требуемое разрешение по частоте δf (в процентах) и предполагая, что вблизи частоты единичного усиления спад амплитудно-частотной характеристики ОУ общего применения составляет 20 дБ на декаду частоты, можно определить соответствующее такому разрешению по частоте δf изменение амплитуды выходного напряжения ОУ δU_m (в децибелах):

$$\delta U_m = 20 \lg \left(1 + \frac{\delta f}{100} \right). \quad (1)$$

Для измерения отношения амплитуд выходного и входного напряжений ОУ в [8] предложено использовать логарифмический усилитель-детектор AD8302 [9], характеристики которого на предварительном этапе исследуются с целью определения «усредненного» для рабочего диапазона частот наклона передаточной характеристики $a_{\text{уср}}$, мВ/дБ.

Тогда изменению амплитуды δU_m выходного напряжения ОУ соответствует изменение постоянного выходного напряжения ΔU_a измерителя отношения амплитуд сигналов – детектора AD8302:

$$\Delta U_a = a_{\text{уср}} \delta U_m = a_{\text{уср}} 20 \lg \left(1 + \frac{\delta f}{100} \right). \quad (2)$$

На рис. 3 и 4 приведены графики рассчитанных в соответствии с (2) зависимостей разрешения по напряжению ΔU_a (в милливольтках) измерителя отношения амплитуд сигналов с $a_{\text{уср}} = 31,405$ мВ/дБ от разрешения по частоте δf в диапазонах 0,1–1 и 0,01–0,1 %.

Соотношение (2) и графики, приведенные на рис. 3 и 4, позволяют сформулировать требования к разрешению аналого-цифрового преобразователя, осуществляющего оцифровку постоянного выходного напряжения измерителя отношения амплитуд сигналов. Например, при требуемом разрешении 0,5 % по частоте разрешение по напряжению АЦП должно быть около 1,5 мВ. Если, наоборот, задано разрешение по напряжению используемого АЦП, то можно определить обеспечиваемое при этом разрешение по частоте. Например, разрешению по напряжению АЦП 0,1 мВ соответствует разрешение по частоте около 0,04 %.

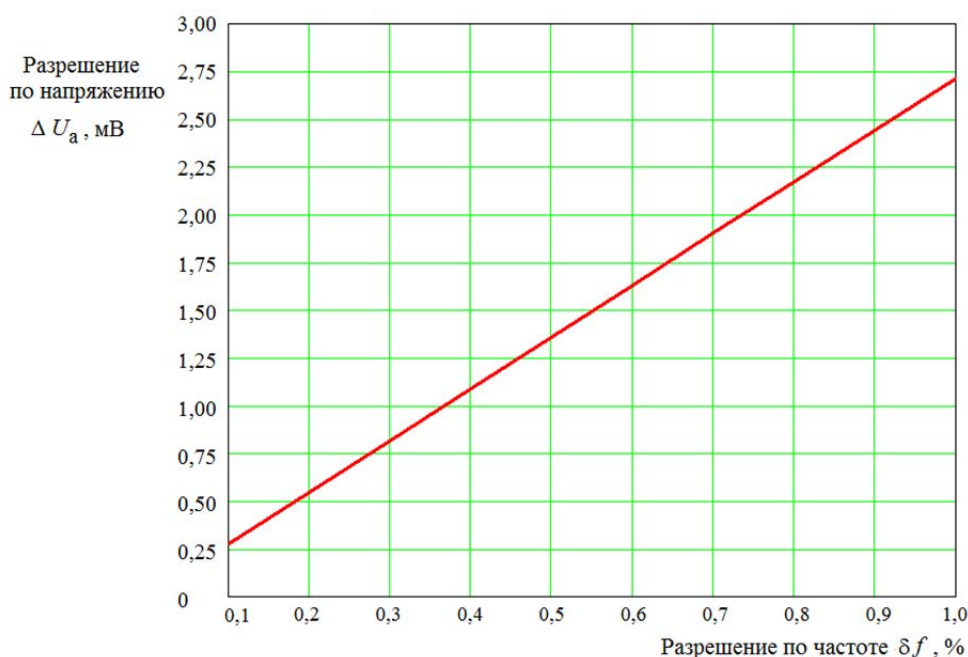


Рис. 3. График зависимости разрешения по напряжению от разрешения по частоте в диапазоне 0,1–1 %

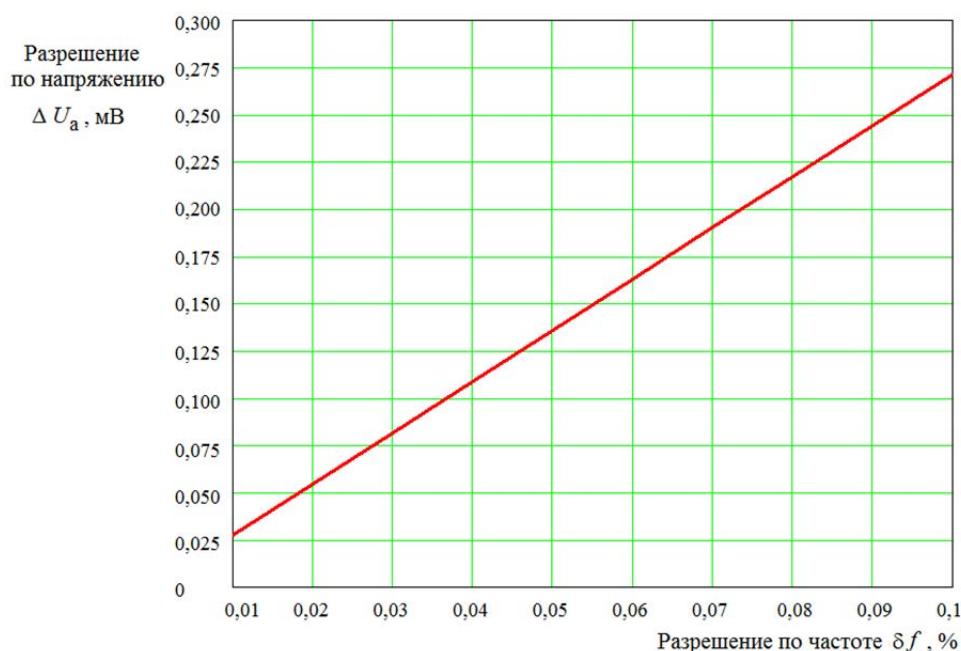


Рис. 4. График зависимости разрешения по напряжению от разрешения по частоте в диапазоне 0,01–0,1 %

Для оперативного задания требуемого разрешения по частоте целесообразно использовать АЦП с программным управлением разрешением, например МСР3422 [10].

Заключение

Сформулированы требования, предъявляемые к средствам измерений частотных параметров ОУ:

- программное управление работой аппаратной части;
- рабочий диапазон частот: от 0,1 до 10 МГц;
- рабочий диапазон измерения отношения амплитуд сигналов: $U_{\text{вых ОУ}}/U_{\text{вх ОУ}} = 0,5...2$ или от минус 6 до + 6 дБ;
- рабочий диапазон измерения разности фаз: от 30 до 150°;
- относительная погрешность измерений отношения амплитуд и разности фаз сигналов не более 2 % в пределах рабочих диапазонов.

Получено соотношение, позволяющее сформулировать требования к разрешению АЦП, осуществляющего оцифровку выходного напряжения измерителя отношения амплитуд сигналов, исходя из требуемого разрешения по частоте при измерении частоты единичного усиления ОУ.

Средства измерений динамических параметров ОУ, построенные с учетом описанных требований, могут применяться для отбора ОУ, предназначенных для построения высокоточных измерительных приборов, например фазометров, фазовращателей и калибраторов фазы [11].

Список литературы

1. Измерители динамических параметров операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, В. В. Комаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 100–102.
2. Операционные усилители общего применения: Справочная информация // Промэлектро-ника. – URL: http://www.promelec.ru/catalog_info/48/73/251/92/
3. Светлов, А. В. Методика измерения частоты единичного усиления операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, В. В. Комаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 41–51.
4. Совокупные измерения электрических параметров пьезокерамических элементов / А. В. Светлов, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, Е. А. Ломтев, Б. В. Цыпин // Известия

- высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 123–135.
5. Колдов, А. С. Методика совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов с использованием синусоидальных сигналов / А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 44–46.
 6. URL: <http://lib.chipdip.ru/030/DOC001030712.pdf>.
 7. Разевиг, В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 520 с.
 8. Сапунов, Е. В. Исследование характеристик детекторов измерительных сигналов / Е. В. Сапунов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 327–329.
 9. AD8302. LF–2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector. – Analog Devices, Inc., 2002. – URL: <http://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/AD8302.pdf>.
 10. MCP3422/3/4. 18-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I²C™ Interface and On-Board Reference. – Microchip Technology Inc., 2009. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088c.pdf>.
 11. Сапельников, В. М. Фазовращатели, калибраторы фазы, эталоны фазового сдвига, фазовые измерения в радионавигации / В. М. Сапельников, С. А. Кравченко, М. К. Чмых. – 2-е изд., доп. – Уфа : РИЦ УГНТУ, 2014. – 276 с.

Паришуков Максим Юрьевич

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

Parshukov Maksim Jur'evich

engineer,
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

Rodionova Nina Vladimirovna

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

Сапунов Евгений Владимирович

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

Sapunov Evgenij Vladimirovich

engineer,
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

Svetlov Anatolij 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)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
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, associate professor,
head of sub-department
of information and measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Требования, предъявляемые к средствам измерений частотных параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, Н. В. Родионова, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 5–12.

УДК 621.317.3

М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов, Д. И. Неведьев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ¹

M. Y. Parshukov, E. V. Sapunov, A. V. Svetlov, D. I. Nefed'ev

THE INVESTIGATION OF CONVERTER OF OPERATIONAL AMPLIFIERS SLEW RATE TO TIME INTERVAL

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрен преобразователь скоростей нарастания и спада выходного напряжения операционных усилителей в интервалы времени, построенный на основе быстродействующих компараторов напряжения AD8561. Целью исследования является оценка погрешности преобразования в зависимости от скорости изменения во времени линейно нарастающего и спадающего напряжения. *Материалы и методы.* Исследование преобразователя выполнено с применением программы схемотехнического моделирования PSpice и макромоделли компаратора AD8561, разработанной фирмой Analog Devices. *Результаты.* Приведены схема включения компараторов и текст задания на моделирование (cir-файл). Определены длительности интервалов времени, полученных при вариации скоростей нарастания и спада линейно изменяющихся напряжений от 1 до 10 В/мкс при амплитуде 3 В. Приведены графики зависимостей относительной погрешности преобразователя от задаваемой скорости нарастания (спада) напряжения. *Выводы.* Подтверждена возможность применения компараторов напряжения AD8561 для построения преобразователя скоростей нарастания и спада выходного напряжения операционных усилителей в интервалы времени. Получены зависимости относительной погрешности преобразователя от скорости нарастания и спада линейно изменяющегося напряжения, что позволяет устанавливать ограничения по диапазону измеряемых скоростей изменения напряжений во времени.

A b s t r a c t. Background. The converter of operational amplifiers slew rate to time interval based on ultrafast comparators AD8561 is considered. The aim of investigation is to evaluation of the conversion error, depending on the rate of change in time linearly rising and falling voltage. *Materials and methods.* The investigation of converter was executed with use of circuit simulation program PSpice and macromodel of comparator AD8561 developed by Analog Devices Company. *Results.* Comparators connection and text of task on simulation (cir-file) is given. Durations of time intervals obtained by variation of the rise and fall rates of linearly varying voltage from 1 V/us us 10 V/us at the amplitude of 3 V are determinated. Graphs of the relative error of the converter defined by the slew rate (fall) voltage are given. *Conclusions.* The possibility of applying comparator AD8561 to construct of converter speeds rise and fall of the output voltage of the operational amplifiers to time intervals is acknowledged. The dependencies of the relative error of converter from the speed of increase and decrease linearly varying voltage, which allows to set limits on a range of measured voltage change speeds in time.

К л ю ч е в ы е с л о в а: операционный усилитель, скорость нарастания выходного напряжения, преобразователь, интервал времени, моделирование, погрешность.

К е у w o r d s: operational amplifier, slew rate, converter, time interval, simulation, error.

¹ Работа поддержана Грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 16-38-00233).

Введение

Одним из динамических параметров операционных усилителей (ОУ), в обязательном порядке приводимых в паспортных данных, является максимальная скорость нарастания выходного напряжения. Этот параметр должен измеряться в соответствии с требованиями ГОСТ 23089.10–83, но в настоящее время промышленностью не выпускаются средства измерений динамических параметров ОУ. Поэтому актуальна задача разработки многофункциональных аппаратно-программных комплексов для автоматизированного измерения важнейших динамических параметров ОУ, в том числе максимальной скорости нарастания выходного напряжения. При этом необходимо учитывать асимметрию реальных значений максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ [1–3]. Например, для обследованной авторами партии отечественных ОУ К544УД2 среднее значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения составило 26 В/мкс, а среднее значение максимальной скорости спада – 37 В/мкс. Поэтому разрабатываемые средства измерений динамических параметров ОУ должны определять скорость нарастания и спада выходного напряжения.

1. Цель и методика исследования

В [4–6] показано, что при измерении скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ целесообразно осуществление следующей последовательности преобразований: скорость нарастания (спада) напряжения – интервал времени – постоянное напряжение – цифровой код. В предлагаемой работе проведено исследование первой и наиболее ответственной процедуры из этой цепочки преобразований, т.е. преобразования скорости нарастания (спада) напряжения в интервал времени с помощью быстродействующих компараторов напряжения AD8561, разработанных и поставляемых на рынок фирмой Analog devices [7].

Целью данного исследования является оценка погрешности преобразования в зависимости от скорости изменения во времени напряжения. Экспериментальная оценка этой погрешности затруднена ввиду отсутствия рабочих мер скорости нарастания (спада) напряжения. Высокоточное формирование линейно изменяющегося напряжения с варьируемой крутизной само по себе является очень сложной задачей. Поэтому исследование проводится путем схемотехнического моделирования блока компараторов с применением программы PSpice пакета OrCAD [8].

Компараторы напряжения AD8561 представляются макромоделью [9], разработанной фирмой Analog devices. Данная макро модель позволяет адекватно представлять динамические свойства компаратора. Макро модель имеет 8 выводов для подключения внешних цепей. В задании на моделирование (cir-файле) выводы макро модели перечисляются в следующем порядке: non-inverting input; inverting input; positive supply; negative supply; Latch; DGND; Q; QNOT.

Задание на моделирование преобразователя скорости нарастания (спада) напряжения в интервал времени составлено в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

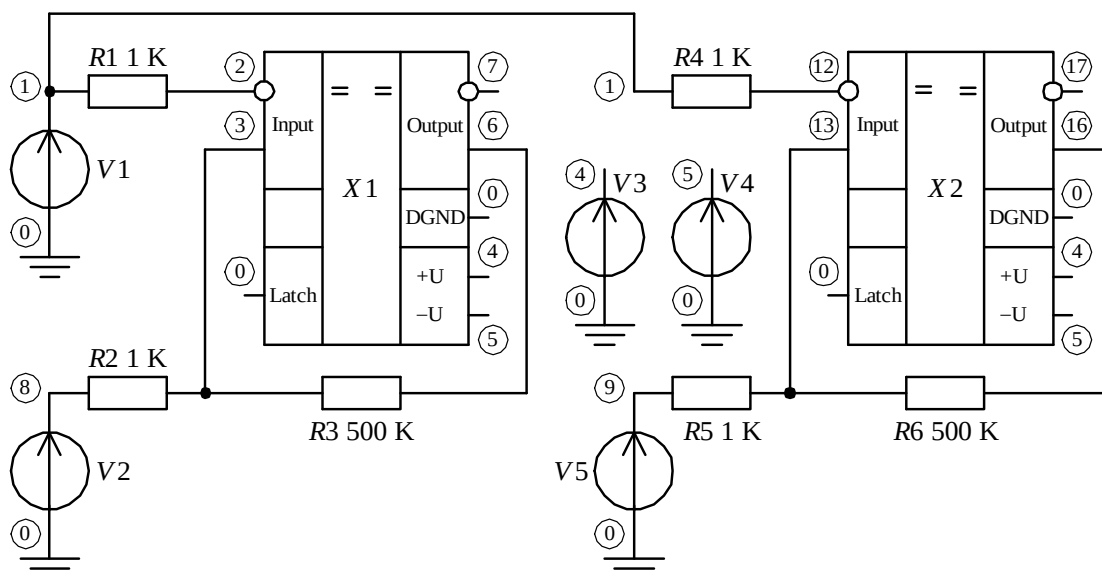


Рис. 1. Схема преобразователя скорости нарастания (спада) напряжения в интервал времени

Задание на моделирование записывается в файл с именем 1.cir:

```
1
V1 1 0 PWL(0 0 3.0E-6 3 3.1E-6 0 3.2E-6 0)
V2 8 0 0.3
V3 4 0 5
V4 5 0 -5
V5 9 0 2.7
R1 8 2 1K
R2 1 3 1K
R3 3 6 500K
R4 9 12 1K
R5 1 13 1K
R6 13 16 500K
.LIB d:\S\AD8561.lib
X1 3 2 4 5 0 0 6 7 AD8561
X2 13 12 4 5 0 0 16 17 AD8561
.tran 0.0001us 3.0us 0us 0.0001us
.PROBE U(1) U(6) U(7) U(8) U(9) U(16) U(17)
.END
```

На инвертирующие входы компараторов, представляемых макромоделями X1 и X2, подаются линейно нарастающее либо линейно спадающее напряжения от независимого источника напряжения V1, включенного между узлами 1 и 0. Скорость нарастания и спада этого напряжения v_U варьируется от 1 до 10 В/мкс при амплитуде 3 В. В приведенном выше тексте файла 1.cir в качестве примера показано напряжение, линейно нарастающее со скоростью 1 В/мкс от 0 до $U(1)_{\text{макс}} = 3$ В за время 3 мкс. Источниками постоянного напряжения V2 и V5 на неинвертирующие входы компараторов подаются пороговые напряжения $0,1U(1)_{\text{макс}} = 0,3$ В и $0,9U(1)_{\text{макс}} = 2,7$ В. Эти пороговые напряжения, а также линейно изменяющееся напряжение в узле 1, показаны на верхней временной диаграмме (рис. 2), построенной по результатам моделирования графическим постпроцессором Probe программы PSpice.

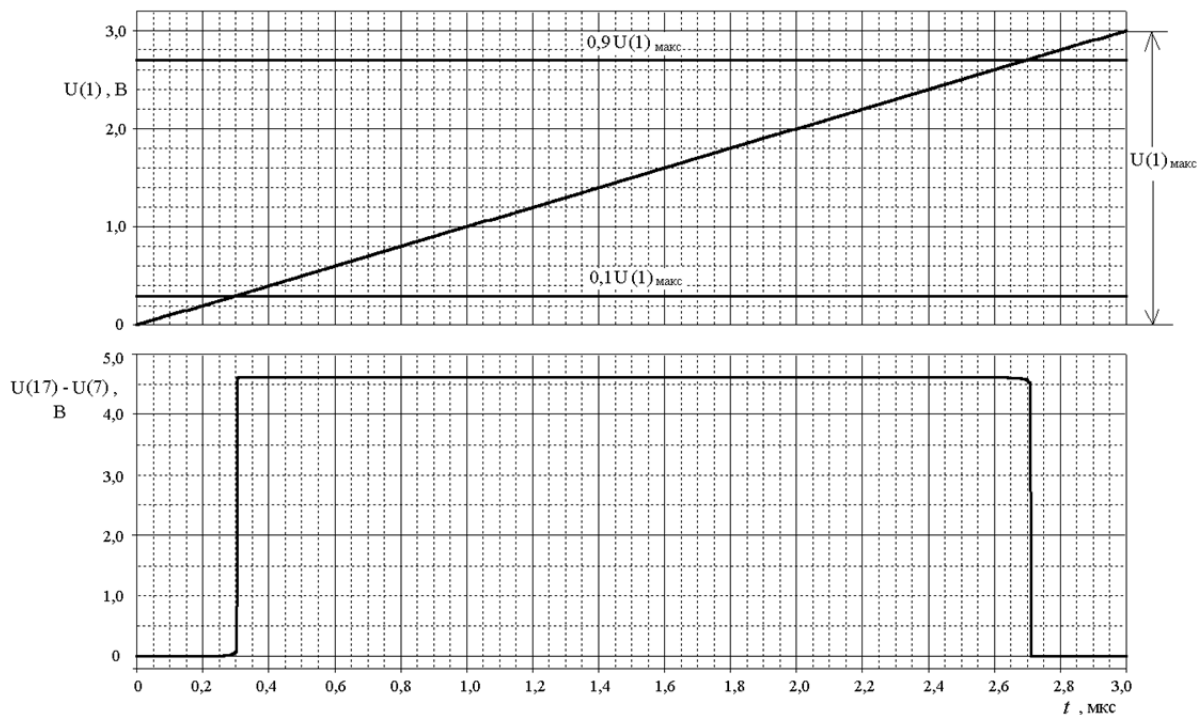


Рис. 2. Временные диаграммы, иллюстрирующие преобразование скорости нарастания напряжения в интервал времени

На нижней временной диаграмме, приведенной на рис. 2, показана разность напряжений $U(17)$ и $U(7)$ на инверсных выходах второго и первого компараторов. Интервал времени между срабатываниями компараторов по пороговым уровням $0,1U(1)_{\text{макс}}$ и $0,9U(1)_{\text{макс}}$ пропорционален скорости нарастания линейно изменяющегося напряжения $U(1)$. Процедура регистрации времени срабатывания компараторов иллюстрируется рис. 3 и 4, на которых показаны временные диаграммы фронта и спад импульса, сформированного блоком компараторов. Отсчет моментов времени срабатывания компараторов проводился по уровню логической единицы 2,5 В.

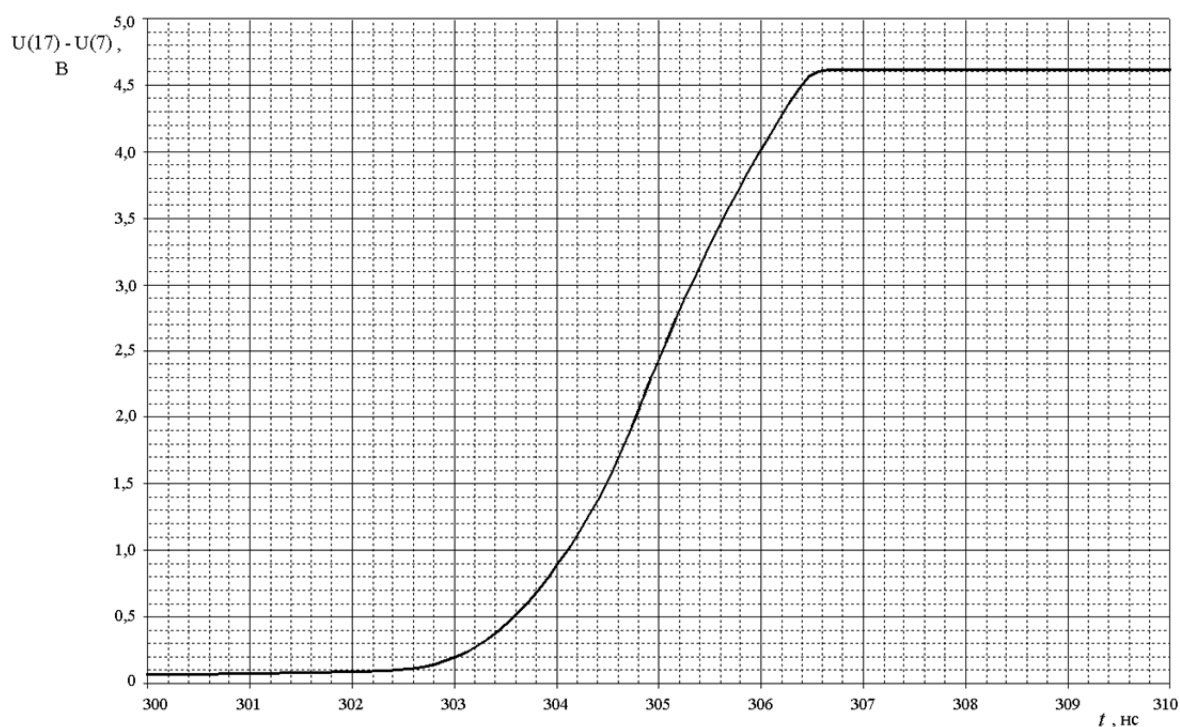


Рис. 3. Временная диаграмма фронта импульса, сформированного блоком компараторов

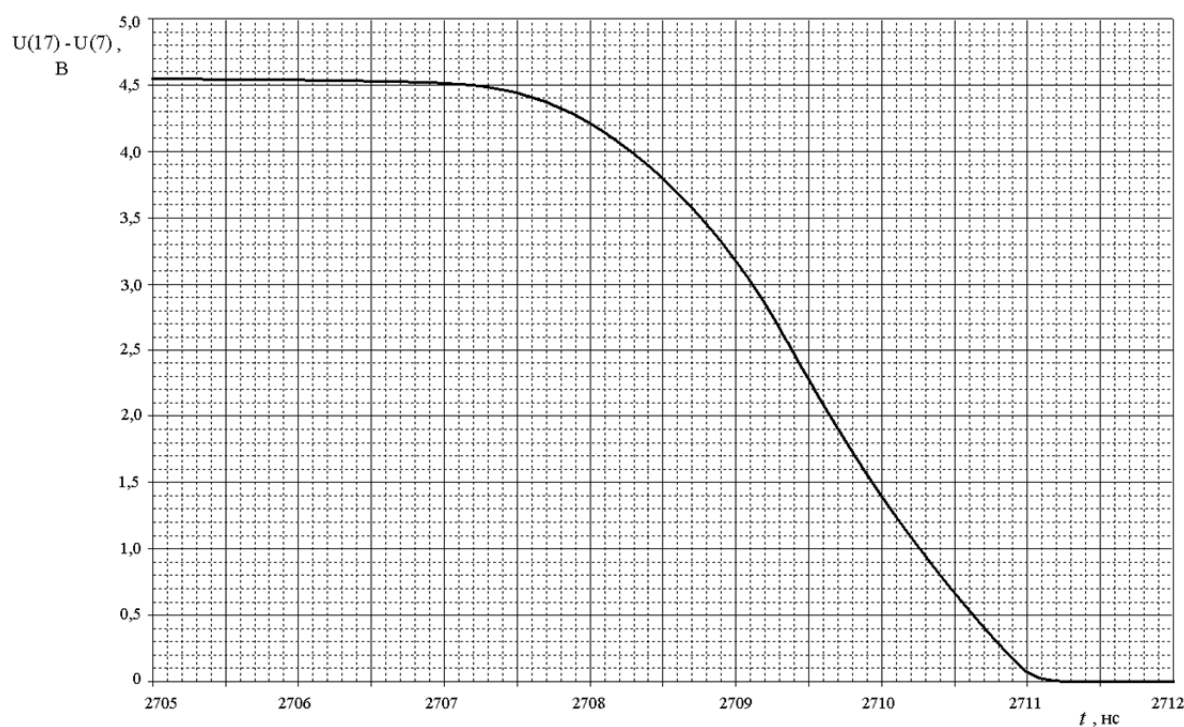


Рис. 4. Временная диаграмма спада импульса, сформированного блоком компараторов

Аналогично проводится моделирование процесса преобразования спада линейно изменяющегося напряжения в интервал времени (рис. 5).

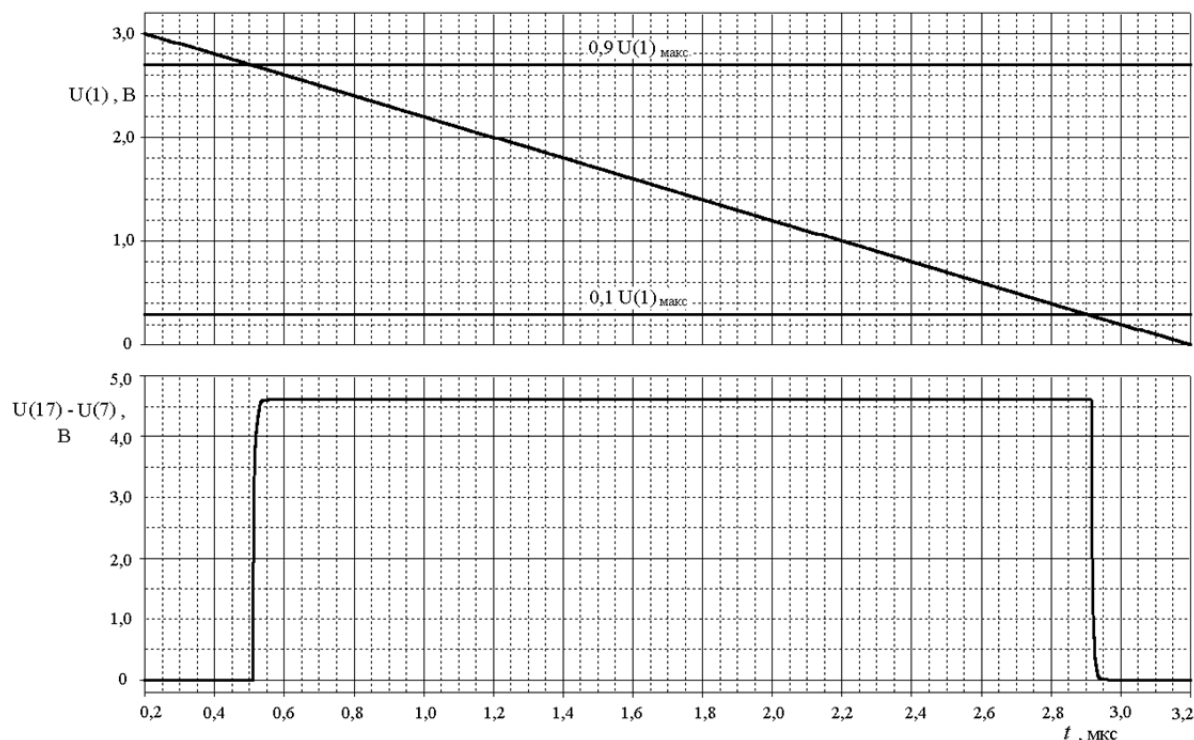


Рис. 5. Временные диаграммы, иллюстрирующие преобразование скорости спада напряжения в интервал времени

2. Результаты исследования

В табл. 1 приведены результаты моделирования преобразователя скорости нарастания (спада) напряжения в интервал времени при вариации скорости v_U от 1 до 10 В/мкс и амплитуде напряжения $U(1)_{\text{макс}} = 3$ В.

Таблица 1

v_U , В/мкс	T , мкс	$\tau_{\text{расч}}$, мкс	$\tau_{\text{ф}}$, мкс	$\tau_{\text{сп}}$, мкс	$\delta\tau_{\text{ф}}$, %	$\delta\tau_{\text{сп}}$, %
1,0	3,0	2,4	2,404	2,4039	0,17	0,16
2,0	1,5	1,2	1,202	1,2017	0,17	0,14
3,0	1,0	0,8	0,8013	0,8008	0,16	0,10
4,0	0,75	0,6	0,6009	0,5999	0,15	-0,01
5,0	0,6	0,48	0,4807	0,4791	0,15	-0,18
6,0	0,5	0,4	0,4002	0,3983	0,05	-0,44
7,0	0,4286	0,34286	0,3429	0,3405	0,03	-0,70
8,0	0,375	0,3	0,2995	0,2969	-0,15	-1,03
9,0	0,3333	0,2667	0,2659	0,2630	-0,27	-1,36
10,0	0,3	0,24	0,2390	0,2359	-0,40	-1,68

В столбцах таблицы приведены:

- задаваемые значения длительности T линейно изменяющейся части импульсов на входе компараторов;
- расчетные значения длительности $\tau_{\text{расч}}$ интервала времени, за который входное напряжение изменится от уровня $0,1U(1)_{\text{макс}}$ до $0,9U(1)_{\text{макс}}$ при нарастании напряжения или, наоборот, при спаде;
- полученные из временных диаграмм фронта и спада импульса, сформированного блоком компараторов, значения интервалов времени $\tau_{\text{ф}}$ и $\tau_{\text{сп}}$, пропорциональных скорости нарастания и спада линейно изменяющегося напряжения;

– значения относительной погрешности преобразователя:

$$\delta\tau_{\phi} = \frac{\tau_{\phi} - \tau_{\text{расч}}}{\tau_{\text{расч}}} \cdot 100\% ; \delta\tau_{\text{сп}} = \frac{\tau_{\text{сп}} - \tau_{\text{расч}}}{\tau_{\text{расч}}} \cdot 100\% .$$

Графики полученных зависимостей относительной погрешности преобразователя от задаваемой скорости нарастания (спада) напряжения приведены на рис. 6 и 7.

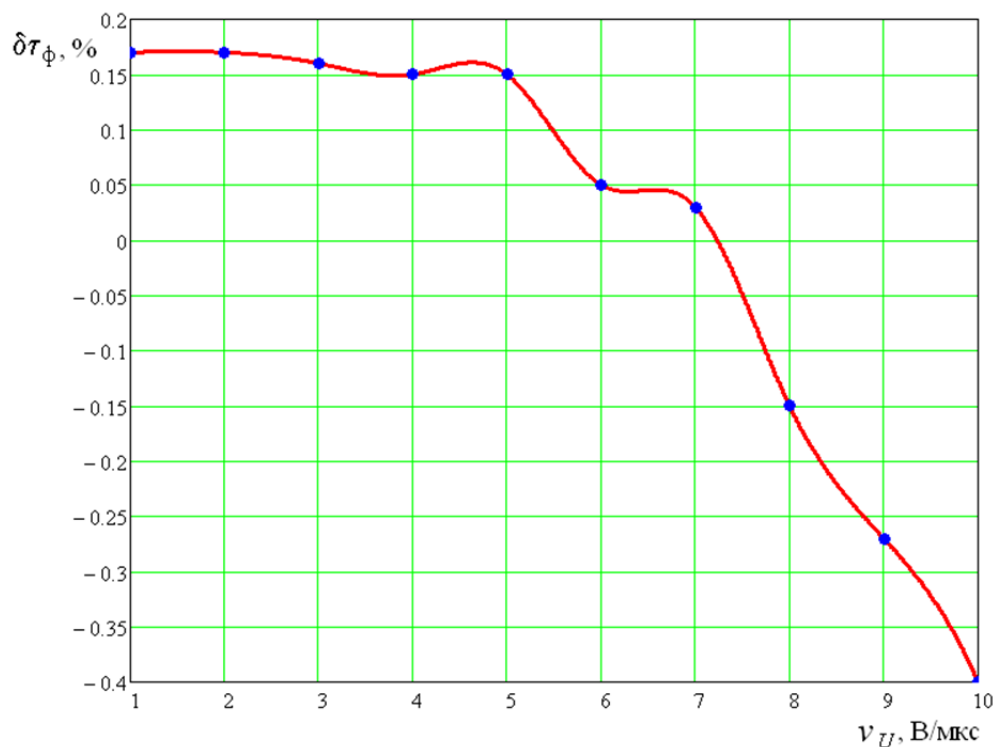


Рис. 6. График зависимости погрешности преобразователя от скорости нарастания напряжения

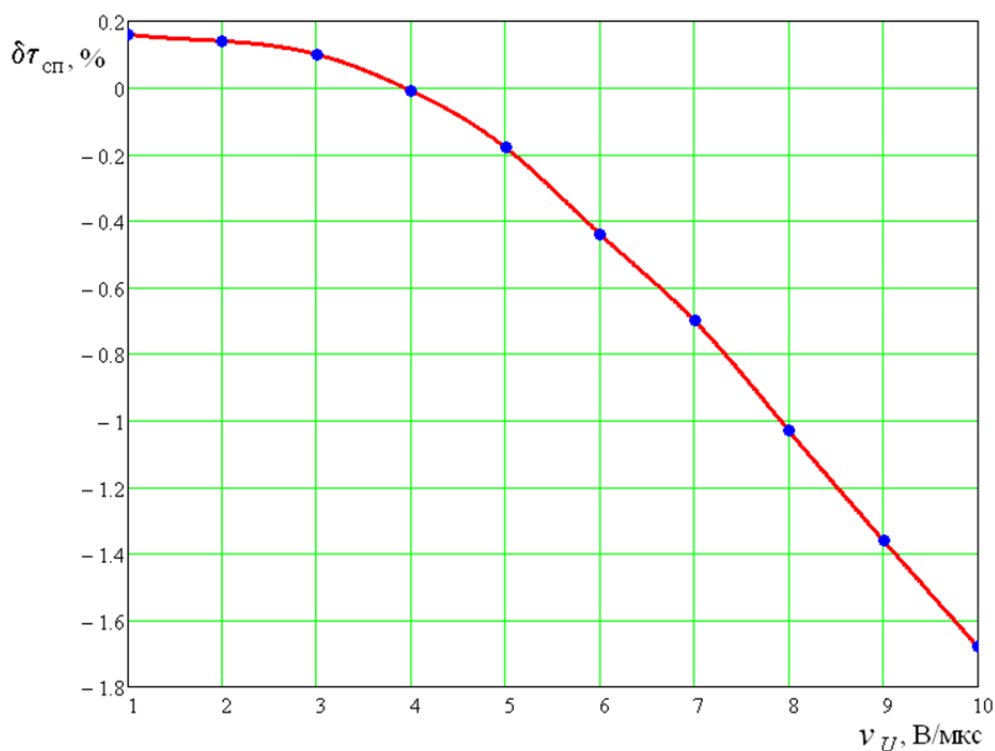


Рис. 7. График зависимости погрешности преобразователя от скорости спада напряжения

Как видно из приведенных графиков, в диапазоне скоростей от 1 до 10 В/мкс относительная погрешность преобразователя при измерении скорости нарастания не превышает 0,4 %, а при измерении скорости спада – 1,8 %. Полученную погрешность преобразователя скоростей нарастания и спада выходного напряжения операционных усилителей в интервалы времени можно считать приемлемой, исходя из того, что результирующая погрешность измерения скоростей нарастания и спада выходного напряжения операционных усилителей не должна превышать ± 10 % [10].

Заключение

Подтверждена возможность применения компараторов напряжения AD8561 для построения преобразователя скоростей нарастания и спада выходного напряжения операционных усилителей в интервалы времени. Получены зависимости относительной погрешности преобразователя от скорости нарастания и спада линейно изменяющегося напряжения, что позволяет устанавливать ограничения по диапазону измеряемых скоростей изменения напряжений во времени.

Список литературы

1. Андреев, А. Н. Макромодель операционного усилителя для моделирования измерительных цепей с импульсными сигналами / А. Н. Андреев, В. А. Казаков, А. В. Светлов // Измерительная техника. – 1999. – № 9. – С. 26–29.
2. Автоматизированное измерение максимальной скорости нарастания выходного напряжения операционного усилителя / С. Ю. Байдаров, М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, И. В. Ханин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2010. – Т. 2. – С. 185–187.
3. Измерение динамических параметров операционных усилителей с применением цифровых формирователей сигналов / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 62–65.
4. Аппаратно-программный комплекс для автоматизированного контроля параметров операционных усилителей / С. Ю. Байдаров, М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, В. В. Комаров // Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments – 2011 : сб. тр. X Междунар. науч.-практ. конф. – М. : ДМК-пресс, 2011. – С. 102–104.
5. Измерители динамических параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 100–102.
6. Структуры автоматизированных измерителей динамических параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: <http://www.science-education.ru/117-13125>
7. AD8561 Ultrafast 7 ns Single Supply Comparator. – Analog Devices, Inc., 2014. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8561.pdf>.
8. Разевиг, В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 520 с.
9. AD8561 Spice Model. 2014. – URL: http://www.datasheetlib.com/datasheet/54357/ad8561aru-reel_adi-analog-devices-inc.html?page=9.
10. ГОСТ 23089.0–78. Микросхемы интегральные. Общие требования при измерении электрических параметров операционных усилителей и компараторов напряжения. – М., 1978.

Паршуков Максим Юрьевич

инженер,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu

Parshukov Maksim Jur'evich

engineer,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сапунов Евгений Владимирович

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

Sapunov Evgenij Vladimirovich

engineer,
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

Svetlov Anatolij 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)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
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, associate professor,
head of sub-department
of information and measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Паршуков, М. Ю.

Исследование преобразователя скорости нарастания выходного напряжения операционных усилителей в интервал времени / М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 13–20.

**Ю. М. Голубинский, А. Г. Елистратова,
В. А. Пискунова, Е. С. Чернова**

ПРИМЕНЕНИЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО МЫШЛЕНИЯ В НОВОЙ ВЕРСИИ СТАНДАРТА ISO 9001:2015

Yu. M. Golubinskiy, A. G. Elistratova, V. A. Piskunova, E. S. Chernova

APPLICATION RISK – THE FOCUSED THINKING IN THE NEW VERSION OF THE ISO 9001:2015 STANDARD

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены новые понятия и подходы, использованные в принятой версии стандарта ISO 9001:2015. Изменения затронули такие понятия, как «среда организации», «документированная информация», «продукция и услуги», «знания организации», и подход на основе «риск-ориентированного мышления». *Результаты.* Показано, каким образом примененные новации коснулись структуры стандарта, которая будет использоваться во всех последующих стандартах серии. Риск-ориентированное мышление рассматривается как новый аспект работы с риском, введенный в стандарт ISO 9001:2015. Усилена роль процессного подхода, позволяющего организации управлять взаимосвязями и взаимозависимостями между процессами системы, так что общие результаты деятельности организации могут быть улучшены. Связь процессов организации с управлением рисками рассматривается как одно из потенциальных преимуществ для организации, направленных на возможность продемонстрировать соответствие установленным требованиям системы менеджмента качества. *Выводы.* Направление усилий на риски и возможности создает основу для повышения результативности системы. Координация работ по управлению рисками в организации должна способствовать достижению улучшенных результатов и предотвращению неблагоприятных последствий.

A b s t r a c t. *Background.* The new concepts and approaches used in the accepted version of the ISO 9001:2015 standard are considered. Changes affected such concepts as «The environment of the organization», «Documentary information», «Production and services», «Knowledge of the organization» and approach on the basis of «Risk-focused of thinking». The applied innovations concerned structure of the standard which will be used in all subsequent standards of a series. The risk-focused thinking is considered as the new aspect of work with risk entered into the ISO 9001:2015 standard. The role of the process approach allowing the organization to operate interrelations and interdependence between processes of system so the general results of activity of the organization can be improved is strengthened. Communication of processes of the organization with risk management is considered as one of the potential advantages to the organization directed on opportunity to show compliance to the established requirements of quality management system. *Conclusions.* The direction of efforts to risks and opportunities creates a basis for increase of productivity of system. Coordination of works on risk management in the organization has to promote achievement of the improved results and prevention of adverse effects.

К л ю ч е в ы е с л о в а: система менеджмента качества, риск-ориентированное мышление, управление рисками, ИСО 9001:2015.

К e y w o r d s: quality management system, the risk-focused system, the risk-focused thinking, risk management, ISO 9001:2015.

Стандарты серии ISO 9000 являются, пожалуй, одними из самых популярных в мире нормативных документов. По данным 2014 г., зарегистрировано более 1 млн сертифицированных по этому стандарту организаций. Они разнообразны по областям деятельности, формам собственности, размеру и структуре, поэтому любая информация об изменениях в этом стандарте вызывает огромный интерес.

Разработкой стандартов ISO 9001 занимается ISO/TC 176 «Менеджмент качества и обеспечение качества». Впервые ISO 9001 вышел в 1987 г., и с этого момента его популярность неуклонно росла. Среднее время «жизни» версии ISO 9001 составляет семь лет, поэтому выход новой версии в 2015 г. являлся плановым и предсказуемым событием. Конечно, новые версии стандартов разрабатываются не просто так – процесс принятия решения по этому поводу требует консультаций со всеми заинтересованными сторонами и одобрения большинства членов ISO [1].

Так же как и все международные стандарты, стандарт системы менеджмента качества ISO 9001:2015 проходит периодическую проверку на соответствие существующим потребностям заинтересованных сторон (бизнеса, государственных органов, потребителей). Результатами такой проверки является пересмотр положений действующего стандарта и выход новой версии [2].

Появление пятого издания ISO 9001 вызвано следующими причинами:

1) за прошедший период произошли существенные изменения в мировой практике менеджмента, окружающей деловой среде, накоплены новые знания;

2) появились новые стандарты на системы менеджмента, что вызвало необходимость в создании единого подхода;

3) есть некоторые «рудименты», с которыми необходимо расстаться, чтобы двигаться дальше. Например: «обязательные документированные процедуры» и «документированное руководство по качеству»;

4) единственный стандарт систем менеджмента, который не использует риск-менеджмент, был ИСО 9001. В целом получилось так, что, стартовав первым, ИСО 9001 оказался в конце, отстав от других аналогичных стандартов менеджмента из-за своей устаревшей структуры;

5) нужна и вертикальная интеграция менеджмента организации. Система менеджмента качества должна соответствовать общей стратегии организации, т.е. ее бизнес-планам, а не быть отдельной автономной частью организации [3].

Рассмотрим основные изменения, которые произошли в новой версии ISO 9001 по сравнению с предыдущей версией 2008 г. (табл. 1).

Таблица 1

Структуры стандартов ИСО 9001:2008 и ИСО 9001:2015 в сравнении [4, 5]

ИСО 9001:2008	ИСО 9001:2015
0 Введение	
1 Область применения	
2 Нормативные ссылки	
3 Термины и определения	
4 Система менеджмента качества	4 Среда организации
5 Ответственность сторон	5 Лидерство
	6 Планирование
6 Менеджмент ресурсов	7 Средства обеспечения
7 Выпуск продукции	8 Деятельность на стадиях жизненного цикла продукции и услуг
8 Измерение, анализ и улучшение	9 Оценка результатов деятельности
	10 Улучшение

При создании новой версии ISO 9001 применена «структура высокого уровня» – стандартизованное перечисление разделов, основанное на цикле непрерывного улучшения Шухарта – Деминга (PDCA). Такая структура теперь будет применяться для всех стандартов ISO, описывающих требования к системам менеджмента. Это огромный шаг на пути к унифика-

ции, который позволит значительно сэкономить усилия организаций при внедрении интегрированных систем менеджмента [6].

Помимо структуры изменениям подверглись термины и принципы стандарта.

Самое принципиальное изменение в терминологии касается применения термина «продукция». В прежних версиях стандарта этот термин объединял материальный товар и нематериальную услугу. В новой версии было решено вместо аморфного термина «продукция» применить термины «продукция» (товар) и «услуга».

Следующие два прежних термина «документация» и «записи» было решено объединить в один общий термин «документированная информация». Это избавит от лишних споров о том, что следует считать документом, а что записью.

Некоторые понятия в проекте стандарта укрупнены. Так, например, «управление закупками» и «аутсорсинг» теперь объединены в понятие «внешнее обеспечение». Смысл этого изменения в том, что возможны такие формы получения организацией продукции (услуги) извне, которые не покрывались двумя названными. При этом требования к процессам получения продукции (услуги) извне могут быть одинаковыми вне зависимости от их формы.

Важным нововведением стало понятие «среда организации». Под средой организации понимается окружающая деловая среда, включающая совокупность внутренних и внешних факторов. В частности, организационная среда используется для анализа и оценки рисков, для стратегического планирования. Наиболее значимой составляющей среды организации является «Заинтересованная сторона», т.е. физическое или юридическое лицо, интересы которого связаны с организацией. Понимание среды организации позволяет определить все требования к системе менеджмента качества (СМК), а также четко определить область применения для системы менеджмента качества. При наличии исключений из требований стандарта их следует аргументированно обосновать.

Все требования касательно закупаемых товаров и услуг, а также процессов, передаваемым внешним организациям, объединяются в один раздел – «Контроль продуктов и услуг от внешних поставщиков». Раньше эти требования были «размазаны» по всему стандарту.

Процессный подход остается ключевой концепцией построения системы менеджмента (в новой версии этот тезис усилен). В практике внедрения стандарта ИСО 9001 процессный подход зачастую применяется в искаженном виде: процессами называют деятельность подразделений и, по сути, в СМК используется функциональный подход.

Наиболее радикальной новацией ИСО 9001:2015 стал отказ от «обязательных документированных процедур» и «руководства по качеству». Теперь организация сама определяет то, как она будет управлять процессами, а не только через «документированные процедуры». Если же организация не пожелает расстаться с документированными процедурами, то это не будет противоречить требованиям ИСО 9001:2015. Формальных или бумажных доказательств соответствия теперь будет недостаточно, а необходимы реально функционирующие процессы в реально функционирующей организации [2].

В новой версии отсутствует раздел, формулирующий особые требования к «предупреждающим действиям». Это связано с тем, что одно из ключевых назначений функционирующей системы менеджмента состоит в том, чтобы действовать как инструмент предупреждения. Подготовка персонала, поддержание инфраструктуры, внутренние аудиты – все это предупреждающие действия. Эти действия заложены в самом духе стандарта. В новой версии этот дух выражается в виде «риск-ориентированного мышления».

Концепция риска, т.е. вероятности невыполнения основной задачи СМК по предоставлению потребителю соответствующих его требованиям продуктов и (или) услуг в целях достижения его удовлетворенности и ранее (скрытым образом) присутствовала в тексте стандарта ISO 9001, но в новой версии она более явно встраивается во всю систему менеджмента.

Не все процессы системы менеджмента качества представляют один и тот же уровень риска с точки зрения способности организации выполнять свои задачи, и последствия несоответствий процесса, продукта, услуги или системы не одни и те же для всех организаций.

Не все процессы организации обладают одним и тем же уровнем риска с точки зрения их влияния на способность организации достигать своих целей, равно как и последствия несоответствий в процессах, продукции, услугах или системе не одинаковы для разных организаций.

В некоторых организациях последствия поставки несоответствующей продукции или предоставления несоответствующих услуг могут приводить лишь к незначительным неудоб-

ствам для потребителя, тогда как в других случаях несоответствия могут привести к далеко идущим последствиям и даже к фатальному исходу.

Поэтому риск-ориентированное мышление означает необходимость количественного (и, в зависимости от условий функционирования организации, качественного) рассмотрения риска при принятии решения о строгости и глубине подхода к планированию и управлению как системой менеджмента качества, так ее процессами и видами деятельности.

Текст документа требует применения риск-ориентированного подхода на всех этапах (P-D-C-A) функционирования системы менеджмента качества. Однако, хотя риски должны идентифицироваться и учитываться, нет никаких требований для формального внедрения системы менеджмента рисков или документированного процесса управления рисками.

В новой версии требование о принятии решений, основанном на рисках, сформулировано явно и тесно увязано с концепцией процессного подхода. Это и позволило отказаться от предупреждающих действий как отдельного требования, поскольку переместило их на уровень оперативного и ежедневного функционирования каждого процесса СМК. При этом риск следует понимать не только как негативное явление, но и как возможность нахождения областей для улучшения в процессах. ISO 9001:2015 не требует проведения полной, официальной оценки рисков с заполнением «реестров рисков» или каких-либо других документов. В качестве полезного, справочного (но совершенно не обязательного) документа по методам принятия решений на основании рисков можно назвать ГОСТ Р ИСО 31000–2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство».

Согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 31000–2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство», который устанавливает принципы и общее руководство по риск-менеджменту, риск – это влияние неопределенности на цели (рис 1):

$$\text{РИСК} = \text{ВЕРОЯТНОСТЬ} \times \text{ТЯЖЕСТЬ СОБЫТИЯ.}$$



Рис. 1. Понятие «риск»

Для облегчения координации работ в организации может быть разработан документ – Положение по идентификации и управлению рисками в организации. Цель внедрения – определение рекомендаций по выявлению приемов, средств и их применение для идентификации рисков, их оценки и снижения, а также разработки мероприятий для устранения рисков. Известно, что системный цикл в риск-менеджменте представлен этапами:

- сбор информации (является базисом – кто, откуда, куда);
- идентификация рисков (даем имена рискам, что будет являться источником риска, рисковым событием).

Идентификация риска – действия, направленные на определение параметров рисковой ситуации (что может случиться, где, когда, как и почему). Цель идентификации – составление полного перечня рисков, которые могут повлиять на достижение поставленных целей, в рамках СМК.

В положении могут быть разделы, в которых описывается:

- а) процедура оценки и управления рисками, связанными с оказанием воздействия на качество продукции (услуг);

- б) ответственность за общее руководство процедурой оценки и управления рисками;
- в) создание рабочей группы ответственных лиц для разработки (далее рабочая группа), системы анализа рисков (идентификация, оценка и снижение) и критических контрольных точек;
- г) распределение ответственности и полномочий в рабочей группе;
- д) результат работы рабочей группы, в который входит выявление области применения оценки рисков, связанных с качеством продукции, определение рисков, планирование мероприятий; методология оценки рисков, способы управления рисками.

Весь процесс управления рисками по процессам СМК можно отразить в схеме на рис. 2 [7].

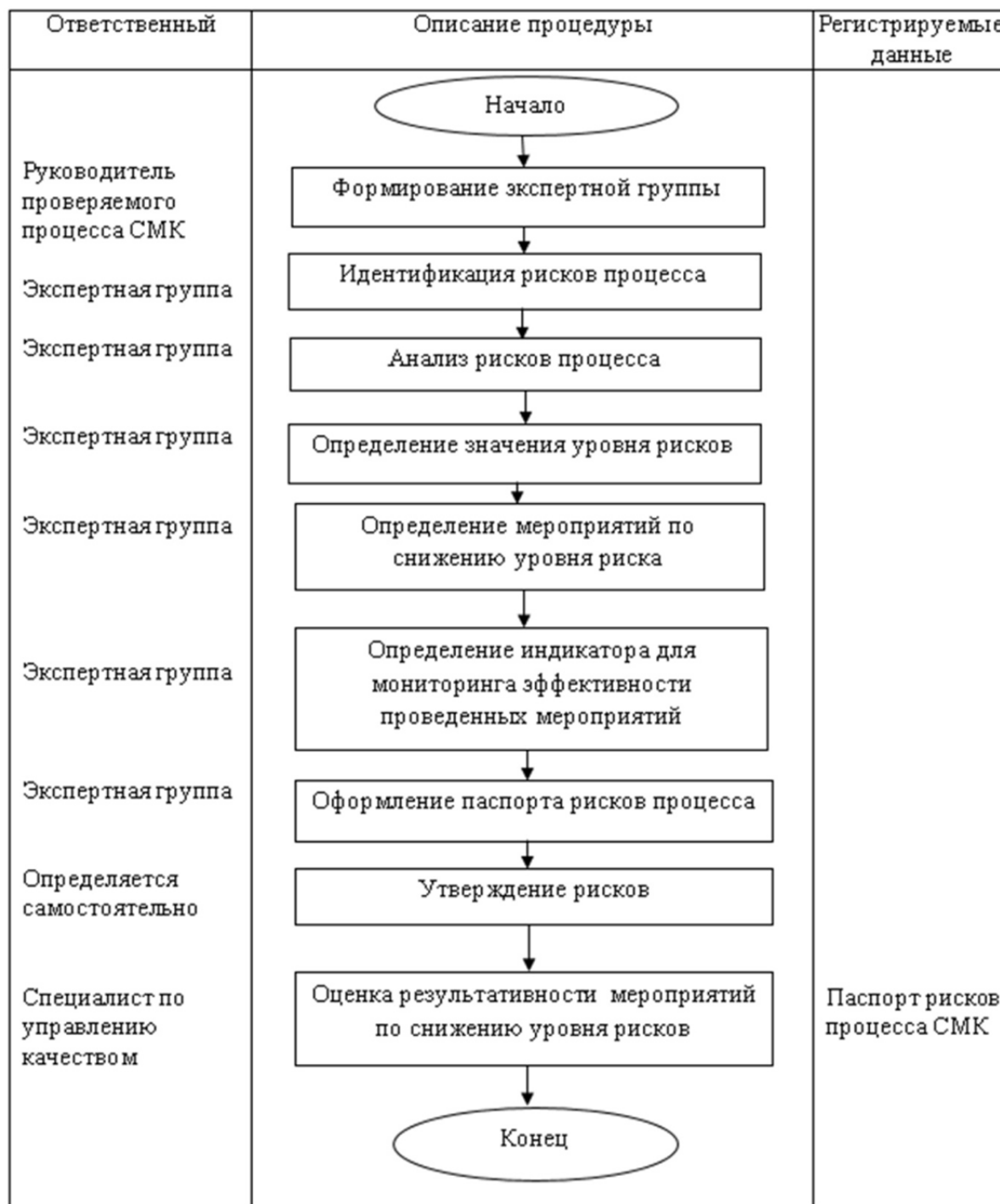


Рис. 2. Деятельность по управлению рисками процессов СМК

По завершении работ по оценке и управлению рисками рабочая группа согласует итоговые документы, включающие: таблицу «Идентификация и оценивание рисков»; матрицу

оценки рисков; реестр критических и значительных рисков; паспорта критических и значительных рисков.

Все риски делятся на приемлемые, оправданные, недопустимые. Приемлемые риски не принимаются во внимание, а остальные требуют действий. Для рисков, получивших статус оправданных, планируются и осуществляются мероприятия, способные предотвратить риски или минимизировать их (в предыдущей версии стандарта мероприятия такого вида назывались предупреждающими). Недопустимый риск показывает, что риск важно еще и постоянно контролировать. Повторная оценка необходима для того, чтобы проверить результативность реализованных мероприятий.

Важно использовать одну и ту же методику по расчету рисков, а также привлекать для оценки все тех же специалистов/экспертов. Это даст возможность получить сравнимые результаты.

На реализацию требований новой версии дается 3 года, т.е. при условии публикации стандарта ISO 9001:2015 в 2015 г. организации будут иметь 3 года на подготовку. В течение этого переходного периода возможна сертификация и по старой версии 2008 г., и по новой [8].

Таким образом, ключевым изменением в новой версии стандарта ISO 9001:2015 является замена предупреждающих действий предшествующего стандарта на управление рисками. На смену ISO 9001:2008, как стандарту менеджмента качества, водворяется ISO 9001:2015, позиционирующийся как стандарт для систем менеджмента бизнеса. Новый стандарт организация может использовать как инструмент управления бизнесом для увеличения ценности, улучшения своей работы и снижения рисков.

Список литературы

1. Езрахович, А. Новая версия ISO 9001:2015 / А. Езрахович, В. Дзедин, Ю. Банных // Методы менеджмента качества. – 2014. – № 7.
2. Есмуханов, Е. Новая версия международного стандарта ИСО 9001:2015 / Е. Есмуханов // Успех-Success [Бизнес-журнал Казахстана]. – 2014. – 20 сентября.
3. Корягина, К. А. Новая версия международного стандарта ISO 9001:2015 / К. А. Корягина // Проблемы и перспективы экономики и управления: материалы III междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, декабрь 2014 г.). – СПб. : Заневская площадь, 2014. – С. 175–179.
4. ГОСТ ISO 9001–2011 (ISO 9001:2008, IDT). Системы менеджмента качества. Требования. – М. : Изд-во стандартов, 2011.
5. ГОСТ Р ИСО 9001–2015 (ISO 9001:2015, IDT). Системы менеджмента качества. Требования. – М. : Изд-во стандартов, 2015.
6. Чайка, И. И. Будущее серии стандартов ISO 9001 / И. И. Чайка // Управление предприятием. – 2012. – № 11.
7. Родионова, М. А. Организация процедуры управления рисками процессов СМК / М. А. Родионова // Молодой ученый. – 2015. – № 11. – С. 963–968
8. Информационный документ IAF. Руководство по планированию перехода на версию ИСО 9001:2015. – М., 2015.

Голубинский Юрий Митрофанович

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

Golubinskiy Yuriy Mitrofanovich

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

Елистратова Анна Григорьевна

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: blue-eyed-girl@mail.ru

Elistratova Anna Grigor'evna

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

Пискунова Виктория Андреевна

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

Piskunova Viktoriya Andreevna

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

Чернова Екатерина Сергеевна

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ket.zato58@gmail.com

Chernova Ekaterina Sergeevna

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

УДК 658.56

Голубинский, Ю. М.

Применение риск-ориентированного мышления в новой версии стандарта ISO 9001:2015 /
Ю. М. Голубинский, А. Г. Елистратова, В. А. Пискунова, Е. С. Чернова // Измерение. Мониторинг.
Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 21–27.

А. Н. Демин, В. И. Смыслов, А. Т. Клементьев

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ С КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ И $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

A. N. Demin, V. I. Smyslov, A. T. Klement'ev

METROLOGICAL ANALYSIS OF FIBER-OPTIC ELECTRIC CURRENT SENSORS BASED ON CRYSTALS WITH CUBIC SYMMETRY $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ AND $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальный вопрос создания волоконно-оптических датчиков электрического тока (ВОДТ). ВОДТ по сравнению с другими датчиками тока обладают рядом преимуществ, что вызывает к ним значительный практический интерес и уже обеспечивает их применение. Объектом исследования являются ВОДТ на основе кристаллов с кубической симметрией $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Предметом исследования являются метрологические характеристики таких ВОДТ. Целью работы является анализ метрологических характеристик с точки зрения минимизации погрешностей датчиков и выработка рекомендаций по их снижению. *Материалы и методы.* Последовательно рассмотрены структурная и функциональная схемы однопроходного ВОДТ на кристаллах с кубической симметрией $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, а также его метрологическая модель. Такая метрологическая модель, разработанная на основе входящих в ВОДТ функциональных элементов, погрешностей изготовления отдельных элементов и узлов ВОДТ, различных внутренних и внешних влияющих факторов, взаимосвязей и взаимовлияния всего вышеуказанного, позволила предложить и проанализировать реальную функцию преобразования ВОДТ. *Результаты.* Проведенный метрологический анализ показал, что на результат измерения влияет ряд факторов, которые проявляются в виде аддитивной и мультипликативной погрешностей. При этом факторы, связанные с несовершенством технологии изготовления ВОДТ, как правило, могут быть учтены при расшифровке результатов измерений или минимизированы путем использования специальных конструктивно-технологических приемов при проектировании и изготовлении ВОДТ. Самой существенной по величине погрешностью, которую достаточно трудно устранить, является дополнительная температурная погрешность от влияния температуры внешней среды. *Выводы.* На основе проведенного метрологического анализа предложен путь реализации ВОДТ с минимально возможной для такого типа датчиков погрешностью измерения. Указано, что наибольший вклад в суммарную погрешность измерения вносит дополнительная температурная погрешность от влияния температуры внешней среды. Предложены технические приемы ее уменьшения.

Abstract. *Background.* The article considers a topical issue of creating optical fiber sensors of electric current (FSEC). FSEC compared with other current sensors have several advantages, which causes them considerable practical interest and provide their application. Object of research are FSEC on the basis of crystals with cubic symmetry $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. The subject of research is the metrological characteristics of such FSEC. The aim of this work is the analysis of metrological characteristics from the point of view of minimizing sensor errors and develop recommendations for their reduction. *Materials and methods.* Consistently examined the structural and functional scheme of the single-pass FSEC on crystals with cubic symmetry $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, as well as its measurement model. Such metrological model developed on the basis of outside FSEC functional elements, the manufacturing errors of individual ele-

ments and nodes of FSEC, various internal and external influencing factors, interrelations and mutual influence of all the above, allowed us to propose and analyze a real function of converting FSEC. *Results.* Metrological analysis showed that the measurement result is affected by several factors, which manifest themselves in the form of additive and multiplicative errors. However, the factors related to imperfect manufacturing techniques, FSEC as a rule, can be taken into account when interpreting the results of measurements or minimized by the use of special design-technological methods in the design and manufacture of FSEC. The most significant largest error, which is quite difficult to resolve, is the additional temperature error from the influence of external temperature. *Conclusions.* Based on metrological analysis a way to implement FSEC with the lowest possible for this type of sensor measurement noise. Indicated that the largest contribution to the total measurement error introduces additional temperature error from the influence of external temperature. Proposed techniques for its reduction.

Ключевые слова: электрический ток, волоконно-оптический датчик, структурная схема, функциональная схема, метрологическая модель, погрешность измерения.

Key words: electric current, fiber optic sensor, structural diagram, a functional diagram, measurement model, measurement error.

Волоконно-оптические датчики электрического тока (ВОДТ) находят в настоящее время все более широкое применение в измерительной технике благодаря целому ряду преимуществ перед традиционными методами измерений и датчиками [1, 2]. К их преимуществам относятся пассивность чувствительного элемента (отсутствие электропитания), дистанционность измерений (расстояние от точки измерений до регистрирующей аппаратуры может составлять сотни метров), гальваническая развязка, высокая чувствительность и быстродействие, малый вес и габариты при высокой помехозащищенности от внешних воздействий. Эти качества ВОДТ важны при разработке и создании информационно-измерительных систем различного назначения.

Для создания ВОДТ для измерения электрического тока в проводнике с электрическим током используются в основном три известных физических эффекта: эффект Фарадея, эффект магнитострикции и эффект смещения проводника с током в магнитном поле под действием силы Лоренца [3–5].

При создании информационно-измерительных систем с большим динамическим диапазоном, высоким рабочим напряжением, минимальной инерционностью и массово-габаритными характеристиками наибольшее применение нашли ВОДТ на основе эффекта Фарадея в оптически активных кристаллах с кубической симметрией, в частности $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Используются три типичные оптические схемы чувствительных элементов (ЧЭ) ВОДТ: проходная схема, когда излучение проходит через кристалл один раз; отражательная схема, когда излучение проходит через кристалл дважды – туда и обратно, и многопроходная схема, в которой луч света несколько раз проходит через кристалл, что позволяет повысить чувствительность ВОДТ за счет увеличения длины оптического пути. С учетом простоты реализации, минимально достижимых габаритов и оптимальных в совокупности технических характеристик наибольшее распространение нашла «проходная» схема, которая приведена на рис. 1.

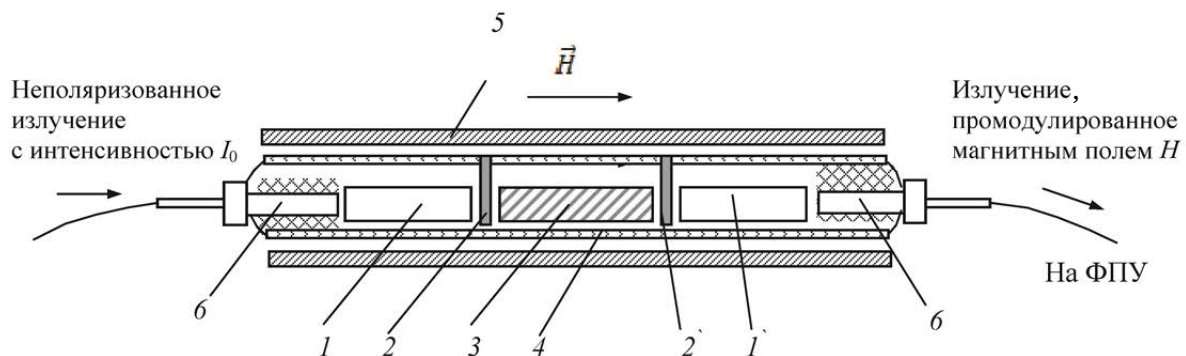


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента однопроходного типа:

1 – коллиматоры; 2 – поляризатор; 3 – кристалл $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$; 4 – стеклянная оправка;
5 – защитная кварцевая трубка; 6 – керамический наконечник волоконно-оптического коннектора

В такой схеме поступающее по волокну на вход ЧЭ излучение коллимируется градиентной линзой (коллиматором), преобразуется в линейно-поляризованное с помощью входного поляризатора, проходит через кристалл $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и далее, проходя через выходной поляризатор, с помощью градиентной линзы (второго коллиматора) вводится в выходное оптическое волокно, подключенное к входу фотоприемного устройства (ФПУ).

Второй поляризатор, устанавливаемый после кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ на его выходе, выполняет роль анализатора, позволяющего преобразовать поворот плоскости поляризации света в изменение амплитуды (или интенсивности) света на выходе ЧЭ. Угол между осями входного и выходного поляризаторов выбирается таким образом, чтобы получить максимальный коэффициент преобразования поляризационной модуляции на входе ФПУ. В отсутствие магнитного поля свет проходит через ЧЭ, не изменяя направления вектора поляризации, интенсивность света на входе ФПУ является постоянной и определяется углом между осями поляризаторов: при определенных углах (скрещенные поляризаторы) она может быть равна 0. При наложении на кристалл магнитного поля $\vec{H}$ направление поляризации света изменяется, что приводит к изменению интенсивности света на выходе ЧЭ. Таким образом, с помощью магнитного поля осуществляется модуляция света, проходящего через ЧЭ.

При проектировании любого ВОДТ необходимо проводить тщательный метрологический анализ и принимать соответствующие решения по снижению возможных погрешностей [6–8].

Проанализируем с указанной точки зрения ВОДТ с «проходной» схемой.

На рис. 2, 3 приведены структурная и функциональная схемы такого датчика соответственно.



Рис. 2. Структурная схема ВОДТ:

ИИ – источник излучения; ПОК – подводящий оптический канал

(подводящее оптическое волокно + коллиматор + поляризатор);

МЭ – модулирующий элемент (кристалл $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$); ОК – отводящий оптический канал

(поляризатор + коллиматор + отводящее оптическое волокно);

ПИ – приемник оптического излучения

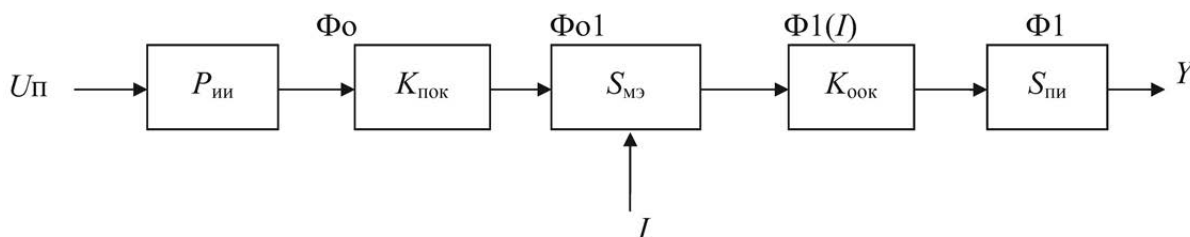


Рис. 3. Функциональная схема ВОДТ

Функция преобразования будет иметь вид

$$Y = P_{\text{ии}} K_{\text{пок}} S_{\text{мэ}} K_{\text{оок}} S_{\text{пи}} I,$$

где Y_n – номинальное значение выходной величины; I – величина измеряемого электрического тока; $P_{\text{ии}}$ – мощность светового потока источника излучения; $K_{\text{пок}}$ – коэффициент передачи подводящего оптического канала «подводящее оптическое волокно – коллиматор – поляризатор»; $S_{\text{мэ}}$ – чувствительность модулирующего элемента (кристалл $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$); $K_{\text{оок}}$ – коэффициент передачи отводящего оптического канала «поляризатор – коллиматор – отводящее оптическое волокно»; $S_{\text{пи}}$ – чувствительность ПИ.

В реальных условиях на результат измерений влияют внешние помехи и влияющие факторы ξ_i , погрешность изготовления отдельных структурных элементов и узлов, а также помехи v_i , возникающие в самом датчике.

Соответственно реальная функция преобразования должна учитывать влияние перечисленных факторов на результат измерения и будет иметь для ВОДТ с оптическим выходом следующий вид:

$$Y_p = Y(I, \xi_i, q_i, v_i). \quad (1)$$

Погрешность преобразования определится как

$$\Delta Y = Y - Y_p. \quad (2)$$

На рис. 4 приведена метрологическая модель ВОДТ, где приняты следующие обозначения: $\Delta 1$ – погрешность юстировки ИИ относительно ПОК; $\Delta 2$, $\Delta 4$ – погрешности из-за неточности начальной установки ПОК и ООК относительно МЭ; $\Delta 3$ – погрешность из-за неточности юстировки ПОК и ООК относительно друг друга; $\Delta_{\text{МЭ}}$ – погрешность из-за неточности изготовления модулирующего элемента (кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$); $\Delta 5$ – погрешность юстировки ООК относительно ПИ; $\Delta 7$ – погрешность спектрального согласования ИИ и ПИ; $\Delta_{\text{ЛМЭ}}$ – погрешность линейности функции преобразования модулирующего элемента (кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$); $\delta S_{\text{МЭ}}$ – погрешность чувствительности МЭ, обусловленная изменением ее параметров при изменении температуры окружающей среды, механических воздействий и т.п.; $\delta K_{\text{ПОК}}$, $\delta K_{\text{ООК}}$ – погрешности, обусловленные изменением светопропускания ПОК и ООК при изгибах волоконно-оптического кабеля, механических воздействий и т.п.; $\delta S_{\text{ИИ}}$ – погрешность, обусловленная изменением мощности и диаграммы излучения ИИ при изменении температуры окружающей среды, напряжения питания и т.п.; $\delta S_{\text{ПИ}}$ – погрешность от изменения интегральной токовой чувствительности ПИ при изменении температуры окружающей среды, напряжения питания и т.п.; $\delta \eta(\lambda)$ – погрешность спектрального согласования ИИ и ПИ при изменении температуры.

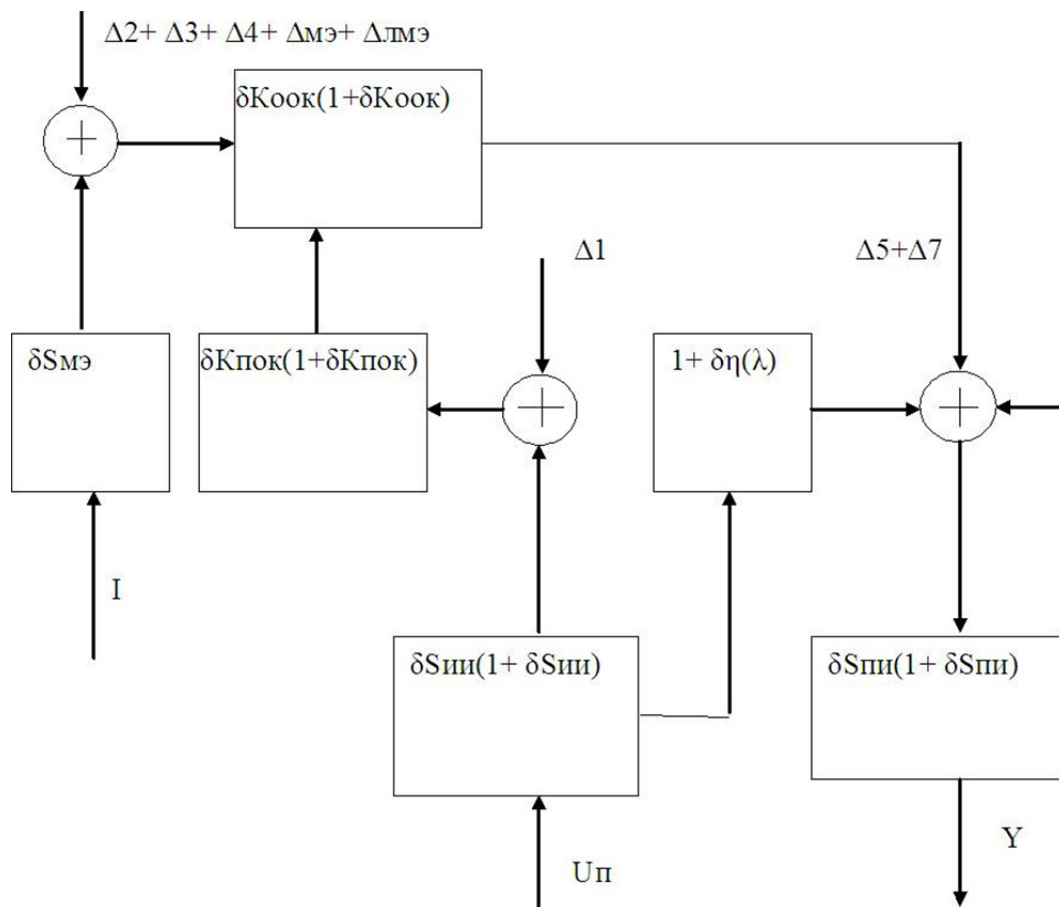


Рис. 4. Метрологическая модель ВОДТ

В соответствии с метрологической моделью ВОДТ реальная функция преобразования будет иметь следующий вид:

$$Y_p = S_{MЭ}(1 + \delta S_{MЭ}) S_{ИИ}(1 + \delta S_{ИИ}) [(\Delta 1 + K_{П\text{ОК}})(1 + \delta K_{П\text{ОК}})] \times \\ \times [(\Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{MЭ} + \Delta_{ЛМЭ} + K_{О\text{ОК}})] \times [(1 + \delta \eta(\lambda))] \times [(\Delta 2 + \Delta 3 + S_{П\text{И}})(1 + \delta S_{П\text{И}})] \times I. \quad (3)$$

Погрешность преобразования с учетом $\Delta Y = Y_p - Y_n$ определится следующим образом:

$$\Delta Y = K_{П\text{ОК}}\Delta 1 + K_{О\text{ОК}}(\Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{MЭ} + \Delta_{ЛМЭ}) + S_{П\text{И}}(\Delta 5 + \Delta 7) + \\ + (\delta K_{П\text{ОК}})K_{П\text{ОК}} + [\delta \eta(\lambda)] \times \eta(\lambda) + [\delta S_{MЭ} + \delta K_{О\text{ОК}} + \delta S_{П\text{И}}] \times I. \quad (4)$$

Мультипликативная составляющая погрешности равна

$$\delta_y = \sqrt{\delta I_{ИИ}^2 + \delta K_{П\text{ОК}}^2 + \delta K_{О\text{ОК}}^2 + \delta \eta^2(\lambda) + \delta S_{П\text{И}}^2}, \quad (5)$$

аддитивная составляющая погрешности:

$$\Delta y = K_{П\text{ОК}}\Delta 1 + K_{О\text{ОК}}(\Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{MЭ} + \Delta_{ЛМЭ}) + S_{П\text{И}}(\Delta 5 + \Delta 7). \quad (6)$$

Аддитивная и нелинейная составляющие погрешности не влияют на результат измерения, если в нормативно-техническую документацию (ТУ, ТО) вносится градуировочная характеристика ИП, смещенная вдоль оси ординат относительно номинальной функции преобразования на величину аддитивной погрешности. Если в документацию внесена номинальная функция преобразования в виде аналитической зависимости, то необходимо учитывать данные погрешности, например, при обработке результатов измерений с целью их исключения.

Большую погрешность $\Delta 1$ (до 10 %) могут внести радиальные рассогласования ИИ и ПОК. Продольные и угловые рассогласования, как правило, вносят незначительную погрешность (не более 1 %).

Погрешности $\Delta 2$ – $\Delta 4$ в значительной степени зависят от конструктивного исполнения измерительного преобразователя (ИП). В процессе проектирования необходимо предусмотреть такие конструктивно-технологические и схемотехнические решения, которые позволят снизить указанные погрешности. Ввиду того, что в каждом конкретном случае конструкции ИП могут отличаться друг от друга, то и способы снижения их в каждом случае различны [9].

Погрешность $\Delta 5$ практически равна нулю, так как площадь торца жгута ООК значительно меньше площади приемной светочувствительной площадки ПИ.

Погрешности $\Delta 1$ – $\Delta 4$ могут быть существенно снижены в процессе сборки ИП точной юстировкой элементов конструкции.

Погрешность спектрального согласования источника и приемника излучения $\Delta 7$ может быть полностью исключена, если диапазон длины волны излучения источника излучения соответствует диапазону спектральной чувствительности приемника излучения.

Погрешность $\Delta_{MЭ}$ из-за неточности изготовления МЭ также может быть значима, как перечисленные выше погрешности. Уменьшить данную погрешность возможно конструктивным путем, применяя совершенную технологию изготовления МЭ [9, 10].

Мультипликативные погрешности $\delta K_{П\text{ОК}}$, $\delta K_{О\text{ОК}}$, обусловленные изменением светопропускания ПОК и ООК при изгибах волоконно-оптического кабеля, воздействии ударов, вибрации, линейного ускорения и т.д., практически исключаются, если все волокна расположены в одном жгуте и испытывают одинаковые внешние воздействия: климатические и механические. При этом указанное справедливо, если изгиб волокна не превышает некоторого критического значения (не менее 10 диаметров волокна). В противном случае изгибы волокна ведут к существенному снижению интенсивности оптического сигнала, поступающего или в зону измерения, или на ПИ, сравнимому с минимальным уровнем информативного сигнала. Поэтому при изготовлении и эксплуатации ВОДТ необходимо принять все возможные конструктивно-технологические меры для исключения неинформативных изгибов волоконно-оптического кабеля [4, 5].

Мультипликативные погрешности $\delta K_{ИИ}$, $\delta S_{П\text{И}}$ при изменении параметров окружающей среды могут достигать 30 %, если не принять соответствующих мер. Но так как они носят систематический характер, то могут быть исключены тем или иным способом. Для снижения этих погрешностей используют различные схемотехнические решения: дифференциальное исполнение измерительной схемы датчика, введение дополнительных схем коррекции и т.п.

Погрешность преобразования без учета погрешностей, которыми можно пренебречь, будет определяться выражением

$$\Delta Y = K_{\text{Оок}}(\Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{\text{МЭ}} + \Delta_{\text{ЛМЭ}}) + \delta S_{\text{МЭ}} I, \quad (7)$$

а реальная функция преобразования запишется

$$Y_p = S_{\text{МЭ}}(1 + \delta S_{\text{МЭ}}) S_{\text{ИИ}} K_{\text{Пов}} K_{\text{д}}(1 + \delta S_{\text{д}}) U_{\text{П}} [(K_{\text{Оок}} + \Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{\text{МЭ}} + \Delta_{\text{ЛМЭ}}) S_{\text{ПИ}}]. \quad (8)$$

Остаются неисключенными погрешности $\Delta 2$ – $\Delta 4$, $\Delta_{\text{МЭ}}$, которые, как указано выше, можно снизить конструктивно-технологическим путем, что ведет к некоторому удорожанию ВОДТ.

Особо следует отметить влияние температуры на чувствительный элемент и измерительный тракт ВОДТ тока в целом через величины $\delta S_{\text{МЭ}}$, $S_{\text{ПИ}}$. Для уменьшения температурной погрешности следует использовать дополнительные технические приемы:

– термостатирование модулирующего элемента и, возможно, других элементов ВОДТ, которые являются менее чувствительными к влиянию температуры;

– введение компенсации выходного сигнала датчика на основе измерения температуры МЭ с помощью специального малогабаритного малоинерционного термометра и введения сигнала компенсации в выходной сигнал датчика;

– применение температурной компенсации МЭ путем подбора оптимального угла между осями максимального пропускания поляризатора и анализатора чувствительного элемента

Заключение

Метрологический анализ ВОДТ показал, что на результат измерения электрических токов с помощью ВОДТ влияет ряд различных факторов, которые проявляются в виде аддитивной и мультипликативной составляющей.

При этом факторы, связанные с несовершенством технологии изготовления ВОДТ, как правило, могут быть учтены при расшифровке результатов измерений или минимизированы путем использования специальных конструктивно-технологических приемов при проектировании и изготовлении ВОДТ.

Самой существенной по величине погрешностью, которую крайне трудно устранить вышеуказанным путем, является дополнительная погрешность, обусловленная влиянием факторов внешней среды, которые приводят к изменению характеристик тракта ВОДТ. Среди таких параметров в первую очередь следует указать влияние изменения температуры внешней среды.

Для уменьшения указанной погрешности следует целенаправленно использовать дополнительные технические приемы, например термостатирование модулирующего элемента, что должно позволить существенно снизить дополнительную погрешность измерения ВОДТ.

Список литературы

1. Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики / Э. Удд. – М. : Техносфера, 2008. – 520 с.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2006. – 592 с.
4. Бурков, В. Д. Экоинформатика: Алгоритмы, методы и технологии : моногр. / В. Д. Бурков, В. Ф. Крапивин. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 431 с.
5. Яворский, Б. М. Справочник по физике : 2-е изд., перераб. / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1985. – 385 с.
6. Бурков, В. Д. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники / В. Д. Бурков, Г. А. Иванов. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. – 332 с.
7. Пивкин, А. Г. Обобщенный подход к метрологическому анализу волоконно-оптических датчиков / Е. А. Бадеева, А. В. Гориш, А. Г. Пивкин // Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг : науч.тр. – Вып. 6. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2003. – С. 255–257.
8. Бабаев, О. Г. Методика исследования магнитооптического эффекта в кристаллах BSO для датчика магнитного поля / О. Г. Бабаев, С. А. Матюнин, Г. И. Леонович // Фотон-экспресс. – 2013. – № 6. – С. 66–67.
9. Бурков, В. Д. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических приборов и систем : практикум / В. Д. Бурков, В. Т. Потапов. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. – 82 с.
10. Оработка технологических параметров и режимов изготовления волоконно-оптических световодов методом регрессионного анализа : учебно-метод. пособие / В. Д. Бурков, В. А. Беяков, Д. А. Голодушкин, А. И. Кофанов, Д. Г. Сырейщиков. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2013. – 102 с.

Демин Андрей Николаевич

инженер,
Московский государственный университет леса
(Россия, Московская обл., г. Мытищи-5,
ул. 1-я Институтская, 1)
E-mail:vladismyslov@yandex.ru

Смыслов Владимир Иванович

кандидат технических наук,
начальник отделения,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, Московская область, г. Королев,
ул. Пионерская, 2)
E-mail:vladismyslov@yandex.ru

Клементьев Алексей Терентьевич,

кандидат технических наук,
ведущий специалист,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, Московская область, г. Королев,
ул. Пионерская, 2)
E-mail:vladismyslov@yandex.ru

Demin Andrey Nikolaevich

engineer,
Moscow State Forest University
(1st Institutskaya street, 1, Mytishi,
Moscow region, Russia)

Smyslov Vladimir Ivanovich

candidate of technical sciences, head of department,
Scientific and Production Association
Measuring Technique
(2 Pionerskaya street, Korolev, Moscow region, Russia)

Klement'ev Aleksey Terent'evich

candidate of technical sciences,
leading specialist,
Scientific and Production Association
Measuring Technique
(2 Pionerskaya street, Korolev, Moscow region, Russia)

УДК 687.586.5

Демин, А. Н.

Метрологический анализ волоконно-оптических датчиков электрического тока на основе кристаллов с кубической симметрией $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ / А. Н. Демин, В. И. Смыслов, А. Т. Клементьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 28–34.

И. Г. Епишин, А. Ю. Репин, Л. Р. Фионова

**ЭКСПЕРТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
ДЛЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

I. G. Epishin, A. Yu. Repin, L. R. Fionova

**EXPERT TECHNOLOGY OF RISK MANAGEMENT
IN THE ELABORATION OF ELECTRONIC EQUIPMENT
AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM
FOR HAZARDOUS PRODUCTION**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* В связи с высокой ответственностью выполняемых задач к электронному оборудованию автоматизированных систем управления технологическими процессами предъявляется целый комплекс специальных требований по обеспечению надежности и безопасности управляемых технологических процессов. Наряду с мерами безопасности, обеспечиваемыми собственно изделием, весьма жесткие требования предъявляются к рабочей конструкторской документации (РКД). Она должна быть лишена критических несоответствий, ошибок, которые могут повлечь опасные последствия. Предлагается экспертная технология обеспечения надежности и безопасности изделия на ответственном этапе его жизненного цикла. Это этап разработки РКД. *Материалы и методы.* Выделено три группы требований РКД. Описаны основные положения предлагаемой экспертной технологии управления риском изделия при техническом проектировании и разработке РКД. Технология основана на моделировании критичности изделия. Моделирование критичности изделия проводится согласно определению структуры критичности. При этом результаты моделирования являются входными данными для валидации. *Результаты.* Описаны все экспертные процедуры процесса моделирования и процесс последующей разработки и валидации РКД. В настоящее время данная технология внедрена на предприятии в виде требований стандарта предприятия. *Выводы.* Сделан вывод о том, что предложенная экспертная технология позволяет на этапе разработки РКД исключить критические несоответствия и ошибки, которые могут повлечь опасные последствия и повлиять на надежность и безопасность изделия.

A b s t r a c t. *Background.* Due to high responsibility tasks to electronic equipment APCS (automated process control system) must meet a whole range of special requirements to ensure the reliability and security of managed technology processes. Along with the security measures provided by the actual product, very stringent demands are placed on the working construction documentation (WCD). It should be deprived of critical non-conformities, errors that can lead to dangerous consequences. Expert technology to ensure reliability and security products at the crucial stage of its life cycle is proposed. This is the stage of development of WCD. *Materials and methods.* Three groups of WCD requirements are allocated. Main provisions of expert technology risk management products in the technical design and development of WCD are described. The technology is based on the simulation of the criticality of the prod-

uct Simulation of criticality is conducted according to definition the structure of the criticality. In this case the simulation results are used as input data for validation. *Results.* All expert procedure modeling process, the process of further development and validation of WCD are described. Currently, this technology is implemented at the enterprise in the requirements of company standard. *Conclusions.* It is concluded that the proposed expert technology allows at the stage of development of design documentation to eliminate discrepancies and critical errors that can lead to dangerous consequences and affect the reliability and safety of the product.

К л ю ч е в ы е с л о в а: экспертная технология, управление риском, разработка, рабочая конструкторская документация, моделирование, критичность изделия, автоматизированные системы управления технологическими процессами, опасное производство.

К e y w o r d s: expert technology, risk management, creation, working construction documentation, modeling, criticality of the product, APCS (automated process control system), hazardous production.

Эксплуатация электронного оборудования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на опасных производственных объектах сопряжена с выполнением целого комплекса сложных и ответственных задач. Например, на объектах уничтожения химического оружия локальные АСУ ТП имеют двухуровневую распределенную структуру с рабочими станциями оператора в центральном пункте управления. На нижнем уровне проводятся прием и обработка информации от датчиков, реализация функций автоматического и логического управления, формирование и выдача управляющих воздействий на исполнительные механизмы. На верхнем уровне осуществляются сбор, хранение и документирование информации о ходе технологического процесса, предоставление информации оператору, управление ходом процесса.

В связи с высокой ответственностью выполняемых задач к электронному оборудованию АСУ ТП (далее – изделие) предъявляется целый комплекс специальных требований по обеспечению надежности и безопасности управляемых технологических процессов.

Наиболее важное требование заключается в том, чтобы отказы изделия не приводили к ситуациям, опасным для жизни и здоровья людей и повреждению основного технологического оборудования.

Основополагающим документом, устанавливающим общие требования к разработке надежных и безопасных машин и оборудования, является Технический регламент таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» [1]. Он разработан на основе результатов анализа законов, нормативных актов, действующих в промышленно развитых странах и регулирующих сферу безопасности машин и оборудования, технических устройств и изделий. Действие регламента распространяется на изделия, применяемые на опасных производственных объектах, а также на процессы их эксплуатации и утилизации в части, не противоречащей требованиям по обеспечению промышленной безопасности, регулируемой национальными законодательствами Сторон. Особенностью регламента является требование подготовки документа «Обоснования безопасности» [2], который разрабатывается при проектировании изделия и должен содержать анализ рисков [3], а также сведения из конструкторской, эксплуатационной, технологической документации о минимально необходимых мерах по обеспечению безопасности.

Таким образом, наряду с мерами безопасности, обеспечиваемыми собственно изделием, весьма жесткие требования предъявляются к рабочей конструкторской документации (РКД). Требования РКД непосредственно исполняются при изготовлении, техническом контроле, испытаниях, монтаже, пуске-наладке и эксплуатации изделия. Поэтому РКД должна быть лишена критических несоответствий, ошибок, которые могут повлечь опасные последствия. Разработка текстовых документов должна выполняться в соответствии с положениями стандартов ASD S1000D [4].

В настоящей работе предлагается экспертная технология обеспечения надежности и безопасности изделия на ответственном этапе его жизненного цикла – этапе разработки рабочей конструкторской документации.

Важно выделить три группы требований РКД, играющих различную роль в обеспечении надежности и безопасности изделия.

Первая группа требований направлена на обеспечение заданных тактико-технических характеристик изделия при изготовлении, монтаже и пуске-наладке (требования функциональных, принципиальных электрических схем, монтажных, сборочных чертежей, расчетов, методик регулировок).

Вторая группа требований направлена на выявление и устранение возможных дефектов, несоответствий изделия при техническом контроле, испытаниях, пуске-наладке (требования программ и методик).

Третья группа требований направлена на предупреждение инцидентов при эксплуатации (требования руководства по эксплуатации).

Рассмотрим основные положения экспертной технологии управления риском изделия при техническом проектировании и разработке РКД, основанной на моделировании критичности изделия [5, 6] на этапах изготовления, технического контроля, испытаний, монтажа, пуска-наладки и эксплуатации. Для оценивания степени соответствия РКД по аналогии с понятием критичности изделия введем понятие «критичность РКД».

Под критичностью РКД будем понимать риск возникновения инцидентов при эксплуатации изделия, обусловленных несоответствиями и/или ошибками требований РКД, направленных на обеспечение надежности и безопасности изделия.

Основные требования к обеспечению минимальной критичности разрабатываемой РКД заключаются в том, что она должна быть системной, полной, адекватной и эффективной. Минимальная критичность должна подтверждаться валидацией процесса разработки РКД. Входными данными валидации являются результаты моделирования критичности изделия [5].

Процесс моделирования включает следующие экспертные процедуры:

1. Анализ входных данных технического проекта. Оценивание категории сложности разработки с учетом ее уровня заимствования (использования элементов прототипов, аналогов). Планирование моделирования критичности изделия на основании оценки категории сложности разработки.

2. Разработка функциональной модели изделия с целью создания информационной среды для последующего построения структурных моделей причинно-следственных связей (ПСС) возможных инцидентов при эксплуатации. Разработка функциональной модели заключается в построении IDEF0 модели процесса «Эксплуатация АСУТП», включающей описание входов, основных функций и выходов процесса.

Разработанная функциональная модель оценивается на адекватность и полноту. Адекватность модели подтверждается полным соответствием (отсутствием противоречий) элементов модели (входов, функций и выходов) процесса эксплуатации изделия требованиям технического проекта и нормативной документации. Достаточность полноты модели подтверждается в том случае, когда добавление любого нового элемента модели является повторением или противоречием существующих элементов модели.

Для входов и выходов функциональной модели согласно техническому проекту и нормативной документации устанавливаются требования «какими они должны быть».

3. Построение функциональным (дедуктивным) методом анализа видов, последствий и критичности отказов [7, 8] структурной модели причинно-следственных связей возможных инцидентов изделия (ПСС₁). Структурная модель ПСС₁ предусматривает три иерархических уровня:

I – уровень, элементами которого являются возможные инциденты изделия при эксплуатации;

II – уровень, элементами которого являются возможные несоответствия и отказы составных частей изделия, соединений (стыковок) составных частей;

III – уровень, элементами которого являются причины несоответствий и отказов составных частей, соединений составных частей (возможные несоответствия), дефекты конструкций составных частей и системы управления изделия.

Информационной основой для построения структурной модели ПСС₁ являются функциональная модель изделия и классификаторы разрабатываемого на предприятии электронного оборудования.

4. Моделирование критичности изделия. Информационной основой моделирования являются структурная модель ПСС₁, классификатор возможных последствий инцидентов, классификатор и шкала критичности тяжести последствий инцидентов.

Моделирование критичности изделия проводится согласно определению структуры критичности [3]:

$$C = \sum_i C_i^I, C_i^I = \sum_j C_{ij}^{II}, C_{ij}^{II} = \sum_k C_{ijk}^{III}, \quad (1)$$

где $C_i^I, C_{ij}^{II}, C_{ijk}^{III}$ – значения критичности элементов I, II и III уровней ПСС₁.

Моделирование критичности включает три самостоятельные задачи:

1) моделирование возможных последствий инцидентов при эксплуатации изделия, моделирование осуществляется структурным (индуктивным) методом анализа видов, последствий и критичности отказов [7];

2) оценивание допустимой совокупной критичности изделия C^* по специально разработанной шкале рисков, согласованной с заказчиком;

3) распределение критичности изделия C^* по элементам иерархических уровней структурной модели ПСС₁ – элементам I, II и III уровней.

Результатом моделирования критичности изделия является распределение допустимых оценок критичности элементов III уровня модели ПСС₁ – $C^*(C_{ijk}^{III})$.

5. Актуализация (если она необходима) классификаторов предприятия, обеспечивающих построение структурных моделей ПСС₁ и моделирование критичности изделия.

Процесс последующей разработки и валидации РКД включает следующие этапы.

1. Планирование разработки РКД на основании данных технического проекта и распределения критичности изделия $C^*(C_{ijk}^{III})$. При планировании в зависимости от допустимых оценок C_{ijk}^{III} устанавливают требования к валидации отдельных документов РКД с учетом полноты и достоверности расчетов.

По мере разработки РКД требования к валидации уточняются.

2–3. Разработка конструкции изделия проводится с учетом результатов моделирования критичности изделия. Результаты разработки подлежат валидации, предусматривающей выполнение процедуры «Анализ видов, последствий и критичности возможных ошибок РКД» [9]. Суть процедуры заключается в выдвижении экспертами гипотез о возникновении различных видов инцидентов, в последующем анализе и оценивании полноты, адекватности и эффективности конструкторских решений, направленных на предупреждение причин анализируемых инцидентов. Оценки критичности не должны превышать предельных допустимых оценок C_{ijk}^{III} , полученных при моделировании критичности изделия. Если отдельные оценки превышают допустимые значения C_{ijk}^{III} , а конструктивные решения исчерпаны, снижение критичности изделия планируется за счет технического контроля, испытаний, мероприятий пуска-наладки и технического обслуживания при эксплуатации.

Информационной основой процедуры «Анализа видов, последствий и критичности возможных ошибок РКД» является структурная модель ПСС₁, классификатор возможных ошибок РКД и их причин, шкала рисков результативности требований РКД.

4–5. Разработка требований технического контроля, программы и методики испытаний, руководства по эксплуатации предусматривает валидацию, включающую:

- построение структурной модели причинно-следственных связей возможных пропусков несоответствий, дефектов изделия при осуществлении операций технического контроля, испытаний, пуска-наладки, эксплуатации изделия (далее модель ПСС₂ ошибок 2-го рода);

- моделирование и анализ критичности ошибок 2-го рода;

- выработку (если необходимо) специальных мер по обеспечению надежности, безопасности изделия при техническом контроле, испытаниях, пуске-наладке и эксплуатации.

При построении структурной модели ПСС₂ к причинам ошибок 2-го рода относят возможные несоответствия, ошибки РКД, технического контроля, испытаний, пуско-наладочных работ и эксплуатации изделия. Информационной основой для построения структурной модели

ПСС₂ являются структурная модель ПСС₁, распределение критичности изделия $C^*(C_{ijk}^{III})$, классификаторы несоответствий, ошибок типовых операций технического контроля, испытаний, пуска-наладки и эксплуатации изделия.

Оценивание критичности m -причины (π_m) ошибки 2-го рода l -го вида ω_l , допущенной на n -й ступени проверок несоответствия или дефекта вида π_{ijk} , проводится по формуле

$$C_{lmn}^{ijk} = C_{ijk}^{III} \mu_{\underline{R}}(\pi_m, \omega_l, \pi_{ijk}) \beta_l^n(\pi_{ijk}), \quad (2)$$

где $\mu_{\underline{R}}(\pi_m, \omega_l, \pi_{ijk})$ – значение функции принадлежности, которая определяет, с какой степенью уверенности, выраженной в долях единицы, π_m считается причиной возникновения ошибки вида ω_l при проверке несоответствия или дефекта вида π_{ijk} ; $\beta_l^n(\pi_{ijk})$ – оценка вероятности ошибки 2-го рода l -го вида ω_l , допущенной на n -й ступени проверок несоответствия или дефекта вида π_{ijk} :

$$\beta_l^n(\pi_{ijk}) = \prod_{p=1}^n \beta_l^p(\pi_{ijk}), \quad (3)$$

где $\beta_l^p(\pi_{ijk})$ – оценка вероятности возникновения ошибки 2-го рода l -го вида ω_l на p -й ступени проверок π_{ijk} , $1 \leq p \leq n$.

Результатами моделирования являются оценки критичности возможных несоответствий и ошибок технического контроля, испытаний, пуско-наладочных работ, эксплуатации.

6. Экспертиза РКД предусматривает выполнение следующих процедур:

6.1. Проведение комплексного анализа разрабатываемых документов на полноту, адекватность и эффективность требований. В результате анализа могут быть установлены новые дополнительные требования, которые учитывают при доработке РКД. Достаточность комплекса требований констатируется экспертами как достижение состояния насыщения.

6.2. Оценивание эффективности каждого комплекса требований T_{ijk} , направленного на предупреждение несоответствия или дефекта вида π_{ijk} , проводится по формуле

$$\mathcal{E}_{ijk} = C_{ijk}^{III} P(\pi_{ijk} / T_{ijk}) P(T_{ijk} / \mathcal{Z}_{ijk}) / \mathcal{Z}_{ijk}, \quad (4)$$

где $P(\pi_{ijk} / T_{ijk})$, $P(T_{ijk} / \mathcal{Z}_{ijk})$ – соответственно экспертная оценка условной вероятности предотвращения несоответствия или дефекта вида π_{ijk} при условии выполнения комплекса требований T_{ijk} и экспертная оценка вероятности выполнения комплекса требований T_{ijk} при затратах $\mathcal{Z}_{ijk}$.

Критичность комплекса требований T_{ijk} оценивается по формуле

$$C(T_{ijk}) = C_{ijk}^{III} (1 - P(\pi_{ijk} / T_{ijk}) P(T_{ijk} / \mathcal{Z}_{ijk})). \quad (5)$$

6.3. Оценивание эффективности каждого комплекса требований T_{lmn} , направленного на предупреждение m -причины ошибки 2-го рода l -го вида, допущенной на n -й ступени проверок π_{ijk} , проводится по формуле

$$\mathcal{E}_{lmn}^{ijk} = C_{ijk}^{III} \beta_l^n(\pi_{ijk} / T_{lmn}) P(T_{lmn} / \mathcal{Z}_{lmn}) / \mathcal{Z}_{lmn}. \quad (6)$$

Результатами оценивания являются оценки эффективности и критичности требований разрабатываемой РКД. Качество разработанных документов считается удовлетворительным, если оценки их критичности не превышают установленную предельно допустимую величину.

6.4. Актуализация (если она необходима) классификаторов предприятия, обеспечивающих построение структурных моделей ПСС₂ и моделирование критичности проверок.

Шкалы для оценивания эффективности и критичности РКД уточняются в соответствии с актуализацией РКД на последующих этапах жизненного цикла изделия.

Таким образом, предложенная экспертная технология позволяет на этапе разработки РКД исключить критические несоответствия и ошибки, которые могут повлечь опасные последствия, повлиять на надежность и безопасность изделия, а также организовать обучение персонала [10].

В настоящее время данная технология внедрена на предприятии ОАО НПП «Химмаш-Старт» в виде требований стандарта предприятия «Управление рабочей конструкторской документацией» и интегрированной информационной системы предприятия, включающей прикладную экспертную систему.

Список литературы

1. Технический Регламент Таможенного союза (ТР ТС 010/2011) «О безопасности машин и оборудования». Утвержден решением комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 года № 823.
2. ГОСТ Р 54122–2010. Безопасность машин и оборудования. Требования к обоснованию безопасности. – М. : Стандартинформ, 2012.
3. ГОСТ Р 51901.15–2005. Менеджмент риска. Применение Марковских методов. – М. : Изд-во стандартов, 2005.
4. International specification for technical publications utilizing a common source data base (ASD S1000D) The European Association Aerospace Industries. Issue 2.3. – Brussels : ASD, 2007. – 2609 p.
5. Епишин, И. Г. Моделирование критичности этапов жизненного цикла технологического оборудования специального назначения / И. Г. Епишин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 63–69.
6. Епишин, И. Г. Анализ рисков жизненного цикла технологического оборудования для опасных производственных объектов при разработке рабочей конструкторской документации / И. Г. Епишин, А. Ю. Репин, Л. Р. Фионова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 176–188.
7. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1996.
8. ГОСТ Р МЭК 61508-5–2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 5. Примеры методов определения уровней полноты безопасности. – М. : Стандартинформ, 2008.
9. Епишин, И. Г. Методика анализов видов и последствий ошибок в рабочей конструкторской документации / И. Г. Епишин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2002. – № 4. – С. 34–35.
10. Фионова, Л. Р. Использование информационной системы для обучения персонала разработке конструкторской документации / Л. Р. Фионова, И. Г. Епишин, А. Ю. Репин // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2011. – № 11. – С. 36–46.

Епишин Игорь Георгиевич

кандидат технических наук, доцент,
начальник научно-исследовательской лаборатории,
Научно-производственное предприятие
«Химмаш-Старт»
(Россия, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3)
E-mail: epishin.igor@yandex.ru

Epishin Igor' Georgievich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of research laboratory,
Research and Production Enterprise
«Khim mash-Start»
(3 Lermontova street, Penza, Russia)

Репин Андрей Юрьевич

старший научный сотрудник
научно-исследовательской лаборатории,
Научно-производственное предприятие
«Химмаш-Старт»
(Россия, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3)
E-mail: ASAPR-snegovik@mail.ru

Repin Andrey Yur'evich

senior staff scientist of research laboratory,
Research and Production Enterprise
«Khim mash-Start»
(3 Lermontova street, Penza, Russia)

Фионова Людмила Римовна

доктор технических наук, профессор,
декан факультета вычислительной техники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lrfionova@mail.ru

Fionova Lyudmila Rimovna

doctor of technical sciences, professor,
dean of the faculty of computer engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.001.57

Епишин, И. Г.

Экспертная технология управления риском при разработке электронного оборудования автоматизированных систем управления технологическими процессами для опасных производств /
И. Г. Епишин, А. Ю. Репин, Л. Р. Фионова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 35–41.

В. Ю. Трофимов, Л. Е. Шахмейстер

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО ДАТЧИКА

V. Yu. Trofimov, L. E. Shakhmeyster

ERROR ARISING WHEN THE TRANSFORMATION COEFFICIENT OF THE DIFFERENTIAL FREQUENCY SENSOR IS MEASURED

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Целью работы является измерения коэффициента преобразования дифференциального частотного датчика с помощью двух возможных методов и анализ полученных погрешностей связанных с использованием этих методов. *Материалы и методы.* Измерение коэффициента преобразования дифференциального частотного датчика целесообразно осуществлять либо измерением разностной частоты каналов датчика с дополнительным измерением задержки поступления импульсов со 2-го канала относительно импульсов с 1-го канала датчика в начале и конце периода измерения разностной частоты, либо измерением частот каждого канала по отдельности. *Результаты.* Вариант измерения разностной частоты без учета задержек имеет погрешность дискретности определения коэффициента преобразования, примерно в 20 раз больше погрешности других вариантов. Погрешность определения коэффициента преобразования, обусловленная дискретностью измерений, при измерении разностной частоты с учетом измерения задержек равна аналогичной погрешности при измерении частот каждого канала датчика. *Выводы.* Погрешности измерения коэффициента преобразования датчика при использовании рассмотренных методов практически одинаковы.

A b s t r a c t. *Background.* The aim is the conversion coefficient of the differential frequency sensor using two possible methods and the analysis of the obtained errors associated with the use of these methods. *Materials and methods.* Measurement of the transformation coefficient of the differential frequency sensor either both the differential frequency of sensor's channels and the second channel impulses delay in comparison with the first channel impulses are measured at the beginning and at the end of differential frequency measured period or each channel's frequency is measured separately. *Results.* The measurement of the difference frequency without delay has an error of discreteness determination of the conversion factor is about 20 times larger than the error of other options. The accuracy of determining the conversion factor due to the discreteness of the measurements, the measurement of the difference frequency, given measurements of the delays equals that of the error in the measurement frequency of each sensor channel. *Conclusions.* Errors arising when the transformation coefficient of the differential frequency sensor is measured with both methods differ a little.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частотные датчики, погрешности при определении коэффициента преобразования, обработка сигналов датчиков.

К е у w o r d s: frequency sensors, errors the transformation coefficient of the differential frequency, sensor signals processing.

1. Определение коэффициента преобразования

В измерительной технике широкое применение нашли дифференциальные частотные датчики различных физических величин. Эти датчики имеют два канала, разность частот сигналов которых соответствует информации об измеряемом параметре [1–4].

Выходным сигналом датчика, определяющим значение измеряемого параметра, является частота $F_{\text{вых}}$:

$$F_{\text{вых}} = F_{\text{и}} - F_0, \quad (1)$$

где $F_0 = f_{10} - f_{20}$ – начальная разностная частота сигналов датчика, соответствующая нулевому или начальному значению измеряемой датчиком физической величины; f_{10} , f_{20} – выходные частоты сигналов 1-го и 2-го каналов датчика соответственно, для нулевого или начального значения измеряемой физической величины; $F_{\text{и}} = f_1 - f_2$ – разностная частота сигналов каналов датчика при измерении датчиком физической величины; f_1 , f_2 – выходные частоты сигналов 1-го и 2-го каналов датчика соответственно при измерении физической величины.

С учетом входящих в выражение (1) величин

$$F_{\text{вых}} = (f_1 - f_2) - (f_{10} - f_{20}). \quad (2)$$

Коэффициент преобразования K_{pr} датчика определяется как

$$K_{pr} = \frac{F_{\text{вых}}}{P}, \quad (3)$$

где $F_{\text{вых}}$ – значение выходного сигнала датчика, соответствующее значению измеряемой им физической величины, равному P .

При определении коэффициента преобразования датчика первоначально определяется значение $F_0 = f_{10} - f_{20}$ при воздействии на датчик физической величины, принимаемой за нулевое или начальное значение, затем на датчик воздействует физическая величина P , имеющая эталонное значение, определяется значение $F_{\text{и}} = f_1 - f_2$, по формуле (1) вычисляется $F_{\text{вых}}$, после чего осуществляется вычисление значения K_{pr} по формуле (3).

В работе [5] определены с точностью до плотностей распределения временные интервалы между опросами одного и того же периферийного устройства и опросами различных устройств на основе модели формирования транзакций в цифровых контроллерах как результата блужданий по состояниям полумарковского процесса, каждое из которых моделирует интерпретацию соответствующего оператора управляющего алгоритма. Однако вопросы точности измерения временных интервалов и частот, необходимых при измерении коэффициента преобразования частотных датчиков, для различных вариантов измерения не определены.

Возможны два варианта реализации выражений для выходной частоты датчика.

По варианту 1 осуществляется измерение разностных частот сигналов датчика $F_{\text{и}}$, F_0 с последующим их вычитанием в соответствии с выражением (1).

По варианту 2 осуществляются измерения частот f_{10} , f_{20} , f_1 , f_2 сигналов, а затем осуществляется вычитание частот в соответствии с выражением (2).

Рассмотрим основные составляющие погрешности определения коэффициента преобразования для указанных вариантов измерения.

2. Составляющие погрешности определения коэффициента преобразования

Относительная погрешность $\delta_{K_{pr}}$ определения коэффициента преобразования K_{pr} датчика равна относительной погрешности $\delta_{F_{\text{вых}}}$ определения его выходного сигнала $F_{\text{вых}}$. Это следует из выражения (3):

$$\delta_{K_{pr}} = \delta_{F_{\text{вых}}}.$$

Погрешность определения коэффициента преобразования имеет две основные составляющие: одна из них обусловлена дискретностью преобразования временных интервалов, периодов и частот в цифровое значение, а вторая обусловлена нестабильностью используемого при измерениях задающего генератора.

3. Составляющая погрешности, обусловленная дискретностью преобразований

3.1. Погрешность при измерении разностной частоты

При измерении разностной частоты датчика погрешность определяется параметрами используемой схемы вычитания частот.

Существуют самые разнообразные схемы вычитания частот [6, 7].

При использовании схемы вычитания частот, например на D -триггере, дискретность формирования выходных импульсов схемы вычитания определяется периодом сигналов одного из каналов датчика.

Формирование импульсов схемы вычитания проиллюстрировано циклограммой сигналов (рис. 1).

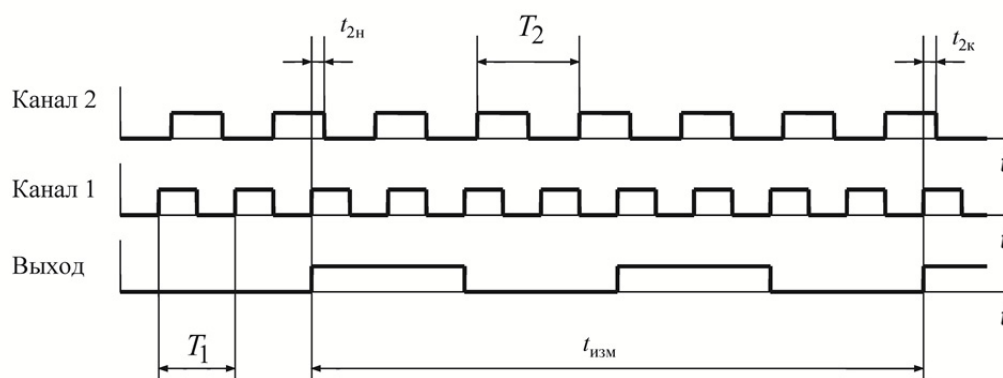


Рис. 1. Циклограмма сигналов схемы вычитания

Можно показать, что разностная частота F при использовании схемы вычитания на D -триггере равна

$$F = \frac{N - (t_{2н} - t_{2к}) f_2}{t_{изм}}, \quad (4)$$

где N – число импульсов разностной частоты, поступающих за время измерения $t_{изм}$; $t_{2н}, t_{2к}$ – задержки начала и конца поступления импульсов канала 2 относительно импульсов канала 1.

Если не учитывать задержки $t_{2н}, t_{2к}$, то возникает относительная погрешность $\delta_{K_{пр}}(F_{и}, F_0)$ определения коэффициента преобразования $K_{пр}$, с учетом вероятностных законов распределения составляющих [8] равная

$$\delta_{K_{пр}}(F_{и}, F_0) = \delta 1_{F_{вых}} = \frac{1}{F_{вых} N} \left(\frac{F_{и}^2}{f_1} S_{21} - \frac{F_0^2}{f_{10}} S_{22} \right), \quad (5)$$

где S_{21}, S_{22} – лежащие в диапазоне ± 1 разности двух случайных величин, распределенных по закону равномерной плотности в диапазоне от 0 до 1, при измерении разностных частот $F_{и}, F_0$ соответственно.

В выражении (5) учтено, что максимальные значения задержек определяются разностью периодов $T_2 = \frac{1}{f_2}$ и $T_1 = \frac{1}{f_1}$ сигналов второго и первого каналов датчика, $(t_{2к}, t_{2н})_{\max} = T_2 - T_1$, а отношения $\frac{t_{2к}}{T_2 - T_1}, \frac{t_{2н}}{T_2 - T_1}$ – случайные величины, изменяющиеся в диапазоне (0, 1) и распределенные по закону равномерной плотности.

Предельные значения составляющей относительной погрешности определения $K_{пр}$, обусловленные пренебрежением задержек поступления импульсов 2-го канала датчика, равны

$$\delta_{1_{F_{\text{вых пред}}}} = \delta_{K_{пр}}(F_{и}, F_0)_{\text{пред}} = \pm \frac{1}{F_{\text{вых}} N} \left(\frac{F_{и}^2}{f_1} + \frac{F_0^2}{f_{10}} \right). \quad (6)$$

Рассмотрим погрешности измерения разностной частоты при учете задержек $t_{2н}, t_{2к}$.

Каждая из указанных задержек измеряется с погрешностью, обусловленной дискретностью h , и состоит из составляющих, определяемых началом и концом измерения задержек.

Из выражения (4) относительная погрешность $\delta_{K_{пр}}(t_{2н} - t_{2к})$ определения $K_{пр}$, обусловленная погрешностью дискретности измерения $t_{2н}, t_{2к}$, равна

$$\delta_{K_{пр}}(t_{2н} - t_{2к}) = \frac{h}{NF_{\text{вых}}} (F_{и} S_{21} f_2 - F_0 S_{22} f_{20}). \quad (7)$$

Предельные значения указанной погрешности равны

$$\delta_{K_{пр пред}}(t_{2н} - t_{2к}) = \pm \frac{h}{NF_{\text{вых}}} (F_{и} f_2 + F_0 f_{20}). \quad (8)$$

Разумеется, осуществлять измерение задержек $t_{2н}, t_{2к}$ можно лишь при $h \ll T_2 - T_1$.

Составляющая относительной погрешности $\delta_{K_{пр}}(t_{изм})$, обусловленная дискретностью h измерения значения $t_{изм}$, определится выражением

$$\delta_{K_{пр}}(t_{изм}) = \frac{h}{NF_{\text{вых}}} (F_{и}^2 S_{21} + F_0^2 S_{22}). \quad (9)$$

Предельные значения этой составляющей равны

$$\delta_{K_{пр пред}}(t_{изм}) = \pm \frac{h}{NF_{\text{вых}}} (F_{и}^2 + F_0^2). \quad (10)$$

3.2. Погрешность при измерении частот сигналов каждого канала датчика

При измерении частот каждого канала составляющая погрешности $\delta_{K_{пр}}(f)$ определения $K_{пр}$, обусловленная дискретностью h измерения частот каналов, равна

$$\delta_{K_{пр}}(f) = \frac{h}{NF_{\text{вых}}} (f_1^2 S_{21} + f_2^2 S_{22} + f_{10}^2 S_{23} + f_{20}^2 S_{24}), \quad (11)$$

где $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}$ – лежащие в диапазоне ± 1 разности двух случайных величин, распределенных по закону равномерной плотности в диапазоне от 0 до 1, при измерении частот f_1, f_2, f_{10}, f_{20} соответственно.

Ее предельное значение равно

$$\delta_{K_{пр пред}}(f) = \pm \frac{h}{NF_{\text{вых}}} (f_1^2 + f_2^2 + f_{10}^2 + f_{20}^2). \quad (12)$$

4. Составляющая погрешности, обусловленная нестабильностью частоты генератора

В общем виде определение частоты F какого-либо сигнала осуществляется измерением времени $t_{изм}$ поступления N импульсов этой частоты.

Составляющая погрешности $\delta_F(f_r)$ измерения частоты F , обусловленная отклонением δ_{f_r} от номинального значения частоты генератора f_r , используемого для измерения временного интервала $t_{изм}$, определяется выражением

$$\delta_F(f_r) = \delta_{f_r}.$$

Разделим отклонение δ_{f_r} на две составляющие:

$$\delta_{f_r} = \delta 1_{f_r} + \delta 2_{f_r},$$

где $\delta 1_{f_r}$ – отклонение частоты генератора от номинального значения при первом измерении; $\delta 2_{f_r}$ – кратковременная нестабильность частоты генератора в процессе измерений относительно его частоты при первом измерении.

С учетом этого относительная погрешность $\delta_{K_{np}}(f_r)$, обусловленная нестабильностью используемого генератора при измерении разностных частот каналов датчика, равна

$$\delta_{K_{np}}(f_r) = \delta 1_{f_r} + \frac{F_{\text{и}}}{F_{\text{вых}}} \delta 2_{f_r}. \quad (13)$$

Аналогичные выражения запишем для варианта измерения частот (периодов) отдельно каждого канала датчика, учитывая, что измерения первого и второго каналов осуществляются одновременно:

$$\delta_{K_{np}}(f_r) = \frac{f_1}{F_{\text{вых}}}(\delta 1_{f_r} + \delta 2_{f_r}) - \frac{f_2}{F_{\text{вых}}}(\delta 1_{f_r} + \delta 2_{f_r}) - \frac{f_{10}}{F_{\text{вых}}} \delta 1_{f_r} + \frac{f_{20}}{F_{\text{вых}}} \delta 1_{f_r},$$

$$\delta_{K_{np}}(f_r) = \delta 1_{f_r} + \frac{F_{\text{и}}}{F_{\text{вых}}} \delta 2_{f_r}.$$

Получили выражение, совпадающее с выражением (13).

Исходя из этого, можно заключить, что влияние нестабильности генератора, с помощью которого осуществляется измерение частот, при измерении разностной частоты и частоты каждого канала одинаково.

5. Пример параметров датчика

Возьмем следующие параметры датчика: $f_{10} = 16\,000$ Гц, $f_{20} = 15\,200$ Гц, $f_1 = 16\,050$ Гц, $f_2 = 15\,150$ Гц, $h = 0,2$ мкс, $\delta_{f_{r1}} = \pm 10^{-5}$, $\delta_{f_{r2}} = \pm 10^{-6}$, $N = 1000$ – при измерении разностной частоты.

Находим $F_{\text{и}} = 900$ Гц, $F_0 = 800$ Гц, $F_{\text{вых}} = 100$ Гц. При измерении разностной частоты $N = 1000$, $t_{\text{изм}} = \frac{N}{F_0} = \frac{1000}{800} = 1,25$ с.

При измерении частот каждого канала время измерения берется тем же.

Результаты расчета, проведенные по формулам (5)–(13) с использованием метода Монте-Карло [9] и пакета Matlab [10] для 20 000 опытов, приведены в табл. 1 и на рис. 2–4.

Таблица 1

Погрешность измерения коэффициента преобразования

Параметр		Вариант измерения		
		Разностная частота без учета задержек	Разностная частота с учетом задержек	Частоты каждого канала
Погрешность дискретности, %	min	–0,048	–0,002	–0,0019
	max	0,048	0,002	0,0019
	Среднеквадратическое отклонение, σ	0,0128	0,0005	0,0005
Предельная погрешность дискретности, $\pm$		0,091	0,0053	0,0053
Нестабильность генератора, $\pm$, %	долговременная	0,001		
	кратковременная	0,0009		
	суммарная	0,0019		

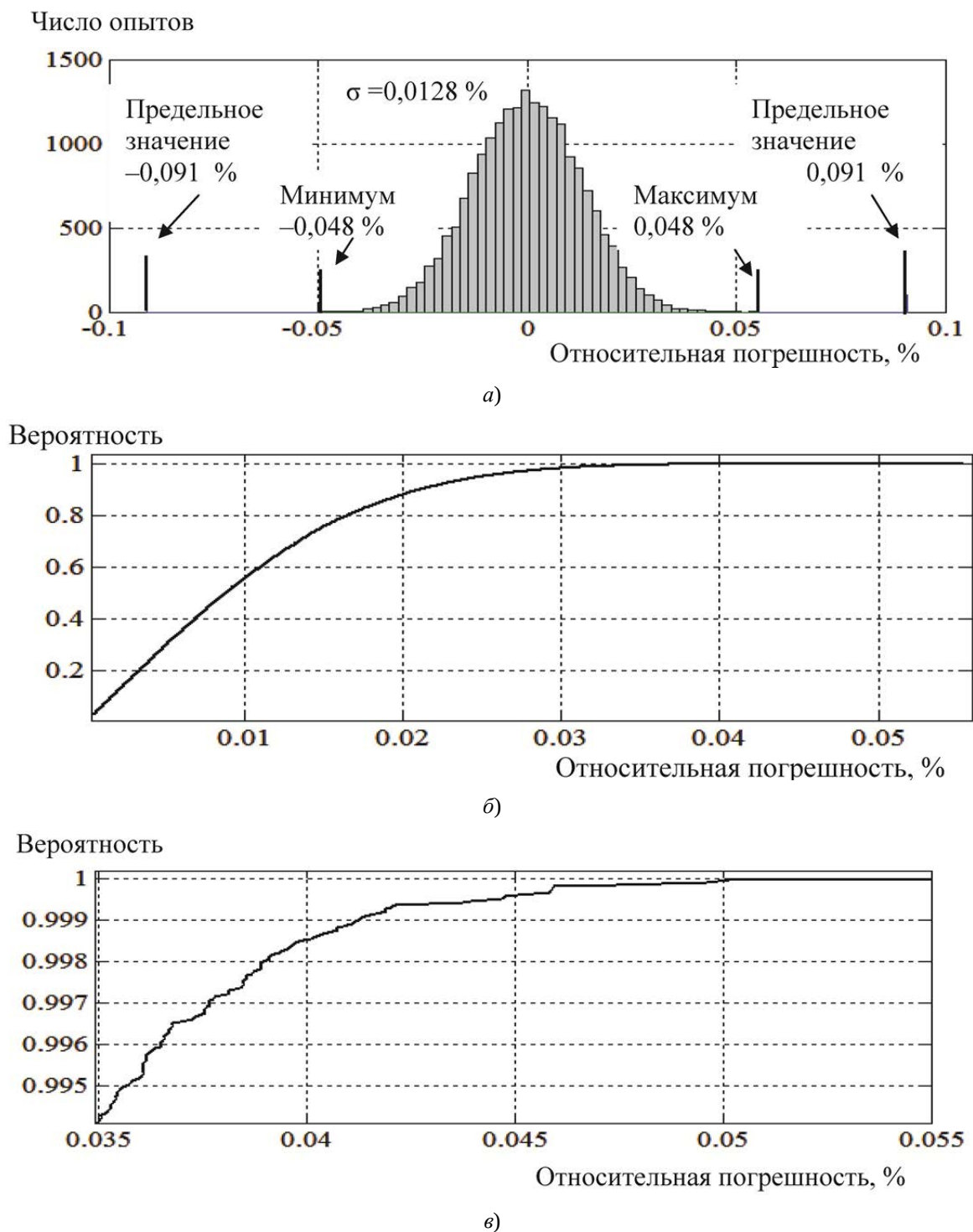


Рис. 2. Составляющая относительной погрешности измерения коэффициента преобразования при измерении разностной частоты и отсутствии учета задержек формирования импульсов второго канала датчика:

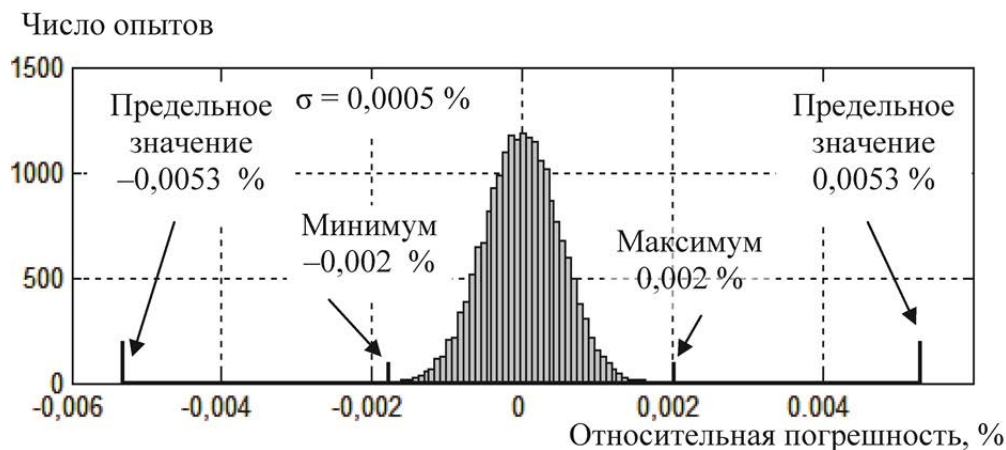
а – гистограмма распределения погрешности при 20 000 опытах; б – распределение погрешности;

в – распределение погрешности для малых вероятностей

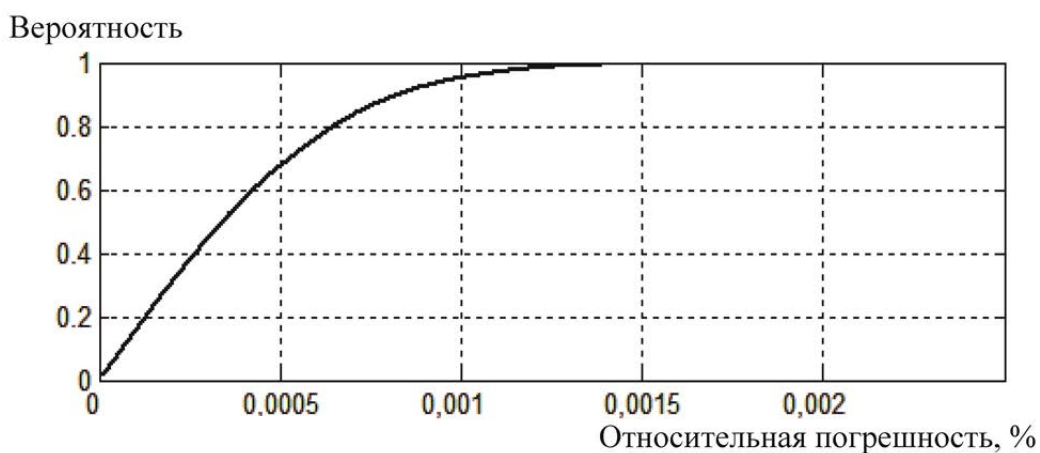
Из данных табл. 1 и рис. 2–4 следует:

1) вариант измерения разностной частоты без учета задержек имеет погрешность дискретности определения коэффициента преобразования, примерно в 20 раз больше погрешности других вариантов;

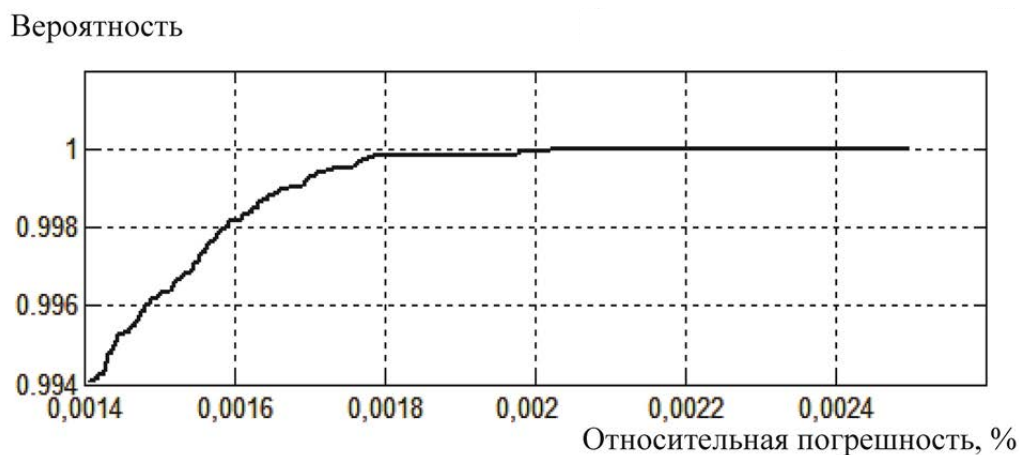
2) погрешность определения коэффициента преобразования, обусловленная дискретностью измерений, при измерении разностной частоты с учетом измерения задержек равна аналогичной погрешности при измерении частот каждого канала датчика.



а)



б)



в)

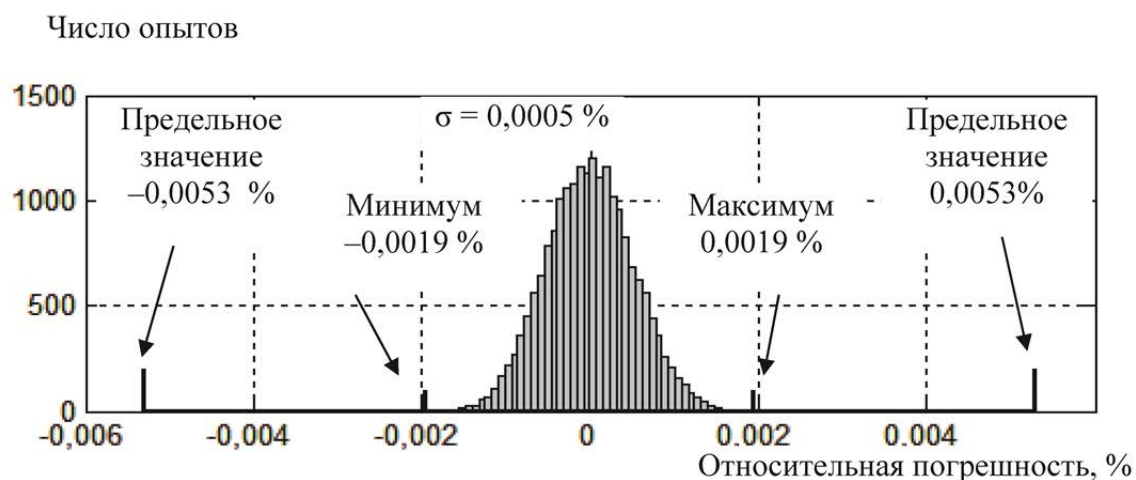
Рис. 3. Составляющая относительной погрешности измерения коэффициента преобразования при измерении разностной частоты и учете задержек формирования импульсов второго канала датчика:
 а – гистограмма распределения погрешности при 20 000 опытах; б – распределение погрешности;
 в – распределение погрешности для малых вероятностей

Примерное равенство погрешностей утверждения 2 может быть показано и аналитическим сравнением выражений (7) и (11).

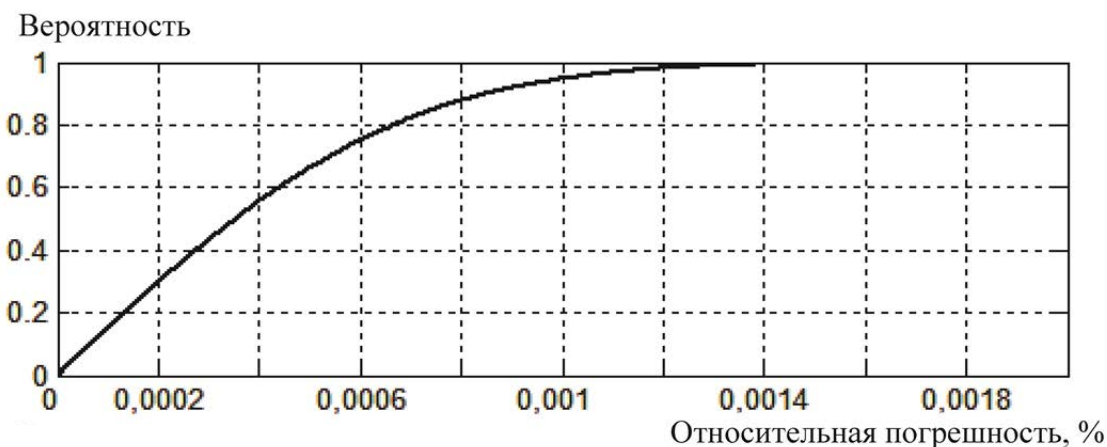
Подытоживая проведенные анализ, можно сделать следующие выводы:

1. Измерение коэффициента преобразования дифференциального частотного датчика целесообразно осуществлять либо измерением разностной частоты каналов датчика с допол-

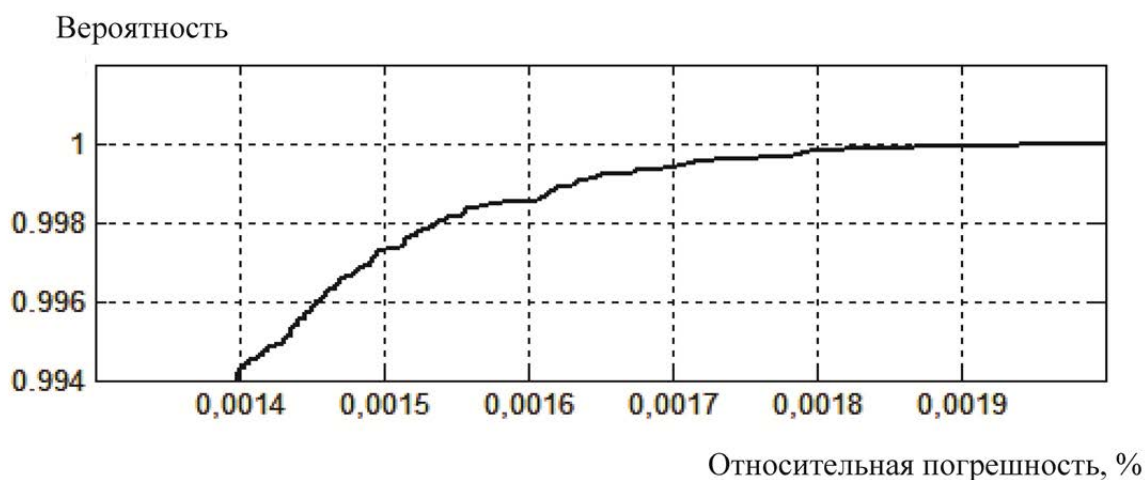
нительным измерением задержки поступления импульсов 2-го канала относительно импульсов 1-го канала в начале и конце измерения разностной частоты, либо измерением частот каждого канала.



а)



б)



в)

Рис. 4. Составляющая относительной погрешности измерения коэффициента преобразования при измерении частот каждого канала:

а – гистограмма распределения погрешности при 20 000 опытах;

б – распределение погрешности; в – распределение погрешности для малых вероятностей

2. В приведенном примере в вариантах, указанных в п. 1 выводов, предельная погрешность дискретности при времени измерения около 1,25 с равна $\pm 0,0053$ %, максимальная – $\pm 0,002$ %, среднеквадратическое отклонение 0,0005 %.

3. Учет вероятностных законов распределения составляющих погрешности дискретности дает значение погрешности определения коэффициента преобразования примерно в 2,5 раза меньше предельных значений.

4. Составляющая погрешности определения коэффициента преобразования, обусловленная долговременной и кратковременной нестабильностью генератора во всех вариантах измерения одинакова и в приведенном примере равна $\pm 0,0019$ %.

Список литературы

1. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
2. Патент RU 2377575 С2 Российская Федерация. Частотный микромеханический акселерометр / Крестьянинов А. А., Смирнов Г. Г. – № 2007133247/28 ; заявл. 04.09.2007 ; опубл. 27.12.2009.
3. Аппаратно-программное интегрирование сигналов дифференциального частотного датчика / Л. Е. Шахмейстер, В. Ю. Трофимов, С. М. Манин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 2 (4). – С. 10–16.
4. Трофимов, В. Ю. Предварительная обработка сигналов пьезокварцевых датчиков / В. Ю. Трофимов, Л. Е. Шахмейстер // Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения : сб. тр. Междунар. молодежной конф., г. Анапа, 23–27 сентября 2013 г. – Ростов н/Д : Изд-во Южного федерального университета, 2013. – С. 137–139.
5. Ларкин, Е. В. Определение временных интервалов в алгоритмах управления / Е. В. Ларкин, А. Н. Ивутин // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 5.
6. Шахмейстер, Л. Е. Цифро-частотные и времяимпульсные преобразователи информации / Л. Е. Шахмейстер. – М. : Книжный дом университета, 2011. – 252 с.
7. Данчеев, В. П. Цифро-частотные вычислительные устройства / В. П. Данчеев. – М. : Энергия, 1976. – 176 с.
8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – 6-е изд. стер. – М. : Высшая школа, 1999. – 576 с.
9. Ермаков, С. М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике / С. М. Ермаков. – СПб., 2009. – 192 с.
10. Иглин, С. П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB / С. П. Иглин. – Харьков, Украина : Изд-во НТУ «ХПИ», 2006. – 612 с.

Трофимов Вадим Юрьевич

кандидат технических наук,
начальник отделения 2,
Научно-производственное объединение «Поиск»
(Россия, Ленинградская область,
Мурино, ул. Лесная, 3)
E-mail: Trovadji@ya.ru

Trofimov Vadim Yur'evich

candidate of technical sciences,
head of department 2,
Scientific and Production Association «Poisk»
(3 Lesnaya street, Myrino, Leningrad region, Russia)

Шахмейстер Леонид Ефимович

доктор технических наук,
заместитель генерального директора по НИОКР,
Научно-производственное объединение «Поиск»
(Россия, Ленинградская область,
Мурино, ул. Лесная, 3)
E-mail: lsh43@mail.ru

Shakhmeyster Leonid Efimovich

doctor of technical sciences, deputy director general
for research and development,
Scientific and Production Association «Poisk»
(3 Lesnaya street, Myrino, Leningrad region, Russia)

УДК 681.2.088

Трофимов, В. Ю.

Погрешность определения коэффициента преобразования дифференциального частотного датчика / В. Ю. Трофимов, Л. Е. Шахмейстер // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 42–50.

А. К. Гришко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ОТКАЗОВ И ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ¹

A. K. Grishko

CALCULATION INDICATORS OF RELIABILITY STRUCTURAL ELEMENTS OF COMPLEX SYSTEMS WITH FAULT LOGGING AND PARAMETER CHANGES

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Конструкции радиоэлектронных средств различного назначения классифицируются как сложные системы и характеризуются многоуровневой иерархической структурой в виде отдельных узлов, блоков, модулей. Поскольку в процессе эксплуатации на систему воздействует комплекс факторов, надежность функционирования сложной системы зависит и от показателей надежности элементов системы, и оптимального распределения значений показателей надежности между элементами системы. Целью данной статьи является определение требований надежности структурных элементов с учетом интенсивности отказов, а также возможных постепенных изменений параметров элементов проектируемой системы в процессе эксплуатации. В качестве накладываемых ограничений выступает требование обеспечения минимума затрат для заданного уровня надежности системы. *Материалы и методы.* Используются методы системного анализа, теории надежности сложных систем и теории вероятности, учитывающие интенсивность отказов и процессы изменения параметров в процессе эксплуатации. *Результаты.* В результате такого подхода появляется возможность дополнить известные методы и получить аналитические выражения для решения конструкторских задач обеспечения надежности с учетом возможных постепенных и внезапных отказов, а также возможных постепенных изменений параметров элементов проектируемой системы. *Выводы.* Разработанную методику определения требований к надежности элементов сложных технических систем предлагается применять на ранних этапах проектирования, когда отсутствие необходимой информации делает невозможным нахождение оптимального распределения норм надежности структурных элементов, обеспечивающее минимальную общую стоимость изделия. Помимо этого, методика определения надежности структурных элементов может применяться для проектирования высоконадежных систем бортовой радиоаппаратуры длительного функционирования.

A b s t r a c t. *Background.* Design of radio-electronic means for various purposes are classified as complex systems and are characterized by a multilevel hierarchical structure in the form of separate units, blocks, modules. Because in the process of operation of the system is influenced by complex factors, reliability of complex systems depends on the reliability of the elements of the system and optimal distribution of values of indicators of reliability between ele-

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

ments of the system. The purpose of this article is to define the requirements of reliability of structural elements, with the possible gradual and catastrophic failure, and possible gradual changes of parameters of elements of the designed system. As the constraints is required to ensure the minimum cost for a given level of system reliability. *Materials and methods.* The article uses methods of system analysis, reliability theory of complex systems and probability theory, taking into account the occurrence of failures and the processes of change parameters in the process of operation. *Results.* As a result of this approach there is an opportunity to complement known methods and to obtain analytical expressions for solving design problems of reliability with regard to possible gradual and sudden failures, and possible gradual changes of parameters of elements of the designed system. *Conclusions.* Developed a methodology for defining the requirements for reliability elements of complex technical systems is proposed to apply at early design stages, when the lack of information makes impossible to find the optimal distribution of norms of reliability of structural elements that provides the minimum total cost of the product. In addition, the method of determining the reliability of structural elements can be used to design highly reliable board radio systems for long functioning.

К л ю ч е в ы е с л о в а: надежность, элемент, система, параметры, внезапные отказы, постепенные отказы.

К е у w o r d s: reliability, element, system parameters, unexpected failures, gradual failures.

Введение и постановка задачи

Расчет надежности сложных технических изделий обычно начинают с его разложения на отдельные части, в отношении которых можно определить количественные характеристики надежности. Эта декомпозиция выполняется так, чтобы отдельные части можно было представить конструктивно в виде самостоятельных узлов, блоков или устройств, независимых в отношении отказов [1, 2]. Если у отказов соседних блоков существует зависимость друг от друга, их объединяют в один блок. Соответственно структурную часть изделия, для которого производят нахождение количественной характеристики надежности, называют элементом расчета надежности.

В процессе конструирования сложных технических изделий ответственного назначения особо важным является обеспечение определенного уровня его надежности [3, 4]. Как правило, необходимо, чтобы вероятность безотказной работы за определенный период времени не превышала требуемую величину. Но вследствие того, что расчет надежности сложных изделий производится в соответствии с его структурой, возникает задача по определению требований надежности для каждого из n элементов системы исходя из требований к проектируемому изделию в целом. При отсутствии дополнительных ограничений, например на массу, объем, габариты, стоимость, материальные затраты, решение задачи приходится искать в условиях неопределенности [5–7], так как любые увеличения показателя надежности структурного элемента будут приводить к повышению надежности всего изделия в целом. Если количество элементов в системе больше двух, то, следовательно, будет существовать множество вариантов для определения норм надежности для каждого элемента.

Допустим, задано требование по надежности некоторой системы в целом:

$$R \geq R_0, \quad (1)$$

где R – показатель надежности (вероятность безотказной работы); R_0 – заданное значение показателя надежности системы в целом, $0 < R_0 < 1$. Обозначив через R_i , $i = 1, \dots, n$, показатель надежности i -го независимого элемента расчета надежности системы (i -й подсистемы), получаем:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i.$$

Таким образом, требуется найти значения R_i , $i = 1, \dots, n$, при выполнении условия (1).

Определение надежности с учетом внезапных отказов

Выбор способа определения требований к надежности элементов системы существенно зависит от объема априорной информации [6, 8, 9]. Если допустить, что все элементы изделия близки по сложности и расчет надежности можно производить с учетом только внезапных отказов (считая, что интенсивность отказов изделия не имеет временной зависимости), используют метод равномерного распределения [5, 10], при этом

$$R_i = R^{1/n}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где n – число независимых элементов системы (подсистемы).

Если известны интенсивности отказов λ_j элементов (прототипов элементов) i -го типа, входящих в подсистему, и можно полагать, что интенсивности отказов не зависят от времени, и не учитывать постепенные изменения параметров, то R_i находят методом пропорционального распределения, например, по формуле

$$R_i = R^{\alpha_i}, \quad (3)$$

где

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j b_{ij} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_j b_{ij} \right)^{-1}, \quad (4)$$

b_{ij} – число элементов i -й подсистемы, которые имеют интенсивность отказов λ_j .

Если задана структура системы и известны некоторые функции $C_i(R_i)$, где $C_i(R_i)$ – ресурс, который затрачивается на обеспечение требований надежности i -й подсистемы, тогда задачу можно решить методом оптимального распределения [5, 7, 11]. В этом случае необходимо найти такие значения R_i , которые обеспечивают

$$\min \{C[C_i(R_i)], i = 1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

при соблюдении условия (1). Здесь $C[*]$ – некий функционал.

В общем случае эта задача на условную оптимизацию решается обычными способами дискретного программирования. Существуют различные варианты формулировки задачи (5). Например [12, 13], требуется найти:

$$\min_{l_i} \sum_{i=1}^n C_i(R_i), \quad i = \overline{1, n},$$

при условии, что

$$\prod_{i=1}^n R_{l_i} \geq R_0, \quad l_i = \overline{1, r_1}; \dots; l_i = \overline{1, r_n},$$

где $C_i(R_{l_i})$ – значение стоимости i -го элемента изделия в l_i -м варианте исполнения; R_{l_i} – значение вероятности безотказной работы i -го элемента в l_i -м варианте исполнения; R_0 – значение заданного уровня вероятности безотказной работы изделия, который распределяется между его структурными элементами. Для сформулированной в такой постановке задачи в работах [14–16], предложен способ ее решения, который оказывается эффективным на тех этапах проектирования, когда имеется информация о соотношении показателей надежности и значений стоимости для каждого возможного варианта исполнения элементов. Но поскольку на ранних стадиях проектирования эта информация, как правило, отсутствует или известна только частично, то найти оптимальное решение не удастся. Иногда полагают, что

$$C[C_i(R_i)] = \sum_{i=1}^n g_i R_i (1 - R_i)^{-1} \quad (6)$$

при условии

$$\prod_{i=1}^n R_i \geq R_0,$$

где g_i – известные весовые коэффициенты, которые определяют по прототипу системы или по экспертным оценкам.

Таким образом, применение метода равномерного распределения обусловлено отсутствием необходимой информации на раннем этапе проектирования и дает, естественно, грубое приближение. Более того, нормы надежности, рассчитанные по формуле (2), для некоторых структурных элементов окажутся труднореализуемыми, так как будут приводить к существенному увеличению стоимости элемента, для которой существует некоторая нелинейная функциональная зависимость от показателя надежности [11, 17]. Применение методов пропорционального (3) и оптимального (5) распределения существенно улучшает качество решения [18, 19], но поиск решения часто затруднителен из-за неполноты исходных данных.

Определение надежности с учетом постепенных отказов

Известно, что каждый элемент и изделие в целом работоспособны, если определяющие их параметры лежат в пределах определенного допуска. Также известно, что в процессе эксплуатации вследствие износа, старения и под влиянием воздействия окружающей среды эти параметры могут изменяться. Средняя скорость такого процесса изменения может оцениваться по справочным данным или по данным эксплуатации изделий-аналогов. Очевидно, что чем меньше интервал допуска и чем больше значение скорости изменения параметров, тем сложнее обеспечить заданные требования надежности структурного элемента и, следовательно, выше будет его стоимость.

На ранних этапах проектирования можно приближенно считать, что ресурс, затрачиваемый на обеспечение надежности структурного элемента, пропорционален показателю надежности этого элемента [6, 11]. Таким образом, с учетом значений допусков на определяющие или выходные параметры элементов и данных, прогнозирующих изменение этих параметров, предлагается рассчитывать нормы надежности структурных элементов системы:

$$R_i = R^{\beta_i}, i = 1, \dots, n, \quad (7)$$

где

$$\beta_i = \left[t_i \sum_{i=1}^n (t_i)^{-1} \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$t_i = L_i V_i^{-1}, \quad (9)$$

t_i – среднее время нахождения i -го параметра в интервале допуска; L_i – величина допуска; V_i – средняя скорость изменения определяющего параметра i -го элемента в процессе эксплуатации системы; $L_i = B_i - A_i$, A_i , B_i – известные границы допуска для определяющего параметра i -го элемента; $0 < V_i < V_{0i}$, где V_{0i} – заданная величина.

Легко заметить, что достоверность расчетов по формуле (8) и, следовательно, по формуле (7), зависит от точности вычисления величины t_i , так как при этом не учитывается положение номинальной (исходной точки) в поле допуска в начальный момент эксплуатации. С целью более точной оценки t_i необходимо рассматривать процесс изменения определяющего параметра подсистемы (структурного элемента). В работах [10, 13–16] были рассмотрены различные модели таких процессов [14–16], предложены способы и алгоритмы [11, 12] вычисления значений t_i для линейных и монотонных процессов [17, 19]. Для наиболее

распространенной на практике линейной модели определяющего параметра в виде $X + V_i$, где X и V – случайные величины, получены расчетные соотношения для различных вариантов: случайная величина X распределена или по равномерному закону, или по усеченному нормальному закону [5, 19].

Для распределения X и V по усеченному нормальному закону получено следующее выражение:

$$t_i = (L_i - 2\lambda_{2i}\sigma_{x_i})(m_{v_i} + \lambda_{1i}\sigma_{v_i})^{-1}.$$

Здесь m_{v_i} – математическое ожидание случайной величины V ; σ_{x_i} и σ_{v_i} – среднеквадратичные отклонения случайных величин X и V ; λ_{2i} и λ_{1i} – коэффициенты, определяемые из уравнений:

$$\Phi_0(\lambda_{1i}) = (1 - \gamma_{1i})\Phi_0\left((V_{0i} - m_{v_i}\sigma_{v_i}^{-1})\right) - \gamma_{1i}\Phi_0(m_{v_i}\sigma_{v_i}^{-1});$$

$$\Phi_0(\lambda_{2i}) = 0,5 - \gamma_{2i},$$

где V_{0i} – детерминированная величина; γ_{1i} и γ_{2i} – коэффициенты, зависящие от R_0 и определяемые по алгоритму, изложенному в работах [11, 12]:

$$\Phi_0(\lambda) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\lambda} \exp[-z^2/2] dz.$$

Таким образом, применяя для определения t_i методы и алгоритмы из работ [11, 12, 18], можно по формуле (7) рассчитать нормы и показатели надежности структурных элементов сложных систем с учетом прогнозируемого изменения этого параметра в процессе эксплуатации.

Определение надежности с учетом внезапных и постепенных отказов

В тех случаях, когда необходимо учитывать и внезапные, и постепенные отказы, будем полагать, что эти отказы наступают независимо друг от друга. При этом для расчета предлагается использовать следующие соотношения:

$$R_i = R^{K_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (10)$$

где

$$K_i = (\alpha_i + \beta_i) \left(\sum_{i=1}^n (\alpha_i + \beta_i) \right)^{-1}, \quad (11)$$

α_i и β_i – вычисляются по формулам (4) и (8) с использованием справочных значений интенсивностей отказов и структуры подсистемы.

Выражение (11) получено при условии, что наступление внезапных и постепенных отказов происходит независимо друг от друга. Такое предположение часто принимают при практических расчетах, так как на ранних стадиях проектирования, как правило, нет достаточного объема достоверных данных для учета зависимости внезапных и постепенных отказов изделия. В противном случае, когда каким-либо способом удастся описать зависимость внезапных и постепенных отказов, способы расчета требований к надежности подсистем изделия существенно усложняются. В работах [15–19] исследованы варианты с зависимыми параметрами и рассмотрены частные случаи, когда удастся преобразовать систему зависимых случайных параметров в систему независимых, для которых можно использовать выражение (10).

Заключение

В дополнение к известным ранее способам определения требований надежности подсистем сложной системы по интенсивности отказов структурных элементов [2] предложены со-

отношения для оценки требований к надежности подсистем как с учетом только постепенных изменений параметров, так и с одновременным учетом внезапных и постепенных отказов. Разработанную методику определения требований к надежности элементов сложных технических систем предлагается применять на ранних этапах проектирования, когда отсутствие необходимой информации делает невозможным нахождение оптимального распределения норм надежности структурных элементов, обеспечивающее минимальную общую стоимость изделия. Помимо этого, методика определения надежности структурных элементов может применяться для проектирования высоконадежных систем бортовой радиоаппаратуры длительного функционирования, когда особую важность приобретают прогнозирование и учет изменений параметров систем в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. ГОСТ РВ 20.39.304–2003. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – М. : Изд-во стандартов, 2003.
2. Садыхов, Г. С. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, Н. И. Сидняев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. – 502 с.
3. Гарькина, И. А. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 3–11.
4. Гришко, А. К. Системный анализ параметров и показателей качества многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Д. В. Артамонов, В. А. Канакин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 77–84.
5. Гришко, А. К. Динамическая оптимизация управления структурными элементами сложных систем / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Т. В. Жашкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 134–141.
6. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
7. Кочегаров, И. И. Выбор оптимального варианта построения электронных средств / И. И. Кочегаров, Н. В. Горячев, А. К. Гришко // Вестник Пензенского государственного университета. – 2015. – № 2 (10). – С. 153–159.
8. Гришко, А. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 35, № 2-1. – С. 16.
9. Гришко, А. К. Метод последовательного анализа моделей радиолокационных систем в процессе эксперимента / А. К. Гришко, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 178–179.
10. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
11. Гришко, А. К. Алгоритм управления в сложных технических системах с учетом ограничений / А. К. Гришко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 379–381.
12. Гришко, А. К. Синтез оптимальной структуры сети распределенных систем разнотипных радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, М. К. Танатов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2015. – Т. 1. – С. 299–301.
13. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели / А. К. Гришко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Технические науки». – 2015. – № 3 (47). – С. 85–90.
14. Гришко, А. К. Анизотропная модель системы измерения и анализа температурных полей радиоэлектронных модулей / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 82–88.
15. Andreyev, P. A. The Temperature Influence on the Propagation Characteristics of the Signals in the Printed Conductors / P. Andreyev, A. Grishko, N. Yurkov // XIIIth International Conference

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

Гришко Алексей Константинович

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

Grishko Aleksey Konstantinovich

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

УДК 621.396

Гришко, А. К.

Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 51–57.

В. В. Кикот

К ВОПРОСУ О ТЕНДЕНЦИЯХ РАЗВИТИЯ ПЬЕЗОДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И СПОСОБАХ УМЕНЬШЕНИЯ ИХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

V. V. Kikot

AT THE QUESTION OF PIEZOELECTRIC ACOUSTIC PRESSURE TRANSDUCERS DEVELOPMENT TRENDS AND THE METHODS FOR REDUCING THEIR THE TEMPERATURE ERROR

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Измерение акустического давления при эксплуатации и испытаниях энергетических установок производится датчиками акустических давлений. Температурные переходные процессы в этих датчиках при мощном и быстропеременном температурном воздействии в диапазоне от минус 253 до + 300 °С приводят к снижению точности измерений акустического давления из-за возрастания температурной погрешности измерения акустического давления до 60 %. Даже при установившемся температурном режиме коэффициент влияния температуры на коэффициент преобразования составляет от 0,4 до 1,1. Повышение точности датчиков при нестационарной температуре рабочей среды, в том числе при ее термоударных воздействиях, является актуальной задачей. Целью проведенной работы является подтверждение актуальности исследований по разработке способов уменьшения температурной погрешности и определение тенденций развития пьезодатчиков акустического давления на основе патентной и технической информации. **Материалы и методы.** Изучены патентные материалы по датчикам акустических и быстропеременных давлений за 20 лет за период с 1995 по 2015 г. с использованием баз данных полных описаний изобретений Роспатента (Россия), Патентного офиса США, Европейской патентной организации, Всемирной организации интеллектуальной собственности и их распределение по годам выдачи. **Результаты.** Приведены результаты исследований тенденций развития способов коррекции пьезодатчиков акустических и динамических давлений на основе патентной информации. Указано распределение патентов по странам, динамика патентования, направленного на улучшение различных характеристик датчиков, распределение национальных патентов по странам, соотношение национальных патентов и патентов, полученных изобретателями в других странах, представлены результаты выявления наиболее значимых тенденций развития, указаны патенты с наиболее интересными с точки зрения практической реализации техническими решениями. **Выводы.** Результатами анализа тенденций развития подтверждена необходимость и актуальность научных исследований схемно-технических способов уменьшения температурной погрешности от нестационарной температуры рабочей среды, в том числе при ее термоударных воздействиях.

A b s t r a c t. Background. the acoustic pressure measurement during the operation and testing of power plants produced by the acoustic pressure sensors. Temperature transients in these sensors with a powerful and rapidly exposed to temperatures ranging from minus 253 to + 300 °C

leads to a decrease in the accuracy of acoustic pressure measurement due to the increase in the temperature of the acoustic pressure measurement error of up to 60 %. Even with the steady temperature conditions influence the temperature coefficient of the transform coefficient is from 0.4 to 1.1. Improving the accuracy of the sensor with a non-stationary temperature of the working environment, including in its thermal shock influences, it is an important task. The objective of this work is to demonstrate the relevance of research to develop ways to reduce the temperature error and the determination on the basis of patent and technical information, development trends of acoustic pressure piezosensors. *Materials and methods.* The patent materials on acoustic and dynamic pressure sensors in the 20 years between 1995 and 2015 using a database full descriptions of inventions of Rospatent (Russia), the United States Patent Office, the European Patent Organization, the World Intellectual Property Organization and their distribution by year of issue are considered. *Results.* The results of the development trends of research methods of the temperature error correction of the acoustic and dynamic pressure piezosensors on the basis of patent information are presented. This distribution of patents across countries, the dynamics of patents, aimed at improving the various sensors characteristics, distribution of national patents of the countries, the ratio of national patents and patents obtained by the inventors in other countries, the results of detection of the most significant trends, these patents with the most interesting from the point of view practical implementation of the technical solutions are described. *Conclusions.* The results of the analysis of trends confirmed the need and relevance of research scheme-technical ways to reduce the temperature error of the non-stationary temperature of the environment, including in its thermal shock.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик давления, пьезоэлектрический, акустический, патент, тенденции развития, уменьшение температурной погрешности, распределение патентов.

К е у w o r d s: pressure sensor, piezoelectric, acoustic, patent, development trends, reducing the temperature error, patents distribution.

Введение

Датчики акустического давления применяются для измерения значений акустических нагрузок, воздействующих на изделия ракетно-космической и авиационной техники при эксплуатации, а также при их наземных испытаниях. Температурные переходные процессы в этих датчиках при мощном и быстропеременном температурном воздействии в диапазоне от минус 253 до + 300 °С приводят к снижению точности измерений акустического давления из-за возрастания температурной погрешности измерения акустического давления до 60 %. Даже при установившемся температурном режиме коэффициент влияния температуры на коэффициент преобразования составляет от 0,4 до 1,1 [1, 2]. Повышение точности датчиков при нестационарной температуре рабочей среды, в том числе при ее термоударных воздействиях, является актуальной задачей [3–7].

Целью проведенной работы является подтверждение актуальности исследований по разработке способов уменьшения температурной погрешности и определение тенденций развития пьезодатчиков акустического давления на основе патентной и технической информации.

Основная часть

При анализе тенденций развития по патентно-технической информации согласно [8] были изучены патентные материалы по датчикам акустических и быстропеременных давлений за 20 лет за период с 1995 по 2015 г. включительно с использованием баз данных полных описаний изобретений национальных патентных ведомств и международных организаций: Роспатент (Россия) [9], Патентный офис США [10], Европейская патентная организация (ЕПО) [11], Всемирная организация интеллектуальной собственности (ВОИС) [12]. Поиск проводился по словам и словосочетаниям: коррекция, температура, погрешность, давление, датчик акустического давления, пьезоэлектрический датчик давления. По исследуемой теме были отобраны 366 патентов, по которым проведен анализ тенденций развития. Количество выданных патентов с 1995 по 2015 г. составляет в среднем 12 шт. в год, с 2007 по 2009 г. по-

вышается в среднем до 33 шт. в год. В 2010 г. наблюдается наибольшее количество выданных патентов – 67 шт. С 2011 г. количество выданных патентов по исследуемой теме составляет примерно 4 шт. в год. Распределение выданных изобретателям патентов следующее:

- всего по странам: Россия – 58 шт., Япония – 146 шт., Китай – 25 шт., США – 66 шт., Южная Корея – 5 шт., Германия – 28 шт., Франция – 10 шт., Великобритания – 8 шт., Австралия – 4 шт., Финляндия – 5 шт., Сингапур – 2 шт. Италия – 2 шт., Норвегия – 1 шт., Австрия – 3 шт., Швейцария – 2 шт., Израиль – 1 шт.;

- национальные патенты: Япония – 100 шт. (42,6 %), Россия – 58 шт. (24,7 %), США – 36 (15,3 %), Китай – 22 (9,4 %), Германия – 8 шт. (3,4 %), Франция – 4 шт. (1,7 %), Великобритания – 3 шт. (1,3 %), Южная Корея – 2 шт. (0,9 %), Австрия – 1 шт. (0,4 %), Израиль – 1 (0,4 %);

- патенты, полученные изобретателями в других странах: Япония – 46 шт. (12,57 %), Китай – 3 шт. (0,82 %), США – 30 (8,19 %), Южная Корея – 3 шт. (0,82 %), Германия – 20 шт. (5,46 %), Франция – 6 шт. (1,64 %), Великобритания – 5 шт. (1,37 %), Австралия – 2 шт. (0,55 %), Финляндия – 5 шт. (1,37 %), Сингапур – 2 шт. (0,55 %), Италия – 1 шт. (0,27 %), Норвегия – 1 шт. (0,27 %), Австрия – 2 шт. (0,55 %), Швейцария – 1 шт. (0,27 %), Израиль – 1 (0,27 %).

По количеству изобретений, косвенно указывающему на объемы научных исследований, связанных с пьезодатчиками, лидируют Россия, Япония, Китай, США и Германия. Это страны с развитым производством судов, летательных и космических аппаратов и прочих транспортных средств. Лидерами по количеству национальных патентов являются Япония, Россия, США и Китай. В патентовании своих изобретений в других странах наиболее заинтересованы Япония, США и Германия. Очевидно, что изобретатели этих стран стараются максимально защитить свои права в других странах, и это вынужденная глобализацией экономики мера, так как взаимная интеграция научно-исследовательских и производственных мощностей делают необходимой правовую защиту интеллектуальной собственности в экономических интересах.

Проанализированы описания изобретений, найденных в процессе поиска, установлены задачи изобретений и технические результаты, которые отображают технико-экономические показатели, улучшение которых может быть важно для развития пьезодатчиков. Для выявления наиболее значимых тенденций патенты распределены в соответствии с решаемыми ими задачами. Распределенное количество патентов (498 шт.) превышает количество найденных патентов (366 шт.). Это связано с тем, некоторые изобретения направлены на решение нескольких задач.

Распределение патентов в соответствии с решаемыми ими задачами следующее:

- повышение точности – 27,91 % (139 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах RU 94035305 A1 (особая конструкция рабочей полости воздушной камеры), RU 2228578 C1 (выбор особенного соотношения геометрических размеров опорных частей корпуса и пьезоэлектрической биморфной пластины чувствительного элемента), RU 2066856 C1 (чувствительный элемент и акустический волновод датчика изготовлены из ленгмюровской пьезопленки, которая изготовлена из поливинилиденфторида или его сополимеров);

- улучшение конструкции – 24,1 % (120 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах RU 2241212 C2 (введение в конструкцию двух волноводов для расширения диапазона измерений и снижения электромагнитных помех), RU 95106595 A1 (введение опорных столбиков в конструкцию мембраны), US 2010107772 A1 (пьезодатчик давления на основе конструкции емкостного датчика давления с использованием пьезоэлектрической пленки);

- повышение чувствительности – 14,66 % (73 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах RU 2215275 C2 (введение в конструкцию датчика нового элемента – биморфной пьезопластины с увеличенным диаметром и с новым взаимным расположением зон с различной поляризацией пьезокерамики), RU 93002292 A (пьезоэлемент, собранный из пьезоколец, которые поляризованы радиально относительно их оси);

- повышение надежности – 8,63 % (43 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах US 2008238261 A1 (снижение риска пробоя, а также снижение тока утечки путем нанесения влагозащитной пленки на боковые поверхности пьезоэлементов), WO 2011065197 A1 (повышение надежности пленочного пьезоэлемента путем понижения его гистерезиса), RU 2339013 C1 (формирование жестко за-

крепленной на основании пьезоэлементной сборки с последующей герметизацией полости со сборкой);

– уменьшение температурной погрешности – 7,23 % (36 шт.), в том числе:

- улучшение свойств пьезоматериала для уменьшения температурной погрешности – 3,82 % (19 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах RU 2165116 C1 (особая рецептура пьезоматериала, позволяющая добиться высокой пьезочувствительности), RU 2498960 (пьезокерамика на основе ниобата лития для гидрофонов, микрофонов и радиоприемников), RU 2047585 C1 (пьезокерамика с повышенными значениями диэлектрической проницаемости, коэффициента электромеханической связи и пьезомодуля d_{31} для медицинских микрофонов);

- конструктивное уменьшение температурной погрешности – 2,41 % (12 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах RU 2093806 C1 (переходник датчика выполнен виде трубки с оребренной поверхностью), RU 2242730 C1 (повышение термостойкости и вибростойкости с использованием пьезоэлементов особой формы и конструкции), US 6925885 B2, WO 2010085603 A3 (система сбора информации с пьезорезистивными датчиками, с расположением компенсационных элементов в соединительных кабелях датчиков и установкой модуля электроники системы в безопасной среде);

- схемно-техническое уменьшение температурной погрешности – 1 % (5 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересны для внедрения и практической реализации патенты RU 94046114 A1 (попеременный анализ импедансов чувствительных элементов: информативных по внешнему задающему воздействию и воздействию, вносящему погрешность измерения: температуре, статическому давлению), RU 2568928 C1 (введение высокочастотного канала измерения температуры без изменения конструкции датчика с последующей коррекцией влияния температуры на точность измерения динамического давления);

- экономическая эффективность – 7,22 % (36 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах US 2010083474 A1 (особый способ изготовления пьезоэлемента, снижающий его себестоимость), US 2008048525 A1 (пьезодатчик давления с использованием особой конструкции опорного элемента, снижающей себестоимость изготовления пьезодатчика без изменения его конструкции);

- расширение функциональных возможностей – 6,42 % (32 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах DE 19923087 A1 (интеллектуальный датчик для анализа вибрации, давления, шума с использованием чувствительного элемента на основе пленочной пьезоэлектрической матрицы), US 2006283256 (диагностика работоспособности датчика давления путем введения еще одного пьезоэлектрического чувствительного элемента в разделительную мембрану), RU 2349886 C1 (размещение на сенсоре давления датчика температуры);

- расширение диапазона – 2,61 % (13 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах RU 94040199 A1 (снижение конвекционного переноса тепла с использованием вытеснителя в присоединительном патрубке датчика), CN 201289420 Y (введение чувствительного элемента из монокристаллического фосфата галлия и изолятора из керамики и слюды), RU 2384826 C1 (расширение нижнего диапазона измеряемого акустического давления введением чувствительного элемента с несколькими мембранами);

- улучшение технологии изготовления – 1,22 % (6 шт.), из выявленных изобретений наиболее интересными являются решения, изложенные в патентах CN 202026456 U (изготовление пленочной микрофонной матрицы), WO 2015194811 A1 (формирование чувствительного элемента датчика с использованием намотки пьезоэлектрической пленки), CN 203027480 U (технология изготовления пьезоэлектрического кремниевого микрофона).

Большинство изобретений (16 шт. из 19 шт.), направленных на уменьшение температурной погрешности путем улучшения свойств пьезоматериала, – зарубежные. Акцент отечественных изобретений сделан на конструктивные и схемно-технические способы. Это объясняется тем, что принципы преобразования неэлектрических измеряемых величин в электрические и используемые для их реализации в датчиках материалы и технологии, которые за рубежом патентовались в течение двух последних десятилетий, в СССР изучены, внедрены и используются с 50–70-х гг. XX в. Отечественные изобретения, связанные с продукцией двойного

назначения, к которой относятся и датчики акустических давлений для жестких условий эксплуатации, не патентуются и не публикуются в открытой печати. Именно поэтому сведения об изобретениях тех лет, связанных с улучшением свойств материалов, отсутствуют. Использование при разработке пьезодатчиков технологических способов уменьшения температурной погрешности (улучшение свойств пьезокерамических материалов, применение материалов с минимальной зависимостью характеристик от температуры), конструктивных способов (применение материалов со схожими температурными коэффициентами линейного расширения, использование различных вариантов взаимного расположения элементов пьезодатчиков, применение различных вариантов термостатирования и термостабилизации пьезодатчиков) по достижении предела их возможностей, обусловленного уровнем технического развития этих способов, становится неэффективным. Именно поэтому далее уменьшение влияния температуры осуществляется схемно-техническими способами. Ранее использование схемно-технических способов было ограничено возможностями электрорадиоизделий и комплектующих (ЭРИиК), которые применялись для проектирования измерительных цепей вторичных измерительных преобразователей с реализацией схемно-технических способов коррекции. Большие габаритные размеры, вес, низкая функциональность ЭРИиК не позволяли в полной мере использовать весь потенциал схемно-технических способов коррекции. Современные возможности ЭРИиК все чаще позволяют использовать решения, объединяющие ранее несовместимые конструктивные и схемно-технические способы коррекции для выполнения требований по точности измерений, энергосбережению, миниатюризации, адаптивности к системам измерений, управления и контроля. Например, стало возможным размещение пьезоэлектрических датчиков акустических давлений, датчиков температуры, а в необходимых случаях и измерительных цепей этих датчиков, реализующих схемно-технические способы коррекции, в одном корпусе. Поэтому отечественных конструктивных и схемно-технических способов повышения точности запатентовано больше, чем изобретений, которые направлены на улучшение свойств пьезоматериалов.

Заключение

Анализ тенденций развития пьезодатчиков на основе патентной информации свидетельствует о наличии двух тенденций. С одной стороны, научные исследования направлены на миниатюризацию пьезодатчиков и их измерительных цепей, с другой стороны, из-за возрастающей интеллектуализации измерительных цепей усложняются их структурные схемы, реализующие схемно-технические способы уменьшения погрешностей измерений.

Необходимость и актуальность научных исследований схемно-технических способов повышения точности пьезодатчиков объясняется возможностью (при относительно небольших затратах на разработку) совершенствования их характеристик путем уменьшения погрешностей измерений от вибрации, нестационарной температуры рабочей среды, в том числе ее термоударных воздействий и подтверждается результатами представленного анализа тенденций развития.

Список литературы

1. ОСТ 92-4527-84. Преобразователи первичные измерительные звуковых давлений пьезоэлектрические. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1984.
2. Преобразователи. Системы. Каталог ОАО «НИИФИ». – Пенза : Пензенская правда, 2011. – С. 70–98.
3. Баринов, И. Н. Состояние разработок и тенденции развития высокотемпературных тензорезистивных датчиков давлений на основе карбида кремния / И. Н. Баринов, Б. В. Цыпин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 11. – С. 50–60.
4. Волков, В. С. Автоматизация разработки диагностического обеспечения интеллектуальных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Приборы. – 2009. – № 12. – С. 20–25.
5. Баринов, И. Н. Использование системы Simulink при имитационном моделировании высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2011. – № 7. – С. 50–54.

6. Баринов, И. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий / И. Баринов, В. Пауткин, С. Козел, А. Федулов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1 (102). – С. 24–27.
7. Измерение параметров первичных пьезоэлектрических преобразователей систем управления / Е. А. Ломтев, А. А. Мельников, А. В. Пушкарева, А. В. Светлов, Б. В. Цыпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 3 (35). – С. 95–103.
8. ГОСТ Р 15.011–96. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения. – М., 1996. – 23 с. – (Система разработки и постановки продукции на производство).
9. Информационно-поисковая система // ФГБУ «ФИПС». – URL: <http://www.fips.ru> (дата обращения: 06.12.2015).
10. USPTO Patent Full-Text and Image Database // United States Patent and Trademark Office. – URL: <http://www.uspto.gov> (дата обращения: 14.12.2015).
11. Espacenet search [Электронный ресурс] // European Patent Office. – URL: <http://ep.espacenet.com> (дата обращения: 20.12.2015).
12. Search WIPO // World Intellectual Property Organization. – URL: <http://ipdl.wipo.int> (дата обращения: 04.01.2016).

Кикот Виктор Викторович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: inbox@post.su

Kikot Viktor Viktorovich

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

УДК 681.586.773.088.8

Кикот, В. В.

К вопросу о тенденциях развития пьезодатчиков акустического давления и способах уменьшения их температурной погрешности / В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 58–63.

УДК 519.24; 519.7; 57.017

А. И. Иванов, К. А. Перфилов, Е. А. Малыгина

МНОГОМЕРНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫХ ВЫБОРКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЕВ СРЕДНЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО, ВЫЧИСЛЕННОГО ДЛЯ АНАЛИЗИРУЕМЫХ ФУНКЦИЙ ВЕРОЯТНОСТИ

A. I. Ivanov, K. A. Perfilov, E. A. Malygina

MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS OF THE QUALITY OF BIOMETRIC DATA ON EXTREMELY SMALL SAMPLES USING THE CRITERIA OF THE GEOMETRIC MEAN CALCULATED FOR THE ANALYZED PROBABILITY FUNCTIONS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Целью работы является оценка мощностей трех вариантов статистических критериев среднего геометрического от эмпирической и теоретической функций вероятности. *Материалы и методы.* Предложено воспользоваться средствами имитационного моделирования и численно получить оценку мощности сравниваемых критериев в точке равновероятных ошибок первого и второго рода. Применена логарифмическая шкала сравнительной оценки мощностей, в которой зависимости сравниваемых мощностей от числа опытов в обучающей выборке близки к линейным. *Результаты и выводы.* Показано, что предложенный ранее статистический критерий среднего геометрического занимает промежуточное положение между двумя его аналогами. Наибольшей мощностью подавление шумов квантования обладает критерий, построенный как квадратный корень среднего геометрического сравниваемых функций вероятности. Рассматриваемые критерии в их многомерном варианте исполнения способны работать на предельно малых выборках биометрических данных от 11 до 21 примера одного биометрического образа.

A b s t r a c t. *Background.* The aim is to assess the capacity of the two variants of the statistical criteria of the geometric mean of the empirical and theoretical probability functions. *Materials and methods.* It is proposed to use simulation tools and numerically to estimate power at comparable criteria equally errors of the first and second kind. Applying a logarithmic scale comparative assessment of capacities, which, depending on the number of power compared experiences in the training set are close to linear. *Results and conclusions.* It is shown that the statistical criterion proposed by the geometric mean of the previously occupies an intermediate position between its two counterparts. The greatest power of the suppression of the quantization noise has a test based as the square root of the geometric mean of comparable probability functions. Considered criteria in their multidimensional embodiment capable of operating at extremely small samples of biometric data from 11 to 21, an example of a biometric image.

К л ю ч е в ы е с л о в а: статистический критерий среднего геометрического, логарифмическая шкала мощности критериев, обработка многомерных биометрических данных, подавление шумов квантования.

K e y w o r d s: statistical criterion geometric mean of comparable probability functions, logarithmic scale power of statistical tests, multidimensional processing of biometric data, the quantization noise generated by the suppression of a small volume of the test sample.

Введение

Информационное общество предполагает активное использование интернет-ресурсов. Государственные и частные структуры создают на своих сайтах личные кабинеты пользователей. К сожалению, существующая практика парольной защиты доступа к личным кабинетам обладает существенными уязвимостями. Пользователи не способны запоминать длинные случайные пароли. Владелец информационного ресурса не может быть уверен в том, что к личному электронному кабинету получил доступ именно его хозяин. Пароль может быть перехвачен программной закладкой, также не составляет проблемы подменить IP-адрес интернет-пользователя.

Для усиления защиты доступа к электронным кабинетам в настоящее время разрабатываются технологии биометрической аутентификации личности путем преобразования личных биометрических данных человека в его криптографический ключ или длинный случайный пароль доступа. Используются такие биометрические образы, как: рисунок отпечатка пальца [1], рисунок радужной оболочки глаза [2], голосовой пароль [3], рукописный пароль [4], рисунок кровеносных сосудов глазного дна или ладони руки [5]. Естественно, что преобразователи биометрия-код не могут быть идеальными и имеют вероятности ошибок первого и второго рода. Возникает необходимость тестирования ошибок первого и второго рода на реальных биометрических данных. Кроме того, при настройке «нечетких экстракторов» [1–3] и при обучении нейросетевых преобразователей [4, 5] необходимо контролировать отсутствие в биометрических данных грубых ошибок. По сути дела, на небольшом числе примеров биометрического образа необходимо контролировать показатель близости распределения биометрических данных к многомерному нормальному закону [6]. Формально для этой цели может быть использован классический одномерный хи-квадрат-критерий Пирсона [7–9], однако такой подход далек от оптимального. В рамках данной статьи мы попытаемся доказать, что контроль нормальных плотностей распределения биометрических данных выгоднее осуществлять статистическим критерием Крамера – фон Мезиса. Мощность критерия Крамера – фон Мезиса на малых выборках примеров биометрических данных оказывается существенно выше, чем мощность аналогичного критерия хи-квадрат.

Появление шумов квантования при статистической обработке малых выборок

Рассмотрим простейшую ситуацию, когда тестовая или обучающая выборка представлены девятью примерами образа «Свой». Из-за того что непрерывная функция вероятности $P(x)$ первого биометрического параметра v_1 малой выборки, мы вынуждены описывать ее ступенчатой монотонно возрастающей функцией $\tilde{P}(x)$, как это показано на рис. 1,а.

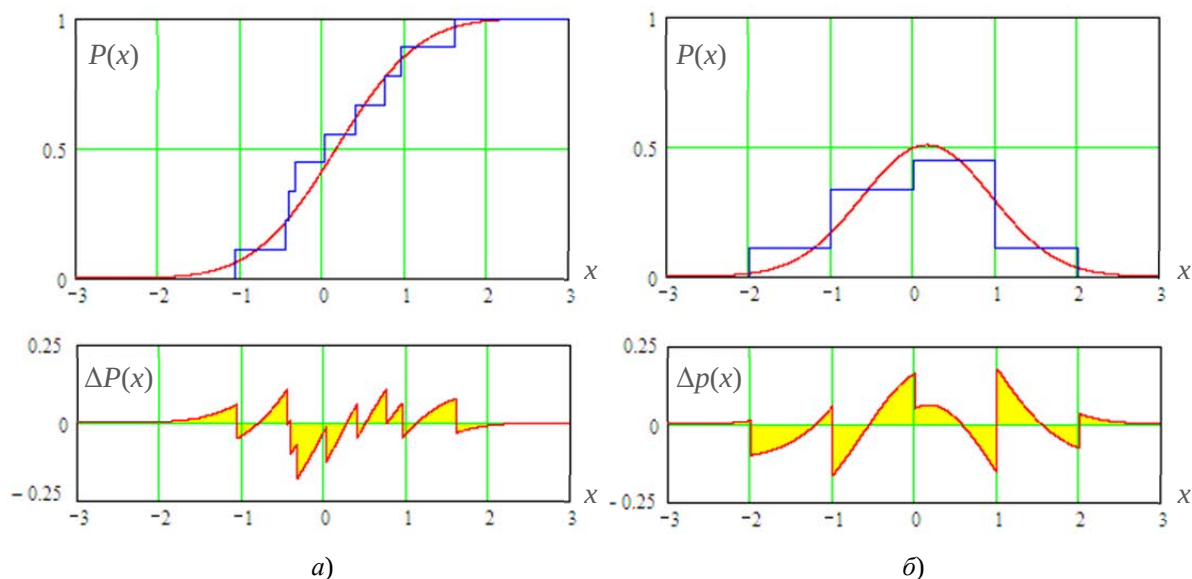


Рис. 1. Эффекты квантования непрерывной вероятности распределения значений и непрерывной плотности распределения значений при девяти примерах

Для того чтобы построить ступенчатое монотонно возрастающее приближение $\tilde{P}(x)$, необходимо осуществить сортировку биометрических данных по их возрастанию:

$$x_i = \text{sort}(v_{1,i}) \text{ для } i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где n – размер тестовой выборки или число квантов приближения монотонной функции вероятности.

В этом случае монотонно возрастающая ступенчатая функция будет описываться следующим кусочно-постоянным приближением:

$$\tilde{P}(x_i) = \frac{i}{n}. \quad (2)$$

Ошибка приближения или шум квантования находится как разность непрерывной функции вероятности и ее ступенчатого приближения:

$$\Delta P(x) = P(x) - \tilde{P}(x). \quad (3)$$

В нижней части рис. 1 отображены функции ошибки квантования или шумы квантования, возникающие из-за малых тестовых выборок.

В контексте вышеизложенного статистический критерий Колмогорова – Смирнова [7] следует рассматривать как поиск максимального значения модуля ошибки приближения:

$$\sup_{-\infty < x < +\infty} |P(x) - \tilde{P}(x)| = \max |\Delta P(x_i)| \quad (4)$$

или выбор наибольшего из локальных максимумов шума квантования.

С этих же позиций статистический критерий Крамера – фон Мизеса [7] является оценкой стандартного отклонения шума квантования непрерывной функции вероятности:

$$KfM = \int_{-\infty}^{\infty} \{P(x) - \tilde{P}(x)\}^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} \{E(\Delta P(x)) - \Delta P(x)\}^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} \{\Delta P(x)\}^2 dx = \sigma^2(\Delta P(x)), \quad (5)$$

если выполняется условие нулевого математического ожидания шума квантования $E(\Delta P(x)) = 0$.

Следует подчеркнуть, что статистический критерий Колмогорова – Смирнова (4) всегда имеет меньшую мощность в сравнении с критерием Крамера – фон Мизеса (5). Критерий Колмогорова – Смирнова (4) точечный, а критерий Крамера – фон Мизеса (5) интегральный.

Очевидно, что с ростом размеров тестовой выборки n два этих статистических критерия набирают мощность оценок, однако оценка по интегральному критерию всегда оказывается надежнее, чем оценка по точечному критерию. При интегрировании шумы квантования подавляются, при точечных оценках они усиливаются. В этом отношении все интегральные статистические критерии представляют значительный интерес как исходный генетический материал для создания более мощных статистических критериев высокой размерности.

На сегодня известно достаточно много статистических критериев, часть из которых приведена в табл. 1.

Таблица 1

Примеры статистических критериев с указанием года их создания

№	Название критерия и год создания	Формула критерия
1	2	3
1	Хи-квадрат критерий или один из вариантов критерия Пирсона, 1900 г.	$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\{p(x) - \tilde{p}(x)\}^2}{p(x)} \cdot dx$
2	Критерий Крамера – фон Мизеса, 1928 г.	$\int_{-\infty}^{+\infty} \{P(x) - \tilde{P}(x)\}^2 \cdot dx$
3	Критерий Колмогорова – Смирнова, 1933 г.	$\sup_{-\infty < x < +\infty} P(x) - \tilde{P}(x) $

Окончание табл. 1

1	2	3
4	Критерий Смирнова – Крамера – фон Мизеса, 1936 г.	$\int_{-\infty}^{+\infty} \{P(x) - \tilde{P}(x)\}^2 \cdot dP(x)$
5	Критерий Джини, 1941 г.	$\int_{-\infty}^{+\infty} P(x) - \tilde{P}(x) \cdot dx$
6	Критерий Андерсона – Дарлингга, 1952 г.	$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\{P(x) - \tilde{P}(x)\}^2}{P(x) \cdot \{1 - P(x)\}} \cdot dP(x)$
7	Критерий Ватсона, 1961 г.	$\int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \tilde{P}(x) - P(x) - \int_{-\infty}^x [\tilde{P}(x) - P(x)] \cdot dP(x) \right\} \cdot dP(x)$
8	Критерий Фроцини, 1978 г.	$\int_{-\infty}^{+\infty} P(x) - \tilde{P}(x) \cdot dP(x)$
9	Дифференциальный вариант критерия Джини, 2006 г. [6]	$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) - \tilde{p}(x) \cdot dx$
10	Критерий среднего геометрического, 2014 г. [10]	$\int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{P(x) \cdot (1 - \tilde{P}(x))} \cdot dx$

Следует подчеркнуть, что на практике наиболее часто используется хи-квадрат-критерий Пирсона, созданный им в 1900 г. [8]. Популярность этого статистического критерия обусловлена тем, что Пирсон построил аналитическое описание хи-квадрат-плотностей распределения значений. С опорой на это аналитическое описание разработаны таблицы доверительных вероятностей для оценки уровня достоверности той или иной статистической гипотезы для хи-квадрат-критерия. На сегодня хи-квадрат-критерий следует рассматривать как эталон при исследовании мощности других критериев.

В частности, необходимо для всех широко применяемых на данный момент статистических критериев [9] дать оценку их мощности по отношению к мощности классического и наиболее часто используемого хи-квадрат-критерия. В рамках данной статьи мы попытаемся дать относительные оценки мощности для вариантов относительно нового критерия среднего геометрического сравниваемых между собой теоретической и эмпирической функций вероятности.

Использование хи-квадрат-критерия как фактического эталона мощности для других критериев

Следует отметить, что оценка мощности хи-квадрат-критерия во многом остается субъективной. В частности, это связано с тем, что уровень доверительной вероятности принимаемых решений выбирает сам исследователь. Исключим эту неопределенность. Далее будем судить о качестве принимаемых решений по точке равновероятных ошибок первого и второго рода $P_1 = P_2 = P_{EE}$. Еще одной неопределенностью является то, какой закон распределения выбран как теоретический и какой закон выбран как экспериментальный. Будем рассматривать ситуацию, когда выбран нормальный закон распределения как теоретический и экспериментальный закон распределения также является нормальным. Как альтернативу будем использовать в качестве экспериментального закона равномерный закон, проверяя его на гипотезу нормальности. Результаты численного эксперимента отражены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что для выборок из 15 примеров равновероятная ошибка составляет $P_{EE} = 0,272$, если же объем тестовой выборки увеличить до 30 примеров, то равновероятная ошибка падает до величины $P_{EE} = 0,194$. С увеличением объема тестовой выборки в 2 раза происходит снижение примерно в $\sqrt{2}$ раза вероятности появления ошибок.

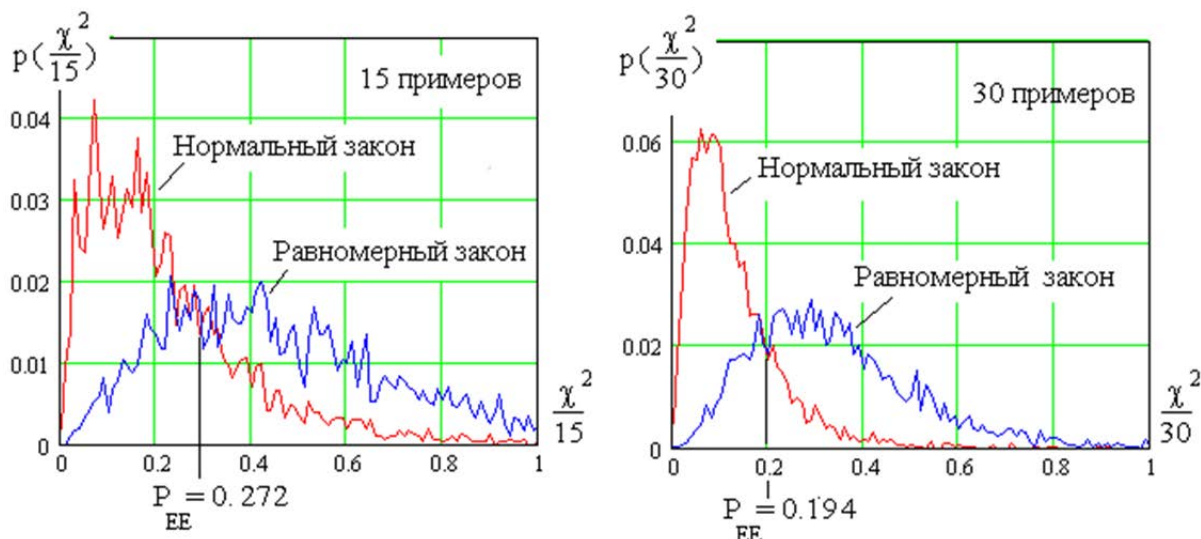


Рис. 2. Результаты численного эксперимента по оценке мощности хи-квадрат-критерия для выборок, состоящих из 15 и 30 примеров при одинаковом числе столбцов гистограммы

На практике удобно пользоваться логарифмической шкалой значений равновероятных ошибок. При логарифмическом представлении данных мощность хи-квадрат-критерия хорошо описывается ломаными линиями из-за того, что при росте числа примеров в обучающей выборке обычно увеличивают число столбцов в гистограмме. Для того чтобы уйти от этого эффекта, будем использовать гистограмму, состоящую из шести столбцов для выборки, изменяющейся от 9 до 144 примеров. Данные о мощности критерия хи-квадрат отображены в верхней части рис. 3 в виде утолщенной линии.

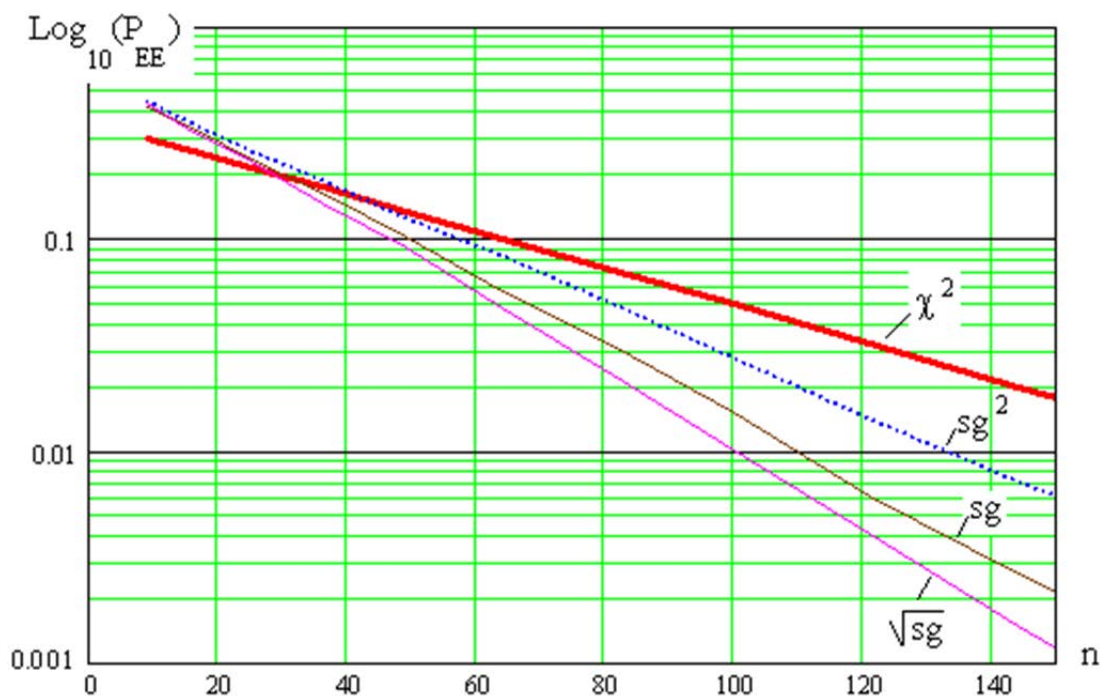


Рис. 3. Эталонная мощность хи-квадрат-критерия (толстая линия) в логарифмической шкале равновероятных ошибок

Из рис. 3 видно, что при одинаковом числе столбцов гистограммы в логарифмическом масштабе происходит линейное уменьшение вероятности ошибок, т.е. эталонная мощность хи-квадрат критерия хорошо описывается следующим приближением:

$$P_{EE}(n) = 10^{-0,45-0,0086n}. \quad (6)$$

**Три варианта критерия среднего геометрического
от сравниваемых функций вероятности**

Критерий среднего геометрического (строка 10 табл. 1) был предложен в 2014 г. [10] и более подробно был исследован в 2015 г. [11, 12]. Хронологии создания статистических критериев приходится уделять серьезное внимание в силу того, что давно созданные статистические критерии, размещенные в верхней части табл. 1, хорошо изучены. Рассматривать их как альтернативу хи-квадрат-критерию не следует. Иначе обстоит дело со статистическими критериями, созданными недавно. Они практически не исследованы и вполне могут быть использованы как генетический материал при синтезе новых критериев существенно более мощных, чем хи-квадрат-критерий Пирсона.

Из рис. 3 видно, что мощность критерия среднего геометрического (sg) хуже мощности хи-квадрат-критерия на выборках объемом до 30 опытов. При выборках более 30 опытов возникает ситуация обратная, мощность sg -критерия выше мощности хи-квадрат-критерия. Мощность критерия среднего геометрического описывается следующим приближением:

$$P_{EE}(n) = 10^{-0,22-0,0165n}. \quad (7)$$

Следует подчеркнуть, что критерий среднего геометрического можно усилить, если извлечь из него квадратный корень:

$$\sqrt{sg} = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt[4]{P(x)(1-\tilde{P}(x))} dx. \quad (8)$$

Усиленный вариант критерия среднего геометрического описывается более круто падающей линией в логарифмическом масштабе:

$$P_{EE}(n) = 10^{-0,22-0,0182n}. \quad (9)$$

Увеличение порядка извлекаемого корня в подынтегральной части выражения (8) приводит к усилению наклона линии, однако этот эффект незначителен. Наступает насыщение при корне 20 порядка, и дальнейшего усиления мощности критерия не наблюдается.

Если мы будем уменьшать показатель корня для критериев среднего геометрического, то происходит ослабление мощности нелинейной статистической обработки. Эта ситуация на рис. 3 иллюстрируется прямой квадрата среднего геометрического:

$$\begin{cases} sg^2 = \int_{-\infty}^{\infty} P(x)(1-\tilde{P}(x)) dx, \\ P_{EE}(n) = 10^{-0,22-0,0135n}. \end{cases} \quad (10)$$

Все три рассмотренных выше статистических критерия среднего геометрического оказываются мощнее критерия хи-квадрат при выборках объема более 30 примеров. Чем больше выборка, тем ощутимее растет мощность статистических критериев среднего геометрического.

Многомерные обобщения критериев среднего геометрического

Казалось бы, критерии среднего геометрического бесполезны для биометрии, так как работают хуже критерия хи-квадрат на выборках объемом менее 30 опытов. На самом деле это не так. Дело в том, что все биометрические данные многомерны. Так, в среде моделирования «БиоНейроАвтограф» [13] осуществляется учет 416 биометрических параметров. Каждый биометрический параметр – это один из коэффициентов двухмерного преобразования Фурье от пары функций $X(t)$, $Y(t)$. Формально мы можем рассматривать вектор из 416 биометрических параметров вместо одного биометрического параметра v_1 .

Каждый из биометрических параметров будет иметь свои статистические моменты, для построения многомерного критерия среднего геометрического необходимо осуществить центрирование и нормирование всех биометрических параметров:

$$\hat{v}_j = \frac{v_j - E(v_j)}{\sigma(v_j)}, \quad (11)$$

где $E(\cdot)$ – математическое ожидание биометрического параметра; $\sigma(\cdot)$ – стандартное отклонение биометрического параметра.

После нормирования и центрирования следует объединить в одну группу все биометрические данные путем их простой конкатенации:

$$\bar{x} = \hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots, \hat{v}_j, \dots, \hat{v}_N. \quad (12)$$

Если у нас имеется n примеров биометрического образа, то объединив их между собой конкатенацией, мы получим тестовую выборку размером $n \cdot 416$. Это обстоятельство позволяет обойти проблему тестирования качества биометрических образов на малых выборках.

Так, при использовании всего одного примера 416-мерный анализ биометрического образа по критерию $\sqrt{sg}$ должен давать одинаковые значения ошибок первого и второго рода на уровне $P_{\text{ее}} = 0,000000016$ (вычисление выполнено по приближенной формуле (9)). Этот пример показывает, что 416-мерный статистический анализ биометрических данных по критерию $\sqrt{sg}$ эффективнее 416-мерного критерия хи-квадрат (6) примерно в 5800 раз. Естественно, что эта приближенная оценка выигрыша, она построена на том, что оба сравниваемых многомерных критерия должны быть одинаково чувствительны к уровню коррелированности биометрических данных.

Заключение

Каждый из статистических критериев является некоторым нелинейным цифровым фильтром, который давит шумы квантования. Увеличивая размерность цифрового фильтра (размерность статистического критерия), мы естественно увеличиваем его мощность. В итоге мы можем снизить выборку примеров до предельно малого значения в один пример. Многомерные статистические критерии должны оставаться работоспособными даже на выборках из одного или двух примеров, если их ранее кто-то настроил, применив выборку из 20 примеров исследуемого биометрического образа. То есть при многомерном статистическом анализе биометрических данных мы имеем примерно ту же ситуацию, что и при многомерном нейросетевом анализе [4, 5]. Настройку многомерных статистических критериев приходится осуществлять на выборке примерно из 20 примеров, а решение по качеству можно принимать по каждому примеру отдельно.

Видимо, многомерный статистический анализ с использованием различных статистических критериев и нейросетевой статистический анализ являются близкими по эффективности инструментами. Тем не менее между ними существует значительная разница. Как работают искусственные нейронные сети, понять трудно; как осуществляется синтез и настройка многомерных статистических критериев – понятно. В рамках данной статьи мы попытались показать, что оптимизация многомерных статистических критериев вполне возможна. 416-мерный критерий $\sqrt{sg}$ при анализе биометрических данных должен работать лучше в сравнении хи-квадрат-критерием той же размерности.

Список литературы

1. Ramírez-Ruiz, J. Keys Generation Using FingerCodes / J. Ramírez-Ruiz, C. Pfeiffer, J. Nolasco-Flores // Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA. – 2006 (LNCS 4140). – P. 178–187.
2. Monrose, F. Cryptographic key generation from voice / F. Monrose, M. Reiter, Q. Li, S. Wetzel // Proc. IEEE Symp. on Security and Privacy, 2001.
3. Feng Hao. Crypto with Biometrics Effectively / Feng Hao, Ross Anderson, John Daugman // IEEE Transactions on computers. – 2006. – Vol. 55, № 9.
4. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / Ю. К. Язов, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, И. П. Назаров. – М. : Радиотехника, 2012. – 157 с.

5. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа / Б. С. Ахметов, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, А. В. Безяев, Е. А. Малыгина. – Алматы : LEM, 2014. – 144 с.
6. Малыгин, А. Ю. Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / А. Ю. Малыгин, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 161 с.
7. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М. : Физматлит, 2006. – 816 с.
8. Р 50.1.037–2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 . Госстандарт России. – М., 2001. – 140 с.
9. Р 50.1.037–2002. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии. Госстандарт России. – М., 2002. – 123 с.
10. Перфилов, К. А. Критерий среднего геометрического, используемый для проверки достоверности статистических гипотез распределения биометрических данных / К. А. Перфилов // Труды научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. – Пенза, 2014. – Т. 9. – С. 92–93. – URL: <http://www.pniei.penza.ru/RV-conf/T9/C92>
11. Использование среднего геометрического, ожидаемой и наблюдаемой функций вероятности как статистического критерия оценки качества биометрических данных / Б. С. Ахметов, А. И. Иванов, К. А. Перфилов, Е. Д. Проценко, Д. С. Пашенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 281–283.
12. Перфилов, К. А. Расширение многообразия статистических критериев, используемых при проверке гипотез распределения значений биометрических данных / К. А. Перфилов, А. И. Иванов, Е. Д. Проценко // Европейский союз ученых. – 2015. – № 13, ч. 5. – С. 9–12.
13. Иванов, А. И. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф». Программный продукт создан лабораторией биометрических и нейросетевых технологий, размещен на сайте АО «ПНИЭИ» / А. И. Иванов, О. С. Захаров. – URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc.htm> [с 2009 г. для свободного использования университетами России, Белоруссии, Казахстана].

Иванов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент,
начальник лаборатории биометрических
и нейросетевых технологий,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Ivanov Aleksandr Ivanovich

doctor of technical sciences, associate professor,
head of biometric and neuronal nets
technology laboratory,
Penza Scientific Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Перфилов Константин Александрович

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

Perfilov Konstantin Aleksandrovich

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

Малыгина Елена Александровна

кандидат технических наук,
младший научный сотрудник,
межотраслевая лаборатория тестирования
биометрических устройств и технологий,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Malygina Elena Aleksandrovna

candidate of technical sciences, research assistant,
interdisciplinary laboratory testing
of biometric devices and technologies,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 519.24; 519.7; 57.017

Иванов, А. И.

Многомерный статистический анализ качества биометрических данных на предельно малых выборках с использованием критериев среднего геометрического, вычисленного для анализируемых функций вероятности / А. И. Иванов, К. А. Перфилов, Е. А. Малыгина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 64–72.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317

В. С. Мелентьев, Е. В. Поздеева, А. С. Пескова, Д. И. Нефедьев

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО ИХ МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ, ИЗМЕРЕННЫМ ОДИН РАЗ В ТЕЧЕНИЕ ПЕРИОДА¹

V. S. Melent'ev, E. V. Pozdeeva, A. S. Peskova, D. I. Nefed'ev

METHOD OF DETERMINATION OF PARAMETERS OF HARMONIC SIGNALS BY THEIR INSTANTANEOUS VALUES, MEASURED ONCE DURING THE PERIOD

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Предметом исследования является метод определения параметров, основанный на формировании двух дополнительных напряжений и одного дополнительного тока, сдвинутых относительно входных по фазе. Целью работы является разработка и исследование нового метода определения параметров гармонических сигналов, реализация которого предусматривает одновременное измерение мгновенных значений входных и дополнительных сигналов один раз в течение периода и обеспечивает сокращение времени измерения. *Материалы и методы.* Предложен подход к определению параметров на основе формирования дополнительных напряжений и тока, сдвинутых на произвольный угол относительно входных сигналов, и измерения мгновенных значений сигналов один раз за период. При анализе погрешности, обусловленной отклонением реальных сигналов от принятой гармонической модели, используется известная методика, основанная на оценке погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, характеризующей отклонение модели от реального сигнала в соответствующих точках. *Результаты.* Использование нового подхода к определению параметров гармонических сигналов позволило разработать метод, который, в отличие от большинства известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов, исключает частотную погрешность фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов. Приведены результаты оценки степени отклонения реальных сигналов от гармонической модели на результирующую погрешность определения параметров. *Выводы.* Разработанный метод определения информативных параметров сокращает время измерения за счет однократного и одновременного измерения мгновенных значений сигналов. Полученные в работе результаты позволяют выбирать оптимальные параметры фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов, в соответствии с требованиями по точности измерения.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-08-00252 А).

Abstract. Background. The subject of research is the method of measuring, based on the formation of two additional voltages and additional current, shifted relative to the input phase. The purpose of work is development and investigation of a new method determine the parameters of harmonic signals, the implementation of which includes simultaneous measurement of the instantaneous values of the input and additional signals once per period, that reduces the time of measurement. *Materials and methods.* The approach to the determination of the parameters on the basis of the formation of additional voltage and current, shifted by an arbitrary angle relative to the input signals, and measuring the instantaneous values of the signals once per period is offered. In the analysis of error due to deviation of the real signal from the harmonic model, used a known method based on the estimation of uncertainty of measurement parameter, as a function, the arguments of which are assigned approximately with an error describing the deviation of the model from the real signal at appropriate points. *Results.* A new approach to the determination of parameters of harmonic signals allowed us to develop a method that, unlike most known methods based on the formation of additional signals, eliminates frequency error of the phase-shifting units engaged in the generation of additional signals. The evaluation of the degree of deviation of the real signal from a harmonic model on the resulting error of the determined parameters are given. *Conclusions.* Developed method of determining the informative parameters reduces the measurement time at the expense of single and simultaneous measurement of the instantaneous values of the signals. Obtained results allow to choose optimal parameters of the phase-shifting units engaged in the generation of additional signals, in accordance with the requirements in measurement accuracy.

Ключевые слова: параметры, гармонический сигнал, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающий блок, время измерения, погрешность.

Keywords: parameters, harmonic signal, the instantaneous values, additional signals, the phase-shifting block, measuring time, error.

Введение

Исследования в области создания новых методов и средств определения характеристик периодических сигналов с улучшенными метрологическими характеристиками широко проводятся как в России, так и за рубежом [1–3].

При этом большая часть исследований сводится к попыткам увеличения точности определения отдельных параметров периодических сигналов в основном за счет обработки результатов измерений. В них отсутствует системный подход как к определению всего комплекса характеристик, так и к проблемам повышения точности их измерений. Вопросы сокращения времени измерения не рассматриваются.

В настоящее время развивается направление, связанное с разработкой методов и средств определения параметров сигналов, близких к гармоническим, по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала [4], что позволяет существенно сократить время измерения.

В работах [5, 6] предложено разделять мгновенные значения в пространстве за счет формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных. Это обеспечивает сокращение времени определения параметров гармонических сигналов (ПГС).

Дальнейшее сокращение времени определения ПГС обеспечивают методы, осуществляющие одновременное измерение мгновенных значений входных и дополнительных сигналов один раз за период.

Известный метод измерения ПГС, использующий такой подход, основан на формировании ортогональных составляющих напряжения и тока и определении параметров сигналов по двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени [7].

Однако реализация подобных методов может привести к погрешности, обусловленной частотной погрешностью фазосдвигающих блоков (ФБ), обеспечивающих формирование ор-

тогональных составляющих сигналов. С изменением частоты сигнала угол сдвига ФБ может отличаться от 90° [8].

Исключить частотную погрешность ФБ позволяет метод [9], который заключается в определении ПГС по трем мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени, причем вторые мгновенные значения сигналов сдвинуты относительно первых на произвольный (в общем случае) угол $\Delta\alpha$, а третьи мгновенные значения напряжения и тока сдвинуты относительно вторых на угол $\Delta\alpha$.

Однако для реализации метода требуется использование четырех ФБ и шести аналого-цифровых преобразователей. Кроме того, метод предусматривает анализ мгновенных значений напряжений и токов на ноль и измерении дополнительных сигналов, если хотя бы одно из значений равно нулю.

В статье рассматривается новый метод, реализация которого снижает аппаратные затраты и сокращает время измерения.

Метод определения параметров гармонических сигналов по одновременно измеренным мгновенным значениям напряжений и токов

Метод заключается в том, что формируют два дополнительных напряжения, сдвинутые относительно входного на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$, и дополнительный ток, сдвинутый относительно входного на угол $\Delta\alpha$. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на угол $2\Delta\alpha$, производится одновременное измерение мгновенных значений входных и дополнительных сигналов напряжения и тока. ПГС определяют по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рис. 1.

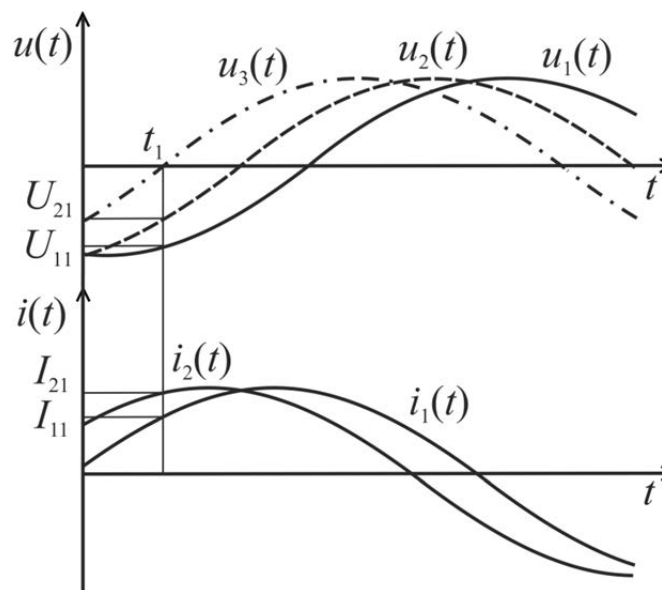


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Для входных гармонических сигналов напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и тока $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ дополнительные сигналы принимают следующий вид: $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$; $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha)$, где U_m , I_m – амплитудные значения напряжения и тока; ω – угловая частота входного сигнала; φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

В момент перехода напряжения $u_3(t)$ через ноль (момент времени t_1) мгновенные значения сигналов будут равны:

$$U_{11} = U_m \sin(-2\Delta\alpha); U_{21} = U_m \sin(-\Delta\alpha); I_{11} = I_m \sin(\varphi - 2\Delta\alpha); I_{21} = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha).$$

Используя мгновенные значения сигналов, после преобразований получим выражения для определения ПГС:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока:

$$U_{\text{СКЗ}} = \frac{\sqrt{2}U_{11}^2}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{11}^2}}; \quad (1)$$

$$I_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{I_{21}^2(4U_{21}^2 - U_{11}^2) + (I_{21}U_{11} - 2I_{11}U_{21})^2}{2(4U_{21}^2 - U_{11}^2)}}; \quad (2)$$

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности:

$$P = \frac{|U_{21}| \left[(U_{11}^2 - 2U_{21}^2) I_{21} + I_{11}U_{11}U_{21} \right]}{4U_{21}^2 - U_{11}^2}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_{21}(I_{21}U_{11} - I_{11}U_{21})}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{11}^2}}. \quad (4)$$

Оценка погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели

Рассматриваемый метод измерения ПГС предназначен для измерения параметров гармонических сигналов. Если форма реального сигнала отличается от гармонической модели, то неизбежно возникает погрешность.

Для анализа данного вида погрешности можно использовать методику оценки погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала [10]. Погрешность вычисления значения какой-либо функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена с помощью дифференциала этой функции. Погрешности функции соответствует ее возможное приращение, которое она может получить, если аргументам дать приращения, равные их погрешностям.

Если погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, то предельные значения абсолютных погрешностей определения СКЗ напряжения и тока, АМ и РМ в соответствии с (1)–(4) примут следующий вид:

$$\Delta U_{\text{СКЗ}} = \left| \frac{\partial U_{\text{СКЗ}}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{\text{СКЗ}}}{\partial U_{21}} \right| \Delta U_{\text{max}}; \quad (5)$$

$$\Delta I_{\text{СКЗ}} = \left[\left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial U_{21}} \right| \Delta U_{\text{max}}; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left[\left| \frac{\partial P}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| \Delta U_{\text{max}}; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left[\left| \frac{\partial Q}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| \Delta U_{\text{max}}, \quad (8)$$

где ΔU_{max} , ΔI_{max} – предельные абсолютные погрешности аргументов, соответствующие наибольшим отклонениям моделей от реальных сигналов.

В общем случае $\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$, $\Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$, где $h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$ и $h_{ik} = \frac{I_{km}}{I_{1m}}$ – коэффициенты k -х гармоник напряжения и тока; U_{1m} и I_{1m} – амплитуды первых гармоник сигналов; U_{km} и I_{km} – амплитуды k -х гармоник напряжения и тока.

Используя выражения (1)–(4) с учетом предельных значений абсолютных погрешностей (5)–(8), можно определить относительные погрешности измерения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} (|\cos \Delta\alpha| + 2|\cos 2\Delta\alpha|)}{2|\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}}; \quad (9)$$

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [|\cos(\varphi - \Delta\alpha)| + |\cos(\varphi - 2\Delta\alpha)|]}{|\sin \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} +$$

$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\cos(\varphi - \Delta\alpha) \cos(\varphi - 2\Delta\alpha)| (1 + 2|\cos \Delta\alpha|)}{2|\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}}; \quad (10)$$

$$\gamma_P = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [|\cos \Delta\alpha| + |\cos 2\Delta\alpha|]}{|\sin \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2|\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \times$$

$$\times [2 \cos^2 \Delta\alpha \cos(\varphi - \Delta\alpha) + \sin \varphi \sin \Delta\alpha] +$$

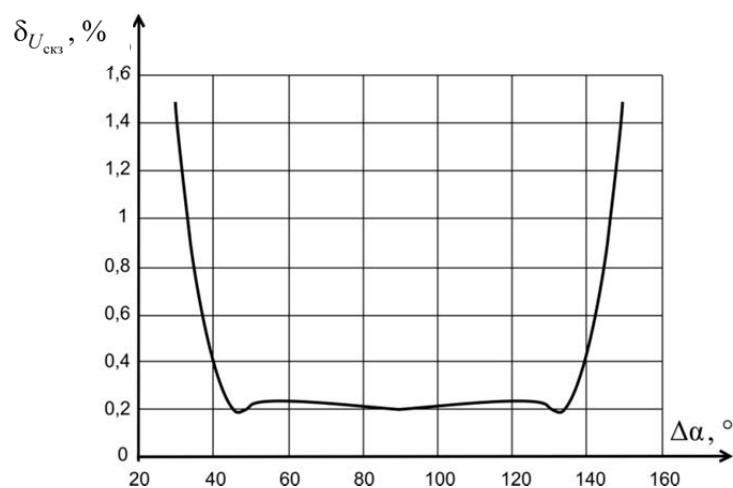
$$+ 2|\sin(\Delta\alpha - \varphi) \sin \Delta\alpha - 2 \cos^3 \Delta\alpha \cos(\Delta\alpha - \varphi)|; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (1 + 2|\cos \Delta\alpha|)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} +$$

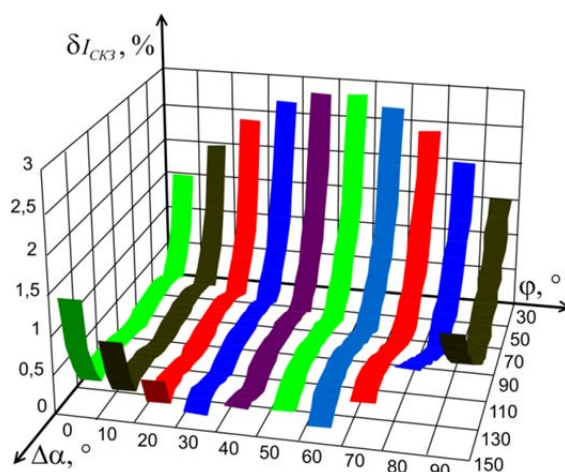
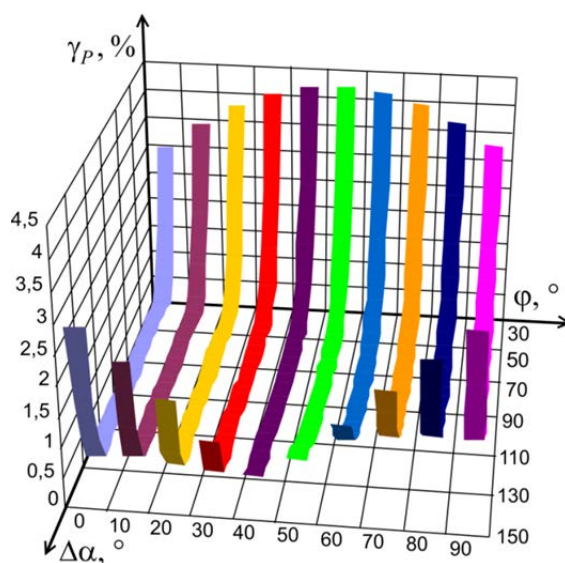
$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} [2 \cos^3 \Delta\alpha \sin \varphi + \sin^3 \Delta\alpha \cos \varphi + 2|2 \sin^3 \Delta\alpha \cos(\varphi - \Delta\alpha) - \sin \varphi|]}{|\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}}. \quad (12)$$

Анализ выражения (9) показывает, что относительная погрешность определения СКЗ напряжения зависит от спектра сигнала и угла сдвига фазы ФБ $\Delta\alpha$. Погрешности определения других параметров зависят еще и от угла сдвига фазы между напряжением и током φ .

На рис. 2 представлен график зависимости относительной погрешности определения СКЗ напряжения от угла $\Delta\alpha$ при наличии в сигнале первой и третьей гармоники с коэффициентом $h_{u3} = 0,2\%$ согласно (9).

Рис. 2. График зависимости $\delta_{U_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha$

На рис. 3–5 приведены графики зависимости относительной погрешности определения СКЗ тока и приведенных погрешностей измерения АМ и РМ от угла $\Delta\alpha$ и φ при наличии в сигналах напряжения и тока первых и третьих гармоник с коэффициентами $h_{u3} = h_{i3} = 0,2 \%$ согласно (10)–(12).

Рис. 3. Графики зависимости $\delta_{I_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha$ и φ Рис. 4. Графики зависимости γ_P от $\Delta\alpha$ и φ

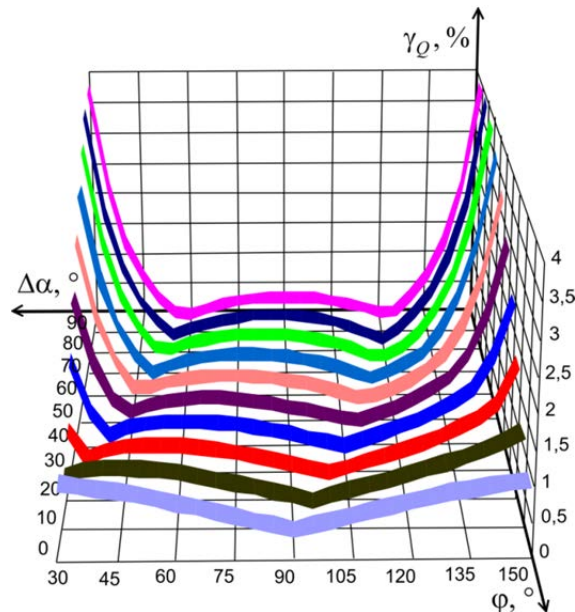


Рис. 5. Графики зависимости γ_Q от $\Delta\alpha$ и φ

Из рис. 2–5 следует, что относительные погрешности измерения СКЗ сигналов и приведенные погрешности определения АМ и РМ существенно зависят от $\Delta\alpha$. В общем случае погрешности меньше при $\Delta\alpha = 45\text{--}135^\circ$.

Погрешности измерения СКЗ тока АМ и РМ менее существенно зависят от угла сдвига фаз между напряжением и током φ . При этом в наиболее важной с практической точки зрения области значений угла, близких к нулю, погрешности меньше.

Заключение

Таким образом, разработанный метод позволяет определять все основные параметры гармонических сигналов. Метод, в отличие от большинства известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов, не использует временное разделение мгновенных значений сигналов для определения ПГС. При этом время измерения мало и определяется в основном длительностью интервала времени с момента начала измерения до момента перехода дополнительного напряжения через ноль.

В общем случае угол сдвига фазы ФБ может быть произвольным, что исключает возможность возникновения частотной погрешности фазосдвигающих блоков.

Полученные в работе результаты позволяют оценивать погрешность определения ПГС при отклонении входных сигналов от гармонической модели, а также выбирать параметры фазосдвигающих блоков в соответствии со спектральным составом сигналов и требованиями по точности измерения.

Список литературы

1. Petrovic, P. B. A method of measuring the integral characteristics of a signal / P. B. Petrovic // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 56, № 2. – P. 185–194.
2. Jiekang, W. High-accuracy, wide-range frequency estimation methods for power system signals under nonsinusoidal conditions / W. Jiekang, L. Jun, W. Jixiang // IEEE Transactions. Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, № 1. – P. 366–374.
3. Petrovic, P. B. A new method of determining the amplitude and phase of an alternating signal / P. B. Petrovic, M. P. Stevanovic // Measurement Techniques. – 2010. – Vol. 53, № 8. – P. 903–910.
4. Melentiev, V. S. An improvement in the methods used for the measurement of the integrated characteristics of harmonic signals / V. S. Melentiev, V. I. Batishchev, A. N. Kamyshnikova, D. V. Rudakov // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 54, № 4. – P. 407–411.
5. Melent'ev, V. S. A method of measuring integral characteristics from the instantaneous values of signals separated in time and space / V. S. Melent'ev, Yu. M. Ivanov, A. O. Lychev // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57, № 9. – P. 979–984.

6. Мелентьев, В. С. Сокращение времени определения параметров за счет пространственного разделения мгновенных значений гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, В. В. Муратова // Измерения, контроль, информатизация : материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 61–63.
7. Мелентьев, В. С. Исследование метода измерения параметров по мгновенным значениям входных и дополнительных гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, В. В. Муратова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1. – С. 4–10.
8. Мелентьев, В. С. Оценка погрешности реализации метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих сигналов / В. С. Мелентьев // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 8 (17). – Ч. 2. – С. 99–102.
9. Мелентьев, В. С. Метод определения интегральных характеристик гармонических сигналов по мгновенным значениям напряжения и тока, сдвинутым в пространстве / В. С. Мелентьев, Е. Г. Кожевникова // Измерение, контроль, автоматизация : матер. 12-й Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул, 2011. – С. 115–118.
10. Мелентьев, В. С. Анализ погрешности измерения параметров периодических сигналов из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели / В. С. Мелентьев // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 3 (3). – С. 172–178.

Мелентьев Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: vs_mel@mail.ru

Melent'ev Vladimir Sergeevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of information
and measuring equipment,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Поздеева Елена Владиславовна

аспирант,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: yaelenkapavlenko@yandex.ru

Pozdeeva Elena Vladislavovna

postgraduate student,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Пескова Анастасия Сергеевна

аспирант,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: yaelenkapavlenko@yandex.ru

Peskova Anastasiya Sergeevna

postgraduate student,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
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, associate professor,
head of sub-department
of information and measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317

Мелентьев, В. С.

Метод определения параметров гармонических сигналов по их мгновенным значениям, измеренным один раз в течение периода / В. С. Мелентьев, Е. В. Поздеева, А. С. Пескова, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 73–80.

**В. А. Акулов, В. И. Батищев, И. В. Макаров,
В. М. Мякишев, А. С. Видманов**

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ТЕМОДИНАМИКИ В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК – КОРОТКОРАДИУСНАЯ ЦЕНТРИФУГА»

V. A. Akulov, V. I. Batishchev, I. V. Makarov, V. M. Myakishev, A. S. Vidmanov

PROBLEMS OF INFORMATIONAL AND ANALYTICAL SUPPORT FOR SYSTEMS «MAN – SHORT RADIUS CENTRIFUGE»

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются системы мониторинга состояний человека, находящегося в среде с искусственной силой тяжести, создаваемой центрифугами короткого радиуса. Предметом исследования является создание проблемно-ориентированной информационно-аналитической системы. Целью исследования является разработка концепции системы мониторинга, ее аппаратная реализация и экспериментальная проверка эффективности при решении актуальных задач пилотируемой космонавтики и восстановительной медицины. *Материалы и методы.* В качестве основных методов применены системный анализ сложной системы класса «человек – центрифуга короткого радиуса», теория принятия решений, планирование экспериментов, статистическая обработка данных и построение эмпирических моделей. *Результаты.* Разработана концепция системы мониторинга, учитывающая условия эксплуатации оборудования во вращающейся среде, предусматривающая двухблочную схему исполнения. Основной блок выполняется в виде быстросъемного контейнера, размещаемого на центрифуге и содержащего измерительную и регистрирующую аппаратуру. Второй блок представляет собой портативный радиопередатчик, служащий устройством управления. Проведена опытная эксплуатация системы на реальной информации. *Выводы.* Разработана концепция и выполнена аппаратная реализация многоканальной системы мониторинга артериального давления пациентов, находящихся в сеансах вращения на центрифугах короткого радиуса. Выполнена апробация системы в условиях крупного медицинского учреждения, показавшая ее высокую эффективность при решении задач, актуальных для космической и восстановительной медицины. Установлена зависимость артериального давления в периферической системе кровообращения от интенсивности гравитационной нагрузки, представляющая значительный интерес для специалистов, занимающихся отбором и тренировкой экипажей, врачей, конструкторов перспективных космических аппаратов и центрифуг. Намечены направления дальнейших исследований.

A b s t r a c t. Background. The object of study is the human condition monitoring system, located in an environment with artificial gravity produced by a short radius centrifuges. The subject of the study is to create a problem-oriented information analysis system. The aim of the study is to develop a monitoring system concept, its hardware implementation and experimental verification of effectiveness in solving urgent problems of manned space flight, and regenerative medicine. *Materials and methods.* The main methods of applied system analysis of a complex system of class «people – short-radius centrifuge,» the theory of decision-making, de-

sign of experiments, statistical processing of data and the construction of empirical models. *Results.* A monitoring system concept, which takes into account the operating conditions of the equipment in a rotating medium, providing for a two-gang enforcement scheme. The main unit is designed as a quick-container, placed in a centrifuge and comprising measuring and recording equipment. The second unit is a portable radio transmitter serving controller. Spend an experienced operating system on real information. *Conclusions.* The concept and made hardware implementation of a multi-channel system for monitoring blood pressure patients in sessions of rotation on a short radius centrifuges. It completed testing of the system in a large medical institution, which showed its high efficiency in solving problems relevant to space and regenerative medicine. Established the dependence of blood pressure in the peripheral circulatory system, the intensity of the gravity load is of considerable interest to professionals involved in the selection and training of crews, doctors, designers looking spacecraft and centrifuges. Outlined directions for further research.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пилотируемая космонавтика, восстановительная медицина, дистанционный мониторинг, короткорADIUSная центрифуга, гравитационная нагрузка, периферическая система кровообращения, закономерности отклика артериального давления.

К e y w o r d s: manned space flight, short radius centrifuge, gravity load, peripheral circulatory system, remote monitoring, the blood pressure response patterns.

Введение

В перспективных программах освоения Космоса предусматриваются межпланетные экспедиции [1–4]. Такие экспедиции представляют собой качественно новый этап пилотируемой космонавтики, что обусловлено появлением ряда новых факторов и, в первую очередь, длительным пребыванием экипажа в условиях пониженной гравитации с многократно возросшим, по сравнению с существующей практикой, количеством выходов в открытый Космос с использованием скафандра.

Как известно, гравитация оказывает активное влияние на физиологические показатели человека. Прежде всего она выполняет функции бустерного насоса, создающего гидростатическое давление в нижних конечностях, соизмеримое по уровню с системным артериальным давлением [1, 5–7]. Важность гравитации доказывает многолетний опыт пилотируемой космонавтики, согласно которому отсутствие гравитации (невесомость) оказывает крайне негативное воздействие на организм человека и требует компенсации. В настоящее время при выполнении орбитальных полетов применяются исключительно косвенные методы противодействия невесомости. Однако они могут оказаться недостаточными при межпланетных экспедициях, учитывая сочетание невесомости и близкой к ней гипогравитации Луны и Марса, а также длительность экспедиций [1, 2, 8].

Динамическая система «человек – короткорADIUSная центрифуга»

В качестве радикальной меры, решающей «гравитационные» проблемы, российские и иностранные специалисты предлагают использование искусственной силы тяжести, создаваемой короткорADIUSными центрифугами (ЦКР). Немаловажным доводом в пользу ЦКР является возможность их установки на перспективных космических аппаратах (КА) [1–4, 8]. В этом случае ЦКР становится и динамическим тренажером, и аппаратным средством для научных исследований, причем как наземного, так и, что особенно важно, космического применения.

Если рассматривать ЦКР как перспективное бортовое устройство, то наряду с «земными» возникают сугубо «бортовые» задачи, обусловленные междисциплинарностью предметной области и спецификой КА (массовые характеристики, габариты, энергопотребление, пространственная ориентация). К числу таких задач относится определение нижней границы частоты вращения ротора ЦКР исходя из достижения медицинских эффектов. Очевидно, что чем выше граница и продолжительность сеанса вращения, тем в большей степени закручива-

ется КА, что требует дополнительных энергозатрат на восстановление ориентации. Кроме того, с ростом частоты вращения растет мощность привода, а вместе с ней – его масса и энергопотребление.

Обобщая изложенное, заключаем, что для осуществления перспективных программ пилотируемой космонавтики необходимы широкомасштабные исследования сложной динамической системы класса «человек – ЦКР» (рис. 1).

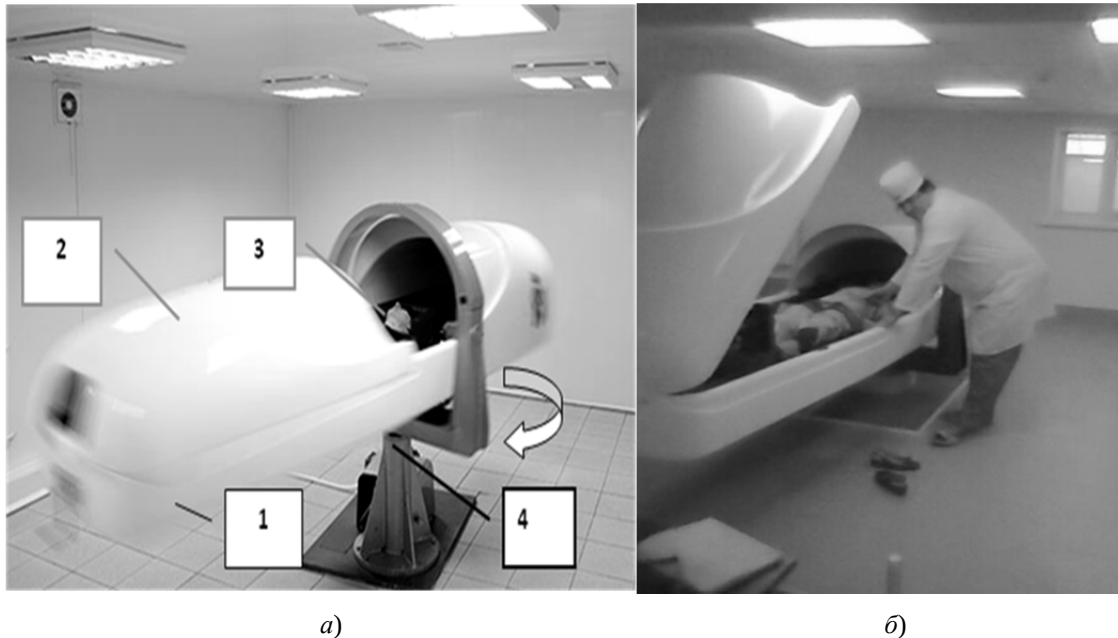


Рис. 1. ЦКР для создания управляемой ИСТ в направлении «голова – ноги»:
 а – сеанс вращения; б – подготовка к сеансу (колпак кабины пациента открыт);
 1 – ротор – горизонтальный стол; 2 – кабина пациента; 3 – пациент в позе «лежа»; 4 – ось вращения;

Пациент располагается на ЦКР горизонтально, лежа на спине, а его нижние конечности направляются радиально к периферии. При надлежащем выборе интенсивности воздействия, прежде всего частоты вращения ротора, происходит имитация естественной силы тяжести, включая гипогравитацию планет, действующей в направлении «голова – ноги» [1, 2, 5, 6, 8].

Кроме пилотируемой космонавтики, система «человек – ЦКР» применяется в гравитационной терапии (ГТ). Под ГТ понимаются физиотерапевтические процедуры, заключающиеся в воздействии на организм человека управляемым центробежным ускорением. ГТ успешно применяется в Самарском государственном медицинском университете для профилактики и лечения широкой номенклатуры заболеваний опорно-двигательного аппарата, прежде всего ишемий [9, 10].

Поскольку речь идет о широкомасштабных исследованиях состояния человека, особую значимость приобретает проблема оснащения нового поколения ЦКР современной информационно-аналитической системой. Следует отметить, что такого рода задачи успешно решаются в медицинских учреждениях в массовом порядке с применением триады вида «врач» – «аппаратура» – «пациент». Что касается ЦКР, то, во-первых, триада распадается, и, во-вторых, ни стационарная, ни портативная аппаратура, выпускаемая промышленностью, не рассчитана на эксплуатацию в интенсивно вращающейся среде. В результате сложившейся ситуации особую актуальность приобретает проблема разработки и применения новых методологических схем оценки состояний человека в среде с искусственной силой тяжести, основу которых составляет управляемый мониторинг периферической системы кровообращения.

Методология экспериментов

В табл. 1 представлен перечень из десяти процедур, составляющих основу разработанной авторами методологии имитационных экспериментов.

Методологические основы имитационных экспериментов

1. Разработка технологической схемы экспериментов	6. Получение экспериментальной зависимости среднего артериального давления от частоты вращения ротора ЦКР
2. Формулировка требований к системе мониторинга	7. Эксперименты выполняются на ЦКР с привлечением здоровых добровольцев. Диапазон частот вращения 0–30 об/мин
3. Выбор компонентов системы мониторинга	8. Оценка состояния периферической системы кровообращения осуществляется по двухточечной схеме доступа с установкой тонометров на руку и лодыжку
4. Аппаратная реализация	9. В качестве основного гемодинамического показателя выбрано среднее артериальное давление (АДср)
5. Апробация системы на реальной информации в условиях крупного медицинского учреждения	10. Оценка отклика системы кровообращения на вариацию гравитационной нагрузки представляется в виде зависимостей АДср от частоты вращения ротора ЦКР (n), построенных для обеих точек доступа

Система мониторинга периферического кровообращения

Система мониторинга выполняется в виде двух функциональных устройств: быстрого съемного приборного контейнера, размещаемого на ЦКР, и портативного радиопередатчика, который находится у врача, осуществляющего дистанционное управление измерителями. Приборный контейнер состоит из трех секций, в каждой из которых закрепляется соответствующая управляющая и регистрирующая аппаратура (рис. 2). Такая компоновка препятствует смещению оборудования в условиях перегрузок.

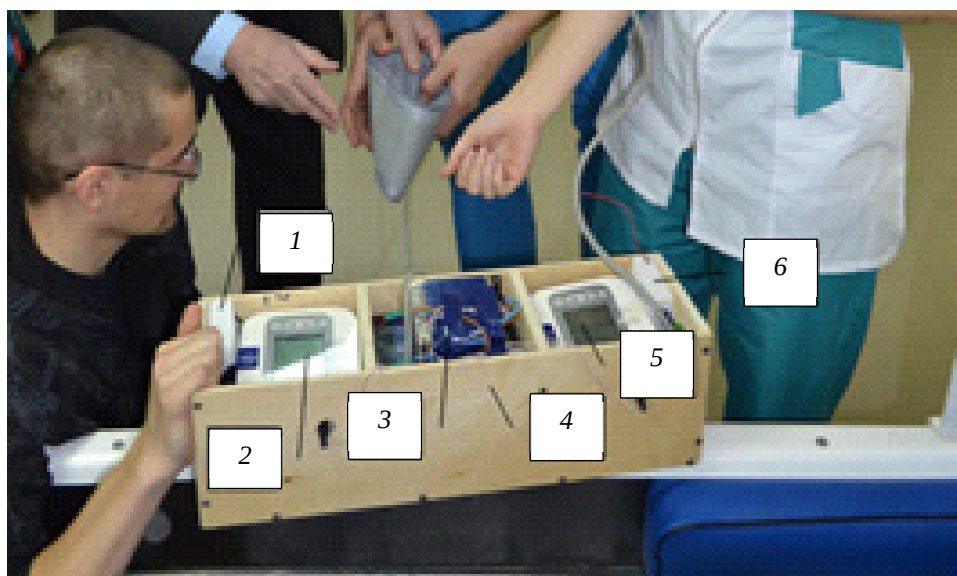


Рис. 2. Общий вид быстрого съемного приборного контейнера. Показан момент подготовки аппаратуры к экспериментам. Контейнер извлечен из ЦКР: 1 – приемник сигналов с встроенным коммутатором и антенной; 2 – тонометр АД2 (нижняя конечность); 3 – источник питания повышенной емкости; 4 – корпус контейнера; 5 – тонометр АД1 (верхняя конечность); 6 – согласующее устройство

В качестве измерителей давления выбраны тонометры OMRON, которые обладают расширенной памятью (до 60 измерений) и встроенным таймером, необходимым для синхронизации показаний при выполнении серии экспериментов со сменой участников и режимов вращения.

Управление процессом мониторинга осуществляется с помощью радиоканала (рис. 3). Моменты включения тонометров (Измерители АД1, АД2) определяются врачом и осуществляются простым нажатием кнопки «Пуск». Таким образом, программирование регистраторов не требуется, что существенно повышает технологичность испытаний.

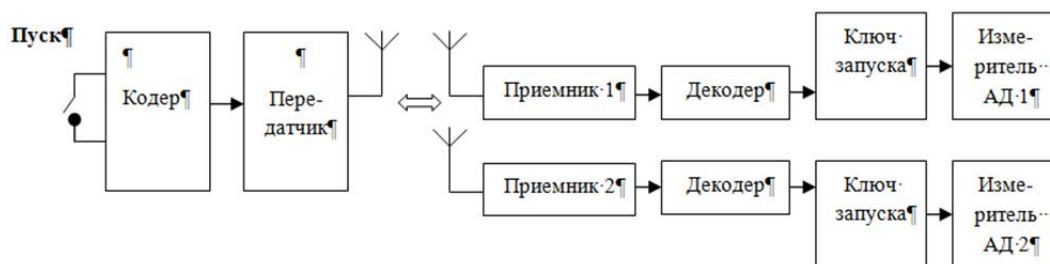


Рис. 3. Укрупненная структурная схема радиоканала

Что касается аппаратной реализации радиоканала, то на рис. 4 в качестве примера представлена схема платы радиопередатчика. В целях сокращения изложения схема приемника не приводится.

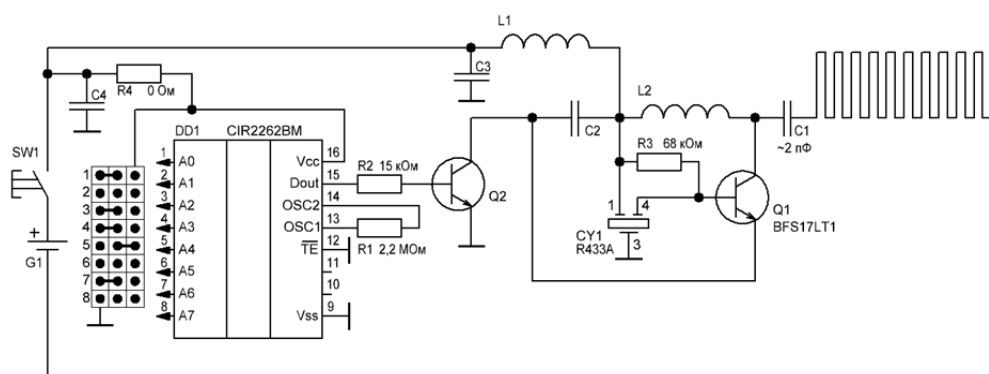


Рис. 4. Принципиальная схема платы передатчика QH-E.G.I.-АС 09.05.05

Предлагаемая система прошла успешную апробацию на реальной информации в условиях крупного медицинского учреждения г. Самары. Эффективность предлагаемой системы подтверждена многократно. В частности, получены новые знания относительно отклика кровотока на интенсивность гравитационного воздействия, представляющие значительный интерес для пилотируемой космонавтики и ГТ.

Результаты мониторинга артериального давления

На рис. 5 представлен пример зависимостей среднего артериального давления АД_{ср} от частоты вращения ротора ЦКР. Вычисления выполнены по следующей формуле [7]:

$$A_{\text{Дср}} = A_{\text{Дд}} + (A_{\text{Дс}} - A_{\text{Дд}}) / 3, \quad (1)$$

где Ad_s , Ad_d – систолическое и диастолическое давление соответственно.

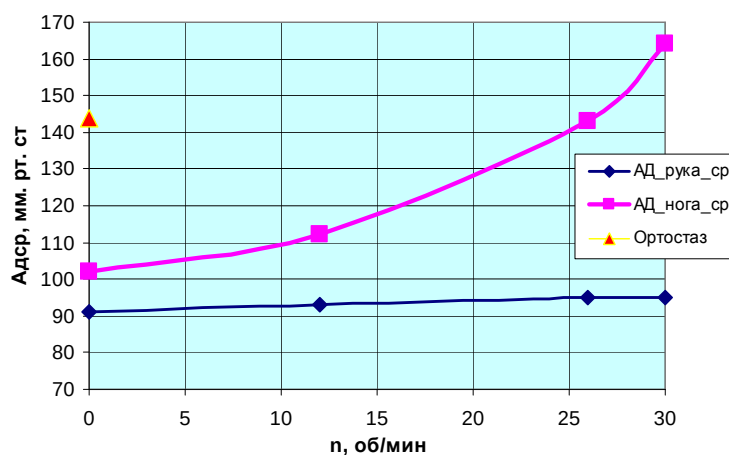


Рис. 5. Пример зависимостей АДср от частоты вращения ротора ЦКР при двухточечном мониторинге периферического кровотока

Из рис. 5 следуют важные выводы:

1) в исследуемом диапазоне частот вращения среднее АД на уровне сердца (АД_рука_ср) остается практически постоянным. Такая закономерность согласуется с теоретическими основами гидромеханики и гемодинамики. Прежде всего расстояние от оси вращения до сердца ($\sim 0,3$ м), а вместе с ним значение центробежного ускорения относительно невелико. Кроме того, барорецепторы, расположенные на уровне сердца, стабилизируют системное АД. Принимая во внимание приведенные соображения, далее показатель «АД_рука_ср» не рассматриваем;

2) выявлена важная закономерность, согласно которой возрастание частоты вращения (увеличение гравитационной нагрузки) сопровождается нелинейным ростом среднего артериального давления в лодыжечном сечении (АД_ноги_ср). В связи с этим были обработаны статистические данные, результаты которых представлены на рис. 6 в виде трех графиков: M , $M \pm \sigma$, где M – среднее арифметическое значение показателя, σ – среднее квадратическое отклонение. Для удобства сопоставления полученных данных с нормой на рис. 6 показана точка, соответствующая позе «ортостаз» и обозначенная как «орто» ($n = 0$ об/мин).

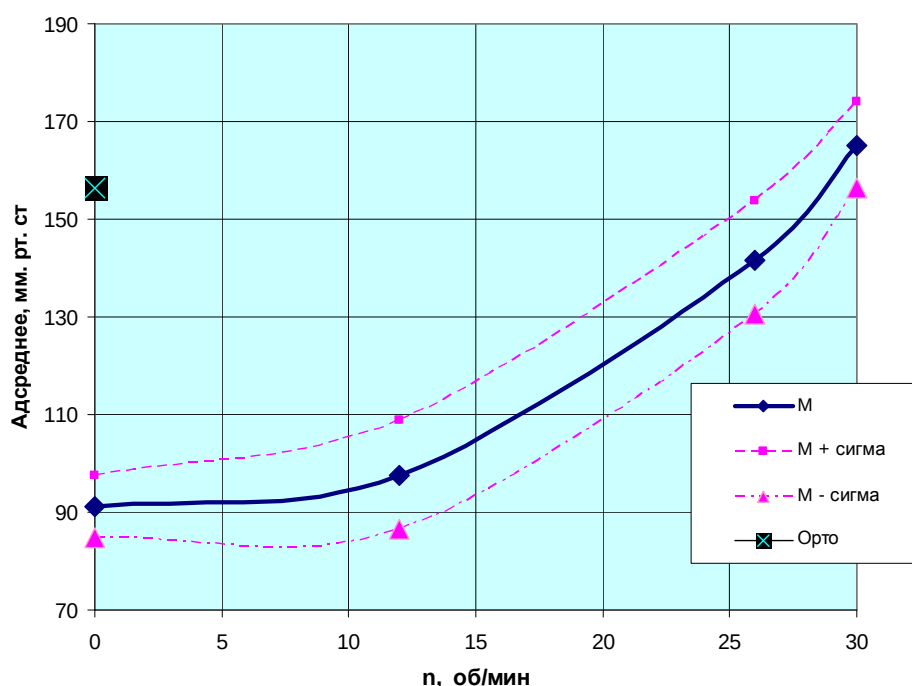


Рис. 6. Обобщенные зависимости АДср в области лодыжки от частоты вращения ротора ЦКР

Из рис. 6 следуют важные закономерности:

1) в диапазоне частот 10–15 об/мин (диапазон имитации гипогравитации Луны) среднее АД приближается к показателям, соответствующим невесомости ($n = 0$ об/мин), т.е. к патологии. Столь значительные отклонения от нормы требуют дальнейших исследований и, прежде всего, оценки работоспособности человека в условиях ослабленного кровотока в нижних конечностях. Ситуация осложняется еще и тем, что экипаж будет вынужден прилагать значительные усилия на преодоление сопротивления скафандра, жесткость которого в условиях Космоса возрастает;

2) в диапазоне частот 0–27 об/мин среднее АД ниже нормы. Это обстоятельство следует учитывать при планировании и осуществлении экспериментов, ориентированных на задачи пилотируемой космонавтики и гравитационной терапии.

Заключение

1. Разработана концепция и аппаратная реализация системы информационно-аналитического обеспечения сложных динамических систем класса «человек – короткорadiusная центрифуга». Система управляется дистанционно по радиоканалу и не требует программирования, что повышает технологичность экспериментов.

2. Выполнена апробация системы с использованием реальной информации. В результате апробации установлено, что система обладает высокой эффективностью по обеспечению дискретного мониторинга состояния периферической гемодинамики человека, находящегося во вращающейся среде.

3. Решен ряд задач, актуальных для пилотируемой космонавтики и гравитационной терапии. Построена эмпирическая зависимость артериального давления от частоты вращения ротора ЦКР, на основании которой определена нижняя граница эффективности сеансов вращения, и получены количественные оценки, характеризующие кровоток в условиях гипогравитации.

4. Необходимо продолжить исследования реакции периферического кровообращения на величину гравитационной нагрузки с расширением контингента испытуемых (статистика), выполнением ультразвуковой доплерграфии сосудов конечностей в сеансах вращения, привлечением наклонного стенда в качестве дополнительного технического средства, имитирующего гипогравитацию, и построением математической модели процессов.

Список литературы

1. Газенко, О. Г. От 108 минут до 438 суток и далее... (к 40-летию полета Ю. А. Гагарина) / О. Г. Газенко, А. И., Григорьев, А. Д. Егоров // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2001. – Т. 35, № 2. – С. 10–11.
2. Котовская, А. Р. Проблема создания искусственной силы тяжести с помощью центрифуги короткого радиуса для медицинского обеспечения межпланетных пилотируемых полетов / А. Р. Котовская, И. Ф. Виль, Вильямс, В. Ю. Лукьянюк // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2003. – Т. 37, № 5. – С. 36–39.
3. Падалка, Г. И. Задачи подготовки космонавтов на центрифугах по перспективным космическим программам / Г. И. Падалка, П. П. Долгов, В. Н. Киршанов // *Космический форум*, посвящ. 50-летию полета в космос Ю. А. Гагарина : материалы форума (18–19 октября 2011). – М. : ФГБУ НИИЦПК, Звездный городок, 2011.
4. Долгов, П. П. Основные направления работ на центрифугах и их целевого применения / П. П. Долгов, В. Н. Киршанов, А. П. Чудинов // *Пилотируемые полеты в космос : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию ФГБУ НИИЦПК имени Ю. А. Гагарина (10–12 ноября 2015)*. – М. : ФГБУ НИИЦПК, Звездный городок, 2015. – С. 267–268.
5. Акулов, В. А. Мехатронные системы генерации искусственной силы тяжести наземного и космического применения / В. А. Акулов ; под ред. Г. П. Аншакова. – М. : Машиностроение, 2011. – 161 с.
6. Акулов, В. А. Анализ и синтез систем медицинского назначения с управляемой искусственной силой тяжести : дис. ... д-ра техн. наук / Акулов В. А. – Самара, 2013. – 252 с.
7. Фолков, Б. Кровообращение : пер. с англ. / Б. Фолков, Э. Нилс. – М. : Медицина, 1976. – 463 с.
8. Zander, V. Short Radius Centrifuges – A New Approach for Life Science Experiments Under Hyper-g Conditions for Applications in Space and Beyond / V. Zander, R. Anken // *Recent Patents on Space Technology*. – 2013. – № 3. – Р. 74–81.
9. Макаров, И. В. Клинико-экспериментальное обоснование применения гравитационной терапии в комплексном лечении больных облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей : автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Макаров И. В. – Самара : СамГМУ, 2004. – 46 с.
10. Галкин, Р. А. Гравитационная терапия в лечении больных облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей / Р. А. Галкин, И. В. Макаров. – Самара, 2006. – 198 с.

Акулов Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационных технологий,
Самарский государственный технический
университет
(Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: Vladislav.a.akulov@gmail.com

Akulov Vladislav Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information technology,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeiskaya street,
Samara, Russia)

Батищев Виталий Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных технологий,
Самарский государственный технический
университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: vib@list.ru

Batishchev Vitaliy Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of information technology,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeiskaya street,
Samara, Russia)

Макаров Игорь Валериевич

доктор медицинских наук, профессор,
заведующий кафедрой хирургических болезней № 1,
Самарский государственный медицинский
университет
(Россия, г. Самара, ул. Чапаевская, 89)
E-mail: makarov-samgtmu@yandex.ru

Makarov Igor' Valerievich

doctor of medical sciences, professor,
head of sub-department of surgical diseases № 1,
Samara State Medical University
(89 Chapaevskaya street, Samara, Russia)

Мякишев Владимир Михайлович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра теоретических основ электротехники,
Самарский государственный технический
университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: vib@list.ru

Myakishev Vladimir Mikhaylovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of theory of electrical engineering,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeiskaya street,
Samara, Russia)

Видманов Алексей Сергеевич

инженер,
Институт космического приборостроения,
Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: jkt13@rambler.ru

Vidmanov Aleksey Sergeevich

engineer,
Institute of Space Device Engineering,
Samara State Aerospace University
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

УДК 519.876.5

Информационно-аналитическое обеспечение мониторинга состояния периферической гемодинамики в системе «человек – короткорадиусная центрифуга» / В. А. Акулов, В. И. Батищев, И. В. Макаров, В. М. Мякишев, А. С. Видманов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 81–88.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 681.586.787

А. А. Трофимов, Е. В. Кучумов

ВЫВОД СООТНОШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАСТРОВЫХ ДАТЧИКАХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

A. A. Trofimov, E. V. Kuchumov

OUTPUT RATIO BASED ON A MODIFIED GEOMETRY FOR THE CALCULATION MAGNETIC CONDUCTIVITY IN THE ELECTROMAGNETIC DISPLACEMENT SENSORS RASTER

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Предметом исследования являются электромагнитные растровые датчики перемещений. Целью работы является исследование распределения магнитной проводимости в электромагнитных растровых датчиках перемещений, работающих в широком диапазоне температур. *Материалы и методы.* Обоснована целесообразность проведения расчета магнитной проводимости в рабочих зазорах растровых датчиков перемещений. Разработана и математически описана физическая модель электромагнитного датчика перемещений. При решении поставленных задач использованы методы теории электрических цепей и электромагнитного поля. *Результаты.* Выведены выражения для расчета магнитной проводимости в рабочих зазорах датчиков перемещений с торцевым сопряжением зубцовых растров для однородного магнитного поля с введением поправочных коэффициентов, учитывающих потоки с торцевых поверхностей и боковых граней выступов ротора и статора, позволяющие разработать методику расчета конструктивных параметров чувствительных элементов растровых датчиков перемещений. *Выводы.* Предложенная авторами физическая модель электромагнитного растрового преобразователя перемещений и приведенные выражения для расчета магнитной проводимости позволяют на стадии разработки выбирать оптимальные конструктивные параметры чувствительного элемента для обеспечения максимального значения модуляции выходного сигнала.

A b s t r a c t. *Background.* The subject of this study is electromagnetic raster encoders. The aim is to study the distribution and magnetic conductivity in electromagnetic raster displacement sensor operating over a wide temperature range. *Materials and methods.* The expediency calculation magnetic conductivity in the gap raster encoders. Developed and described mathematically physical model electromagnetic displacement sensor. When solving tasks used methods theory of electrical circuits and electromagnetic field. *Results.* We derive expressions for the calculation of the magnetic conductivity in the gap displacement sensor with mechanical conjugation the tooth pattern to a uniform magnetic field with the introduction of correction factors that take into account flows from the end faces and the side faces of the rotor projections and the stator, allowing to develop a methodology of calculation of design parameters

sensitive elements raster encoders. *Conclusions.* The authors proposed a physical model electromagnetic displacement bitmap converter and given expression to calculate the magnetic conductivity allow the development stage to choose the optimal design parameters sensor to maximize the value output signal modulation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик перемещений, растр, магнитная проводимость, магнитодвижущая сила, нониусное сопряжение, статор, ротор.

К e y w o r d s: motion sensor, screen, magnetic conductivity, magnetomotive force, vernier pair, stator, rotor.

Совершенствования технических характеристик электромагнитных датчиков перемещений удалось добиться за счет использования в их конструкции растровых комбинационных сопряжений [1, 2].

В разработках приборов реализованы два вида растровых сопряжений ферромагнитных элементов (статор – ротор). На их основе разработаны два типа базовых конструкций малогабаритных датчиков угловых перемещений, которые использованы при построении датчиков перемещений повышенной точности.

В основу первого типа положено комбинационное сопряжение двух цилиндрических растров [3, 4], образованных статором и ротором. Второй тип датчиков перемещений построен на использовании комбинационного сопряжения кольцевого и спирального (по спирали Архимеда) растров [5, 6].

При проектировании цифровых электромагнитных датчиков как линейных, так и угловых перемещений разработчику приходится решать вопросы, связанные с получением максимального значения модуляции выходного сигнала с чувствительного элемента (ЧЭ) растрового датчика перемещений. Для решения этой проблемы необходимо провести расчет магнитной проводимости в зазоре между статором и ротором датчика.

В физической модели электромагнитного преобразователя перемещения (рис. 1) ферромагнитные элементы 1 и 2 образуют зазор-паз, в котором расположен чувствительный элемент 3. Контур ЧЭ описывается функцией $f_2(x, y)$. Сопрягаемые поверхности заданы функциями $f_1(x, y)$ и $f_3(x, y, \varepsilon)$. Для определенности введем некоторые допущения и ограничения:

- магнитодвижущая сила (МДС) равномерно распределена по площади зазора в пределах контура ЧЭ;
- магнитное сопротивление ферромагнитных элементов мало по сравнению с магнитным сопротивлением зазора;
- ЧЭ 3 и элемент 2 неподвижны, перемещается элемент 1, перемещение ε происходит только вдоль оси X в плоскости XOY ;
- плоскость ЧЭ (обмотки) параллельна плоскости XOY ;
- исследуемые растры прямолинейные и регулярные.

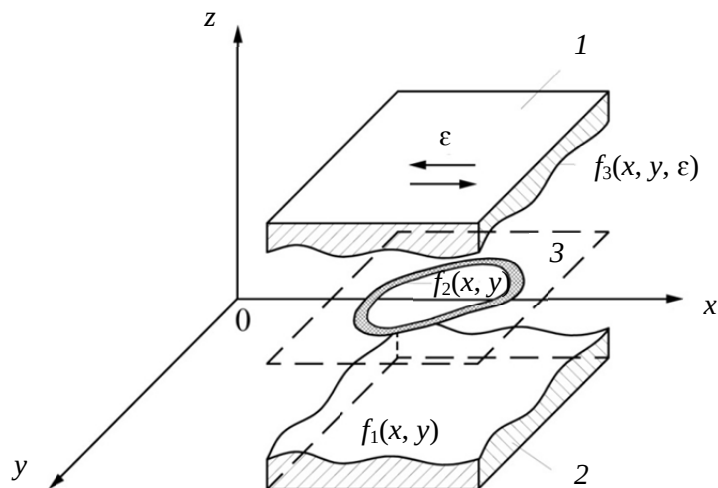


Рис. 1. Физическая модель растрового датчика перемещений

Соотношение значения длины рабочего зазора и длины магнитной силовой линии в магнитопроводе позволяет сделать вывод о том, что $z_m \ll z_3$, поэтому допущение $z_m = 0$ не внесет существенных погрешностей при ограничении частоты питания, значение которой определено экспериментальным путем и составляет 7 кГц.

Выражение для нахождения значения выходной ЭДС в соответствии с [2] имеет вид

$$e = -W \frac{d}{dt} \iint_S F(x, y, t) \lambda(x, y, \varepsilon) dx dy, \quad (1)$$

где W – число витков вторичной обмотки; S – контур ЧЭ; $F(x, y, t)$ – функция распределения МДС по площади ЧЭ; $\lambda(x, y, \varepsilon)$ – локальная магнитная проводимость, определяемая выражением

$$\lambda(x, y, \varepsilon) = \frac{\mu_0 \mu_r}{f_3(x, y, \varepsilon) - f_1(x, y)}.$$

Здесь μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды в зазоре (для воздуха $\mu_r = 1$).

Функцию $F(x, y, t)$ для рассматриваемых частот можно представить как

$$F(x, y, t) = F_o(x, y) f_o(t). \quad (2)$$

С учетом (1) выражение (2) примет вид

$$e = -W \frac{df_o(t)}{dt} \iint_S F_o(x, y) \lambda(x, y, \varepsilon) dx dy, \quad (3)$$

где $-W \frac{df_o(t)}{dt}$ определяет временной закон модуляции потока возбуждения; $F_o(x, y)$ характеризует распределение МДС в площади сечения зазора для области ЧЭ (область 3 на рис. 1), а $\lambda(x, y, \varepsilon)$ описывает медленно меняющуюся магнитную проводимость зазора в зависимости от параметра ε .

Например, если МДС распределена в пределах контура ЧЭ равномерно и модулируется напряжением синусоидальной формы, т.е. $F_o(x, y) = F_o = \text{const}$, $f_o(t) = \text{karctg}(\text{tg}(\omega t))$, $\frac{df_o(t)}{dt} = k\omega$, то из выражения (3) получим

$$e = -Wk\omega F_o \iint_S \lambda(x, y, \varepsilon) dx dy. \quad (4)$$

Таким образом, при условии постоянства пространственного распределения МДС в пределах контура ЧЭ выходная ЭДС будет определяться текущим значением магнитной проводимости растрового зазора:

$$G(\varepsilon) = \iint_S \lambda(x, y, \varepsilon) dx dy. \quad (5)$$

Несмотря на то, что функция распределения магнитной проводимости $\lambda(x, y, \varepsilon)$ может быть представлена в явном виде в случае аналитического задания функций поверхностей $f_1(x, y)$ и $f_3(x, y, \varepsilon)$, выражение (4) является существенно приближенным. Для случая профилей ротора и статора в виде кусочно-постоянных (зубчатых) структур выражение $G(\varepsilon)$ не учитывает флуктуаций пространственного распределения МДС из-за наличия повышенного магнитного поля возле острых кромок. Поэтому в данном случае актуально применение специальных методов для математического описания свойств исследуемого датчика.

При обтюрационном сопряжении, когда шаг нарезки зубцов статора равняется шагу зубцов ротора, наиболее эффективным является метод, основанный на условном преобразовании

конфигурации паза [7]. В этом случае реальные прямоугольные границы паза $OBCD$ (рис. 2) заменяют условными границами OE и ED , проведенными под углом β к плоскости сопряжения.

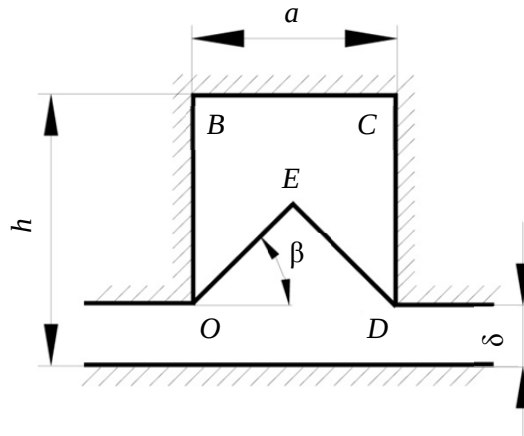


Рис. 2. Условно-графическое обозначение конфигурации паза

Магнитные силовые линии в зоне сектора угла β имеют форму дуг окружностей и прямых линий в зазоре (рис. 2). При таких условиях можно достаточно просто связать координаты поля с текущим и интегральным значениями проводимости в зазоре. Значение угла β выбирают из условия

$$\beta = \begin{cases} 1 & a/\delta < 10, \\ 1,1 & a/\delta \geq 10. \end{cases}$$

Текущее и интегральное значения проводимости паза соответственно равны

$$g(x) = \mu_o / (\delta + \beta x);$$

$$\sigma = 2\mu_o \int_0^{a/2} \frac{dx}{\delta + \beta x} = 2 \frac{\mu_o}{\beta} \ln \left(1 + \frac{a_0}{2} \beta \right),$$

где $a_0 = a / \delta$.

Для нониусного сопряжения (рис. 3), когда шаг нарезки зубцов опорной шкалы не равен шагу нарезки зубов нониусной шкалы, значения углов β_0 и β_n выбирают аналогично обтюраторному сопряжению. Значения текущей и интегральной проводимостей находят по участкам [7].

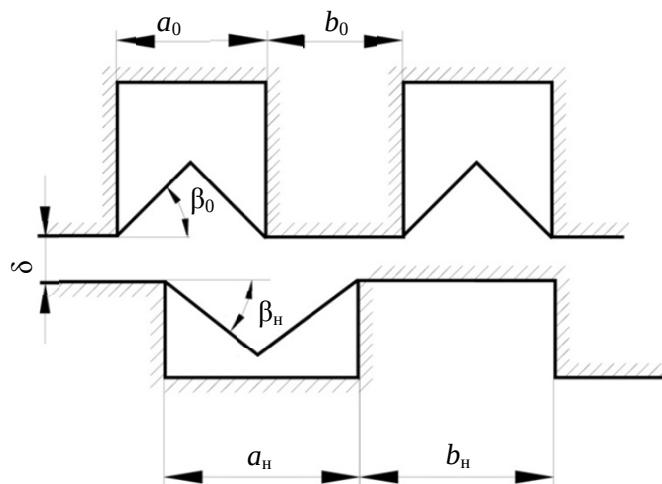


Рис. 3. Условные границы при нониусном сопряжении

Так как значение длины воздушного зазора участка «выступ статора над впадиной ротора» равно значению воздушного зазора участка «впадина над впадиной» ($d = e$), а площади участков S_2 и S_4 одинаковы, формула (7) примет вид

$$G = \frac{\mu_0 H}{\tau_1} \left[\frac{\xi_1}{g} S_1 + \left(\frac{\xi_2}{c} + \frac{\xi_4}{d} \right) S_2 + \frac{\xi_3}{c} S_3 \right]. \quad (8)$$

Для расчета площадей S_1 , S_2 , S_3 из геометрических соображений выразим значение относительной ширины контура:

$$\eta = \frac{r \operatorname{tg} \varphi}{\tau_1}, \quad (9)$$

где r – ширина контура обмотки.

Площадь участка «выступ статора над впадиной ротора» равна

$$S_2 = \frac{\eta \tau_1^2}{\gamma_1 \operatorname{tg} \varphi} - S_1, \quad (10)$$

где $\gamma_1 = \frac{\tau_1}{\epsilon_1}$.

Площадь участка «впадина над впадиной»:

$$S_3 = \frac{\eta \tau_1^2}{\gamma_1 \operatorname{tg} \varphi} (\gamma_1 - 2) + S_1; \quad (11)$$

$S_1 = S_3$ – площадь участка «выступ над выступом».

Для одного участка «выступ над выступом» площадь S_1 как функция перемещения X вычисляется следующим образом:

$$S_1(x) = \begin{cases} \operatorname{tg} \varphi \left[rH \left(\frac{1}{2} - \frac{r}{4H} \right) - x^2 \right] & \text{при } -\frac{r}{2} \leq x \leq \frac{r}{2}, \\ r \operatorname{tg} \varphi \left(\frac{H}{2} - x \right) & \text{при } \frac{r}{2} \leq x \leq \frac{H}{2} - \frac{r}{2}, \\ \operatorname{tg} \varphi \left[\frac{r^2}{4} + \left(x - \frac{H}{2} \right)^2 \right] & \text{при } \frac{H}{2} - \frac{r}{2} \leq x \leq \frac{H}{2} + \frac{r}{2}, \\ r \operatorname{tg} \varphi \left(x - \frac{H}{2} \right) & \text{при } \frac{H}{2} + \frac{r}{2} \leq x \leq H - \frac{r}{2}. \end{cases} \quad (12)$$

Если в рассматриваемом датчике имеются четыре обмотки считывания, то функции $G_i(x)$ будут сдвинуты друг относительно друга на величину, равную $\frac{H}{4}$:

$$G_i(x) = G_i \left(x + \frac{H}{4}(i-1); r \right), \quad (13)$$

где $i = 1, \dots, 4$.

Тогда функции магнитной проводимости воздушного зазора будут иметь вид

$$\begin{aligned} G_1(x, r) &= G \left(x + \frac{r}{2}; r \right), G_2(x, r) = G \left(x + \frac{r}{2} + \frac{H}{4}; r \right), \\ G_3(x, r) &= G \left(x + \frac{r}{2} + \frac{H}{2}; r \right), G_4(x, r) = G \left(x + \frac{r}{2} + \frac{3H}{4}; r \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Подставляя значения участков магнитной проводимости $G_1, \dots, G_4$ в формулу (6), получим общую магнитную проводимость воздушного зазора.

Таким образом, анализ физической модели растровых электромагнитных датчиков и выведенные математические выражения для расчета магнитной проводимости в воздушных зазорах ЧЭ показывают, что для формирования математической расчетной модели необходимо, отказавшись от решения методами теории поля, решить эту задачу другим способом, например, методами теории цепей с разработкой обобщенной схемы замещения.

Список литературы

1. Конюхов, Н. Е. Электромагнитные датчики механических величин / Н. Е. Конюхов, Ф. М. Медников, М. Л. Нечаевский. – М. : Машиностроение, 1987.
2. Трофимов, А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : моногр. / А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов. – Пенза, 2009. – 174 с.
3. Трофимов, А. Н. Унифицированный ряд высокотемпературных растровых электромагнитных датчиков перемещений / А. Н. Трофимов, А. В. Блинов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2007. – № 7. – С. 24–29.
4. Трофимов, А. Н. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений / А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – № 6. – 2009. – С. 24–27.
5. Дмитриенко, А. Г. Электромагнитный датчик линейных перемещений с торцевым сопряжением растров / А. Г. Дмитриенко, Д. И. Нефедьев, А. А. Трофимов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 4–10.
6. Трофимов, А. А. Расчет магнитной проводимости в растровом сопряжении электромагнитного датчика больших линейных перемещений / А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2008. – № 6. – С. 7–10.
7. Зверев, А. Е. Преобразователи угловых перемещений в цифровой код / А. Е. Зверев, В. П. Максимов, В. А. Мясников. – Л. : Энергия, 1974. – 184 с.
8. Дмитриенко, А. Г. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники / А. Г. Дмитриенко, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 18–21.
9. Зеленский, В. А. Способы совершенствования растровых взаимноиндуктивных датчиков перемещений / В. А. Зеленский, А. А. Трофимов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – № 4. – С. 5–9.
10. Патент RUS 63143 Российская Федерация, МПК G08C. Растровый трансформаторный преобразователь перемещения в код / Мокров Е. А., Цыпин Б. В., Трофимов А. Н., Мельников А. А., Трофимов А. А. – заявл. 19.01.2007 ; опубл. 10.05.2007, Бюл. 13.

Трофимов Алексей Анатольевич

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

Trofimov Aleksey Anatol'evich

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

Кучумов Евгений Владимирович

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

Kuchumov Evgeniy Vladimirovich

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

УДК 681.586.787

Трофимов, А. А.

Вывод соотношений на основе модифицированной геометрии для расчета магнитной проводимости в электромагнитных растровых датчиках перемещений / А. А. Трофимов, Е. В. Кучумов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 89–95.

А. В. Грачев

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

A. V. Grachev

ERRORS ANALYSIS OF THE CONVERTER CAPACITY MEASURING CIRCUIT WITH CONTACTLESS CONDUCTIVITY SENSOR

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Кондуктометрические датчики широко используются в устройствах измерения электропроводности и состава жидких сред, влажности сыпучих и твердых материалов. Бесконтактные кондуктометрические датчики (БКД) обеспечивают ряд преимуществ перед более распространенными контактными кондуктометрическими датчиками. БКД, например, позволяют осуществить измерение в широком диапазоне температур состава, находящихся в ампулах агрессивных и токсичных жидких сред. Сложность построения и анализа метрологических характеристик таких устройств состоит в том, что БКД представляется четырехэлементной эквивалентной электрической схемой замещения. При этом значительная доля погрешности измерения вносится на этапе преобразования пассивных параметров в активные величины, что делает актуальным анализ погрешностей активной измерительной схемы. *Материалы и методы.* Анализ погрешностей проведен для четырехэлементной схемы замещения БКД с учетом реальных параметров используемого в активной измерительной схеме дифференциального операционного усилителя методом теории направленных графов. *Результаты.* Составлены операторные уравнения выходного напряжения активной измерительной схемы, несущих информацию о всех параметрах БКД. Переход от операторной формы уравнений во временную и анализ погрешностей осуществлен с использованием символьного преобразования в программном продукте Maple. Представлены графики рассчитанных погрешностей. *Выводы.* Проведенный анализ погрешностей позволил определить требования и выбрать тип операционного усилителя. По значениям погрешности инвариантности были определены диапазоны допустимых измерений значений неинформативных параметров БКД.

A b s t r a c t. *Background.* Conductivity sensors are widely used in devices of measurement of conductivity and structure of liquid environments, humidity of loose and solid materials. The Contactless Conductivity Sensors (CCS) provide a number of advantages in front of more widespread contact conductivity sensors. CCS, for example, allow to carry out measurement in the wide range of temperatures of structure which are in ampoules of hostile and toxic liquid environment. Complexity of construction and the analysis of metrological characteristics of such devices consists that CCS is represented a four-element equivalent electric circuit of replacement. At the same time the considerable share of an error of measurement is introduced at a stage of transformation of passive parameters to active sizes that does actual the analysis of the active measuring system errors. *Materials and methods.* The analysis of errors is carried out for CCS four-element equivalent circuit based on actual parameters used in the active measuring scheme of the differential operational amplifier by the theory of directed graphs. *Results.* Compiled active measuring circuits carry information about all the parameters of the output voltage CCS operator equations. The transition from the operator equations in the form of

temporary and error analysis was done using the symbol mapping in the software Maple product. Is a graph of calculated errors. Schedules of the calculated errors are submitted. *Conclusions.* The carried-out analysis of errors has allowed to define requirements and to choose the OA type. From the values of error invariance were defined ranges for the measurement of values of non-informative parameters CCS.

Ключевые слова: бесконтактный кондуктометрический датчик, активная измерительная схема, анализ погрешности.

Key words: contactless conductivity sensor, active measuring scheme, analysis of errors.

Введение

Устройства измерения удельной электропроводности жидких сред применяются в качестве источника информации для контроля физико-химического состава различных жидкостей в системах управления технологическими процессами, в микроэлектронике, при контроле удельной электропроводности деионизованной воды [1] и т.д.

Чаще всего контроль удельной электропроводности жидкостей, используемых в различных производствах, производится с помощью контактных кондуктометров, которые обладают следующими недостатками [2]:

- невысокая точность измерения, вызванная загрязнением электродов в процессе эксплуатации измерителя;
- низкая надежность, обусловленная наличием гальванического контакта «жидкая среда – электрод»;
- невозможность измерения удельной электропроводности агрессивных сред из-за химических реакций, протекающих на поверхности электродов;
- необходимость и сложность регулярной отмывки и зачистки электродов.

Кардинально решить все вышеперечисленные проблемы возможно лишь с помощью применения бесконтактных кондуктометров, которые, несмотря на меньшую чувствительность по сравнению с контактными измерителями, превосходят их в точности и эксплуатационной надежности [3].

Кроме того, бесконтактные кондуктометры обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными контактными датчиками:

- возможность бесконтактного контроля электропроводности агрессивных и токсичных жидких сред;
- полное исключение загрязнения датчика контролируемой жидкостью и исключение необходимости изготовления электродов из драгоценных металлов;
- исключение воздействия контролируемых сред на детали измерителя и, следовательно, изменения его характеристик;
- возможность работы измерителя в широком диапазоне электропроводности, температур и давлений жидкости, в том числе исследования процессов, происходящих в системе, находящейся в запаянной ампуле при высокой и низкой температуре.

Несмотря на очевидные преимущества бесконтактных кондуктометров, до настоящего времени их применение не получило широкого распространения, методик оптимального проектирования таких измерителей значительно меньше, чем для контактных.

Все вышеперечисленные причины ставят проблему оценки погрешности активных измерительных схем бесконтактных кондуктометров в ряд актуальных и своевременных.

Определение относительной погрешности выходного напряжения измерительной схемы бесконтактного кондуктометрического датчика

Схема замещения бесконтактного кондуктометрического датчика (БКД) [4] приведена на рис. 1, где C_1 – емкость, обусловленная диэлектрическими свойствами изоляции электродов; R_1 – активное электрическое сопротивление раствора или вещества, находящегося между электродами датчика; C_2 – емкость, обусловленная полярными свойствами этого раствора или вещества; C_3 – «геометрическая» емкость между электродами незаполненного датчика, определяемая конструкцией, размерами датчика и дополнительной емкостью соединительного кабеля в режиме телеизмерений.

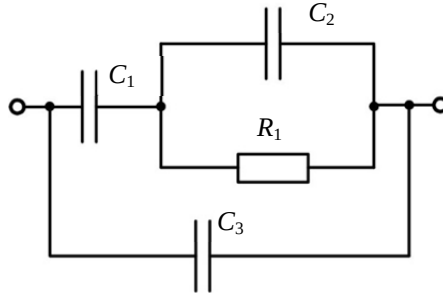


Рис. 1. Схема замещения бесконтактного кондуктометрического датчика

Проводимость такого датчика в операторной форме будет иметь вид

$$Y_{\text{кд}} = pC_3 + \frac{pC_1(pC_2 + G_1)}{pC_1 + pC_2 + G_1}. \quad (1)$$

В работе [5] проведен анализ погрешностей измерения контактного датчика с использованием теории направленных графов [6]. Воспользуемся этой методикой для анализа погрешностей измерительной схемы с бесконтактным кондуктометрическим датчиком [7–9].

На рис. 2 приведены конфигурация измерительной схемы и ее сигнальный граф.

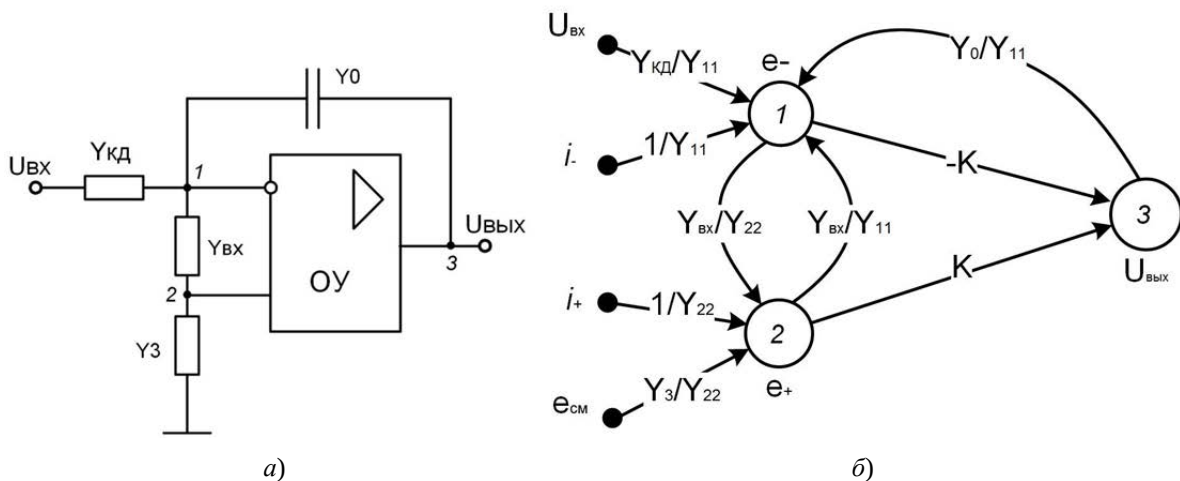


Рис. 2. Измерительная схема БКД:
а – конфигурация; б – сигнальный граф

Данный сигнальный граф составлен в соответствии с [10–12] и описывается системой линейных уравнений (рис. 2). Граф содержит 4 истока, 1 сток, 3 контура. В измерительной схеме (ИС) инвертирующего типа в эквивалентной схеме операционного усилителя (ОУ) можно не учитывать влияние синфазных составляющих: синфазная проводимость $Y_{\text{сф}}$ значительно меньше входной проводимости ОУ $Y_{\text{вх}}$, а коэффициент подавления синфазной составляющей очень велик $M_{\text{сф}} \rightarrow \infty$:

$$\begin{cases} e_+ = e_- \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_{22}} + e_{\text{см}} \frac{Y_3}{Y_{22}} + \frac{i_+}{Y_{22}}, \\ e_- = U_{\text{вх}} \frac{Y_{\text{кд}}}{Y_{11}} + e_+ \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_{11}} + U_{\text{вых}} \frac{Y_2}{Y_{11}} + \frac{i_-}{Y_{11}}, \\ U_{\text{вых}} = -Ke_- + Ke_+, \end{cases} \quad (2)$$

где e_- и e_+ – напряжения соответственно на инвертирующем и неинвертирующем входах ОУ; $Y_{11} = Y_{\text{кд}} + Y_0 + Y_{\text{вх}}$ и $Y_{22} = Y_3 + Y_{\text{вх}}$ – собственные проводимости узлов 1 и 2; $Y_0 = pC_0$ –

проводимость опорного элемента в цепи обратной связи ОУ. Реальный ОУ не обладает бесконечно большим коэффициентом усиления $K \neq \infty$ и бесконечно большим входным сопротивлением $R_{\text{вх}} \neq \infty$ или нулевой входной проводимостью $Y_{\text{вх}} \neq 0$. Соответственно не равны нулю напряжение смещения $e_{\text{см}} \neq 0$ и входные токи $i_+ \neq 0$ и $i_- \neq 0$. Неинвертирующий вход ОУ соединен с общей шиной через проводимость $Y_3 = G_3 \neq 0$. Для упрощения расчетов в этой схеме положим равными нулю выходное сопротивление $R_{\text{вых}} = 0$, входную емкость $C_{\text{вх}} = 0$ и емкость нагрузки $C_{\text{н}} = 0$ ОУ (при сравнении с типовыми значениями других элементов).

Запишем в операторной форме выходной сигнал ИС, используя формулу Мейсона [12]:

$$U_{\text{вых}}(p) = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i \Delta_i}{\Delta} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2 + P_3 \Delta_3 + P_4 \Delta_4 + P_5 \Delta_5 + P_6 \Delta_6 + P_7 \Delta_7 + P_8 \Delta_8}{1 - (L_1 + L_2 + L_3)}, \quad (3)$$

где P_i – коэффициент передачи i -го пути от истока к стоку; Δ_i – алгебраическое дополнение i -го пути; Δ – определитель Мейсона; L_i – коэффициент передачи i -го контура;

$$\begin{aligned} P_1 &= -KU_{\text{вх}} \frac{Y_{\text{кд}}}{Y_{11}}; P_2 = KU_{\text{вх}} \frac{Y_{\text{кд}} Y_{\text{вх}}}{Y_{11} Y_{22}}; P_3 = -K \frac{i_-}{Y_{11}}; P_4 = K \frac{i_- Y_{\text{вх}}}{Y_{11} Y_{22}}; \\ P_5 &= K \frac{i_+}{Y_{22}}; P_6 = -K \frac{i_+ Y_{\text{вх}}}{Y_{22} Y_{11}}; P_7 = Ke_{\text{см}} \frac{Y_3}{Y_{22}}; P_8 = -Ke_{\text{см}} \frac{Y_3 Y_{\text{вх}}}{Y_{22} Y_{11}}; \\ \Delta_1 &= \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = \Delta_5 = \Delta_6 = \Delta_7 = \Delta_8 = 1; \\ L_1 &= \frac{Y_{\text{вх}}^2}{Y_{11} Y_{22}}; L_2 = -K \frac{Y_0}{Y_{11}}; L_3 = K \frac{Y_0 Y_{\text{вх}}}{Y_{11} Y_{22}}. \end{aligned} \quad (4)$$

После подстановки (4) в (3) и с учетом того, что $Y_{22} = Y_3 + Y_{\text{вх}}$ и $Y_{11} = Y_{\text{кд}} + Y_0 + Y_{\text{вх}}$, напряжение на выходе будет иметь вид

$$U_{\text{вых реал}}(p) = \frac{K(-U_{\text{вх}} Y_{\text{кд}} Y_3 - i_- Y_3 + i_+ Y_{\text{кд}} + i_+ Y_0 + e_{\text{см}} Y_3 Y_{\text{кд}} + e_{\text{см}} Y_3 Y_0)}{Y_{\text{кд}} Y_3 + Y_0 Y_3 + Y_{\text{вх}} Y_3 + Y_{\text{кд}} Y_{\text{вх}} + Y_0 Y_{\text{вх}} - KY_{\text{кд}} Y_0 - KY_2^2}. \quad (5)$$

Для идеального преобразователя $K \rightarrow \infty$ и $Y_{\text{вх}} = 0$, тогда

$$U_{\text{вых идеал}}(p) = -\frac{-U_{\text{вх}} Y_{\text{кд}} Y_3 - i_- Y_3 + i_+ Y_{\text{кд}} + i_+ Y_0 + e_{\text{см}} Y_3 Y_{\text{кд}} + e_{\text{см}} Y_3 Y_0}{Y_{\text{кд}} Y_0 + Y_2^2}. \quad (6)$$

Относительная погрешность выходного напряжения будет иметь вид

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{вых}}(p) &= \left| \frac{U_{\text{вых реал}}(p) - U_{\text{вых идеал}}(p)}{U_{\text{вых идеал}}(p)} \right| = \left((U_{\text{вх}} Y_1 Y_3 - e_{\text{см}} Y_1 Y_3 - e_{\text{см}} Y_2 Y_3 + i_- Y_3 - i_- Y_1 - i_- Y_2) \times \right. \\ &\quad \times (Y_1 Y_3 + Y_1 Y_{\text{вх}} + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_{\text{вх}} + Y_3 Y_{\text{вх}}) (Y_1 Y_2 + Y_2^2) \Big) \times \\ &\quad \times \left((KY_1 Y_2 + KY_2^2 - Y_1 Y_3 - Y_1 Y_{\text{вх}} - Y_2 Y_3 - Y_2 Y_{\text{вх}} - Y_3 Y_{\text{вх}}) \times \right. \\ &\quad \times \left. (KY_1 Y_2 + KY_2^2 - Y_1 Y_3 - Y_1 Y_{\text{вх}} - Y_2 Y_3 - Y_2 Y_{\text{вх}} - Y_3 Y_{\text{вх}}) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Упростим выражение (7), считая $i_- = i_+ = i_{\text{см}}$ и подставляя значения проводимостей, получим

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{вых}}(p) &= (g_{\text{вх}} C_3 p (C_1 C_2 g_3 e_{\text{см}} p - C_1 C_3 g_3 U_{\text{вх}} p + C_1 C_3 g_3 e_{\text{см}} p + \\ &\quad + C_0 C_1 i_{\text{см}} p - C_1 G_1 g_3 U_{\text{вх}} - C_3 G_1 g_3 U_{\text{см}} + C_3 G_1 g_3 e_{\text{см}} + C_0 G_1 i_{\text{см}}) (C_1 + C_2)) \times \end{aligned}$$

$$\times \left((C_1 C_2 U_{BX} p + C_1 C_3 U_0 p - C_1 C_3 e_{CM} p + C_1 g_1 U_{BX} - C_1 G_1 e_{CM} + C_3 G_1 U_{BX} - C_3 G_1 e_{CM} + C_1 i_{CM}) \times \right. \\ \times G_3 \left(KC_0^2 C_1 p^2 + KC_0^2 G_1 p - C_0 C_1 g_{BX} p - C_1 C_2 g_{BX} p - C_1 C_2 g_{BX} p - \right. \\ \left. \left. - C_1 C_3 g_{BX} p - C_2 C_3 g_{BX} p - C_0 G_1 g_{BX} - C_1 G_1 g_{BX} - C_3 G_1 g_{BX} \right) \right)^{-1}. \quad (8)$$

Для перехода во временную область удобнее всего воспользоваться математическим символьным аппаратом программного продукта Maple [13]. Для того чтобы осуществить обратное преобразование Лапласа из (8), предварительно разделим это выражение на оператор p , так как формулы записаны по методу Карсона – Хэвисайда:

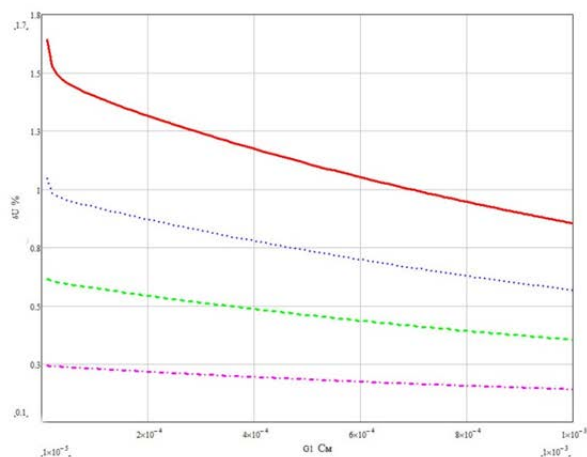
$$\delta U_{\text{ВЫХ}}(t) = \left(\frac{1}{KC_0 G_1 + G_3} \left((2KC_0^2 C_1^2 G_1^2 G_3 U_{BX}^2 - 2KC_0^2 C_1^2 G_1^2 G_3 U_{BX} e_{CM} - KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 G_3 U_{BX}^2 + \right. \right. \\ + KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 G_3 U_{BX} e_{CV} - KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 G_3 e_{CM}^2 + 2KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 G_3 U_{BX}^2 - \\ - 3KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 G_3 U_{CM} e_{CM} + KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 G_3 e_{CM}^2 - KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 G_3 U_{BX}^2 + \\ + 2KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 G_3 U_{BX} e_{CM} - KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 G_3 e_{CM}^2 - KC_0^3 C_1 G_1^2 U_{BX} i_{CM} + KC_0^3 C_1 G_1^2 e_{CM} i_{CM} + \\ + KC_0^3 C_2 G_1^2 U_{BX} i_{CM} + 2KC_0^2 C_1^2 G_1 G_3 U_{CM} i_{CM} + KC_0^2 C_1 C_2 G_1 G_3 e_{CM} i_{CM} + KC_0^2 C_1 C_3 G_1 G_3 U_{BX} i_{CM} - \\ - KC_0^2 C_1 C_3 G_1 G_3 e_{CM} i_{CM} - KC_0^3 C_1 G_1^2 i_{CM}^2) \cdot e^{\frac{-C_0^2 G_1 + C_0 C_1 g_{BX} + C_1 C_2 g_{BX} + C_1 C_3 g_{BX} + C_2 C_3 g_{BX}}{2KC_1 C_0^2} t} \cdot \sinh\left(\frac{G_1}{2C_1} t\right) \times \\ \times (C_1 + C_2) g_{BX} C_3) + \frac{1}{G_3} \left((-C_1 C_2 G_1 G_3 U_{BX}^2 - C_1 C_2 G_1 G_3 U_{BX} e_{CM} + C_1 C_3 G_1 G_3 e_{CM}^2 - \right. \\ - C_2 C_3 G_1 G_3 U_{BX}^2 + C_2 C_3 G_1 G_3 e_{CM}^2 - C_0 C_1 G_1 U_{BX} i_{CM} + C_0 C_1 G_1 e_{CM} i_{CM} + C_0 C_2 G_1 U_{BX} i_{CM} - C_1 C_2 G_3 e_{CM} i_{CM} + \\ + C_1 C_3 G_3 U_{BX} i_{CM} - C_0 C_1 i_{CM}^2) \left(e^{\frac{-KC_0^2 G_1 + C_0 C_1 g_{BX} + C_1 C_2 g_{BX} + C_2 C_3 g_{BX}}{2KC_1 C_0^2} t} \cdot \cosh\left(\frac{G_1}{2C_1} t\right) - \right. \\ \left. \left. - e^{\frac{-C_1 G_1 U_{BX} + C_1 G_1 e_{CM} - C_3 G_1 U_{BX} + C_3 G_1 e_{CM} - C_1 i_{CM}}{(C_2 U_{BX} + C_3 U_{BX} - C_3 e_{CM}) C_1} t} \right) \cdot (C_1 + C_2) g_{BX} C_3 \right) \times (KC_0^2 C_1^2 G_1^2 U_{BX}^2 - 2KC_0^2 C_1^2 G_1^2 U_{BX} e_{CM} + \\ + KC_0^2 C_1^2 G_1^2 e_{CM}^2 - KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 U_{BX}^2 + KC_0^2 C_1 C_2 G_1^2 U_{BX} e_{CM} + KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 U_{BX}^2 - 2KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 U_{BX} e_{CM} + \\ + KC_0^2 C_1 C_3 G_1^2 e_{CM}^2 - KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 U_{BX}^2 + KC_0^2 C_2 C_3 G_1^2 U_{BX} e_{CM} + 2KC_0^2 C_1^2 G_1 U_{BX} i_{CM} - 2KC_0^2 C_1^2 G_1 e_{CM} i_{CM} - \\ - KC_0^2 C_1 C_2 G_1 U_{BX} i_{CM} + KC_0^2 C_1 C_3 G_1 U_{BX} i_{CM} - KC_0^2 C_1 C_3 G_1 e_{CM} i_{CM} + KC_0^2 C_1^2 i_{CM}^2)^{-1}. \quad (9)$$

Практический интерес представляет изменение погрешности при изменении параметров БКД [14, 15]. Для ряда значений параметров ОУ (табл. 1) на рис. 3 приведены графики рассчитанных в программе Maple относительных погрешностей. Из графиков следует, что определяющими являются погрешности от влияния емкостей C_2 , C_3 и предъявляются жесткие требования к опорному элементу и ОУ ИС.

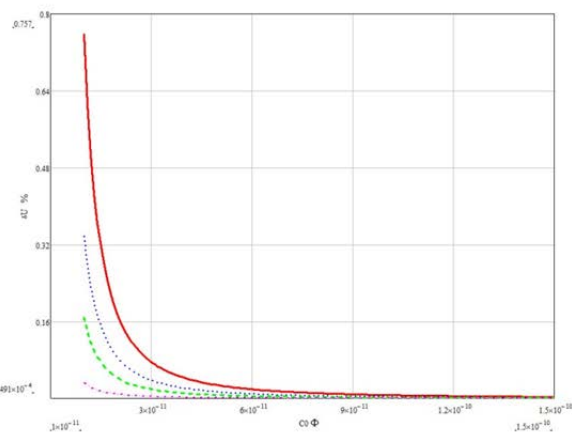
Таблица 1

Параметры исследуемых ОУ

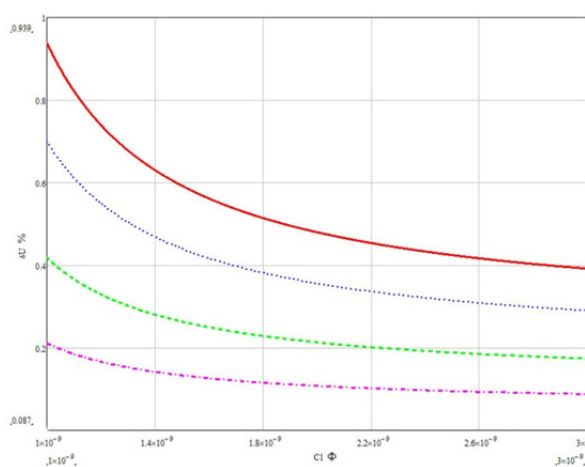
№ ОУ	Параметры ОУ				
	Коэффициент усиления, К	Входные токи, А		ЭДС смещения, В	Входное сопротивление, Ом
		i^+	i^-		
1	2500	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^4$
2	50 000	$4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	10^{-3}	10^6
3	50 000	10^{-9}	10^{-9}	$7 \cdot 10^{-4}$	10^7
4	100 000	10^{-11}	10^{-11}	$7 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^8$



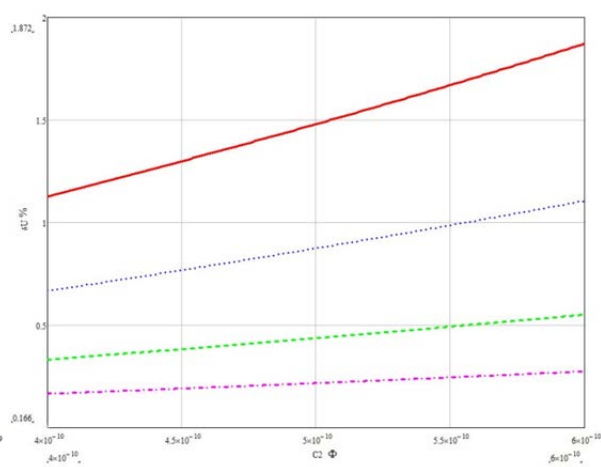
а)



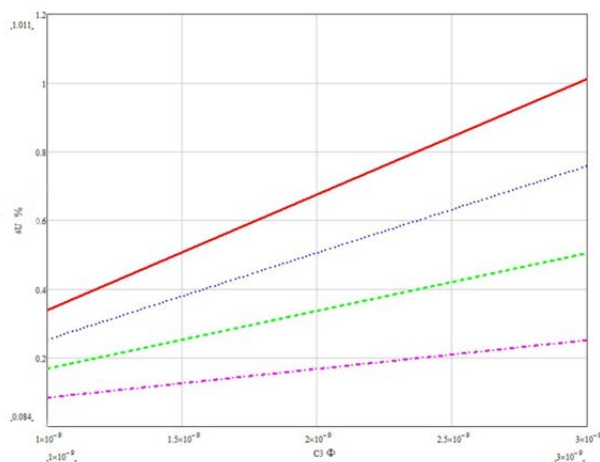
б)



в)



г)



д)

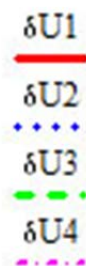


Рис. 3. Графики рассчитанных относительных погрешностей выходного напряжения ИС БКД:
 а – от проводимости контролируемой среды G_1 ; б – от значения опорного конденсатора C_0 ;
 в – от емкости изоляции электродов C_1 ; г – от емкости контролируемой среды C_2 ;
 д – от геометрической емкости C_3

Заключение

По результатам расчета погрешностей в качестве активного элемента ИС рекомендован ОУ КР544УД2 (или МА740), обладающий следующими параметрами: $K = 100\,000$; $e_{см} = 1,5\text{ мВ}$;

$\Delta e_{\text{см}} = 20 \text{ мкВ/}^\circ\text{C}$; $I_{\text{вх}} = 0,05 \text{ нА}$. При этом погрешность ИС во всем диапазоне измерения параметров БКД не превышает 0,4 %. Выбор конкретного ОУ определяется требованиями к быстрдействию ИС и от частоты опорного воздействия.

Список литературы

1. Худякова, Т. А. Кондуктометрический метод анализа : учеб. пособие для вузов / Т. А. Худякова, А. П. Крешков. – М. : Высшая школа, 1975. – 207 с.
2. Лопатин, Б. А. Кондуктометрия: измерение электропроводности электролитов / Б. А. Лопатин. – Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1964. – 280 с.
3. Комиссаренков, А. А. Кондуктометрия и высокочастотное титрование : учебно-метод. пособие / А. А. Комиссаренков, Г. Ф. Пругло. – СПб. : ГОУ ВПО СПбГТУРП, 2009. – 42 с.
4. Джапаридзе, П. Д. Эквивалентная электрическая схема емкостного первичного преобразователя влажности с изолированными электродами / П. Д. Джапаридзе, Р. Н. Месхидзе, В. Е. Пруидзе // Измерительная техника. – 1975. – № 5. – С. 77–79.
5. Грачев, А. В. Анализ погрешностей измерительной схемы инвариантного преобразователя емкости кондуктометрического датчика / А. В. Грачев, П. П. Чураков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 24–29.
6. Сешу, С. Линейные графы и электрические цепи / С. Сешу, М. Б. Рид. – М. : Высшая школа, 1971. – 448 с.
7. Машошин, П. В. Преобразователь параметров емкостного датчика для диэлькометрических влагомеров / П. В. Машошин, П. П. Чураков, М. Ю. Щербаков // Датчики и системы. – 2003. – № 1. – С. 24–26.
8. Патент 2483313 Российская Федерация RU МКП G01R27/22. Преобразователь параметров кондуктометрического датчика в напряжение / Грачев А. В., Гудожников Е. С., Чураков П. П. – заявл. 06.10.2011 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.
9. Крюков, М. А. Оценка погрешности измерительной схемы емкостных влагомеров / М. А. Крюков, П. В. Машошин, П. П. Чураков // Измерения-2000 : материалы МНТК. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2000. – С. 47–49.
10. Остапенко, А. Г. Анализ и синтез линейных и радиоэлектронных схем с помощью графов: аналоговые и цифровые фильтры / А. Г. Остапенко. – М. : Радио и связь, 1985. – 280 с.
11. Диткин, В. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В. Диткин, А. Прудников. – М. : Физматлит, 1961. – 524 с.
12. Мэзон, С. Электрические цепи, сигналы и системы / С. Мэзон. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 619 с.
13. URL: <http://www.maplesoft.com/support/help/Maple>.
14. Арбузов, В. П. Квазиуравновешенные измерительные цепи датчиков с комплексной схемой замещения параметрического преобразователя / В. П. Арбузов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 253–262.
15. 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.

Грачев Андрей Владимирович

начальник отдела технических средств обучения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: andean@mail.ru

Grachev Andrey Vladimirovich

head of technical means education department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.33

Грачев, А. В.

Анализ погрешностей измерительной схемы преобразователя сопротивления бесконтактного кондуктометрического датчика / А. В. Грачев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 96–102.

В. Н. Ашанин, С. Е. Ларкин, О. Н. Регеда

КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

V. N. Ashanin, S. E. Larkin, O. N. Regeda

CORRECTION OF ERROR MEASUREMENT CIRCUITS OF PARAMETRIC SENSORS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются измерительные цепи параметрических датчиков, предметом исследования – методы уменьшения дополнительной погрешности преобразования информативного параметра датчика от изменения влияющих факторов. Цель – разработка алгоритма и схемотехнического решения измерительной цепи параметрического преобразователя датчика на основе микропроцессора с высокими метрологическими характеристиками. *Материалы и методы.* Для коррекции дополнительной погрешности измерения от изменения влияющих факторов предложено использовать фазовое разделение каналов, обеспечивая получение дополнительной информации о влияющих факторах. *Результаты.* Сформулирован метод определения выходного сигнала измерительной цепи, пропорционального информативному параметру параметрического преобразователя датчика, который заключается в подаче на рабочий и опорный параметрические преобразователи, подключенные к входу активного преобразователя, напряжений, сдвинутых друг относительно друга на некоторый угол. В последующем осуществляется дискретизация устройством обработки информации выходного напряжения активного преобразователя и вычисление информативного параметра по определенному алгоритму с помощью микропроцессора. Для реализации вычислительного алгоритма необходимо обеспечить многократное превышения частоты дискретизации в сравнении с частотой изменения влияющих факторов. *Выводы.* Предложенный метод преобразования информативного параметра параметрического преобразователя, основанный на фазовом разделении каналов, обеспечивает коррекцию погрешности как из-за неидеальности элементов тракта преобразования, так и временной нестабильности влияющих факторов.

A b s t r a c t. *Background.* The object of the research is measuring circuit parameter sensors. The subject of research are methods of reducing the additional error parameter conversion informative gauge of changes in influencing factors. The aim is to develop an algorithm and schematic solution parametric sensor measuring circuit converter based on a microprocessor with high metrological characteristics. *Materials and methods.* For additional error correction of the measurement of changes in influencing factors proposed to use the phase separation of the channels, providing the additional information on the influencing factors. *Results.* We formulate a method for determining the output of the measuring circuit, the proportional informative parameters of the parametric sensor transducer, which is applied to the working and supporting parametric converters connected to the input of the active converter, voltage, shifted relative to each other by a certain angle. In the following sampling device made active converter output voltage information processing and computation of the informative parameter for a particular algorithm with the microprocessor. For implementation of a computational algorithm is necessary to provide multiple sampling frequencies in excess compared with the frequency changes affecting factors. *Conclusions.* The proposed method of converting information parameter parametric converter based on phase separation channel provides error correction for a non-ideal path conversion elements as well as temporary instability affecting factors.

К л ю ч е в ы е с л о в а: временное разделение каналов, параметрический преобразователь, микропроцессор, метод определения выходного сигнала измерительной цепи.

К е у w o r d s: Time Division Multiplexing, parametric converter system of, the method of determining the measuring circuit output signal.

Основной особенностью функционирования большинства параметрических датчиков является необходимость преобразования физической (измеряемой) величины в электрическую величину. Первичный параметрический преобразователь (ПП) такого датчика осуществляет преобразование измеряемой величины в изменение пассивных электрических свойств чувствительного элемента (изменение сопротивления, емкости или индуктивности). Естественно, что влияние климатических условий (температуры, влажности, давления и т.д.) приводит к возникновению дополнительной погрешности преобразования [1, 2]. С целью минимизации такого влияния в корпусе датчика наряду с рабочим ПП (РПП), имеющим сопротивление Z_x , используется опорный ПП (ОПП) [3–5] с сопротивлением Z_0 (рис. 1). На сопротивление Z_0 ОПП измеряемая величина не воздействует. Его назначением является учет изменения влияющих факторов путем изменения своего сопротивления. Это позволяет, используя структурные методы повышения точности преобразования [3, 6], существенно снизить погрешность преобразования измеряемой величины.

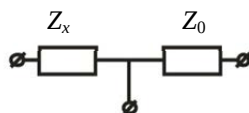


Рис. 1. Схема замещения ПП

В общем случае выражения для комплексных сопротивлений Z_x и Z_0 имеют вид

$$\begin{aligned} Z_x &= (Z_n + \Delta Z)(1 + \gamma_{\delta 1}), \\ Z_0 &= Z_n(1 + \gamma_{\delta 2}), \end{aligned} \quad (1)$$

где Z_n – начальные значения сопротивлений РПП и ОПП, которые заранее известны; ΔZ – изменение сопротивления РПП; $\gamma_{\delta 1}$ и $\gamma_{\delta 2}$ – относительные погрешности преобразования от изменения влияющих факторов на РПП и ОПП соответственно.

Вследствие конструктивного отличия РПП и ОПП воздействие влияющих факторов на изменение их параметров происходит в разной степени. Поэтому в общем случае значения $\gamma_{\delta 1}$ и $\gamma_{\delta 2}$ не равны.

Использование структурных методов повышения точности преобразования направлено на снижение погрешности от действия влияющих факторов. С этой целью схемотехнически обеспечивают такое включение ПП датчика, чтобы осуществлялась логометрическая коррекция погрешности. При этом выходной сигнал измерительной цепи (ИЦ) будет пропорционален отношению сопротивлений: $\frac{Z_x}{Z_0}$ или $\frac{Z_0}{Z_x}$. Тогда обеспечивается существенное снижение

дополнительной погрешности преобразования от воздействия влияющих факторов. Вместе с тем, как следует из системы уравнений (1), полной коррекции погрешности обеспечить невозможно:

$$\frac{Z_x}{Z_0} = \frac{Z_n + \Delta Z}{Z_n}(1 + \gamma),$$

где γ_{δ} – результирующая относительная погрешность преобразования от воздействия влияющих факторов на РПП и ОПП. Данная погрешность равна нулю только при условии $\gamma_{\delta 1} = \gamma_{\delta 2}$.

Следует отметить, что, строго говоря, значения погрешностей $\gamma_{\delta 1}$ и $\gamma_{\delta 2}$ являются функциями времени $\gamma_{\delta 1}(t)$ и $\gamma_{\delta 2}(t)$. Градиенты их изменения лишь примерно равны. Поэтому в произвольный момент времени $\gamma_{\delta 1}(t) \neq \gamma_{\delta 2}(t)$.

Преобразование пассивного параметра ПП в электрическую величину (напряжение или ток) осуществляется с помощью активного преобразователя (АП), реализация которого целесообразна на основе операционного усилителя (ОУ), обладающего высокими техническими характеристиками. При этом в зависимости от вида ПП датчика автоматически обеспечивается необходимый режим его работы – заданного тока или заданного напряжения, как показано на рис. 2. Недостатком данной схемной реализации АП является то, что она не обеспечивает создание избыточности, т.е. получения дополнительной информации о влияющих факторах, что может быть реализовано дополнительным вторым каналом преобразования [3]. Снижение погрешности преобразования в представленной схеме ограничено техническими характеристиками используемой элементной базы и параметрами линии связи (ЛС) параметрического преобразователя с измерительной цепью: сопротивлением R_k , индуктивностью L_k и емкостью C_k .

Избыточность можно создать с использованием пространственного или временного разделения каналов [3, 6]. В данном случае более целесообразным является временное разделение каналов в пределах периода несущей частоты генератора гармонических колебаний Γ (фазовое разделение каналов) [3, 4]. Достоинство фазового разделения каналов заключается в большем быстродействии по сравнению с традиционным временным разделением каналов коммутацией [7]. Схема ИЦ, реализующая фазовое разделение каналов, приведена на рис. 3.

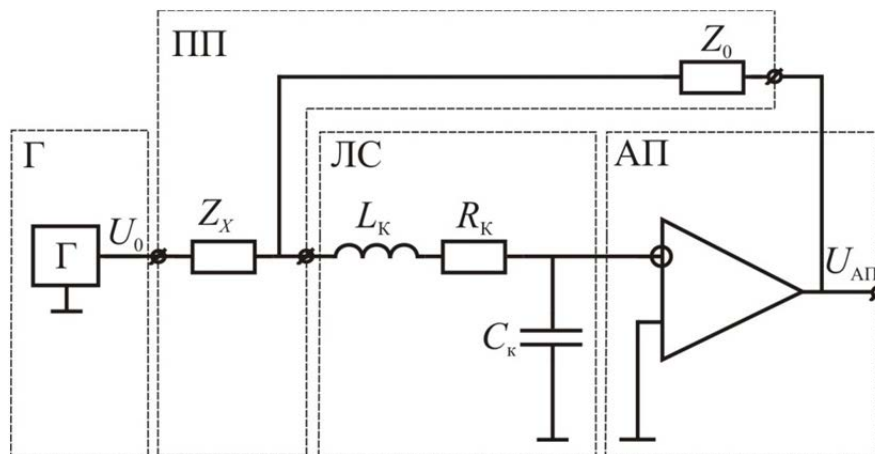


Рис. 2. Функциональная схема ИЦ с реализацией режима заданного напряжения для преобразования параметров параметрических датчиков в электрический сигнал

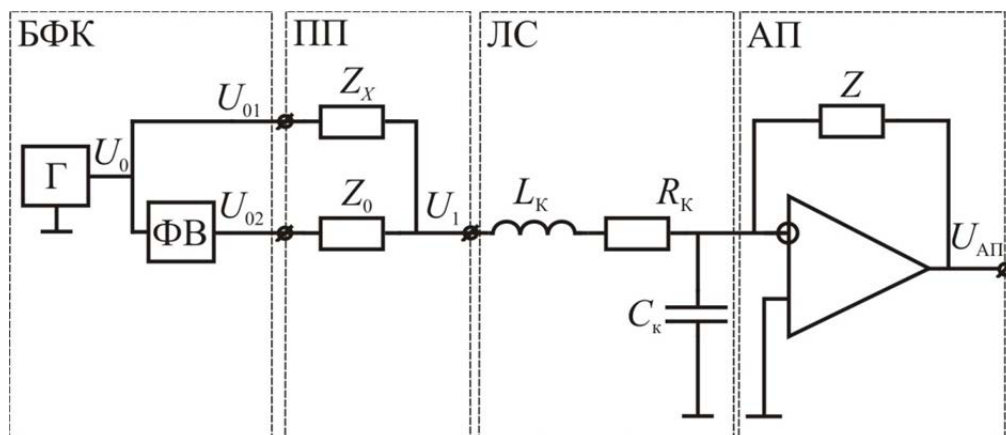


Рис. 3. Функциональная схема ИЦ с фазовым разделением каналов

Разделение каналов осуществляется в блоке формирования каналов (БФК), в котором из синусоидального напряжения генератора Γ амплитудой U_0 формируется второе напряжение u_{02} с помощью фазовращателя (ФВ), осуществляющего сдвиг входного напряжения на угол φ . Напряжения, поступающие на РПП (Z_x) и ОПП (Z_0), описываются выражениями:

$$u_{01}(t) = U_0 \sin(\omega t),$$

$$u_{02}(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi).$$

Требования, предъявляемые к напряжениям $u_{01}(t)$ и $u_{02}(t)$, подробно изложены в [8, 10]. Образцовое сопротивление $\underline{Z}$, включенное в обратную связь ОУ, является необходимым элементом при осуществлении коррекции погрешности, что будет показано ниже. Данное сопротивление является частью ИЦ и изготавливается из материалов, параметры которых мало изменяются при воздействии влияющих факторов. В общем случае можно отметить, что значение сопротивления Z определяется выражением

$$Z = Z_n(1 + \gamma_Z(t)),$$

где Z_n и $\gamma_Z(t)$ – начальное значение и относительная погрешность преобразования Z от изменения влияющих факторов.

Исходные уравнения для расчета ИЦ имеют вид

$$-\frac{\underline{U}_{АП}}{\underline{K}_y} \left(\frac{1}{\underline{Z}_k} + j\omega C_k + \frac{1}{\underline{Z}} \right) = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_k} + \frac{\underline{U}_{АП}}{\underline{Z}},$$

$$-\underline{U}_1 \left(\frac{1}{\underline{Z}_k} + \frac{1}{\underline{Z}_x} + \frac{1}{\underline{Z}_0} \right) = -\frac{\underline{U}_{АП}}{\underline{K}_y \underline{Z}_k} + \frac{\underline{U}_{01}}{\underline{Z}_x} + \frac{\underline{U}_{02}}{\underline{Z}_0},$$

где $\underline{Z}_k = j\omega L_k + R_k$.

Откуда выходное напряжение АП определяется выражением

$$\underline{U}_{АП} = - \frac{\underline{U}_{01} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_x} + \underline{U}_{02} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_0}}{\left(1 + \frac{1}{\underline{K}_y} \left(1 + j\omega C_k \underline{Z} + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_k} \right) \right) \left(1 + \underline{Z}_k \left(\frac{1}{\underline{Z}_x} + \frac{1}{\underline{Z}_0} \right) \right) - \frac{\underline{Z}}{\underline{K}_y \underline{Z}_k}},$$

а погрешность преобразования –

$$\underline{\gamma} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\underline{K}_y} \left(1 + j\omega C_k \underline{Z} + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_k} \right) \right) \left(1 + \underline{Z}_k \left(\frac{1}{\underline{Z}_x} + \frac{1}{\underline{Z}_0} \right) \right) - \frac{\underline{Z}}{\underline{K}_y \underline{Z}_k}} - 1.$$

Как следует из последнего выражения, погрешность преобразования определяется неидеальностью параметров элементов тракта преобразования и она тем меньше, чем больше коэффициент усиления $\underline{K}_y$ ОУ. Кроме того, погрешность определяется изменением не только информативного параметра РПП $\underline{Z}_x$, но и вследствие изменения параметров ОПП $\underline{Z}_0$, образцового элемента $\underline{Z}$ и при изменении влияющих факторов. Следовательно, модуль результирующей погрешности γ изменяется с течением времени вследствие как неидеальности параметров элементов тракта преобразования ($\underline{K}_y$), так и изменения информативного и влияющего факторов. Учесть данные изменения довольно сложно, так как ряд из них носит случайный характер. Вследствие этого предлагается проводить измерения в течение времени, меньше времени изменения параметров РПП или ОПП под воздействием самого быстродействующего из влияющих факторов. Как известно, изменение влажности, температуры и других влияющих величин носит длительный характер. Постоянные времени изменения данных процессов определяются их значительной энергоемкостью, а следовательно, инерционностью и находятся, в лучшем случае, на уровне единиц секунд. Электрические процессы более быстротечные. На метрологические характеристики влияние оказывает изменение напряжения питания ОУ, что в свою очередь определяется изменением напряжения на выходе стабилизатора питающего напряжения. Поскольку в фильтрах источников питания для сглаживания пульсаций используются конденсаторы большой емкости, то постоянная времени изменения напря-

жения питания ОУ находится на уровне долей секунд. Следовательно, если время измерения не будет превышать 0,1 с, то можно предполагать, что погрешность от действия влияющих факторов за это время не изменится.

Представляет интерес разработка методики программной коррекции погрешности преобразования. С этой целью рассмотрим процедуру такой коррекции на примере емкостного квазидифференциального датчика. При этом полагаем

$$\underline{Z}_x = \frac{1}{j\omega C_x},$$

$$\underline{Z}_0 = \frac{1}{j\omega C_0}.$$

Выходное напряжение АП равно сумме двух синусоидально изменяющихся функций одной частоты и, следовательно, будет также являться синусоидально изменяющейся величиной. Фрагмент выходного напряжения АП представлен на рис. 4.

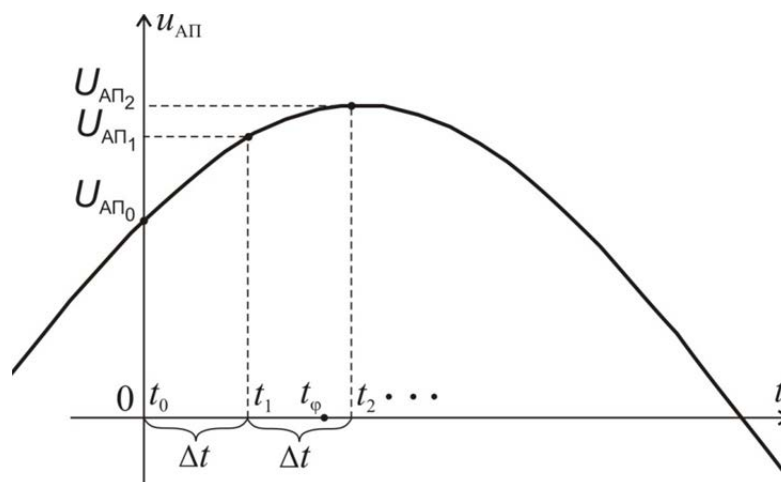


Рис. 4. Фрагмент выходного напряжения АП

Напряжения с выхода АП будем фиксировать через равные промежутки времени Δt устройством обработки сигнала (УОС). Тогда напряжения в моменты времени $t_0 - t_n$ будут равны

$$U_{АП0} = \left(-U_1 \frac{C_x}{C} \sin \omega t_0 - U_2 \frac{C_0}{C} \sin \omega(t_0 + t_\phi) \right) (1 + \gamma(t_0)),$$

$$U_{АП1} = \left(-U_1 \frac{C_x}{C} \sin \omega(t_0 + \Delta t) - U_2 \frac{C_0}{C} \sin \omega(t_0 + \Delta t + t_\phi) \right) (1 + \gamma(t_1)),$$

$$U_{АП2} = \left(-U_1 \frac{C_x}{C} \sin \omega(t_0 + 2\Delta t) - U_2 \frac{C_0}{C} \sin \omega(t_0 + 2\Delta t + t_\phi) \right) (1 + \gamma(t_2)),$$

$$U_{АПn} = \left(-U_1 \frac{C_x}{C} \sin \omega(t_0 + n\Delta t) - U_2 \frac{C_0}{C} \sin \omega(t_0 + n\Delta t + t_\phi) \right) (1 + \gamma(t_n)). \quad (2)$$

При выборе малого значения Δt можно считать, что $\gamma(t_0) = \gamma(t_1)$, $\gamma(t_2) = \gamma(t_3)$, $\gamma(t_{n-1}) = \gamma(t_n)$ и погрешность в пределах периода измерения остается постоянной по причинам, приведенным выше. Неизвестными в уравнениях системы (2), кроме относительной погрешности преобразования, являются также значение рабочей емкости C_x и время измерения: t_0 – для первого периода измерения, $t_0 + \Delta t$ – для второго периода и т.д. Значение опорной емкости C_0 , как и образцовой C , остается неизменной в пределах периода измерения.

Данная система уравнений является нелинейной и аналитического решения не имеет. В то же время существует множество численных методов решения подобных уравнений

(например, метод Ньютона). Время определения информативного параметра ограничено лишь быстродействием используемого для численного решения данных уравнений вычислительного модуля, в качестве которого целесообразно использовать микропроцессор. Данная процедура предполагает аналого-цифровое преобразование запоминаемых напряжений и реализуется в большинстве микроконтроллеров.

Исходя из этого предлагается метод определения информативного параметру ПП, который заключается в подаче на РПП и ОПП синусоидальных напряжений, сдвинутых друг относительно друга на некоторый угол, и последующем преобразовании его в электрический сигнал. Затем осуществляется дискретизация устройством обработки информации выходного напряжения активного преобразователя и вычисление информативного параметра по определенному алгоритму с помощью микропроцессора. Для реализации вычислительного алгоритма необходимо обеспечить многократное превышения частоты дискретизации в сравнении с частотой изменения влияющих факторов.

Измерительная цепь для емкостного датчика будет аналогична приведенной на рис. 3, необходимо лишь к выходу АП подключить устройство обработки сигнала.

Как следует из приведенной выше системы уравнений (2), информативный параметр $N_{\text{вых}}$ с выхода устройства цифровой обработки может быть рассчитан по формуле

$$N_{\text{вых}} = \frac{C_x}{C_0} = \frac{U_{\text{АП}_0} \sin \omega(t_0 + \Delta t + t_\varphi) - U_{\text{АП}_1} \sin \omega(t_0 + t_\varphi)}{U_{\text{АП}_0} \sin \omega(t_0 + \Delta t) - U_{\text{АП}_1} \sin \omega t_0}.$$

Данная возможность может быть осуществлена, если функцию задания напряжения генератора реализовать на микропроцессоре. На рис. 5 представлена функциональная схема микропроцессорной ИЦ емкостного датчика. Формированием напряжений $u_{01}(t)$ и $u_{02}(t)$ управляет микропроцессор (МП) путем коммутации ключей Кл1 и Кл2. Полученные прямоугольные сигналы одной частоты, но сдвинутые между собой на некоторый угол φ , поступают на электрические фильтры Ф1 и Ф2, выделяющие первые гармоники. К входу ОУ подключены конденсаторы емкостного ПП C_1 и C_2 . Устройство выборки и хранения (УВХ) осуществляет выборки из выходного напряжения АП, которые с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуются в код и используются МП для вычисления выходного сигнала $N_{\text{вых}}$ ИЦ. В зависимости от требуемого информативного параметра программным способом могут быть получены зависимости $\frac{C_0}{C_x}$, $\frac{\Delta C_x}{C_x}$ и $\frac{\Delta C_x}{C_0}$.

Таким образом, предложенный метод преобразования информативного параметра ПП, основанный на фазовом разделении каналов, обеспечивает коррекцию погрешности как из-за неидеальности элементов тракта преобразования, так и временной нестабильности влияющих факторов.

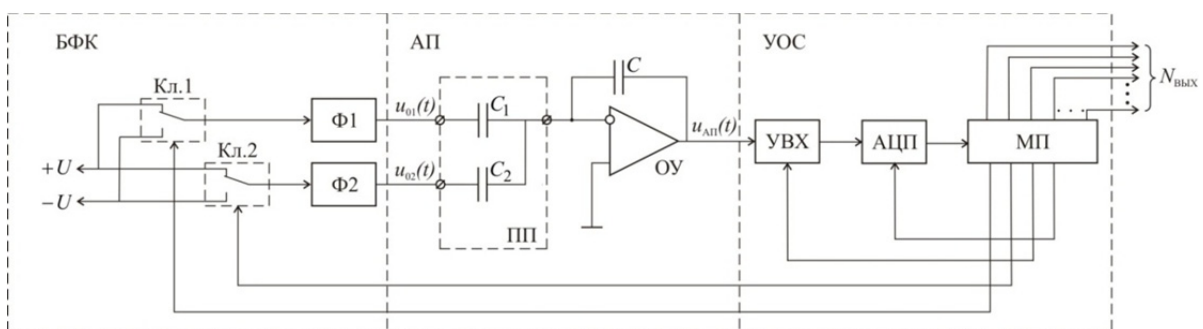


Рис. 5. Функциональная схема микропроцессорной измерительной цепи емкостного датчика

Список литературы

1. Электрические измерения неэлектрических величин – Изд. 5-е, перераб. и доп. / под ред. П. В. Новицкого. – Л. : Энергия, 1975. – 576 с.
2. Мартяшин, А. И. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения / А. И. Мартяшин, Э. К. Шахов, В. М. Шляндин. – М. : Энергия, 1976. – 396 с.

3. Арбузов, В. П. Структурные методы повышения точности измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков : моногр. / В. П. Арбузов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2008. – 230 с.
4. Арбузов, В. П. Микропроцессорная измерительная цепь емкостного датчика с фазовым разделением каналов / В. П. Арбузов, И. А. Долгушев, С. Е. Ларкин, М. А. Мишина // Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С. 5–8.
5. Арбузов, В. П. Временное разделение каналов измерительных цепей датчиков / В. П. Арбузов, М. А. Мишина, С. Е. Ларкин // Датчики и системы. – 2012. – № 12. – С. 22–25.
6. Ашанин, В. Н. Разделение функций – основной принцип совершенствования средств измерений / В. Н. Ашанин, Э. К. Шахов // Датчики и системы. – 2006. – № 7. – С. 2–7.
7. Авторское свидетельство СССР № 1827647. Преобразователь емкости датчика в частоту / Арбузов В. П., С Ларкин. Е., Маланин В. П., Лебедев Д. В. – опубл. 1993, Б. И. № 26.
8. Трахтман, А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов / А. М. Трахтман. – М. : Советское радио, 1972. – 352 с.
9. Арбузов, В. П. Фазовое разделение каналов измерительных цепей датчиков / В. П. Арбузов, С. Е. Ларкин, М. А. Мишина // Измерительная техника. – 2012. – № 11. – С. 22–26.

Ашанин Василий Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электроэнергетики
и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: eltech@pnzgu.ru

Ashanin Vasily Nikolaevich

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

Ларкин Сергей Евгеньевич

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

Larkin Sergey Evgen'evich

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

Регада Ольга Николаевна

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

Regeda Ol'ga Nikolaevna

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

УДК 621.317.733

Ашанин, В. Н.

Коррекция погрешности измерительных цепей параметрических датчиков / В. Н. Ашанин, С. Е. Ларкин, О. Н. Регада // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 103–109.

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.3.032

*В. С. Волков, М. В. Французов, Е. А. Рыблова***АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ***V. S. Volkov, M. V. Frantsuzov, E. A. Ryblova***ANALYTICAL AND NUMERICAL SIMULATION
OF SEMICONDUCTOR PIEZORESISTIVE
PRESSURE SENSING ELEMENTS**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью исследования является определение границ применимости аналитических и численных методов расчета механических напряжений и прогибов мембран при создании чувствительных элементов полупроводниковых тензорезистивных датчиков давления. *Материалы и методы.* Проведено аналитическое и численное моделирование радиального и тангенциального напряжений и прогиба мембраны с использованием допущений линейной теории изгиба тонких пластин. *Результаты.* Применение аналитических выражений для расчета прогиба и механических напряжений с подстановкой в них характеристик кремния для соответствующей кристаллографической плоскости и ориентации тензорезисторов приводит к существенной погрешности при определении тангенциального напряжения. Причиной этого является условие равенства коэффициента Пуассона для всех направлений при выводе аналитических зависимостей, которые первоначально были получены для изотропного материала. *Выводы.* Аналитические зависимости могут быть использованы для расчетов напряжений и прогибов при подстановке в них значения коэффициента Пуассона, усредненного по всем кристаллографическим плоскостям кремния. При этом погрешность результатов расчета относительно данных, полученных численным методом для анизотропной модели кремния, составляет порядка 5 %. Показано, что дальнейшие исследования в этом направлении необходимо направить на исследование нелинейного изгиба мембран чувствительных элементов и исследования влияния размера конечно-элементной сетки на результат численного моделирования.

A b s t r a c t. *Background.* The object of the research is determining of limits of analytical and numerical methods applicability for mechanical stresses and deflections calculation for membranes of semiconductor piezoresistive pressure sensors. *Materials and methods.* Analytical and numerical simulation of radial and tangential stress and deflection of the membrane using the assumptions of the thin plates linear bending theory was completed. *Results.* The use of analytical expressions for calculation of deflection and stresses for physical characteristics of silicon corresponding chosen crystallographic plane and orientation of piezoresistors leads to significant errors in the determination of tangential tension. The reason for this is the assumption of equality of Poisson's ratio for all directions in the derivation of analytical dependences, which were originally derived for an isotropic material. *Conclusions.* The analytical expressions can be used for calculations of stresses and deflections in substituting in them the values of Poisson's ratio, averaged for all crystallographic planes of silicon. In this case, the error of the calculation results as compared with the data obtained by the numerical method for anisotropic models of silicon, is

about 5 %. The further research should be directed to the study of membranes nonlinear bending and study the influence of the size of finite element mesh on the numerical simulation results.

К л ю ч е в ы е с л о в а: полупроводниковый тензорезистивный датчик давления, чувствительный элемент, кремниевая мембрана, радиальное и тангенциальное механическое напряжение, аналитическое моделирование, численное моделирование.

К e y w o r d s: semiconductor piezoresistive pressure sensor, sensing element, silicone membrane, radial and tangential mechanical stresses, analytical simulation, numerical simulation.

Для создания чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков давления широко применяется способ преобразования измеряемой величины в деформацию или прогиб упругого элемента. Основными видами упругих элементов являются жестко защемленные балки (кантилеверы) и мембраны различной геометрической формы. При этом наиболее полно отвечает современным требованиям изготовление ЧЭ датчиков с использованием полупроводниковой технологии и микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1–9].

Монокристаллический кремний, традиционно применяемый для изготовления полупроводниковых ЧЭ, является анизотропным материалом, что существенно усложняет их аналитический расчет, поэтому механические характеристики ЧЭ (напряжения и прогиб) рассчитываются так же, как и для изотропных материалов, с учетом конкретных значений физических параметров для выбранной кристаллографической плоскости кремния [1, 2]. Очевидно, что такой подход к расчету характеризуется определенными погрешностями полученных результатов, но подобные расчеты могут быть сделаны вручную или с использованием простых и доступных программ математического моделирования [10–13]. С другой стороны, в настоящее время доступны специальные программные средства для численного и имитационного моделирования МЭМС-устройств, позволяющие определять конструктивные параметры ЧЭ с учетом анизотропии физических свойств с большей точностью, но при этом такие программы требуют значительных программно-аппаратных ресурсов [10–13]. Поэтому представляется актуальной задача определения применимости аналитического и численного подходов к расчету механических характеристик ЧЭ.

При использовании кремниевых мембран для создания ЧЭ тензорезистивных датчиков давления применяется радиально-тангенциальное расположение тензорезисторов [1]. Аналитические выражения для расчета радиальных и тангенциальных механических напряжений зачастую не позволяют полностью учесть влияние анизотропии свойств материала, так как они строятся по аналогии с изотропными моделями, в которые просто подставляются соответствующие коэффициенты, учитывающие выбранную кристаллографическую плоскость кремния и направления, вдоль которых ориентированы тензорезисторы.

Традиционно при проектировании ЧЭ датчиков давления в виде мембран стараются обеспечить линейную зависимость механического напряжения и прогиба от давления, предполагая для этого, что края мембраны жестко закреплены, диаметр мембраны во много раз превышает ее толщину, максимальный прогиб мембраны не превышает 20 % от толщины (линейная теория изгиба) [6–9].

Для нахождения толщины мембраны h необходимо найти максимальное значение напряжения, которое возникает на окружности мембраны. Максимальное значение напряжения определяется по формуле [1, 2]:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{r\max} = \frac{3 PR^2}{4 h^2}, \quad (1)$$

где R – радиус мембраны; P – максимальное приложенное давление.

Выразим из формулы (1) толщину h :

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} R \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\max}}}. \quad (2)$$

Рассмотрим ЧЭ в виде круглой жесткозащемленной кремниевой мембраны диаметром 3 мм, ориентированной в плоскости (100), под действием давления $P = 1 \cdot 10^6$ Па.

Примем максимальное механическое напряжение $\sigma_{\max} = 400$ МПа [1, 2].

Тогда толщина h , рассчитанная по выражению (1), будет равна 64,95 мкм. Примем значение $h = 65$ мкм.

Радиальное напряжение, тангенциальное напряжение и прогиб мембраны соответственно рассчитываются по следующим формулам [1]:

$$\sigma_r = \frac{3PR^2}{8h^2} \left[(1+\mu) - \left(\frac{r}{R} \right)^2 (3+\mu) \right], \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{3PR^2}{8h^2} \left[(1+\mu) - \left(\frac{r}{R} \right)^2 (1+3\mu) \right], \quad (4)$$

$$w = \frac{P}{64D} (R^2 - r^2)^2, \quad (5)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость; r – текущая координата радиуса; μ – коэффициент Пуассона (для плоскости кремния (100) и ориентации тензорезисторов вдоль кристаллографических направлений [011] $\mu = 0,063$) [1, 2].

На рис. 1 представлены зависимости от координаты радиального и тангенциального напряжений, рассчитанные по формулам (3), (4); на рис. 2 представлена зависимость прогиба от координаты, рассчитанная по формуле (5).

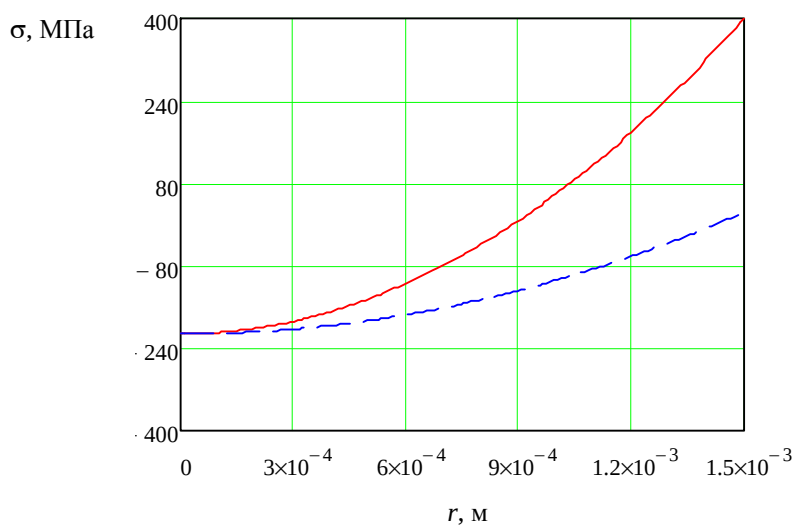


Рис. 1. Радиальные (сплошная линия) и тангенциальные (пунктир) напряжения на поверхности кремниевой мембраны

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования прогиба кремниевой мембраны методом конечных элементов для двух случаев – задания свойств кремния изотропной и анизотропной моделью. Из анализа рис. 3 видно, что использование изотропной модели характеризуется существенной погрешностью – максимальный прогиб, соответствующий изотропной модели, на 25 % меньше прогиба, соответствующего анизотропной, при этом максимальный прогиб, соответствующий анизотропной модели, практически точно совпадает с аналитически полученным значением (см. рис. 2).

На рис. 4, 5 представлены зависимости от координаты радиального и тангенциального напряжений, полученные для изотропной и анизотропной моделей кремния численным моделированием. Численные значения напряжений для рассматриваемого ЧЭ на краю мембраны в местах расположения тензорезисторов, рассчитанные различными способами, представлены в табл. 1.

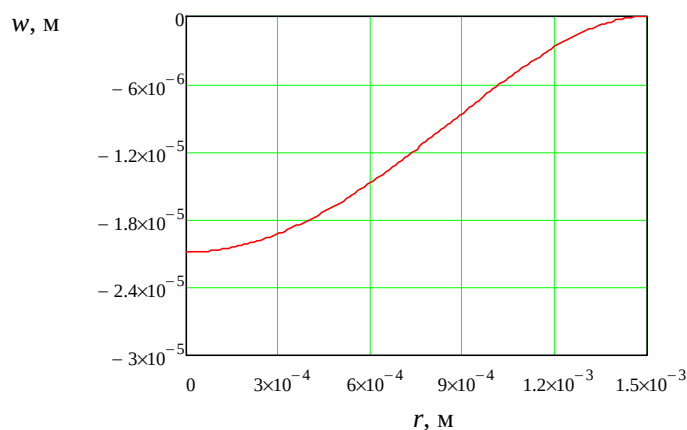


Рис. 2. Прогиб кремниевой мембраны, рассчитанный аналитически

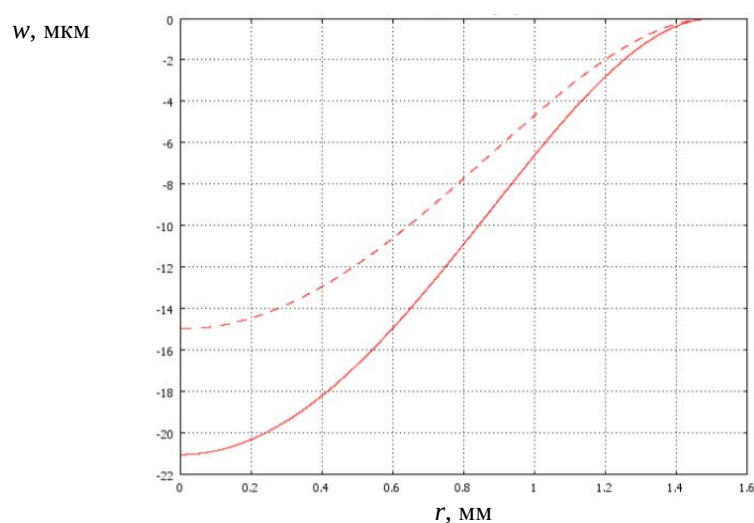


Рис. 3. Результаты численного моделирования прогиба мембраны (пунктир – изотропная модель кремния, сплошная линия – анизотропная)

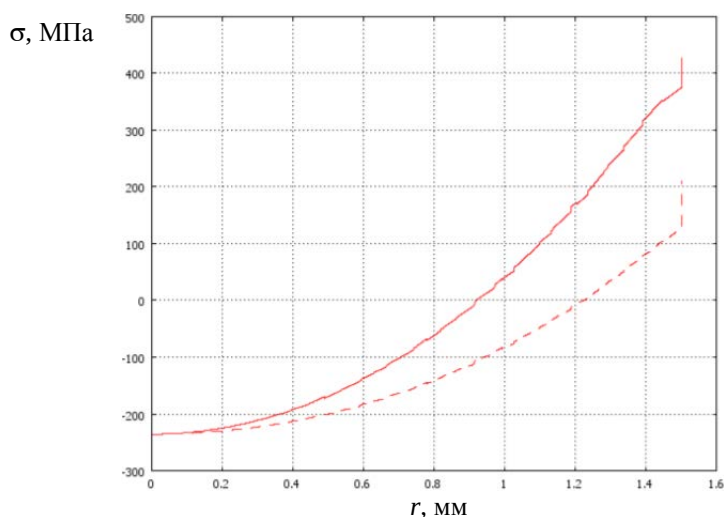


Рис. 4. Результаты численного моделирования для изотропной модели кремния (сплошная линия – радиальное напряжение, пунктир – тангенциальное)

Анализ данных табл. 1 показывает, что для радиального напряжения значения, полученные аналитически, больше, чем для изотропной и анизотропной на величину, не превышающую 10 %. В то же время значения тангенциального напряжения, полученные аналитически, приблизительно в пять раз ниже значений для изотропной и анизотропной моделей.

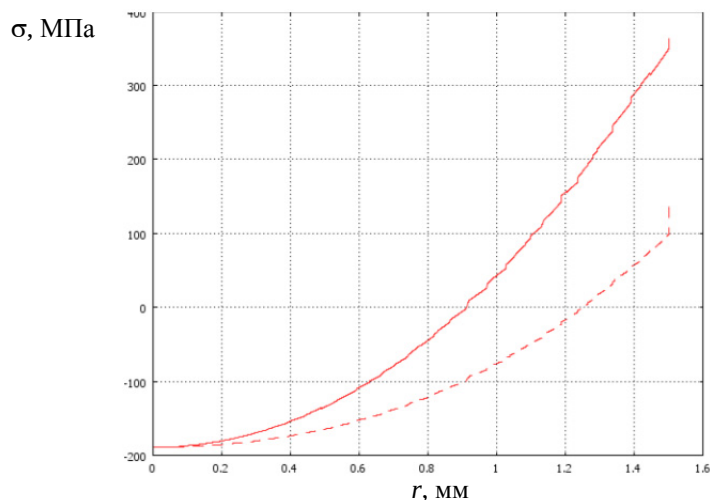


Рис. 5. Результаты численного моделирования для анизотропной модели кремния (сплошная линия – радиальное напряжение, пунктир – тангенциальное)

Таблица 1

Результаты расчета и моделирования механических напряжений

Напряжения, рассчитанные аналитически по формулам (3), (4) при $\mu = 0,063$		Напряжения, рассчитанные аналитически по формулам (3), (4) при $\mu = 0,33$		Напряжения, полученные численным моделированием для изотропной модели кремния		Напряжения, полученные численным моделированием для анизотропной модели кремния	
σ_r , МПа	σ_θ , МПа	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	σ_r , МПа	σ_θ , МПа
400	27	400	132	370	125	360	100

По-видимому, такое существенное различие в значениях тангенциального напряжения, полученных разными способами, объясняется тем, что при аналитическом расчете по формулам (3), (4) значение коэффициента Пуассона принималось равным 0,063, что соответствует кристаллографической плоскости кремния (100) и ориентации тензорезисторов вдоль кристаллографических направлений [011], тогда как выражения (3) и (4) получены первоначально для металлов и подразумевают равенство коэффициента Пуассона по всем направлениям вследствие изотропии материала.

В таком случае более корректный результат дает подстановка в выражения (3) и (4) усредненного по всем кристаллографическим направлениям кремния коэффициента Пуассона $\mu = 0,33$ [1, 2]. Результаты расчета напряжений и прогиба кремниевой мембраны в этом случае приведены на рис. 6, 7.

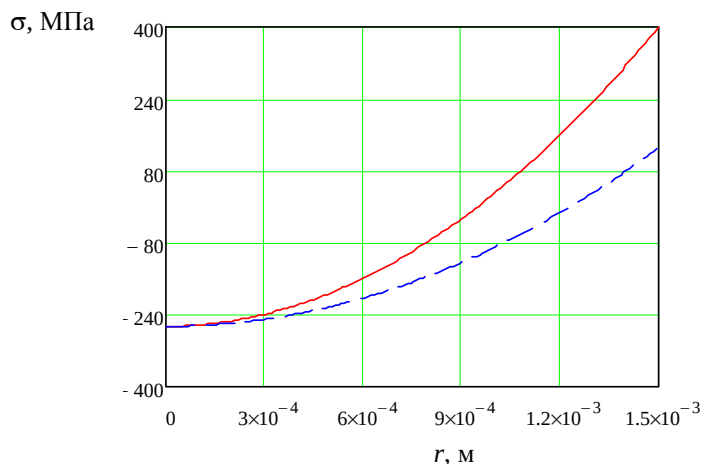


Рис. 6. Радиальные (сплошная линия) и тангенциальные (пунктир) напряжения на поверхности кремниевой мембраны, рассчитанные аналитически при $\mu = 0,33$

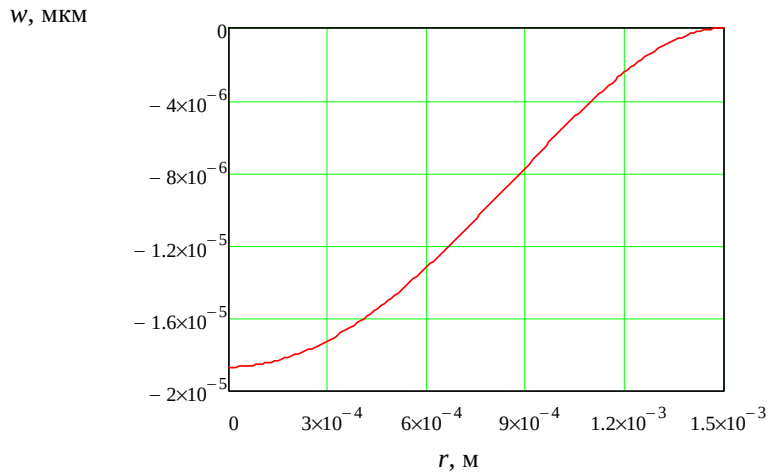


Рис. 7. Прогиб кремниевой мембраны, рассчитанный аналитически при $\mu = 0,33$

При объединении тензорезисторов, расположенных на поверхности мембраны, в полную мостовую схему, при условии идентичности характеристик тензорезисторов выходной сигнал будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_r - \sigma_t), \quad (6)$$

где $\pi_{44} = 138,1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$ – сдвиговый тензорезистивный коэффициент; $U_{\text{п}}$ – напряжение питания схемы [1].

Тогда относительная чувствительность S может быть найдена по формуле

$$S = 10^3 \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_r - \sigma_t). \quad (7)$$

Результаты расчета относительной чувствительности и погрешности ее определения различным способом приведены в табл. 2. За действительное значение относительной чувствительности принималось значение, полученное численным моделированием для анизотропной модели.

Таблица 2

Результаты расчета относительной чувствительности и относительной погрешности

Способ определения значений механических напряжений	Относительная чувствительность S , мВ/В	Погрешность, %
Аналитический при $\mu = 0,063$	257	43,56
Аналитический при $\mu = 0,33$	185	3,35
Численный для изотропной модели	169	–5,59
Численный для анизотропной модели	179	0

Анализ табл. 2 показывает, что использование аналитических выражений (3) и (4) при подстановке в них коэффициента Пуассона, соответствующего выбранной плоскости кремния, дает значительную погрешность, при этом использование усредненного значения коэффициента дает погрешность менее 5 %. В то же время использование при численном моделировании изотропной модели свойств кремния дает погрешность также порядка 5 %.

Таким образом, при расчете механических напряжений кремниевой мембраны в линейном приближении могут быть использованы как численные методы для изотропной анизотропной модели свойств кремния, так и аналитические выражения, выведенные для изотропных мембран при подстановке в них значения коэффициента Пуассона, усредненного по всем кристаллографическим плоскостям.

Задачами дальнейшего исследования является учет влияния размера сетки, формы и размера конечных элементов при численном моделировании на точность результатов, а также анализ применимости аналитических и численных моделей при нелинейном изгибе мембран.

Список литературы

1. Ваганов, В. И. Интегральные тензопреобразователи / В. И. Ваганов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
2. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие / В. Я. Распопов. – М. : Машиностроение, 2007. – 400 с.
3. Баринов, И. Н. Разработка и изготовление микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Б. В. Цыпин, С. П. Евдокимов // Датчики и системы. – 2014. – № 2. – С. 49–61.
4. Баринов, И. Н. Оптимизация чувствительного элемента датчика давления с поликремниевыми тензорезисторами / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2013. – № 2. – С. 1–5.
5. Кучумов, Е. В. Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
6. Баринов, И. Н. Высокотемпературные тензорезистивные датчики давлений на основе карбида кремния. Состояние разработок и тенденции развития / И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 64–71.
7. Козин, С. А. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий / С. А. Козин, А. В. Федулов, В. Е. Пауткин, И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 24–27.
8. Баринов, И. Н. Высокотемпературные чувствительные элементы датчиков давления со структурой «кремний на диэлектрике» / И. Н. Баринов // Датчики и системы. – 2007. – № 1. – С. 36–38.
9. Баринов, И. Н. Оптимизация параметров полупроводниковых чувствительных элементов датчиков абсолютного давления / И. Н. Баринов // Приборы. – 2009. – № 4. – С. 47–51.
10. Волков, В. С. Использование системы Simulink при имитационном моделировании высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Приборы. – 2011. – № 7. – С. 50–54.
11. Фандеев, В. П. Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования приборов : учеб. пособие / В. П. Фандеев, В. С. Волков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2007. – 76 с.
12. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
13. Волков, В. С. Снижение температурной зависимости начального выходного сигнала высокотемпературного полупроводникового датчика давления на структуре «поликремний – диэлектрик» / В. С. Волков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 75–77.

Волков Вадим Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Volkov Vadim Sergeevich

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

Французов Максим Владимирович

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

Frantsuzov Maksim Vladimirovich

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

Рыблова Елизавета Анатольевна

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Ryblova Elizaveta Anatol'evna

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

УДК 621.3.032

Волков, В. С.

Аналитическое и численное моделирование чувствительных элементов полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, М. В. Французов, Е. А. Рыблова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 110–117.

УДК 681.586'325'773

Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
КРЕМНИЕВЫХ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ
С РАСШИРЕННЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ
ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЕНИЙ****F. A. Abdullin, V. E. Pautkin****TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION
OF SILICON PIEZORESISTIVE ACCELEROMETERS
WITH EXTENDED TEMPERATURE RANGE OF MEASURES**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены кремниевые пьезорезистивные МЭМС-акселерометры, их достоинства и недостатки. Объектом исследования являются конструкции чувствительных элементов (ЧЭ) пьезорезистивных микромеханических датчиков. Целью работы является анализ технологических особенностей формирования ЧЭ кремниевых пьезорезистивных акселерометров. *Материалы и методы.* Использован системный подход к рассмотрению технологических особенностей и материалов при формировании ЧЭ пьезорезистивных акселерометров. *Результаты.* Предлагается применение в конструкциях ЧЭ новых материалов и структур, таких как карбид кремния и «кремний – диэлектрик – кремний», а также использование измерительной схемы из поликристаллического кремния. *Выводы.* Использование предложенных вариантов конструктивно-технологических решений позволит создавать микромеханические акселерометры с улучшенными выходными параметрами.

A b s t r a c t. *Background.* Considers silicon piezoresistive MEMS accelerometers, their advantages and disadvantages. The object of research is the design of sensing elements (SE) piezoresistive MEMS sensor. The aim of the work is the analysis of the technological features of formation of SE silicon piezoresistive accelerometers. *Materials and methods.* A systematic approach to the consideration of technological features and materials in the formation of piezoresistive accelerometers. *Results.* Provided the use in constructions SE new materials and structures, such as silicon carbide and «silicon-insulator-silicon» as well as the use of the measuring circuit from polysilicon. *Conclusions.* The use of the options proposed structural and technological solutions will create a micromechanical accelerometer with improved output parameters.

К л ю ч е в ы е с л о в а: микромеханический акселерометр, пьезорезистивный акселерометр, чувствительный элемент, монокремний, поликремний, технология МЭМС.

Key words: micromechanical accelerometer, piezoresistive accelerometer sensor, monocrystall silicon, polysilicon, MEMS technology.

Пьезорезистивные микромеханические акселерометры получили широкое распространение в промышленности благодаря возможности измерения линейных ускорений в широком частотном диапазоне, в том числе ударных ускорений, которые невозможно измерить с помощью другого класса акселерометров (пьезоэлектрических, емкостных и др.). Кремниевым пьезорезистивным акселерометрам, изготовленным по технологиям МЭМС (микроэлектромеха-

нические системы), свойственно одновременное получение множества кремниевых кристаллов чувствительных элементов с одинаковыми температурными характеристиками, что недосяжимо при изготовлении акселерометров, реализованных из дискретных элементов с индивидуальными температурными характеристиками [1].

Достоинствами кремниевых пьезорезистивных микромеханических акселерометров являются высокая механическая прочность, широкий частотный диапазон, возможность компенсации температурного дрейфа схемотехническими методами, а также характеристики чувствительного элемента, основанные на уникальных свойствах кремния: отсутствии гистерезиса подвижных микроструктур, долговременной стабильности, способности к многократным циклическим нагрузкам без накопления механической усталости. К технологическим преимуществам кремния можно отнести способность к легкому термическому окислению (создание защитных слоев при формировании чувствительных элементов), способность к управляемому формообразованию методами анизотропного и плазмохимического травления, возможность одновременного изготовления множества однотипных кристаллов чувствительных элементов и др.

Серьезным недостатком кремниевых пьезорезистивных акселерометров можно считать ограниченный температурный диапазон измерений, связанный с наличием в структуре кремниевого кристалла чувствительного элемента измерительной схемы (как правило, это мостовая схема Уитстона), выполненной диффузией или ионным легированием примеси в исходную кремниевую пластину (рис. 1). Получаемый при этом обратно смещенный $p-n$ -переход имеет рабочий температурный диапазон до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, что определяет и температурный диапазон функционирования акселерометров. Методы температурной компенсации выходного сигнала при температурах, равных $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ или выше, становятся труднореализуемыми или невозможными. Кроме того, при повышенных температурах появляются значительные токи утечки, что ведет к некорректным измерениям и потере информационного сигнала [2, 3].

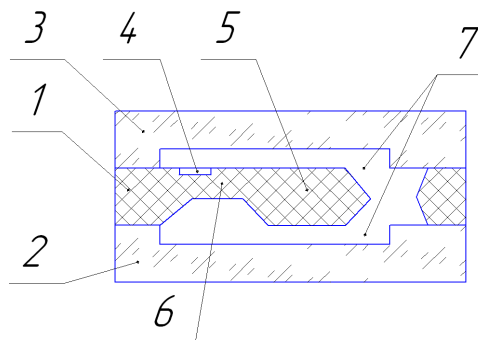


Рис. 1. Пьезорезистивный чувствительный элемент микромеханического акселерометра:

- 1 – кремниевый кристалл; 2, 3 – нижняя и верхняя стеклянные крышки – изоляторы;
- 4 – диффузионные пьезорезисторы; 5 – инерционная масса; 6 – упругая перемычка;
- 7 – зазоры в стеклах для перемещения инерционной массы

На практике существует необходимость измерения ускорений при повышенных температурах. Примером может служить измерение ударных нагрузок и вибрации двигательных установок, узлов оборудования и машин различного технологического назначения при их отработке и эксплуатации. Это требует наличия акселерометров, способных сохранять свои метрологические характеристики при воздействии повышенных температур, характерных при эксплуатации указанного оборудования, когда воздействующая температура может достигать значений выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пьезорезистивные акселерометры могут быть использованы для данного вида измерений только при условии применения высокотемпературного чувствительного элемента, работоспособного при температурах выше $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В последнее время разработчики обращают внимание на применение в конструкциях чувствительных элементов датчиков новых материалов и структур, способных к эксплуатации при повышенных температурах. Примерами таких материалов являются карбид кремния и структуры «кремний – диэлектрик – кремний» [4].

Структуры «кремний – диэлектрик – кремний»

Структура «кремний – диэлектрик – кремний» (КДК) представляет собой опорную пластину кремния, на которой поверх слоя диэлектрика (оксид кремния) нанесен приборный слой кремния толщиной до нескольких микрон (рис. 2). На структурах КДК удастся получать приборы с улучшенными характеристиками по сравнению с аналогичными приборами, изготовленными на обычных кремниевых пластинах.

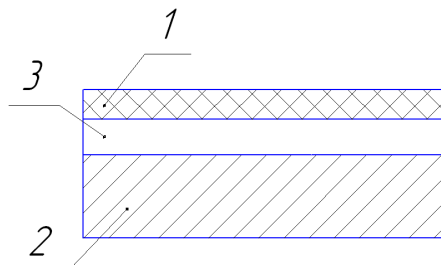


Рис. 2. Структура «кремний – диэлектрик – кремний»:

1 – верхний приборный слой кремния; 2 – кремниевая подложка; 3 – изолирующий слой оксида

Технологические процессы изготовления интегральных микросхем, адаптированные для структур МЭМС, могут стать наиболее подходящей основой для производства микромеханических приборов с улучшенными техническими характеристиками [5]. Замена изоляции *p-n*-переходом компонентов чувствительных элементов на полную диэлектрическую изоляцию позволяет улучшить такие характеристики датчиков, как радиационная и температурная устойчивость. Преимущество структур КДК перед структурами на основе объемного кремния заключено в надежной изоляции рабочего объема пьезорезистора от подложки. Примеры реализации чувствительных элементов акселерометров пьезорезистивного типа с использованием пластин КДК можно найти в ряде источников [6–8].

При всех положительных качествах структурам КДК свойственны следующие недостатки:

- при формировании измерительной схемы на основе приборного слоя методами фотолитографии и травления необходимо создать на поверхности приборного слоя защитный слой из оксида кремния. При этом приборный слой кремния имеет толщину до нескольких микрон, и каждый процесс окисления при таких размерах будет существенно уменьшать толщину слоя [9], что может сказаться на электрических характеристиках формируемых элементов;
- кремниевые кристаллы чувствительных элементов акселерометров формируются двусторонним травлением пластин. При этом наличие в структуре пластин скрытого слоя диоксида кремния, несимметрично расположенного по отношению к планарной и непланарной стороне пластины, требует различного подхода к травлению с планарной и непланарной стороны, а именно: травление приборного слоя кремния – скрытого оксида – травление опорной пластины с планарной стороны, травление опорной пластины с непланарной стороны. Необходимо введение промежуточной операции травления скрытого слоя оксида кремния в технологический маршрут изготовления, что снижает его технологичность;
- отсутствие пластин КДК надлежащего качества на российском рынке является сдерживающим фактором развития высокотемпературных приборов в целом;
- при желании наладить собственное производство пластин КДК разработчики и технологи столкнутся с необходимостью наличия сложного специализированного дорогостоящего оборудования и необходимостью длительной отработки технологий формирования структур КДК.

Карбид кремния

Карбид кремния SiC имеет ширину запрещенной зоны 2,3–3,4 эВ, что значительно больше, чем у кремния, высокую электрическую прочность ($30 \cdot 10^5$ В/см), высокую теплопроводность (3,2–4,9 Вт/см·К). Благодаря этому карбид кремния становится незаменимым материалом при создании устройств, работоспособных в экстремальных условиях: повышенная температура, радиация, сильные электрические поля, высокие механические напряжения. Теоретически карбидокремниевые приборы могут достигать рабочего температурного диапазона до 1000 °С [10]. При этом карбид кремния имеет меньший коэффициент тензочувстви-

тельности по сравнению с объемным монокристаллическим кремнием (30 и 90 соответственно). Примеры реализации микромеханических пьезорезистивных акселерометров на основе карбида кремния представлены в работах [11, 12].

При использовании в качестве основного материала карбида кремния в производстве микромеханических акселерометров можно добиться значительного повышения температурного диапазона (до 600 °С), устранить паразитные токи утечки. При этом карбид кремния имеет следующие недостатки:

- коэффициент тензочувствительности карбида кремния практически в три раза меньше, чем у объемного монокристаллического кремния. Как следствие, нижний диапазон измерений приборов на карбиде кремния будет в три раза выше, чем у образцов, изготовленных из монокристаллического кремния;
- сложность ионного легирования карбида кремния до значений, оптимальных для построения измерительных схем и последующего термического отжига;
- сложность термического окисления поверхности карбида кремния для создания защитных масок при травлении и легировании;
- способность карбида кремния к травлению только методом глубокого реактивно-ионного травления подразумевает наличие сложного дорогостоящего оборудования в технологической производственной линейке;
- отсутствие приемлемых по качеству пластин карбида кремния на российском рынке также является сдерживающим фактором развития высокотемпературных приборов в целом.

Недостатки монокристаллического кремния, структур КДК и карбида кремния при формировании пьезорезистивных акселерометров диктуют необходимость нахождения компромиссных вариантов конструктивно-технологических решений чувствительных элементов, работоспособных при температурах выше 100 °С. Такие решения должны использовать положительные качества описанных выше материалов и структур: отличные упругие свойства кремния как конструкционного материала, возможность изоляции измерительной схемы от подложки, технологичность при изготовлении.

В технологии микромеханических приборов, таких как датчики давления, известны конструктивно-технологические решения формирования измерительной схемы из легированного поликристаллического кремния на окисленной кремниевой подложке [13]. В этом варианте пьезорезисторы мостовой схемы изолированы от подложки слоем двуоксида кремния, что позволяет повысить температурный диапазон измерений до +120 °С.

Данные конструктивно-технологические решения могут быть положены в основу разработки кремниевых микромеханических чувствительных элементов акселерометров пьезорезистивного типа с расширенным до + 120 °С температурным диапазоном измерений [14]. При этом требуется новый подход к разработке технологического маршрута изготовления, так как отличия в конструкции чувствительных элементов датчиков давления и акселерометров существенны, чувствительные элементы акселерометров имеют более сложную конструкцию (рис. 3).

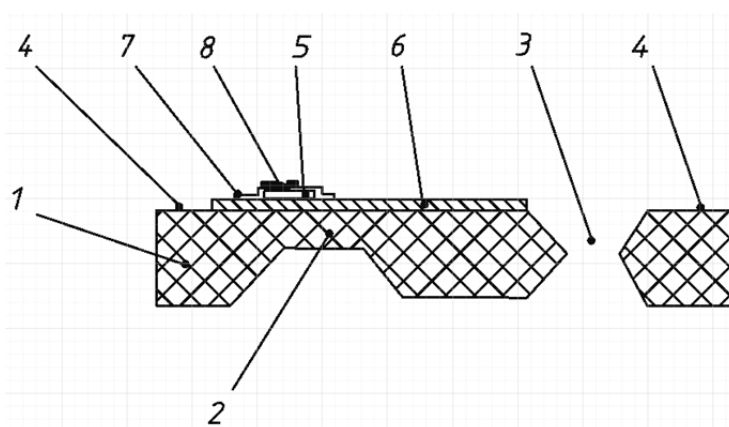


Рис. 3. Кристалл чувствительного элемента микромеханического акселерометра на основе поликремниевых пьезорезисторов: 1 – кремниевый кристалл; 2 – упругая переемычка; 3 – сквозное отверстие между инерционной массой и рамкой кристалла; 4 – области под электростатическое соединение кристалла со стеклянными деталями; 5 – поликремниевый пьезорезистор; 6 – слой термически выращенного оксида кремния на поверхности кремниевой пластины; 7 – защитный слой оксида кремния на поверхности пьезорезисторов; 8 – металлизация

Заключение

Очевидно, что чувствительность акселерометров на основе поликристаллического кремния будет ниже, чем при использовании монокремния, поэтому необходим поиск компромиссных вариантов конструктивно-технологических решений, позволяющих добиться оптимального соотношения между чувствительностью (что и определит диапазон измерения) и температурным диапазоном измерений.

Данная задача требует решения таких вопросов, как выбор технологии формообразования кристалла чувствительного элемента (анизотропное либо плазмохимическое травление кремния), геометрии упругой перемычки (профиля) и инерционной массы, выбор оптимального расположения пьезорезисторов на профиле кристалла, защита измерительной схемы при формообразовании кристалла, выбор метода разделения пластины на кристаллы и т.п.

Компромиссные варианты конструктивно-технологических решений позволят создать кремниевые пьезорезистивные чувствительные элементы с увеличенным до 120 °С температурным диапазоном измерений, технологичные при изготовлении, что в итоге позволит создавать микромеханические акселерометры с улучшенными выходными параметрами.

Список литературы

1. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Баринов, И. Н. Использование тензорезисторов меза-типа в датчиках давления для систем управления и контроля / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 9–15.
3. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
4. Баринов, И. Н. Высокотемпературные тензорезистивные датчики давлений на основе карбида кремния. Состояние разработок и тенденции развития / И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 64–71.
5. Анализ преимуществ, перспектив применений и технологий производства структур КНИ : препринт ИТЭФ 27–00 / А. Л. Суворов, Ю. А. Чаплыгин, С. П. Тимошенко, Е. П. Прокопьев. – М., 2000. – 51 с.
6. Makoto Ishida. SOI sensors and epitaxial MEMS // J. Indian Inst. Sci. – 2001. – Nov. – Dec. – Vol. 81. – P. 619–626.
7. Расчет параметров тестовой структуры МЭМС-акселерометра, изготовленного с использованием КНИ-пластин / И. В. Годовицын, Д. А. Сайкин, Р. А. Федоров, В. В. Амеличев, П. П. Мальцев // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 12. – С. 39–45.
8. Chia-Pao Hsu. Implementation of a gap-closing differential capacitive sensing Z-axis accelerometer on an SOI wafer / Chia-Pao Hsu, Ming-Chuen Yip and Weileun Fang // J. Micromech. Microeng. – 2009. – Vol. 19. – P. 1–7.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2-х кн. ; пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – Кн. 1. – 456 с.
10. Sadow, S. E. Advances in Silicon Carbide. Processing and Applications / Stephen E. Sadow, Anant Agarwal. – Artech House, Inc., 2004. – P. 435.
11. Voican, C. Design considerations 6H-SiC piezoresistive accelerometers / Cristiana Voican, Constantin D. Stanescu // Fascicle of Management and Technological Engineering. – 2007. – Vol. VI (XVI). – P. 792–796.
12. Nieva, P. M. New Trends on MEMS Sensor Technology for Harsh Environment Applications / Patricia M. Nieva // Sensors & Transducers Journal. – 2007. – Special Issue – October. – P. 10–20.
13. Патент 2504866 Российская Федерация, МПК H01L29/84. Интегральный тензопреобразователь ускорения / Пауткин В. Е. – № 2012122850/28 ; заявл. 01.06.2012 ; опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2.

Абдуллин Фархад Анварович

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: farhad_58@mail.ru

Abdullin Farkhad Anvyarovich

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

Пауткин Валерий Евгеньевич

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

Pautkin Valeriy Evgen'evich

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

УДК 681.586'325'773

Абдуллин, Ф. А.

Технологические особенности формирования кремниевых пьезорезистивных акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений / Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 118–123.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 681.5.08

А. П. Писарев, М. А. Писарев

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ДАТЧИКА ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ

A. P. Pisarev, M. A. Pisarev

METHOD FOR INCREASING LEVEL OF THE PULSE WAVE SENSOR OUTPUT SIGNAL

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Определены задачи по снижению случаев смертности в результате заболеваний сердечно-сосудистой системы. Сформулирована задача о необходимости разработки эффективных систем неинвазивного мониторингового контроля состояния сердечно-сосудистой системы с использованием гидроманжеты. *Материалы и методы.* Рассмотрен способ увеличения амплитуды сигнала на выходе датчика давления, воспринимающего пульсовые колебания через камеру с жидкостью, помещенную между манжетой и участком мягких тканей конечности. Конструкция измерителя дополняется камерой с жидкостью, через которую датчик воспринимает изменения давления в мягких тканях. *Результаты.* Повышение точности обеспечивается за счет увеличения отношения сигнал/шум, благодаря чему можно более точно оценить состояние состояния сердечно-сосудистой системы. Кроме того, полностью снимается проблема позиционирования датчика относительно артерии. Предложен алгоритм вычисления значений артериального давления косвенно через значения давления пульсовых колебаний. Преимущество алгоритма перед известным состоит в том, что отпадает необходимость автоматического регулирования силы прижатия датчика к артерии. *Выводы.* Сделан вывод о возможности косвенного измерения артериального давления путем его вычисления из уравнения по измеренному значению давления в мягких тканях.

A b s t r a c t. *Background.* Considered tasks to reduce mortality cases due cardiovascular system diseases. Proposed problem of development effective systems for non-invasively CAS monitors with liquid cuff. *Materials and methods.* Considered method of increasing amplitude of pressure sensor output signal. The sensor is used to determine pulse oscillation through the liquid chamber interposed between the cuff and the portion. The design of the meter is supplemented with the liquid chamber, through which the sensor senses pressure changes in the soft tissues. Improved accuracy is ensured by increasing the signal / noise ratio, so you can more accurately assess the state of the CVS. In addition, completely eliminated the problem of positioning the sensor relative to an artery. *Results.* Proposed an algorithm for computing values of blood pressure indirectly through the pressure pulse fluctuations. The advantage over the know algorithms is eliminated necessity for automatic control of the sensor's pressing force to the artery. *Conclusions.* Made conclusion about the possibility of measuring blood pressure indirectly by its calculation from equation of the measured soft tissues pressure value.

К л ю ч е в ы е с л о в а: мониторинг, сердечно-сосудистая система (ССС), датчик, артериальное давление, пульсовые колебания, повышение точности измерения.

К e y w o r d s: monitoring, cardiovascular system (CVS), sensor, blood pressure, pulse oscillation, improving the accuracy of measurement.

Заболевания сердечно-сосудистой системы (ССС) остаются ведущей причиной смертности. По статистике, в большинстве экономически развитых стран заболевания сердечно-сосудистой системы занимают первое место среди причин смертности. В Европе ежегодно умирают от сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) приблизительно 3 млн человек, в США – 1 млн, в России с 2000 г. ежегодно от ССЗ умирает 2,3 млн человек [1]. Половина тех, кто умирает от болезней сердца, это люди активного и трудоспособного возраста. В последнее время наметилась крайне опасная тенденция, когда сердечно-сосудистые болезни поражают россиян в возрасте от 20 лет. Кроме того, обращает на себя внимание тот факт, что показатели смертности от этих заболеваний в странах Европы составляют в разы меньше, чем в России. Показатель смертности только от ишемической болезни сердца у нас составляет 112 человек на 100 тысяч, а в странах Европы – не более 30 человек на те же 100 тысяч [2].

Основная причина ССЗ – это атеросклероз сосудов и гиперхолестеринемия, которые приводят к развитию ишемической болезни сердца, инфарктам и инсультам с летальным исходом. Все это на ранней стадии поддается лечению, состояние больных стабилизируется, в итоге это позволяет увеличить продолжительность жизни и активное физическое состояние. Для своевременного диагностирования перечисленных заболеваний необходим мониторинг показателей сердечно-сосудистой системы.

В медицине критических состояний диагностика функционирования этой системы занимает одно из главных мест, так как деятельность сердечно-сосудистой системы во многом определяет эффективность протекания процессов метаболизма, переноса кислорода и углекислого газа, терморегуляции.

Оценка деятельности сердечно-сосудистой системы при мониторинге осуществляется путем регистрации механических, акустических и биоэлектрических проявлений сердечной деятельности, наиболее доступных для регистрации. Среди показателей центральной и периферической гемодинамики наибольшую ценность представляют параметры сердечного ритма, артериального и венозного давления крови, сердечного выброса.

Важно своевременно выявить критические состояния у лиц, страдающих ССЗ, т.е. необходима разработка новых и совершенствование существующих методов мониторинга состояния ССС. Сейчас эффективный мониторинг состояния ССС возможен лишь для больных, находящихся в стационарных условиях под постоянным врачебным контролем.

Современным эффективным методом мониторинга является осциллометрический метод измерения формы пульсовой волны [3]. Форма пульсовой волны регистрируется с помощью пневматического датчика давления, подключенного к окклюзионной манжете. При проведении измерений манжета накладывается на конечность пациента и накачивается до необходимого давления. Сигнал пульсовой волны регистрируется под манжетой, что вносит значительную погрешность в результат измерений его формы.

Таким образом, актуальной задачей совершенствования медицинской техники является создание эффективных систем неинвазивного мониторингового контроля состояния ССС. Отсутствие таких систем делает практически неразрешимой задачу получения профиля изменения артериального давления (АД) и состояния ССС у больного в процессе диагностического или терапевтического воздействия.

Основным препятствием, возникающим при попытке использовать для мониторинга состояния ССС существующие измерители, является наличие у них окклюзионной манжеты.

Настоятельная необходимость в безманжетных средствах для мониторингового неинвазивного состояния ССС стимулирует непрекращающиеся попытки создания подобной аппаратуры. В основе опытных разработок этого направления лежат исследования возможностей использования тех или иных функциональных зависимостей, которые могли бы связывать величину АД с каким-либо физиологическим параметром, регистрируемым неинвазивно. Таким параметром является давление выходящей близко к поверхности кожи артерии, воспринимаемое датчиком давления. Большим недостатком этого метода является высокая «критичность» к точности расположения тонометрического датчика по отношению к артерии, в связи с чем использование его требует профессионального навыка. Один из возможных путей создания прибора, реализующего данный метод – использование гидроманжеты. Схематично предлагаемая конструкция показана на рис. 1. Особенность конструкции в том, что под манжетой помещена камера, представляющая собой полость, заполненную жидкостью [4]. Через камеру датчик воспринимает давление, возникающее в мягких тканях конечности под действием пульсирующей артерии. За счет манжеты в мягких тканях создается некоторое началь-

ное давление, которое будем обозначать через $P_{\text{мт}0}$. Поскольку манжета прижимает камеру к мягким тканям, то начальное давление в камере также равно $P_{\text{мт}0}$.

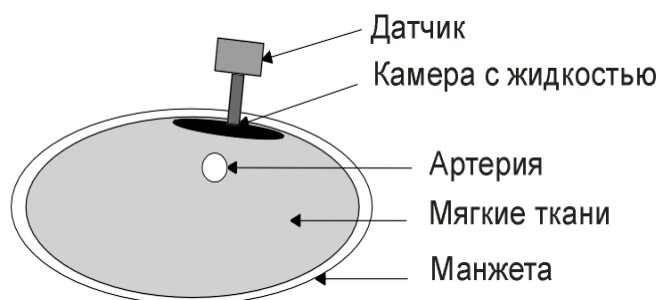


Рис. 1. Использование гидроманжеты

К камере подключен датчик. Камера и конечность охвачены окклюзионной манжетой. Рассмотрим поведение системы относительно свойства сжимаемости мягких тканей.

Первое условие:

$$P_{\text{мт}0} = P_{\text{ан}}. \quad (1)$$

Мягкие ткани несжимаемы (такое предположение не соответствует свойству мягких тканей, но оно полезно для понимания процессов, происходящих при сдавливании мягких тканей манжетой).

В этом случае датчик давления воспринимает давление, развиваемое в мягких тканях.

Для того чтобы понять, как изменяется давление мягких тканей при изменении артериального давления, посмотрим на график зависимости объема артерии от избыточного давления внутри нее рис. 2 [5]. При артериальном давлении $P_a(t) = P_{\text{ан}}$ объем артерии $V_a = V_{a0}$. Данному значению объема артерии соответствует точка на кривой объемного расширения, соответствующая избыточному давлению:

$$\Delta P = P_a(t) - P_{\text{мт}}(t) = P_a(t) - P_{\text{мт}0} = P_{\text{ан}} - P_{\text{ан}} = 0;$$

при возрастании артериального давления имеем

$$P_{\text{мт}}(t) = P_a(t). \quad (2)$$

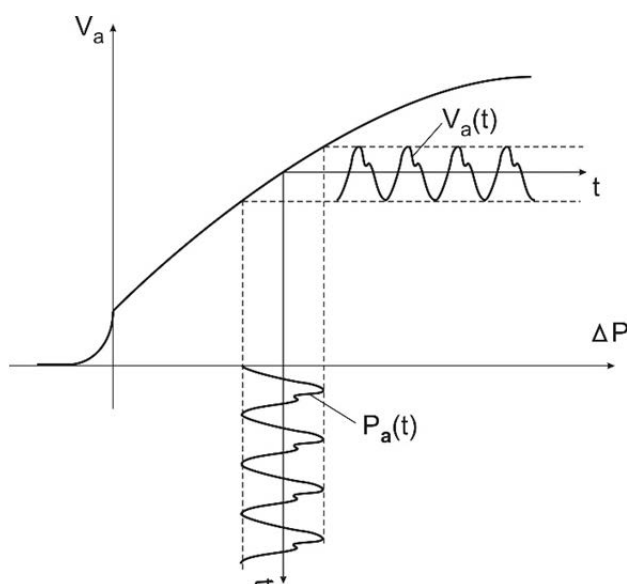


Рис. 2. График зависимости объема артерии от избыточного давления

Поскольку объем манжеты не меняется, мягкие ткани, по предположению, не сжимаются, а стенки артерии не напряжены, то, если под манжету поместить полость с жидкостью, с которой сообщается датчик, артериальное давление можно измерять непосредственно датчиком.

Второе условие:

$$P_{\text{мт}0} < P_{\text{ан}} \quad (3)$$

В предположении, что мягкие ткани не сжимаются, имеем результат, как при первом условии.

Третье условие:

$$P_{\text{мт}0} > P_{\text{ан}} \quad (4)$$

Здесь в предположении о несжимаемости мягких тканей картина изменения давления мягких тканей будет соответствовать рис. 3. Когда артериальное давление $P_a(t)$ выше начального значения $P_{\text{мт}0}$ давления мягких тканей (заданного начальным сжатием манжеты), давление мягких тканей повторяет артериальное давление. На участках, где $P_a(t) < P_{\text{мт}0}$, артерия схлопывается, и давление мягких тканей под манжетой падает до атмосферного давления (так как суммарный объем трех сред – мягких тканей, артерии и полости с жидкостью – становится меньше объема манжеты). Таким образом, если бы мягкие ткани конечности действительно были бы несжимаемы, то при условии

$$P_{\text{мт}0} \leq P_{\text{ан}} \quad (5)$$

будет возможно прямое измерение артериального давления с помощью датчика, воспринимающего давление от полости с жидкостью, помещенной под манжету, с учетом реальных свойств мягких тканей, т.е. с учетом того, что часть мягких тканей вытесняется из-под манжеты при повышении давления, что определяется конструкцией манжеты. Это позволит повысить точность измерения формы пульсовой волны при реализации традиционного способа. При этом конструкция измерителя дополняется камерой с жидкостью, через которую датчик воспринимает изменения давления в мягких тканях [6]. Повышение точности обеспечивается за счет увеличения отношения сигнал/шум, благодаря чему можно более точно оценить состояние ССС. Кроме того, полностью снимается проблема позиционирования датчика относительно артерии.

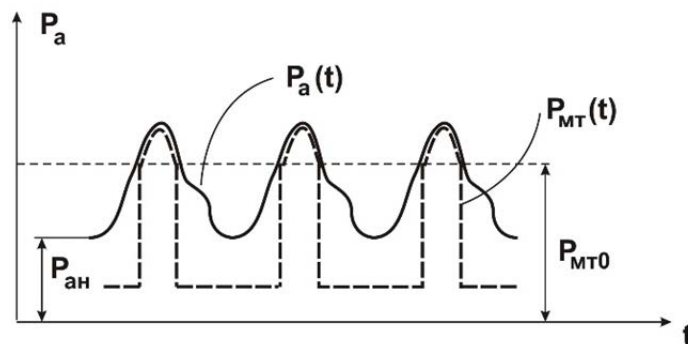


Рис. 3. Картина изменения давления мягких тканей

Для устранения необходимости автоматически регулировать силу прижатия датчика к артерии предлагается алгоритм тонометрического измерения АД, позволяющий определять величину систолического и диастолического значений АД при произвольном значении силы прижатия датчика к артерии.

На рис. 1 была представлена рассмотренная нами схема измерителя, где камера с жидкостью воспринимает давление мягких тканей конечности. Рассмотрим осциллограммы процессов, происходящих в системе «артерия – мягкие ткани конечности – камера – манжета» и представленных на рис. 4, где изображены кривые изменения артериального давления и давления в мягких тканях конечности при двух значениях внешнего компенсирующего давления, создаваемого окклюзионной манжетой. Обратимся к верхней осциллограмме, где показаны соответствующие кривые для случая, когда внешнее компенсирующее давление существенно меньше нижнего значения артериального давления. Справа показана кривая зависимости объема артерии V_a от избыточного давления $P_a - P_{\text{мт}}$.

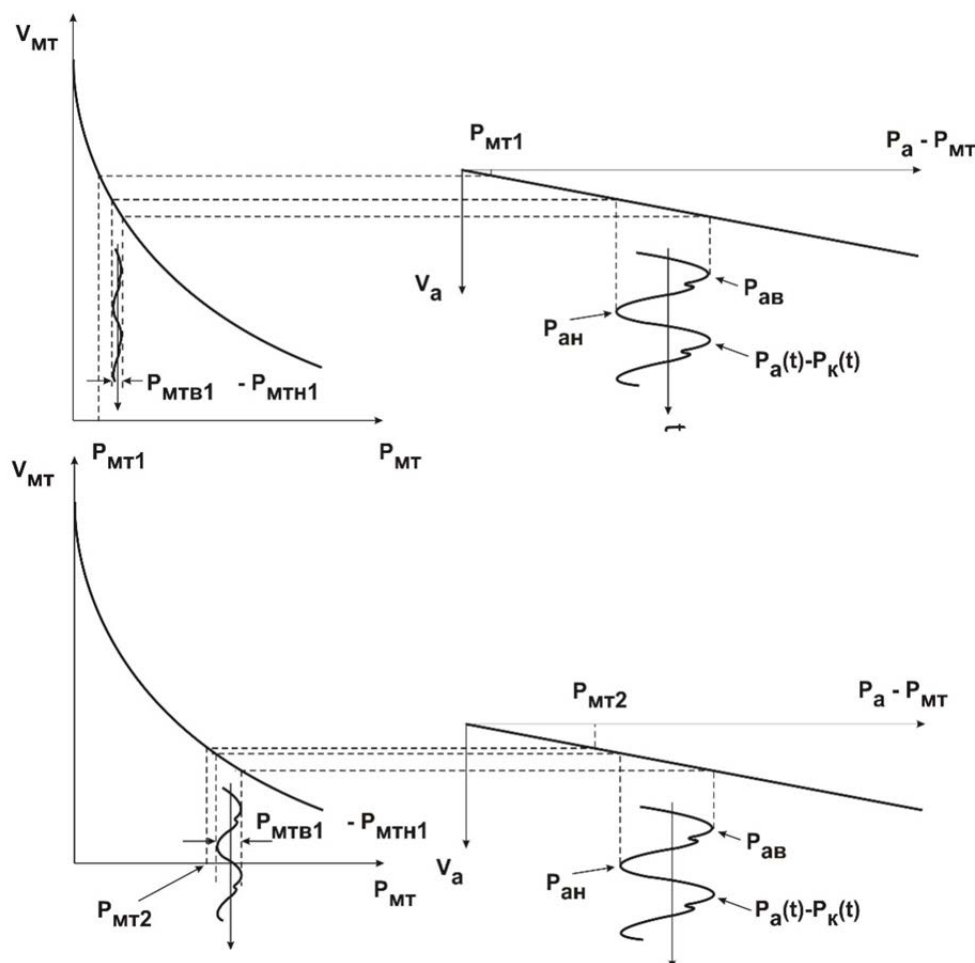


Рис. 4. Кривые изменения артериального давления и давления в мягких тканях

Зависимость в действительности носит более сложный характер [7], но поскольку нас в данном случае интересует только область положительных значений избыточного давления, то с достаточно хорошим приближением к реальной кривой в данной области значений избыточного давления зависимость может рассматриваться как линейная. Как видно из рис. 4, изменение артериального давления приводит к соответствующему изменению объема артерии, причем в силу принятого предположения о линейности зависимости $V_a = F_a (P_a - P_{MT})$ амплитуда изменения объема артерии остается неизменной при любом значении внешнего компенсирующего давления в пределах от 0 до $P_{ан}$, где $P_{ан}$ – нижнее значение артериального давления.

Изменение объема артерии приводит к соответствующему изменению объема мягких тканей конечности, так как предполагается, что манжета изготовлена из материала, не подверженного растяжению, т.е. при каждом данном значении P_{Ki} внешнего компенсирующего давления соблюдается соотношение

$$V_{MT} + V_a = V_{Mi} = \text{const}, \quad (6)$$

где V_{Mi} – объем пространства под манжетой при i -м значении P_{Ki} компенсирующего давления. Из выражения (6) и следует справедливость сказанного:

$$V_{MT} = V_{Mi} - V_a. \quad (7)$$

Слева на верхней осциллограмме на рис. 4. приведена зависимость объема мягких тканей конечности от давления их сжатия манжетой. Как показали экспериментальные исследования [8], эта зависимость носит нелинейный характер, причем, очевидно, что изменение объема мягких тканей под действием сжимающего давления объясняется не столько свойством их сжимаемости, сколько эффектом вытеснения части мягких тканей из-под манжеты. Согласно выражению (7) изменение артериального давления приводит к изменению объема мягких тканей при каждом значении внешнего компенсирующего давления. В конечном итоге изменение артери-

ального давления приводит к соответствующему изменению давления мягких тканей, которое собственно и воспринимается датчиком давления, подключенным к камере с жидкостью [9].

С учетом зависимости объема мягких тканей от воздействующего на них давления обратную зависимость в общем виде можно записать в следующем виде:

$$P_{\text{MT}} = F_{\text{MT}}(V_{\text{MT}}). \quad (8)$$

Подставим выражение (7) в (8):

$$P_{\text{MT}} = F_{\text{MT}}(V_{\text{Mi}} - V_{\text{a}}). \quad (9)$$

С учетом принятого предположения о характере кривой объемного расширения артерии можем записать:

$$V_{\text{a}} = m(P_{\text{a}} - P_{\text{MT}}), \quad (10)$$

где m – некоторый коэффициент (постоянный для каждого конкретного индивидуума).

Подставим выражение (10) в выражение (9):

$$P_{\text{MT}} = F_{\text{MT}}(V_{\text{Mi}} - m(P_{\text{a}} - P_{\text{MT}})). \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой уравнение, из которого следует однозначная связь давления в мягких тканях и артериального давления. Следовательно, существует принципиальная возможность косвенного измерения артериального давления путем его вычисления из уравнения по измеренному значению давления в мягких тканях. Преимущество алгоритма в том, что отпадает необходимость автоматического регулирования силы прижатия датчика к артерии [10]. Это упрощает схему и конструкцию измерителя, в результате открывается перспектива существенного усовершенствования тонометрического метода измерения.

Список литературы

1. URL: <http://apps.who.int/gho/data/node.main.PROJNUMWORLD?lang=en>
2. Физиология человека : учебник / под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротько. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Медицина, 2003. – 656 с.
3. Писарев, М. А. Метод повышения уровня выходного сигнала датчика давления / М. А. Писарев // Вычислительные системы и технологии обработки информации : межвуз. сб. науч. тр. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2010. – С. 126–133.
4. Физиология человека : учебник / под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротько. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Медицина, 2003. – 656 с.
5. Рогоза, А. Н. К вопросу о точности измерения АД автоматическими приборами / А. Н. Рогоза // Функциональная диагностика. – 2003. – № 1. – С. 2–10.
6. Шахов, Э. К. Моделирование процесса измерения артериального давления / Э. К. Шахов, А. И. Сухов // Вычислительные системы и технологии обработки информации : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 2 (28). – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2003. – С. 18–29.
7. Геращенко, М. С. Гидроманжетный тонометр / М. С. Геращенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 308–309.
8. Шахов, Э. К. Простейшая модель тонометра / Э. К. Шахов, А. И. Сухов // Вычислительные системы и технологии обработки информации : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 2 (28). – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2003. – С. 30–37.
9. Патент 104437 Российская Федерация, МПК А61В. Тонометр Геращенко / Геращенко М. С. – Оpubл. 20.05.2011. – URL: <http://bankpatentov.ru/node/78436> (дата обращения 05.05.2015).
10. Абросимова, О. В. Разработка информационно-измерительного устройства регистрации артериального давления с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром / О. В. Абросимова, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 119–127.

Писарев Аркадий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: pisarev602@mail.ru

Pisarev Arkadiy Petrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information computer systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Писарев Максим Аркадьевич

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

Pisarev Maksim Arkad'evich

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

УДК 681.5.08

Писарев, А. П.

Метод повышения уровня выходного сигнала датчика пульсовой волны / А. П. Писарев,
М. А. Писарев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 124–130.

С. А. Балахонова, О. Н. Бодин, Д. С. Логинов, Е. А. Ломтев, М. И. Сафронов

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СЕРДЦА

S. A. Balahonova, O. N. Bodin, D. S. Loginov, E. A. Lomtev, M. I. Safronov

ORGANIZATION OF THE DISTRIBUTED HEART STATE DIAGNOSIS SYSTEM

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Предметом исследования являются неинвазивные методы автоматической оценки состояния сердца, основанные на применении портативных кардиоанализаторов совместно с «облачным» сервисом хранения и обработки данных пациентов из группы риска сердечно-сосудистых заболеваний. Целью исследования является обоснование подхода к разработке распределенной системы автоматической оценки состояния сердца. *Материалы и методы.* Используются методы автоматической оценки состояния сердца, методы разработки медицинских информационных систем и распределенных баз данных. *Результаты.* В рамках трехзвенной структуры распределенной системы автоматической оценки состояния сердца рассмотрено информационное взаимодействие, предложены алгоритмы работы, отвечающие современным требованиям к безопасности и отказоустойчивости. Распределенная система автоматической оценки состояния сердца, основанная на взаимодействии персональных кардиоанализаторов и ресурсов облачного сервиса для автоматической оценки состояния сердца, позволяет производить своевременную диагностику состояния пациента, своевременно осуществлять вызов скорой помощи и предоставлять специалистам всю необходимую информацию о пациенте. *Выводы.* На современном этапе развития науки и техники все большее значение принимают информационные технологии. При этом внимание фокусируется на IT-технологиях, совмещающих в себе мобильность и возможность удаленной работы практически из любой точки мира. Согласно этим тенденциям необходимо модернизировать и подходы к оценке состояния сердца. Функциональные возможности разработанной распределенной системы автоматической оценки состояния сердца заключаются: в оценке состояния сердца на сервере компьютерной диагностической системы «Кардиовид»; предоставлении удаленного доступа к данным пациента; вызове скорой помощи к местоположению пациента в случае необходимости.

A b s t r a c t. *Background.* The subject of the study are non-invasive methods of automatic evaluation of heart condition, based on the use of portable cardiological together with the "cloud" storage and data processing service patients at risk of cardiovascular disease. The aim of the study is to validate the approach to the development of a distributed system of automatic evaluation of heart condition. *Materials and methods.* The article uses the methods of automatic evaluation of heart condition, the development of methods of health information systems and distributed databases. *Results.* Within the three-tier structure of the automatic evaluation of the heart condition of the distributed system, consider the information interaction, algorithms of work, corresponding to modern requirements for security and resiliency. Distributed system of automatic evaluation of heart condition, based on the interaction between personal resources and cardiological cloud service for automatic evaluation of heart condition, allows timely diagnosis of the patient's condition, make timely call an ambulance and provide experts with all the necessary information about the patient. *Conclusions.* At the present stage of development of science and technology are increasingly important information technology. At the same time, more attention is focused on IT-technologies that combine mobility and the ability to work remotely from virtually anywhere in the world. According to these trends is necessary to modernize and approaches to assessing the state of the heart. The functionality of a distributed sys-

tem developed automatic evaluation of heart condition are to: Assessing the state of the heart on the server computer diagnostic system (CDS) "Kardiovid"; Providing remote access to patient data; First aid to the patient's location when necessary.

К л ю ч е в ы е с л о в а: распределенная информационная система, облачный сервис, диагностика состояния сердца.

К e y w o r d s: distributed system, cloud service, heart state diagnosis.

Ежегодно в России свыше 1 млн человек умирают вследствие заболеваний, связанных с работой сердца. Среди трудоспособного населения в зоне риска находятся свыше 10 млн человек, в том числе спортсмены, военные, работники тяжелого физического труда, лица, перенесшие операцию на сердце, а также страдающие хроническими обострениями в работе сердца и др. Современные медицинские учреждения, связанные с лечением заболеваний сердца (центры сердечно-сосудистой хирургии), позволяют вылечить как медикаментозным, так и хирургическим способом большинство пациентов даже с критическими отклонениями в работе сердца. Удачный сценарий лечения возможен только при своевременном обращении в скорую помощь либо в соответствующее лечебно-профилактическое учреждение. Однако очень часто ухудшение работы сердца возникает внезапно, и больной не успевает обратиться за помощью. Несмотря на то, что внезапному ухудшению работы сердца предшествует возникновение различных сбоев в работе организма, в том числе и сердца, больной, как правило, заранее не может предвидеть резкое ухудшение, и решение обратиться за помощью приходит с большим запозданием.

По мнению авторов, своевременная диагностика состояния сердца позволила бы в большинстве случаев минимизировать риск внезапного ухудшения работы сердца и не доводить состояние здоровья пациента до необходимости хирургического способа лечения в тех случаях, когда можно было бы обойтись курсом медикаментозного лечения либо скорректировать для пациента режим труда и отдыха.

Работа авторов направлена на улучшение своевременности диагностики состояния сердца путем использования портативных кардиоанализаторов (ПКА) совместно с использованием ресурсов облачного сервиса для автоматического анализа показаний работы сердца. Помимо этого, работа направлена на повышение оперативности вызова службы скорой помощи при диагностике критического состояния сердца, а также на улучшение качества оказания помощи пациенту путем предоставления врачу данных по состоянию сердца, собранных облачным сервисом КДС «Кардиовид».

Для достижения указанных целей авторами предложена схема организации распределенной системы диагностики состояния сердца (рис. 1).

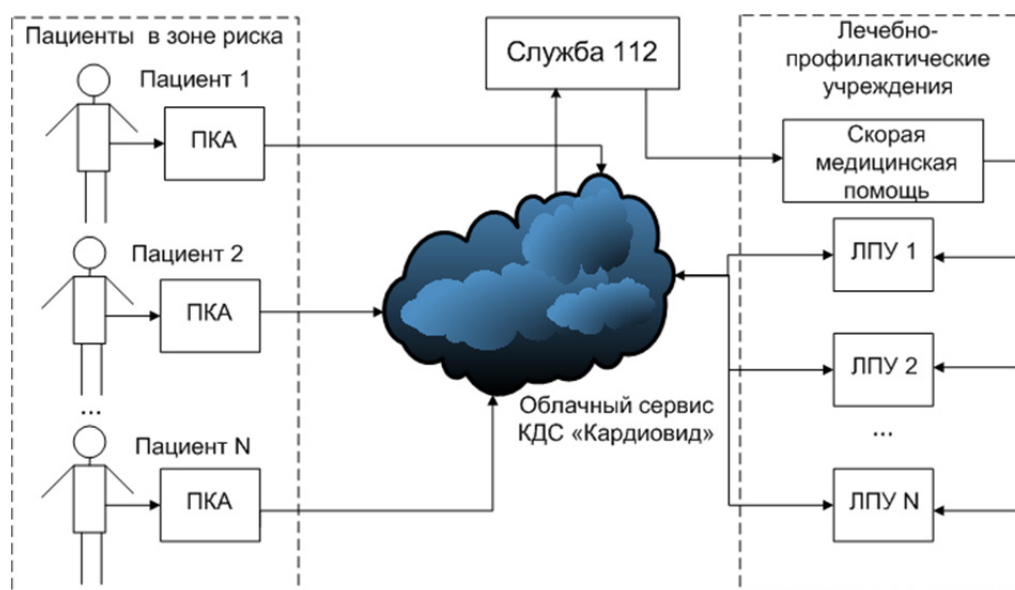


Рис. 1. Организация распределенной системы диагностики состояния сердца

На рис. 1 приведены следующие элементы:

- а) ПКА – портативные кардиоанализаторы, которыми предлагается оснащать пациентов, находящихся в зоне риска;
- б) ЛПУ – любые лечебно-профилактические учреждения, оснащенные медицинскими информационными системами (МИС);
- в) служба 112 – единая система взаимодействия экстренных оперативных служб при реагировании на происшествия и чрезвычайные ситуации;
- г) скорая медицинская помощь – вид медицинской помощи, оказываемой гражданам при заболеваниях, несчастных случаях, травмах, отравлениях и других состояниях, требующих срочного медицинского вмешательства;
- д) облачный сервис КДС «Кардиовид» – система, обеспечивающая предоставление облачных услуг, связанных с диагностикой состояния сердца пациентов.

По мнению авторов, актуальность приведенной схемы обусловлена следующими факторами:

1. В настоящее время активно осуществляются разработки портативных устройств, позволяющих производить оценку состояния сердца, в том числе в условиях свободной двигательной активности. Одним из таких устройств является портативный кардиоанализатор [1], состоящий из устройства регистрации параметров работы сердца и смартфона, который принимает информацию от устройства регистрации и осуществляет автоматическую экспресс-диагностику состояния сердца.

По мнению авторов, применение устройств данного типа совместно с облачным сервисом КДС «Кардиовид» является перспективным направлением развития медицинской техники, поскольку данные устройства оснащены большим количеством интерфейсов (GSM, GPRS, GPS/ГЛОНАСС, SMS и др.), благодаря чему легко решаются задачи сетевого взаимодействия с сервисом КДС.

2. Увеличивается доля лечебно-профилактических учреждений, в основе функционирования которых лежит использование медицинских информационных систем, позволяющих в максимальной степени структурировать информационные процессы, происходящие в ЛПУ. МИС обеспечивают: работу с электронной историей болезни (ЭИБ) [2] и учет связанных с ЭИБ процессов, взаимодействие с различной медицинской аппаратурой, организацию документооборота и бухгалтерского учета ЛПУ. Представить себе современное эффективное ЛПУ без МИС уже невозможно. Преимуществом использования МИС является развитая сетевая инфраструктура, в том числе наличие каналов защищенной цифровой связи с Интернет, что позволяет организовать взаимодействие между несколькими ЛПУ, а также между ЛПУ и облачным сервисом КДС «Кардиовид».

3. В последнее время благодаря федеральной целевой программе «Служба 112» [3] повышается оснащенность экстренных служб современными информационными технологиями, в том числе: использование центров обработки данных для записи и учета всех обращений от граждан и различных служб, возможность применения средств фиксации обращений с различных датчиков (мониторинга пожарной безопасности, климата, загрязнения и т.д.). При наличии средств автоматической фиксации обращений о критическом состоянии сердца пациента, исходящих от портативных кардиоанализаторов, в рамках службы 112 можно было бы организовать вызов службы скорой медицинской помощи по координатам, предоставляемым кардиоанализаторами.

Как видно из рис. 1, центральным элементом схемы организации распределенной системы диагностики состояния сердца является облачный сервис КДС «Кардиовид» – система, обеспечивающая предоставление через Интернет услуг, связанных с диагностикой состояния сердца пациентов, и разрабатываемая с учетом бизнес-модели SaaS [4]. К функциям облачного сервиса КДС «Кардиовид» относятся:

- а) прием информации с ПКА о состоянии сердца пациента;
- б) анализ принятой информации;
- в) вызов службы скорой медицинской помощи в случае диагностики критического состояния сердца пациента;
- г) опрос ЛПУ, оснащенных МИС и зарегистрированных в базе данных сервера, с целью получения актуальных данных об истории болезни пациента;
- д) предоставление собранных данных о пациенте в ЛПУ, в котором осуществляются меры по лечению пациента.

Схема организации облачного сервиса КДС «Кардиовид» представлена на рис. 2.



Рис. 2. Организация облачного сервиса КДС «Кардиовид»

Как видно из рис. 2, сервис КДС «Кардиовид» представляет собой сложную распределенную систему, состоящую из множества серверов, часть из которых является внутренними (функциональными) и недоступны для сетевых обращений из внешнего мира, а часть серверов является внешними (транзитными) и служит для организации сетевого взаимодействия между клиентами (ПКА, ЛПУ и прочие) и активным функциональным сервером.

Рассмотрим отличительные особенности схемы организации облачного сервиса КДС «Кардиовид»:

а) **распределенность**. Облачный сервис КДС «Кардиовид» может быть развернут одновременно на нескольких виртуальных или физических серверах как на собственном серверном оборудовании, так и в различных дата-центрах. Сервера КДС «Кардиовид» подразделяются на **внутренние** (функциональные) и **внешние** (транзитные). На внутренних серверах работает функциональная часть системы, в которой хранятся данные и выполняется их обработка. Взаимодействовать с внутренними серверами могут только внешние сервера по заранее определенным протоколам обмена данными. Возможность выполнять запросы напрямую к внутренним серверам отсутствует, благодаря чему исключена возможность организации DDOS-атак на функциональную часть системы;

б) **репликация**. В один момент времени только один из функциональных серверов КДС «Кардиовид» является **активным**, а все остальные – **резервными**. Транзитные сервера могут взаимодействовать только с активным функциональным сервером. Однако в любой момент времени резервный сервер может начать выполнять функции активного сервера, например, если в аппаратном или программном обеспечении предыдущего активного сервера произошел сбой. К этому моменту резервный сервер должен иметь всю информацию, накопленную активным сервером за время его работы. Это достигается за счет использования технологии репликации. Суть этой технологии заключается в том, что резервный сервер периодически (например, раз в минуту) отправляет активному серверу запрос на поиск новой информации в базе данных. Если в базе данных активного сервера новая (относительно предыдущего запроса, поступившего от резервного сервера) информация имеется, то она отсылается резервному серверу в ответ на его запрос;

в) **устойчивость к DDOS-атакам**. Функциональные сервера защищены от **целевых** DDOS-атак за счет того, что отсутствуют известные злоумышленникам доменные имена и IP-адреса. Функциональные сервера также защищены от **нецелевых** DDOS-атак, направленных на серверное оборудование либо оборудование дата-центра, за счет наличия одного или нескольких резервных функциональных серверов, расположенных, например, в других дата-

центрах и готовых в любой момент принять роль активного сервера. Транзитные сервера также защищены от DDOS-атак за счет того, что их может быть сколь угодно много и они могут быть расположены в различных дата-центрах. Большое количество транзитных серверов может быть достигнуто благодаря простоте их развертывания и дешевизне необходимого оборудования и программного обеспечения;

д) **высокая степень доступности.** Сервис КДС «Кардиовид» может работать круглосуточно в бесперебойном режиме, при этом показатель «доступность» (Uptime) составляет более 99,9 %. За счет распределенной структуры организации отсутствует необходимость полного останова сервиса даже при выполнении операций технического обслуживания и обновления программного либо аппаратного обеспечения;

е) **аппаратная масштабируемость.** Возможность в любой момент времени провести оптимизацию производительности функционального либо транзитного сервера. В случае, если функциональный сервер развернут на виртуальной машине (VDS), то такие параметры, как объем ОЗУ, количество ядер процессора, размер устройства хранения информации (HDD или SSD), скорость сети, можно нарастить несколькими щелчками мыши.

Особенности взаимодействия портативного кардиоанализатора с сервисом КДС «Кардиовид»

Используемый пациентом ПКА устанавливает соединение с облачным сервисом КДС «Кардиовид» в случае диагностирования отклонений в работе сердца. В том случае, если обнаруженное отклонение не признано критическим, ПКА отправляет сервису КДС «Кардиовид» зарегистрированные параметры работы сердца (при наличии соединения с сервисом), затем сервис КДС осуществляет автоматическую компьютерную диагностику состояния сердца и при необходимости отправляет заявку в службу 112 для вызова скорой медицинской помощи. Если же ПКА обнаружил критическое отклонение, то он при отсутствии соединения с сервисом КДС может самостоятельно отправить заявку в службу 112. Подробный алгоритм взаимодействия ПКА с сервисом КДС «Кардиовид» в случае диагностирования отклонений в работе сердца приведен на рис. 3.

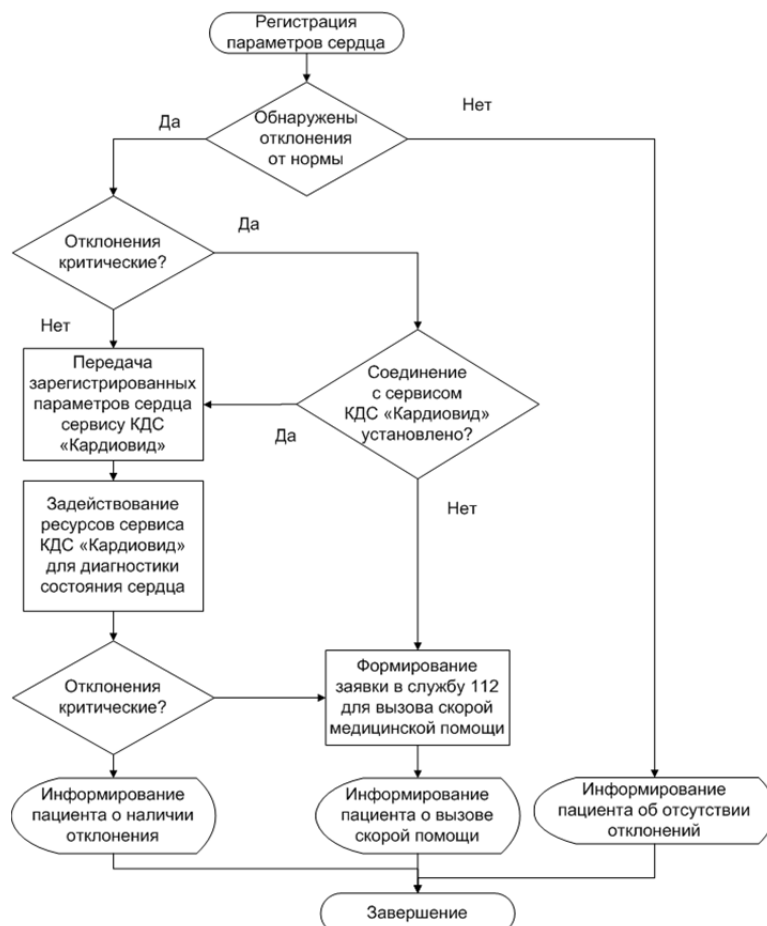


Рис. 3. Алгоритм взаимодействия ПКА с сервисом КДС «Кардиовид»

Преимущество использования сервиса КДС заключается в том, что благодаря использованию высокопроизводительного аппаратного обеспечения и наличию современных алгоритмов диагностики состояния сердца сервис КДС позволяет более точно, по сравнению с ПКА, диагностировать состояние сердца пациента и тем самым избежать ошибок «первого рода» (игнорирование критического состояния сердца) и «второго рода» (ошибочная диагностика критического состояния сердца).

Схема взаимодействия сервиса КДС «Кардиовид» с ЛПУ с учетом особенностей территориального размещения ЛПУ и транзитных серверов представлена на рис. 4.

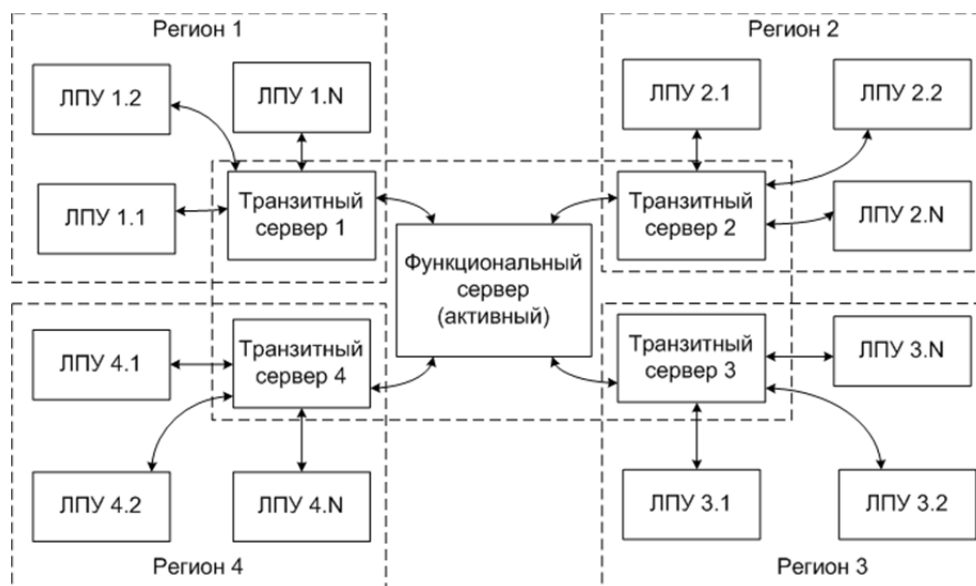


Рис. 4. Схема взаимодействия сервиса КДС «Кардиовид» с ЛПУ

Как видно из рис. 4, функциональный сервер КДС взаимодействует с ЛПУ не напрямую, а через транзитные сервера. Подключение ЛПУ к функциональному серверу может быть произведено через любой транзитный сервер, однако целесообразнее отдавать приоритет транзитному серверу, наиболее близко расположенному к ЛПУ, особенно учитывая протяженность территории Российской Федерации.

Особенности взаимодействия сервиса КДС «Кардиовид» с ЛПУ:

1. ЛПУ, оснащенные МИС и включающие в себя модуль взаимодействия с облачным сервисом КДС «Кардиовид», устанавливают защищенное шифрованное SSL-соединение [5] с ближайшим транзитным сервером. SSL-сертификат создается как для сервиса КДС «Кардиовид», так и для каждого ЛПУ. Благодаря этому обе стороны, установившие между собой SSL-соединение, считают противоположную сторону доверенным источником информации.

2. После диагностирования критического состояния сердца пациента и вызова скорой медицинской помощи сервис КДС «Кардиовид» через подключенные к нему транзитные сервера дает команду для сбора медицинской информации о пациенте со всех ЛПУ.

3. ЛПУ принимают команду сбора информации, производят поиск электронной истории болезни указанного пациента и в случае наличия медицинских электронных записей о пациенте выполняют их подготовку, осуществляют цифровую подпись согласно ГОСТ Р 52636–2006 [2] и передают информацию сервису КДС «Кардиовид».

4. Пациента доставляют в ЛПУ, и лечащий врач с помощью модуля взаимодействия с облачным сервисом КДС «Кардиовид» запрашивает медицинские записи электронной истории болезни, которые были собраны сервисом КДС со всех ЛПУ, а также с ПКА.

Заключение

Благодаря предложенной организации распределенной системы диагностики состояния сердца своевременно диагностируется критическое состояние сердца пациента и осуществляется оперативный вызов скорой медицинской помощи. К моменту доставки пациента в лечебно-профилактическое учреждения врач располагает всей доступной медицинской информацией по данному пациенту, что позволяет повысить эффективность лечения.

Список литературы

1. Патент 2540528 Российская Федерация. Устройство для регистрации электрокардиосигналов в условиях свободной активности / Бодин О. Н. и др. – № 2013132637/14 ; заявл. 16.07.2013 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4.
2. ГОСТ Р 52636–2006. Электронная история болезни. Общие положения. – URL: <http://protect.gost.ru>.
3. Федеральная целевая программа «Создание системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру «112» в Российской Федерации на 2013–2017 годы». – URL: <http://www.mchs.gov.ru>.
4. Mell, P. The NIST Definition of Cloud Computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology / Peter Mell and Timothy Grance. – NIST, 2011.
5. Eric Rescorla. SSL and TLS: Designing and Building Secure Systems. – 1-st. – Addison-Wesley Professional. – 2000, October 27. – Т. 1. – 528 p.

Балахонова Светлана Александровна

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

Balahonova Svetlana Aleksandrovna

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

Бодин Олег Николаевич

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

Bodin Oleg Nikolaevich

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

Логинов Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук,
ведущий специалист
по программному обеспечению,
ООО «АВТОМАТИКА плюс»
(Россия, г. Пенза, ул. Бородина, 21)
E-mail: loginov_d@inbox.ru

Loginov Dmitrij Sergeevich

candidate of technical sciences,
leading software specialist,
Ltd. «AVTOMATIKA plus»
(21 Borodina street, Penza, Russia)

Ломтев Евгений Александрович

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

Lomtev Evgenij Aleksandrovich

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

Сафронов Максим Игоревич

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

Safronov Maksim Igorevich

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

УДК 004.75: 616.12-07

Организация распределенной системы диагностики состояния сердца / С. А. Балахонова, О. Н. Бодин, Д. С. Логинов, Е. А. Ломтев, М. И. Сафронов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 131–137.

М. В. Секретов

ПАРАМЕТРЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ПОДСВЕТКИ В БИОМЕТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ ЛАДОНИ¹

М. V. Sekretov

PARAMETERS INFRARED BACKLIGHT INTEGRATED IN BIOMETRIC DEVICES TO OBTAINING THE PATTERN OF THE BLOOD VESSELS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является инфракрасное излучение (ИК-излучение) ближнего диапазона, проникающее в подкожный слой ладони человека и поглощаемое кровью. Предметом исследования являются способы реализации ИК-подсветки поверхности ладони в составе биометрического устройства, разрабатываемого для получения рисунка кровеносных сосудов, находящихся в подкожном слое ладони человека. Целью работы является определение оптимальных светотехнических параметров ИК-подсветки и расчет ее конструкции для выделения биометрических особенностей рисунка кровеносных сосудов ладони человека. *Материалы и методы.* Для получения изображений кровеносных сосудов ладони использовалась черно-белая мегапиксельная камера. Выделение рисунка кровеносных сосудов ладони осуществлялось с помощью методов цифровой обработки изображений. *Результаты.* Предложена реализация интегрированной ИК-подсветки в биометрическом устройстве за счет размещения ИК-диодов с длиной волны около 850 нм по кругу от объектива. Определены оптимальные светотехнические параметры ИК-подсветки путем расчета освещенности поверхности ладони. Экспериментально подтверждено, что при работе интегрированной ИК-подсветки становится возможной фотофиксация подкожных кровеносных сосудов ладони. *Выводы.* Размещение ИК-диодов по кругу от объектива позволяет сделать биометрическое устройство малогабаритным, а освещение поверхности ладони равномерным. За счет проникающих свойств ИК-излучения ближнего диапазона хорошо выделяется структура кровеносных сосудов, находящихся в подкожном слое ладони человека.

A b s t r a c t. *Background.* The object of research is the infrared radiation passing range, penetrating into the subcutaneous layer of human hands and absorbed by the blood. The subject of research are the ways of realization of infrared backlight surface of the palm of your hand as part of the biometric device, developed to obtain the pattern of the blood vessels located in the subcutaneous layer of the human hand. The purpose of work is to determine the optimum parameters of infrared backlight and calculation of its design to extract the features of the biometric pattern of the blood vessels of the human hand. *Materials and methods* For blood vessels palm images used black and white megapixel camera. Allocation pattern of blood vessels palm was carried out using methods of digital image processing. *Results* A realization of the integrated infrared backlight in biometric devices through the placement of the IR diodes with a wavelength of about 850 nm in a circle on the lens. Defined the optimum parameters of infrared backlight by calculating illumination the surface of the palm. Experiments confirmed that when

¹ Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы в соответствии с договором № 6702ГУ2015 от 14 июня 2015 г. о предоставлении гранта Федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

using the infrared backlight becomes possible photographic images of subcutaneous blood vessels palm. *Conclusions* Placing the IR diodes in a circle on the lens allows you to make small-sized biometric device and the surface of the palm lighting uniform. By penetrating properties of the near infrared light is well distinguished structure of the blood vessels located in the subcutaneous layer of the human hand.

К л ю ч е в ы е с л о в а: биометрия, биометрическое устройство, кровеносные сосуды ладони, инфракрасная подсветка, освещенность, световой поток, чувствительность.

К e y w o r d s: biometric, biometric device, palm blood vessels, infrared backlight, luminosity, light flow, sensitivity.

Введение

Для считывания биометрических характеристик многие устройства и системы требуют непосредственного контакта с человеком. Например, для идентификации по отпечатку пальца необходимо приложить палец к датчику. Это создает неудобства для пользователей при эксплуатации биометрических систем. Кроме того, отпечатки пальцев остаются на поверхностях предметов, а значит – могут быть скопированы и несанкционированно использованы [1, 2]. В этой связи бесконтактные методы считывания биометрических характеристик человека являются более удобными и надежными.

В настоящее время в мире распространяются биометрические системы бесконтактной идентификации человека по кровеносным сосудам ладони. На отечественном рынке биометрических устройств представлены только разработки японской компании Fujitsu, которая не раскрывает деталей собственной технологии получения и анализа рисунка кровеносных сосудов ладони [3–5].

Известно, что с помощью ближнего инфракрасного (ИК) излучения удастся бесконтактным способом получить изображение позиций кровеносных сосудов ладони, независимое от температуры окружающей среды и температуры самого человека. Основными частями конструкции биометрического устройства будут светочувствительный сенсор, объектив, оптический фильтр и ИК-подсветка на основе светодиодов с ИК-излучением ближнего диапазона [6].

Существует два основных метода получения рисунка кровеносных сосудов ладони. Первый метод основан на пропускании ИК-излучения через ладонь [7]. Второй метод основан на отражении ИК-света. Первый метод требует установки источника ИК-излучения с тыльной стороны ладони, из-за чего устройства, его использующие, получаются большого размера. Во втором методе источник ИК-света размещается со стороны ладони, благодаря чему устройства получаются меньшего размера, чем при первом методе.

В условиях малой освещенности достаточно сложно добиться хорошей чувствительности видеокамеры и, как следствие, качества изображения. Освещенность объекта наблюдения также не должна быть выше максимальной рабочей освещенности для светочувствительной матрицы. Правильный расчет конструкции ИК-подсветки при разработке устройства позволит повысить контрастность распознаваемого рисунка кровеносных сосудов и выделить его особенности на фоне изображения. Протекающая в сосудах кровь будет поглощать проникающее ИК-излучение, за счет чего сосуды на изображениях будут темнее относительно тканей под кожного слоя [8–10]. ИК-подсветка поверхности ладони расширит диапазон яркостей изображения, который оказывается важен при работе алгоритмов предварительной обработки и вычисления биометрических параметров, во многом зависящих от качества получаемого биометрическим устройством изображения. Поэтому при получении рисунка кровеносных сосудов ладони важной задачей является определение оптимальных светотехнических параметров ИК-подсветки.

Определение и расчет параметров интегрированной инфракрасной подсветки

В качестве основных светотехнических характеристик ИК-подсветки можно выделить следующие:

- потребляемая мощность;
- мощность излучения;
- световой поток;

- площадь светового пятна;
- угол излучения (градусы);
- длина волны излучения;
- максимальная дальность подсветки, в метрах (расстояние до освещаемого объекта);
- освещенность в плоскости объекта;
- освещенность светочувствительной матрицы.

В основном все биометрические устройства подключаются к USB-порту персонального компьютера, через который осуществляется передача данных, а также питание от источника напряжением +5 В. Для гарантированной работы устройств ток через USB-порт должен быть менее 500 мА. Ток потребления сканера кровеносных сосудов ладони будет складываться из тока потребления платы видеозахвата, содержащей светочувствительный сенсор, и тока потребления светодиодами ИК-подсветки. Как правило, платы видеозахвата, имеющие USB-интерфейс, потребляют около 200 мА. Следовательно общий ток потребления светодиодами ИК-подсветки должен быть не более 300 мА. Стоит отметить, что в устройство получения рисунка кровеносных сосудов ладони для более точной фокусировки особенностей может быть встроен датчик измерения расстояния до поверхности ладони, который несколько увеличивает ток потребления устройством.

В табл. 1 представлены основные характеристики некоторых ИК-диодов, полученные из технической документации на них.

Таблица 1

ИК-диод	Размер, мм	Длина волны, нм	Угол рассеивания, градусы	Мощность, мВт	Мощность излучения, мВт на стерадиан
L-34SF7C	3	850	50	80 (макс.)	18 (тип.)
L-34SF6C	3	860	50	80 (макс.)	18 (тип.)
L-34SF4C	3	880	50	80 (макс.)	18 (тип.)
L-7113SF7C	5	850	20	80 (макс.)	40 (тип.)
L-7113F3C	5	940	20	100 (макс.)	20 (тип.)
L-7113SF4C	5	880	20	100 (макс.)	20 (тип.)
SFH 4550	5	850	3	180 (макс.)	400 (мин.)

ИК-излучение с длинной волны от 800 нм поглощается оксигемоглобином и дезоксигемоглобином, содержащимися в крови практически в одинаковой степени. Согласно технической документации ИК-диоды L-7113SF7C имеют типовую мощность излучения 40 мВт/стерадиан и полный угол излучения 20° в диапазоне 800–900 нм с максимальной мощностью излучения на длине волны 850 нм.

Важно не допустить быстрого перегрева ИК-диодов и выхода их из строя, поэтому необходимо, чтобы прямой ток через ИК-диод был не более 20 мА, а прямое напряжение – не более 1,4 В. Снизить нагрев ИК-диодов можно путем сокращения продолжительности работы подсветки, т.е. включать ИК-диоды только в момент фотофиксации рисунка кровеносных сосудов ладони.

Очевидно, что только с помощью одного ИК-диода нельзя получить достаточно равномерное освещение поверхности ладони. Плата видеозахвата, отвечающая за формирование изображения, так же как источник ИК-света, должны быть размещены со стороны ладони, поэтому целесообразно разместить ИК-диоды по кругу от объектива, например так, как показано на рис. 1.

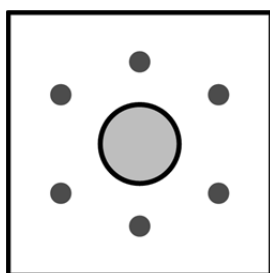


Рис. 1. Размещение шести ИК-диодов по кругу от объектива

Такое размещение ИК-диодов дает источник излучения с полным углом излучения θ . На рис. 2 показан полный угол излучения, образованный ИК-диодами, размещенными по кругу от объектива.

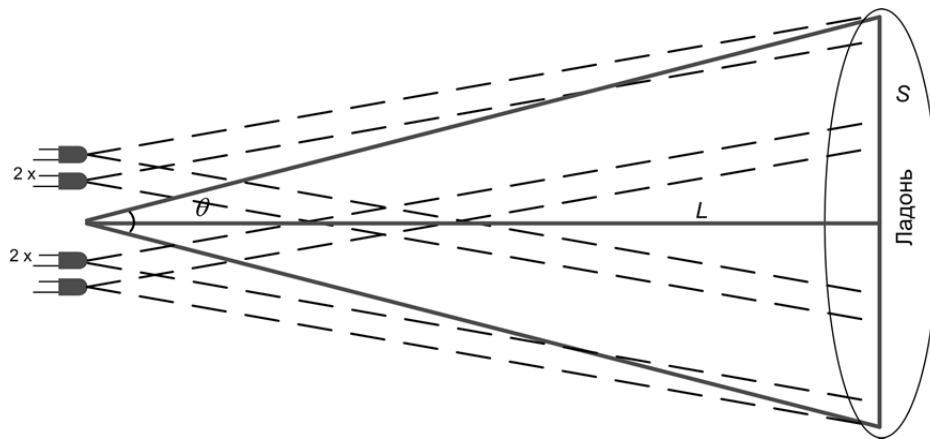


Рис. 2. Полный угол источника ИК-излучения, применяемого для фотофиксации подкожных кровеносных сосудов ладони

Классически показатели силы света и светового потока рассчитываются с учетом чувствительности человеческого глаза к различным длинам волн, однако ИК-излучение полностью невидимо для человеческого глаза. Тем не менее ИК-излучение воспринимается ПЗС-матрицами, следовательно для определения освещенности в ближнем ИК-диапазоне возможно использование классических характеристик и единиц измерения. Это связано с тем, что практически для всей видеоаппаратуры в качестве параметра чувствительности берется единица измерения люкс (лк).

Площадь светового пятна круглой формы, образованного световым пучком, определяется исходя из полного угла подсветки и расстояния до поверхности ладони:

$$S = \pi(L \operatorname{tg}(\theta / 2))^2,$$

где S – площадь светового пятна на поверхности ладони (м); θ – полный угол подсветки (градусы).

Освещенность поверхности ладони определим по формуле

$$E_{\text{объекта}} = \frac{\Phi}{S} = \frac{683P_{\text{опт}}}{\pi(L \operatorname{tg}(\theta / 2))^2},$$

где Φ – световой поток (лм); S – площадь светового пятна на поверхности ладони (м²); $P_{\text{опт}}$ – оптическая мощность, излучаемая ИК-подсветкой (Вт); θ – полный угол подсветки (градусы).

Оптическую мощность $P_{\text{опт}}$, излучаемую ИК-подсветкой, определим по формуле

$$P_{\text{опт}} = P_{\text{потр}} \eta,$$

где $P_{\text{потр}}$ – мощность, потребляемая ИК-подсветкой (Вт); η – КПД или эффективность преобразования (для ИК-диодов реальное среднее значение – 0,05–0,15, т.е. 5–15 %).

Освещенность, получаемая в плоскости светочувствительной матрицы, будет зависеть от чувствительности видеокамеры, коэффициентов пропускания объектива и отражения от объектива. Освещенность матрицы будет отличаться от освещенности поверхности ладони, которая может быть до 20 раз выше. Освещенность светочувствительной матрицы определим по формуле

$$E_{\text{м}} = E_{\text{объекта}} K_{\lambda} K_a p \left(\frac{1}{4F^2} \right),$$

где K_λ – спектральная чувствительность видеокамеры; K_a – коэффициент пропускания объектива (обычно принимается 0,8–0,85); p – коэффициент отражения от объектива (обычно принимается 0,75); F – число объектива.

При расчете характеристик источника ИК-излучения примем полный угол подсветки θ равным 30° . В табл. 2 содержатся результаты расчетов освещенности поверхности ладони, находящейся на расстоянии от 0,1 до 0,2 м от источника ИК-излучения, в качестве которого выступает плата с установленными ИК-диодами L-7113SF7C, излучающими в диапазоне 800–900 нм с максимальной мощностью излучения на длине волны 850 нм.

Таблица 2

Расстояние до объекта, м	Полный угол, град.	Площадь светового пятна, м ²	Световой поток, лм	Освещенность ладони, лк	Освещенность матрицы, лк
0,1	30	0,002	9	4161	85
0,15	30	0,005	9	1849	38
0,2	30	0,009	9	1000	21

Кроме ИК-диодов L-7113SF7C, на плату должны быть установлены резисторы 220 Ом для обеспечения требуемого значения тока. Мощность потребления подсветки получилась равной

$$P_{\text{потр}} = U_{\text{П}} I_{\text{П}} \cdot 6 = 1,4 \cdot 16,4 \cdot 10^{-3} \cdot 6 = 138 \text{ (мВт)}.$$

На рис. 3 представлены изображение ладони, полученное при работе ИК-подсветки, и результат выделения рисунка кровеносных сосудов ладони с помощью алгоритмов предварительной обработки изображения.

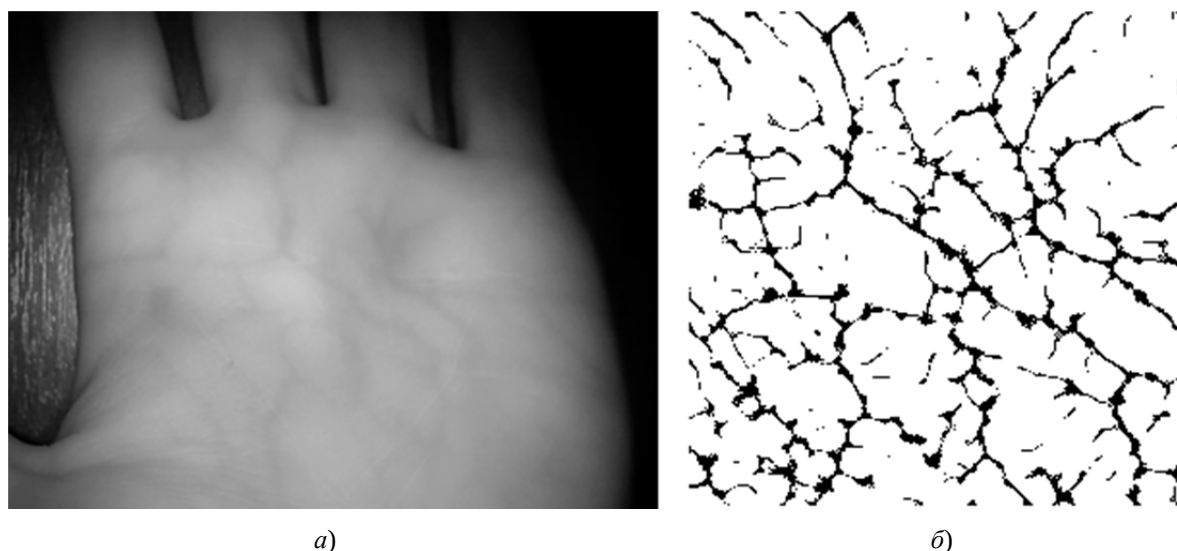


Рис. 3. Выделение рисунка кровеносных сосудов ладони при работе ИК-подсветки:
а – исходное изображение ладони; б – результат предобработки

Заключение

При разработке биометрического устройства фотофиксации подкожных кровеносных сосудов ладони с использованием метода отражения ИК-излучения в качестве его источника могут быть применены ИК-диоды с длиной волны 850 нм, интегрированные в корпус устройства видеозахвата. Данное конструктивное решение позволит сделать устройство малогабаритным, а освещение поверхности ладони равномерным.

Для фотофиксации целесообразнее использовать черно-белые мегапиксельные камеры, так как они обладают более высокой чувствительностью. При рабочей освещенности около 2000 лк и расстоянии до ладони 0,15 м хорошо выделяется структура кровеносных сосудов. Можно сделать вывод, что размещение шести ИК-диодов L-7113SF7C по кругу от объектива

камеры создает достаточную освещенность и условия для получения рисунка кровеносных сосудов, находящихся в подкожном слое ладони человека.

Полученные результаты и владение биометрико-нейросетевой технологией позволяют АО «ПНИЭИ» запустить производство отечественных биометрических систем аутентификации и идентификации личности по рисунку кровеносных сосудов ладони, полностью заменив зарубежную продукцию на рынке.

Список литературы

1. Руководство по биометрии : пер. с англ. / Руд Болл, Джонатан Х. Коннел, Шарат Панканти, Налини К. Ратха, Сеньор Эндрю У. – Москва : Техносфера, 2007. – 368 с.
2. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / Ю. К. Язов, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, И. Г. Назаров. – М. : Радиотехника, 2012. – 157 с.
3. Секретов, М. В. Нейросетевое преобразование рисунка кровеносных сосудов ладони человека в код доступа для систем биометрической аутентификации / М. В. Секретов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : труды Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Пенза : Из-во ПГУ, 2015. – Т. 1. – С. 180–183.
4. Секретов, М. В. Нейросетевая защита рисунка подкожных кровеносных сосудов ладони без гомоморфного шифрования биометрических данных / М. В. Секретов, А. В. Майоров // Безопасность информационных технологий : труды науч.-техн. конф. – Пенза, 2014. – Т. 9. – С. 83–86.
5. Урнев, А. С. Кодировка изображений сетевидных структур для биометрической идентификации / А. С. Урнев // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : труды Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Пенза : Из-во ПГУ, 2015. – Т. 1. – С. 186–190.
6. A Contactless Biometric System Using Palm Print and Palm Vein Features / Goh Kah Ong Michael, Tee Connie, Andrew Beng Jin Teoh // Advanced Biometric Technologies, Dr. Girija Chetty, 2011. – URL: <http://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/a-contactless-biometric-system-using-palm-print-and-palm-vein-features> (дата обращения: 02.03.2016).
7. Тихонов, И. А. Морфометрия изображений сосудистого русла в ИК области / И. А. Тихонов, А. А. Хрулев, И. Н. Спиридонов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2006. – № 10. – С. 27–31.
8. Пономаренко, Г. Н. Биофизические основы физиотерапии : учеб. пособие / Г. Н. Пономаренко, И. И. Турковский. – М. : Медицина, 2006. – 176 с.
9. Лазеры в клинической медицине : руководство / под ред. проф. С. Д. Плетнева. – М. : Медицина, 1996. – 428 с.
10. Морган-мл., Дж. Эдвард Клиническая анестезиология : пер. с англ. / Дж. Эдвард Морган-мл., Мэгид С. – Изд. 2-е, испр. – М. ; СПб. : БИНОМ – Невский Диалект, 2001. – Кн. 1. – 396 с.

Секретов Максим Валентинович

кандидат технических наук,
научный сотрудник,
лаборатория биометрических
и нейросетевых технологий,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: maxims7@mail.ru

Sekretov Maksim Valentinovich

candidate of technical sciences, researcher,
laboratory of biometric technology
and neural network,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

УДК 57.087.1, 621.38, 612.11

Секретов, М. В.

Параметры интегрированной инфракрасной подсветки в биометрических устройствах получения рисунка кровеносных сосудов ладони / М. В. Секретов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 138–143.