

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 3 (43)

2017

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<i>Алимурадов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Агейкин А. В.</i> Разработка алгоритма обработки речевых сигналов для определения информативно значимых параметров пограничных психических расстройств.....	4
<i>Попов Д. И.</i> Обнаружение стохастических радиолокационных сигналов.....	26
<i>Кизилов Е. А.</i> Методика построения цветных сетей Петри, моделирующих работу цифрового автомата .....	36
<i>Евсеева Ю. И.</i> Программная кибернетика: современное состояние и проблемы.....	48
<i>Башков А. А.</i> Метод спектрального анализа сигналов при помощи кусочно-постоянных функций и подход к аппаратной реализации данного метода .....	60
<i>Волчихин В. И., Иванов А. И., Сериков А. В., Серикова Ю. И.</i> Тестирование аналогового и квантового оракулов линейной вычислительной сложности, предсказывающих значения коэффициента корреляции на малой выборке в 32 опыта .....	70
<i>Алимурадов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Торгашин С. И.</i> Способ сегментации речевого сигнала для систем оценки психогенных состояний.....	81

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА**

<i>Арбузов В. П., Мишина М. А.</i> Коррекция температурной погрешности емкостных датчиков давления.....	94
--	----

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

<i>Акопян М. Г.</i> Модель изнашивания зубчатых колес, учитывающая эволюционный характер процесса взаимодействия .....	106
---	-----

<i>Приходько А. А., Смелягин А. И., Мевша Н. В.</i> Экспериментальное исследование кинематики планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства .....	121
<i>Карташова Е. Д., Муйземек А. Ю.</i> Влияние технологических отклонений расположения армирующего в полимерном слоистом композиционном материале на сопротивление деформированию и разрушению .....	134

**UNIVERSITY PROCEEDINGS  
VOLGA REGION  
ENGINEERING SCIENCES**

№ 3 (43)

2017

**CONTENT**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER  
ENGINEERING AND CONTROL**

---

<i>Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Churakov P. P., Ageykin A. V.</i> Development of an algorithm for speech signals processing to determine informatively significant parameters of borderline mental disorders.....	5
<i>Popov D. I.</i> Detection of stochastic radar signals.....	26
<i>Kizilov E. A.</i> A method to construct coloured petri nets that simulate digital automaton's performance .....	36
<i>Evseeva Yu. I.</i> Software cybernetics: current state and problems .....	48
<i>Bashkov A. A.</i> A method of spectral analysis of signals using piecewise constant functions and an approach to hardware implementation of this method.....	60
<i>Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Serikov A. V., Serikova Yu. I.</i> Testing of analog and quantum oracles of linear computational complexity, predicting the values of the correlation coefficient on a small sample in 32 experiments .....	70
<i>Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Churakov P. P., Torgashin S. I.</i> A method of speech signal segmenting for evaluation of psychogenic states .....	81

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT  
AND RADIO ENGINEERING**

---

<i>Arbuzov V. P., Mishina M. A.</i> Correction of capacitive pressure sensor's temperature error.....	94
--	----

**MACHINE SCIENCE AND BUILDING**

---

<i>Akopyan M. G.</i> Gears wearing simulation taking into account the evolutionary nature of interaction .....	106
<i>Prikhod'ko A. A., Smelyagin A. I., Mevsha N. V.</i> An experimental study of kinematics of a planetary rotationally reciprocating stirring tank .....	121
<i>Kartashova E. D., Muzzemnek A. Yu.</i> The influence of technological deviations of the reinforcement's location in a polymeric layered composite material on resistance to deformation and destruction.....	134

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 616.89

DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-1

*А. К. Алимуратов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, А. В. Агейкин*

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНО ЗНАЧИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОГРАНИЧНЫХ ПСИХИЧЕСКИХ РАССТРОЙСТВ<sup>1</sup>

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования явились больные с пограничными психическими расстройствами Областной психиатрической больницы им. К. Р. Евграфова, у которых имеется высокий процент ложноотрицательных результатов диагностики заболеваний. Предметом исследования являются алгоритмы обработки речевых сигналов для диагностики пограничных психических расстройств. Цель – разработка алгоритма измерения частоты основного тона для систем обнаружения паттернов пограничных психических расстройств.

*Материалы и методы.* В качестве материалов использовались информативные параметры речевых сигналов – паттерны. Для эффективной обработки речевых сигналов использовался метод декомпозиции на эмпирические моды и его модификация – полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом. Результаты исследований оценивались в сравнении с известными алгоритмами измерения частоты основного тона, реализованными на основе: автокорреляционной функции и ее модификаций («YIN»), устойчивого метода отслеживания основного тона (Robust Algorithm for Pitch Tracking, RAPT) и оценки основного тона пилообразной формы (Sawtooth Waveform Inspired Pitch Estimation, SWIPE).

*Результаты.* Разработан алгоритм измерения частоты основного тона для систем обнаружения паттернов пограничных психических расстройств. Суть алгоритма заключается в разложении речевого сигнала на частотные составляющие с помощью адаптивного метода анализа нестационарных сигналов – улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды с адаптивным шумом и выделении составляющей, содержащей основной тон. Представлена блок-схема разработанного алгоритма и подробное математическое описание. Проведено исследование алгоритма с использованием сформированной верифицированной базы сигналов здоровых пациентов и пациентов с психогенными расстройствами мужского и женского пола в возрасте от 18 до 60 лет.

*Выводы.* В соответствии с результатами исследования разработанный алгоритм измерения частоты основного тона обеспечивает повышение точности

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (грант № МК-250.2017.8).

определения пограничных психических расстройств: для ошибки первого рода в среднем точнее на 10,7 % и для ошибки второго рода – на 4,7 %.

**Ключевые слова:** речевой сигнал, паттерн, частота основного тона, улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом, психогенные расстройства.

*A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, P. P. Churakov, A. V. Ageykin*

## **DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR SPEECH SIGNALS PROCESSING TO DETERMINE INFORMATIVELY SIGNIFICANT PARAMETERS OF BORDERLINE MENTAL DISORDERS**

### **Abstract.**

*Background.* The objects of the study are patients of the Regional Mental Hospital named after K.R. Evgrafov with borderline mental disorders, who have fairly high percentage of false-negative diagnostic results for these diseases. The subjects of the study are algorithms for speech signals processing to diagnose borderline mental disorders. The goal is to develop an algorithm to measure the pitch frequency for systems that detect patterns of borderline mental disorders.

*Materials and methods.* Informative parameters of speech signals – patterns – are used as research materials. To effectively process speech signals, we use the decomposition method for empirical modes and its modification-complete MDEM with adaptive noise. The results of the study are evaluated in comparison with the known algorithms pitch frequency measuring, and realized on the basis of: the auto-correlation function and its modifications ("YIN"), the stable method of main tone tracking (Robust Algorithm for Pitch Tracking, RAPT) and the sawtooth pitch estimate (Sawtooth Waveform Inspired Pitch Estimation, SWIPE).

*Results.* An algorithm for pitch frequency measuring for systems that detect patterns of borderline mental disorders has been developed. The essence of the algorithm is the decomposition of speech signals into frequency components using the adaptive method for analyzing non-stationary signals – improved complete multiple decomposition into empirical modes with adaptive noise and isolation of the component containing the fundamental tone. The article adduces a block diagram of the developed algorithm together with detailed mathematical description. The algorithm is investigated using the formed verified signal base of healthy patients and patients with psychogenic disorders of both genders aged from 18 to 60 years.

*Conclusions.* In accordance with the study results, the developed algorithm for measuring the fundamental tone frequency provides increased accuracy of borderline mental disorders detection: for an error of first kind, on the average, it is more accurate by 10.7 % and for a second type error – by 4.7 %.

**Key words:** speech signal, pattern, pitch frequency, improved complete multiple decomposition into empirical modes with adaptive noise, psychogenic disorders.

### **Введение**

Оценка состояния психического здоровья на сегодня является социально значимой проблемой для каждого государства, поскольку напрямую связана с формированием здорового образа жизни населения. По данным Всемирной организации здравоохранения, современные социально значимые заболевания, являющиеся главной причиной временной нетрудоспособности, инвалидности и смертности населения, оказывая при этом негативное влия-

ние на социально-экономические факторы развития государства, напрямую связаны с психическим здоровьем населения [1].

Психические расстройства представляют обширную группу болезненных нарушений, объединенных общими признаками: преобладание невротического уровня психопатологических нарушений; взаимосвязь с вегетативными дисфункциями и соматическими проявлениями.

В настоящее время для обнаружения пограничных психических расстройств применяются различные экспериментально-статистические методики и дифференциации методов обработки сигналов по доступным каналам регистрации реакций организма человека. Особый интерес вызывают способы оценки, реализованные на основе: данных видеоряда, отражающего мимические и жестикоулярные изменения [2, 3]; сигналов, отражающих параметры физиологической активности организма человека (электроэнцефалограмма, электрокардиограмма, электромиограмма и др.) [4–6]; биохимических параметров крови [7, 8]; параметров рукописного и клавиатурного написания текстов [9, 10]; параметров окулографии («*eye tracking*») [11, 12].

Существенным недостатком, ограничивающим широкое практическое применение указанных способов, является обязательное условие контактной регистрации/взятия пробы/написания, что, безусловно, влияет на психическое состояние, эффективно оценить которое уже не представляется возможным. Наиболее перспективным и адаптивным (в режиме реального времени и свободной активности) является способ на основе анализа речевых сигналов (РС) [13–15].

## **1. Материалы и методы**

### ***1.1. Информативные параметры речевых сигналов, отражающие пограничные психические расстройства***

Важность анализа РС с целью диагностирования нарушений работы нервной системы отмечена в работе [16], в которой авторы показали, что группировка определенных информативных параметров отражает предположительно лежащую в основе патологию.

Вид и степень выраженности психических расстройств кодируются в определенные информативные параметры РС – паттерны. Обзорный анализ [17–22] в области речеобразования, психологии и психолингвистики выявил, что характеристики речи, способные служить паттернами психогенных состояний (проявляющихся на уровне голосовых сегментов, слогов, слов и целых предложений, связанных с геометрической формой и динамикой изменения речевого аппарата), можно разделить на три основные группы: спектрально-временные, кепстральные и амплитудно-частотные.

Каждая группа паттернов предназначена для описания отдельных аспектов РС и находит свое применение в обнаружении пограничных психических расстройств.

### ***1.2. Частота основного тона***

Речь представляет собой нестационарный акустический сигнал сложной формы, амплитудные и частотные характеристики которого быстро изменяются во времени. Речь состоит из вокализованных и невокализованных

участков, образующихся соответственно в результате периодических и непериодических колебаний голосовых связок. Периодические колебания голосовых связок называется основным тоном (ОТ). Частота колебаний связок является важным информативным параметром речи, называемым частотой основного тона (ЧОТ). С акустической точки зрения ЧОТ – это первая составляющая формантных частот («гармонического сита») речи. Кроме ЧОТ, вокальными характеристиками речи также являются: интенсивность ОТ, динамика изменения интенсивности ОТ, динамика изменения ЧОТ, девиация ЧОТ и отношение интенсивности гармоник к интенсивности ОТ.

Особенностью ЧОТ при расстройках является то, что интервалы следования импульсов голосовых связок непрерывно меняются в значительных пределах. Во многих случаях длительность вокализованных участков речи невелика, значительную часть занимают переходные процессы.

### **1.3. Подходы измерения ЧОТ**

Задача измерения ЧОТ представляет собой: выделение контура ОТ, маркировку периодов ОТ и измерение ЧОТ. В настоящее время известно большое количество способов измерения ЧОТ, которые в общем можно классифицировать как способы во временной, частотной и частотно-временной областях.

Во временной области [23, 24] измерение осуществляется за счет анализа распределения пиков, переходов через ноль, корреляции (автокорреляции, взвешенной и нормированной автокорреляции) осциллограммы сигнала. Временные методы являются самыми точными, но требуют тщательной фильтрации и настройки (работа только с вокализованными участками) исходного РС. Основным недостатком является высокая чувствительность к уровню шума в сигнале.

В частотной области [25, 26] измерение осуществляется за счет использования максимальных значений энергии спектра (пиков) и сопоставления их с частотами, кратными ЧОТ. Основным недостатком частотных методов является наличие в рассматриваемой полосе частот, помимо ЧОТ, второй или третьей гармоники с большей энергией.

В частотно-временных подходах [27, 28] измерение осуществляется за счет анализа предполагаемого контура ОТ, выделения мгновенных максимумов отдельных гармоник и разделения сигнала на вокализованные и невокализованные участки. Недостатком частотно-временных способов является большая вероятность получения мгновенного максимума энергии в невокализованных участках из-за присутствия шума в РС.

Широкое практическое применение получили подходы, реализованные на основе: автокорреляционной функции и ее модификаций («YIN») [29], устойчивого метода отслеживания основного тона (Robust Algorithm for Pitch Tracking, RAPT) [30] и оценки основного тона пилообразной формы (Sawtooth Waveform Inspired Pitch Estimation, SWIPE) [31]. Популярность данных алгоритмов обусловлена хорошей функциональностью, низким процентом грубых ошибок и наличием свободно распространяемых программных реализаций.

Тем не менее с учетом нерегулярности моторики органов речевого аппарата при пограничных психических расстройствах возможности данных

алгоритмов существенно ограничены. Ограничение обусловлено использованием неэффективных и неадаптивных методов обработки сложных нестационарных РС, приводящих к низкой точности и большим погрешностям в измерениях ЧОТ.

В работе предлагается алгоритм измерения ЧОТ для систем обнаружения паттернов пограничных психических расстройств. Исследование является развитием ранее опубликованных трудов авторов [32, 33].

#### **1.4. Методы декомпозиции на эмпирические моды**

Исследования методов обработки РС выявили перспективность использования адаптивной технологии анализа нестационарных сигналов – декомпозиции на эмпирические моды [34].

Декомпозиция на эмпирические моды (ДЭМ) [34] – это адаптивный метод анализа нестационарных сигналов, возникающих в нелинейных системах. ДЭМ обеспечивает локальное разложение сигнала на быстрые и медленные колебательные функции. В результате разложения исходный сигнал может быть представлен в виде суммы амплитудных и частотных модулированных функций, называемых эмпирическими модами (ЭМ). Аналитическое выражение ДЭМ выглядит следующим образом:

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

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

В результате разложения РС с помощью ДЭМ в одной ЭМ могут оказаться несоизмеримые по амплитудному и частотному масштабам колебательные функции или наоборот – соизмеримые колебательные функции могут оказаться в разных модах. Это явление называется смешиванием ЭМ. Для ее решения был предложен новый метод [35]: множественная ДЭМ (МДЭМ). Суть метода заключается в добавлении к исходному сигналу белого шума для создания новых экстремумов:

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

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

Аналитическое выражение МДЭМ выглядит следующим образом:

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

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

Таким образом, в результате разложения получают более регулярные ЭМ с соизмеримыми масштабами колебательных функций. Основным недостатком МДЭМ – декомпозиция не является полной, т.е. каждая шумовая копия исходного сигнала  $x_j(n)$  разлагается независимо от других реализаций и

для каждой из них остаток  $r_{ji}(n) = r_{j,i-1}(n) - IMF_{ji}(n)$  вычисляется на каждом этапе, без связи между различными реализациями. Кроме этого, в ЭМ наблюдается остаточный белый шум, а различные реализации шумовых копий могут порождать разное количество ЭМ, что затрудняет окончательное усреднение.

Другая разновидность ДЭМ – комплементарная МДЭМ [36] – качественнее решает проблему остаточного шума, используя дополнительные (добавляя и вычитая) пары шумов с прямыми и инверсными значениями амплитуды. Тем не менее проблема усреднения остается нерешенной, поскольку разные шумовые копии исходного сигнала также могут производить разное количество ЭМ:

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

где  $x_j(n)$  – зашумленный сигнал белым шумом;  $x_j^*(n)$  – зашумленный сигнал белым шумом с инверсными значениями амплитуды.

С учетом этих недостатков в работе [37] предлагается новый метод, называемый полной МДЭМ с адаптивным шумом (ПМДЭМАШ). Основная идея метода заключается в добавлении к исходному сигналу контролируемого шума для создания новых экстремумов. Первая ЭМ извлекается по методике МДЭМ, усредняя первые моды сигнала с белым шумом:

$$\overline{IMF_1}(n) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J IMF_{j1}(n) = \widetilde{IMF_1}(n).$$

Затем вычисляется первый остаток, независимый от реализации шума:

$$r_1(n) = x(n) - \widetilde{IMF_1}(n).$$

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

Несмотря на вышеупомянутые достоинства метода ПМДЭМАД, в работе [38] авторы отмечают следующие недостатки данного метода:

- ЭМ содержат остаточный шум;
- информативные моды о сигнале при разложении извлекаются «позже», чем при МДЭМ с некоторыми «паразитными» модами на ранних этапах декомпозиции.

В работе [38] авторы решают отмеченные недостатки и предлагают усовершенствованную полную МДЭМ с адаптивным шумом.

Суть уменьшения остаточного шума заключается в использовании локальных средних значений вместо значений ЭМ.

Метод МДЭМ независимо разлагает каждую реализацию сигнала с шумом, поэтому на первом этапе каждой реализации декомпозиции имеется одно локальное среднее значение и одна мода.

Учитывая, что истинная мода может быть определена как разность между текущим остатком и усредненным значением его локальных средних величин, получим следующее выражение:

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

где  $M$  – оператор, создающий локальное среднее значение применяемого сигнала.

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

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

где  $\langle \rangle$  – действие усреднения.

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

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

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

Алгоритм и математическое описание улучшенной ПМДЭМАШ:

**Шаг 1.** С помощью аппарата ДЭМ и выражения из формулы  $\langle E_1(x_j(n)) \rangle = \langle x_j(n) \rangle - \langle M(x_j(n)) \rangle$  локальных средних значений шумовых копий исходного сигнала ( $x_j(n) = x(n) + \beta_0 E_1(w_j(n))$ ) определяется первый остаток  $r_1(n) = \langle M(x_j(n)) \rangle$ .

**Шаг 2.** На первом этапе для  $i = 1$  вычисляется первая мода:  $IMF_1(n) = x(n) - r_1(n)$ .

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

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

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

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

**Шаг 5.** Вычисляется  $i$ -я мода:  $\widetilde{IMF}_i(n) = r_{i-1}(n) - r_i(n)$ .

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

Константы  $\beta_i = \epsilon_i \text{std}(r_i(n))$  выбираются таким образом, чтобы получить желаемое отношение сигнал/шум между добавленным шумом и остатком, к которому добавляется шум. Обратите внимание, что при МДЭМ отношение сигнал/шум между добавленным шумом и остатком увеличивается на порядок  $i$ . Это связано с тем, что энергия шума в  $i$ -м остатке ( $i > 1$ ) является лишь малой энергией шума, добавленного в начале алгоритма. Чтобы эмулировать это поведение, в данной работе мы установим  $\beta_0$  так, чтобы  $\epsilon_0$  было прямо противоположно желаемому отношению сигнал/шум между первым добавленным шумом и анализируемым сигналом: если мы выражаем

отношение сигнал/шум как фактор стандартных отклонений, то имеем  $\beta_0 = \varepsilon_0 \text{std}(x(n)) / \text{std}(E_1(w_j(n)))$ . Для получения шумовых реализаций с меньшими амплитудами для последних стадий декомпозиции в остальных модах мы будем воспринимать шум как результат его предварительной обработки ДЭМ, т.е. без их нормализации стандартным отклонением.

## 2. Описание алгоритма

Авторами разработан алгоритм измерения ЧОТ для обнаружения паттернов пограничных психических расстройств. Блок-схема алгоритма (блоки 1–8) представлена на рис. 1.

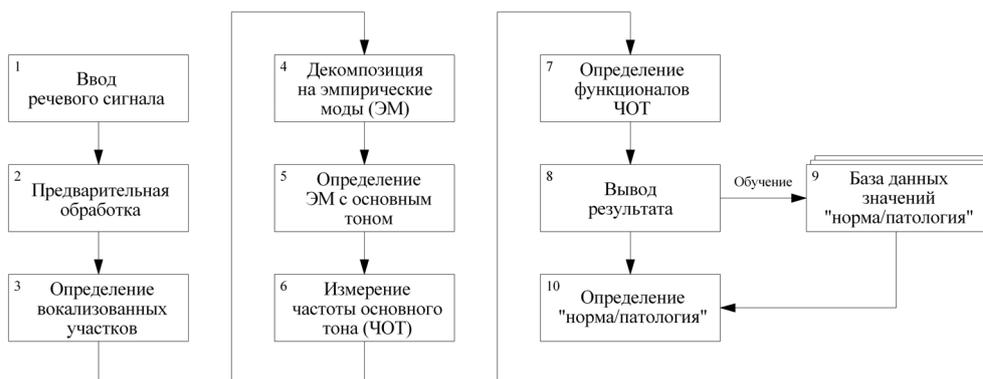


Рис. 1. Блок-схема алгоритма измерения ЧОТ для обнаружения паттернов пограничных психических расстройств

Суть алгоритма заключается в разложении РС на частотные составляющие, выделении составляющей, содержащей ОТ, и измерении ЧОТ.

Работа алгоритма осуществляется следующим образом (рис. 2):

- обработка в блоке 2 выполняется для РС в полном временном интервале;
- обработка в блоке 3 выполняется в режиме скользящего окна длительностью 15 мс с перекрытием 7,5 мс;
- обработка в блоках 4–8 выполняется в режиме скользящего окна длительностью 20 мс (возможны вариации) с перекрытием 10 мс.

Рассмотрим каждый этап обработки подробнее.

**Ввод речевого сигнала.** Ввод осуществляется со следующими параметрами: частота дискретизации 8000 Гц, разрядность квантования 16 бит.

**Предварительная обработка.** В рамках предварительной обработки в первую очередь осуществляется удаление постоянной составляющей (смещение сигнала относительно нуля на некую постоянную величину), которая обычно возникает в аналого-цифровом преобразователе. Для того чтобы удалить постоянную составляющую, или, другими словами, выровнять сигнал относительно нуля, определяется среднее арифметическое значение всех отсчетов сигнала и вычитается из исходного сигнала.

Следующим этапом предобработки является фильтрация РС с помощью фильтра высоких частот Чебышева четвертого порядка для удаления частот ниже 130 Гц, которые включают в себя основной гул, треск и другие шумы в этом диапазоне.

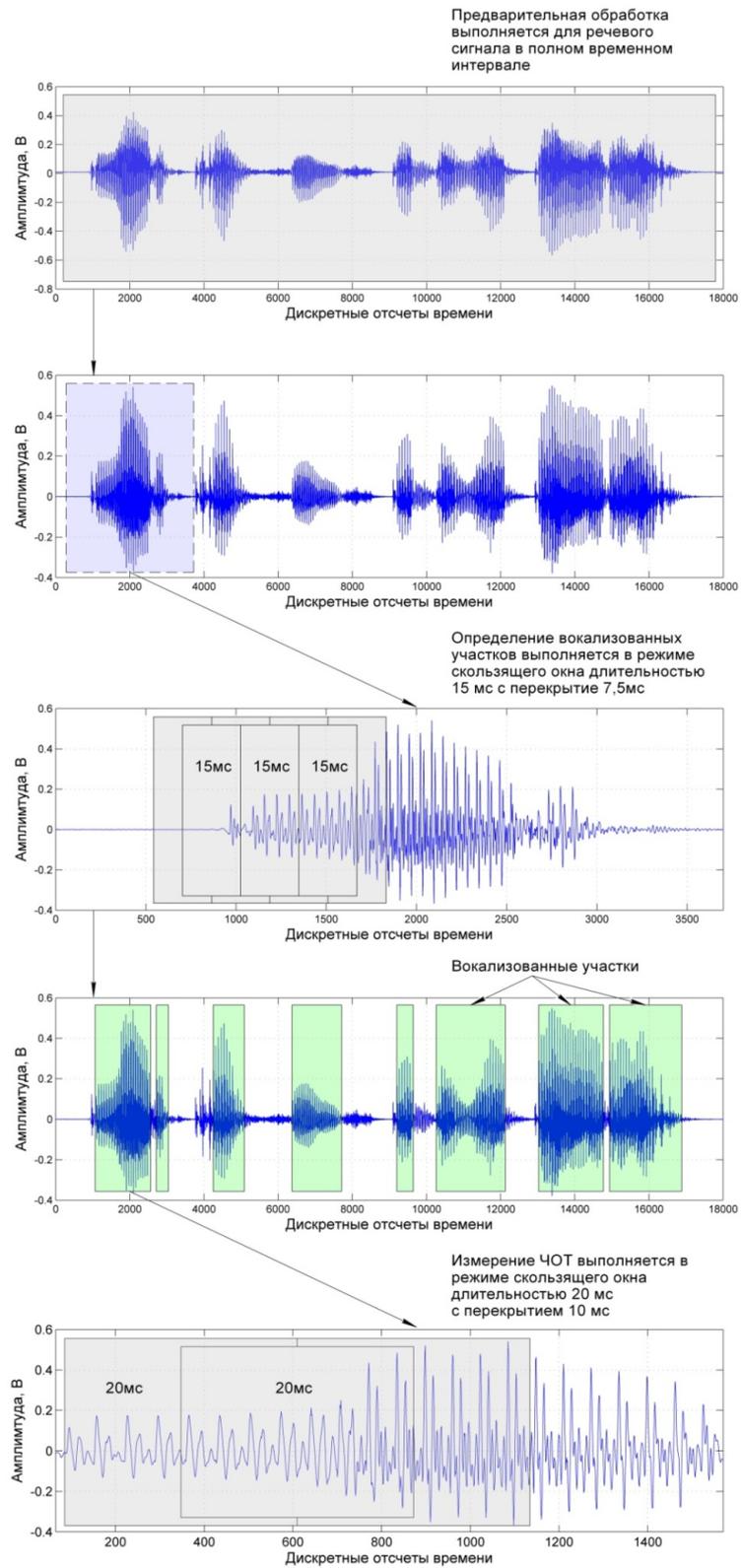


Рис. 2. Работа алгоритма

Фильтрация с частотным срезом на 130 Гц не влияет на полезную информацию в сигнале [39]. В завершение осуществляется коррекция естественных искажений спектра (–6 дБ на октаву), возникающих в речевом аппарате человека при произнесении речи [40]. РС пропускают через корректирующий фильтр с передаточной функцией:

$$W(z) = \sum_{k=0}^m a_k z^{-k},$$

где  $a_k$  – постоянные коэффициенты;  $m$  – целое число ( $m > 0$ );  $k$  – номер коэффициента. Чаще всего  $m = 1$ , а передаточная функция имеет вид

$$W(z) = a_0 - a_1 z^{-1}.$$

**Определение вокализованных участков.** Вокализованные участки выделяются из РС с использованием кластерного анализа в пространстве вычисленных упомянутых выше значений ZCR, ACR и PWR [41]. Сегменты вокализации были идентифицированы как сегменты с самым высоким значением PWR и самыми низкими значениями ZCR и ACR. Решения сглаживались с использованием медианного фильтра 5-го порядка на основе решающего правила принятия решения: вокализованные сегменты короче 30 мс классифицировались как сегменты, не содержащие вокализации (сформированные без участия голосовых связок); но сегменты, не содержащие вокализации, короче 20 мс были классифицированы как вокализованные в силу физиологического аспекта формирования речи [41].

**Декомпозиция на эмпирические моды.** На основе детализированного анализа преимуществ и недостатков различных видов декомпозиции и с учетом специфики РС при пограничных психических расстройствах авторы приняли решение использовать для разложения сигнала на частотные составляющие улучшенную ПМДЭМАШ [39].

Результат разложения вокализованного участка РС с использованием улучшенной ПМДЭМАШ приведен на рис. 3. Параметры декомпозиции: стандартное отклонение шума – 0,2 мВ, количество реализаций – 500, максимально допустимое количество просеивающих итераций – 5000.

Как видно из рис. 3, вокализованный участок РС разложен на 9 ЭМ. Две первые моды (черный цвет) содержат основной шум, присутствующий в исходном сигнале. Шестая мода и последующие являются низкочастотными и соответствуют присутствующему в сигнале тренду. Ценная высокочастотная информация, связанная со смыканием голосовых складок, появляется с третьей по пятую ЭМ.

**Определение ЭМ с основным тоном.** Суть определения ЭМ с основным тоном заключается в предположении, что информативные моды (ЭМ3 – ЭМ5) имеют большую энергию, чем трендовые моды. Амплитудное распределение ЭМ хорошо описывается с помощью функции кратковременной энергии. В разработанном алгоритме для сжатия амплитуды сигнала в большом динамическом диапазоне применяется логарифмирование энергии по аналогии с функционированием слухового аппарата человека:

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

где  $LE_i$  – логарифм энергии ЭМ.

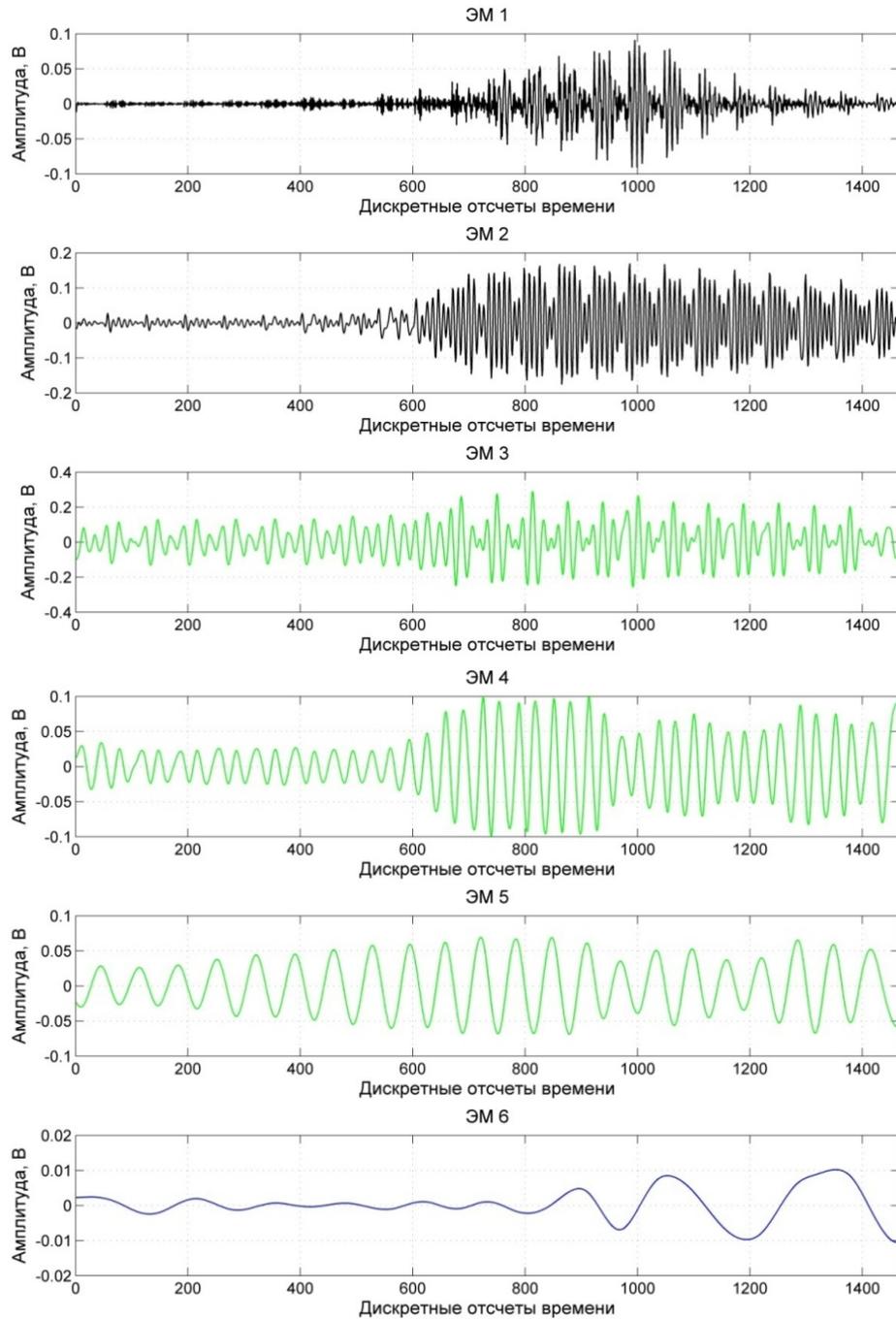


Рис. 3. Результат разложения вокализованного участка РС методом улучшенной ПМДЭМАШ

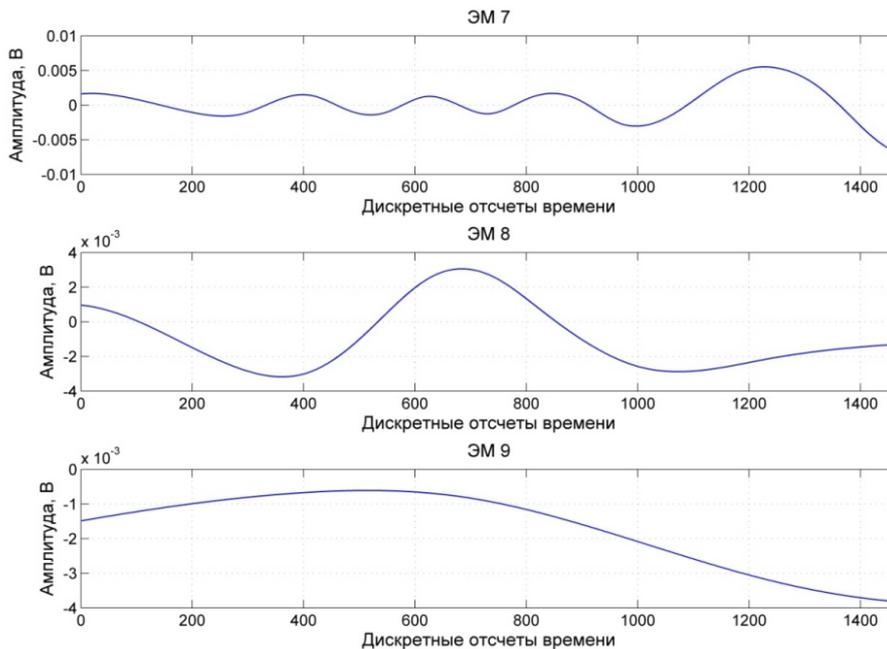


Рис. 3. Окончание

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

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

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

В результате из последовательности полученных значений  $d$  большему из них соответствует резкий спад энергии между информативной ЭМ, содержащей ОТ, и трендовой [42, 43]. На рис. 4 представлена графическая интерпретация процесса определения моды, содержащей ОТ. В соответствии с правилом определения из рис. 4,а следует, что 5-я ЭМ может содержать ОТ. Анализ спектрального распределения 5-й ЭМ и исходного РС подтверждает правильность определения моды, содержащей ОТ: единственная гармоническая составляющая ЧОТ 5-й ЭМ соответствует первой составляющей «гармонического сита» исходного РС (рис. 4,б). На рис. 5 представлены осциллограммы исходного сигнала 5-й моды с ОТ.

В качестве единицы измерения спектральной плотности мощности выбрана составная величина дБВт/Гц с опорным уровнем в 1 Вт/Гц (мощность, выделяющаяся в полосе частот шириной в 1 Гц).

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

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

где  $T(n)$  – функция оператора Тигра;  $IMF_{i,PF}(n)$  – ЭМ, содержащая ОТ.

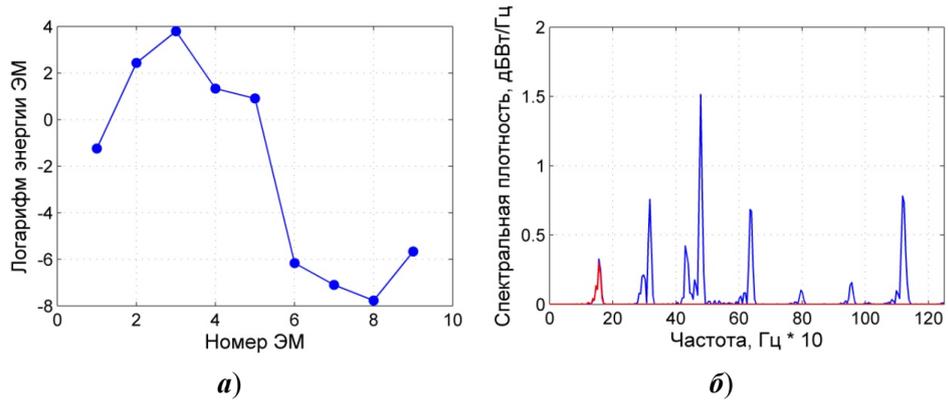


Рис. 4. Определения ЭМ, содержащей ОТ: *a* – логарифмы энергии ЭМ; *б* – спектральное распределение исходного РС и 5-й ЭМ

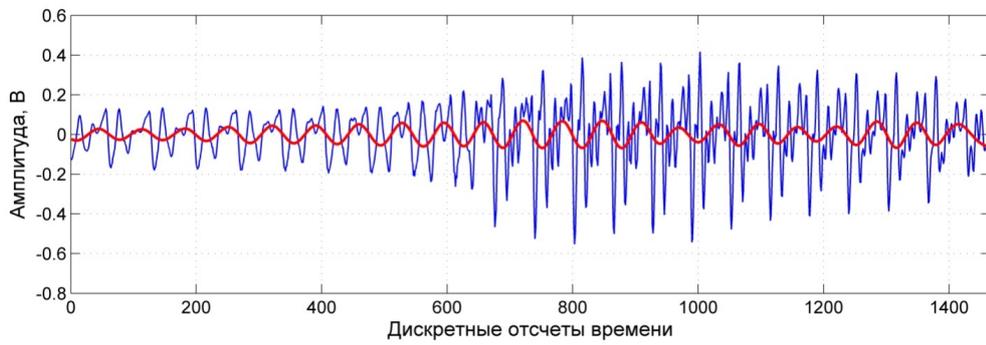


Рис. 5. Осциллограммы исходного сигнала пятой моды с ОТ

На рис. 6 представлены осциллограмма и функция оператора Тигра 5-й ЭМ.

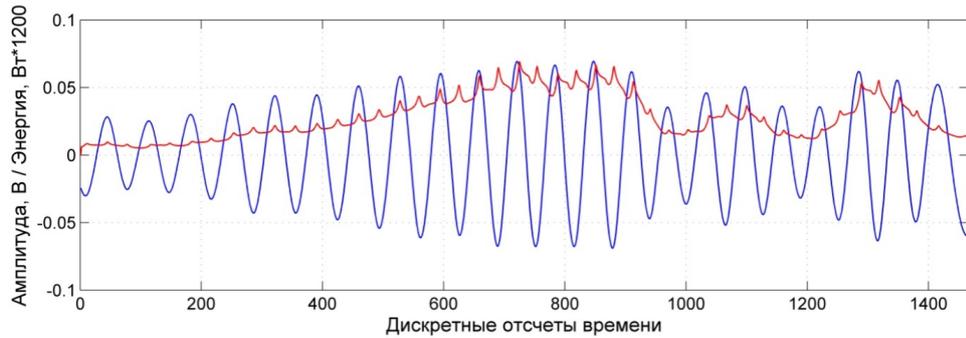


Рис. 6. Осциллограмма и функция оператора Тигра 5-й ЭМ

Для измерения частоты используются близкорасположенные максимумы, функции оператора Тигра, между которыми определяется разница в дискретных отсчетах времени, вычисляется период ОТ (в секундах) и ЧОТ (в герцах):

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

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

**Определение ЧОТ.** Для расширения информационного пространства о частоте ОТ определяются следующие ее значения:

– среднее значение ЧОТ, Гц:

$$f_{0,\text{mean}} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P f_{0,p},$$

где  $p = 1, 2, \dots, P$  – номер периода ОТ;

– максимальное  $\max(f_0)$  и минимальное  $\min(f_0)$  значения ЧОТ, Гц;

– стандартное отклонение контура ЧОТ:

$$SD_{f_0} = \frac{1}{P-1} \sum_{p=1}^P (f_{0,p} - f_{0,\text{mean}})^2;$$

– диапазон фонационных частот:

$$PFR = 12 \times \frac{\log\left(\frac{\max(f_0)}{\min(f_0)}\right)}{\log_2};$$

– среднее абсолютное значение джиттера:

$$MAJ = \frac{1}{P-2} \sum_{p=P-1}^1 |f_{0,p-1} - f_{0,p}|;$$

– джиттер:

$$J = \frac{MAJ}{f_{0,\text{mean}}};$$

– среднее относительное возмущение ЧОТ, сглаженное за три периода ОТ:

$$RAP = \frac{1}{P-2} \sum_{p=2}^{P-1} \left| \frac{f_{0,p+1} + f_{0,p} + f_{0,p-1}}{3} - f_{0,p} \right| \cdot 100;$$

– коэффициент возмущения ЧОТ, сглаженный за пять периодов ОТ:

$$PPQ = \frac{1}{P-4} \sum_{p=3}^{P-2} \left| \frac{\sum_{k=p-2}^{p+2} f_{0,k}}{5} - f_{0,i} \right| \cdot 100.$$

**Вывод результатов.** На данном этапе работы алгоритма осуществляется формирование векторов полученных паттернов ЧОТ и ее значений в удобный для дальнейшего определения «норма/патология» вид (рис. 1, блоки 9, 10).

### **3. Исследование алгоритма**

#### **3.1. Описание базы данных речевых сигналов**

Для проведения исследований разработанного алгоритма сформирована группа пациентов и верифицированная база сигналов при поддержке Областной клинической больницы им. К. Р. Евграфова (г. Пенза, Российская Федерация) и Пензенского государственного университета. Группа пациентов сформирована в соответствии клинической картиной расстройства следующих диагностических рубрик международной классификации болезней МКБ-10: F48.0, F45.3, F43.2, F41.2.

В группу пациентов с психогенными расстройствами отобрано 100 человек мужского и женского пола в возрасте от 18 до 60 лет, которые поступили с явно выраженной симптоматикой. В том же количестве (100 человек) сформирована база контрольной группы пациентов без признаков пограничных психических расстройств (условно здоровые). Средний возраст в экспериментальной группе пациентов с пограничными психическими расстройствами составил 40,2 года, в контрольной группе сравнения 35,4 года.

В обеих группах преобладали женщины (75 %), возраст преимущественно для женщин от 40 до 59 лет, для мужчин от 50 до 59 лет. Большинство пациентов были работающими (90,8 %), среди которых выделялись по численности служащие предприятий и организаций (65,0 %). Меньшие доли приходились на рабочих (14,2 %), творческих работников (12,5 %) и единицы – на учащихся, студентов и неработающих. Большинство пациентов имели высшее или неоконченное высшее образование (69,2 %).

#### **3.2. Результаты исследования**

Для оценки эффективности алгоритма использовался параметр – ошибки первого и второго рода. В рамках данного исследования задачей является определение паттернов пограничных психических расстройства, поэтому ошибкой первого рода будет ложное присваивание статуса «норма» РС, произнесенному человеком с психогенным расстройством, а ошибкой второго рода – ложное присваивание статуса «патология» РС, произнесенному здоровым человеком.

Результаты исследования разработанного алгоритма оценивались в сравнении с упомянутыми в начале статьи алгоритмами измерения ЧОТ, программная реализация которых имеется в открытом доступе: «YIN», RAPT SWIPE.

В табл. 1 представлены результаты определения пограничных психических расстройств для трех сравниваемых алгоритмов.

### **4. Обсуждение и выводы**

Из полученных результатов следует, что разработанный авторами алгоритм обеспечивает повышение точности измерения ЧОТ:

- для ошибки первого рода точнее на 8 %, чем у алгоритма RAPT, на 13 % – чем у алгоритма «YIN», и на 11 % – чем у алгоритма SWIPE;
- для ошибки второго рода точнее на 4, 7 и 3 % соответственно.

Таблица 1

Результаты определения пограничных психических расстройств

Прогнозируемый результат	Результат определения		Ошибки первого и второго рода, %	
	Патология	Норма		
<b>Алгоритм на основе устойчивого отслеживания основного тона (RAPT)</b>				
Патология	84 чел.	16 чел.	1-го	16
Норма	8 чел.	92 чел.	2-го	8
<b>Алгоритм на основе автокорреляционной функции («YIN»)</b>				
Патология	79 чел.	21 чел.	1-го	21
Норма	11 чел.	89 чел.	2-го	11
<b>Алгоритм на основе оценки основного тона пилообразной формы (SWIPE)</b>				
Патология	81 чел.	19 чел.	1-го	19
Норма	7 чел.	93 чел.	2-го	7
<b>Разработанный алгоритм</b>				
Патология	92 чел.	8 чел.	1-го	8
Норма	4 чел.	96 чел.	2-го	4

Данные результаты позволяют сделать вывод, что разработанный алгоритм на основе метода улучшенной ПМДЭМАШ может быть успешно использован в системах обнаружения паттернов пограничных психических расстройств и внедрен в клиническую практику врача-психиатра.

#### Библиографический список

1. Современные представления о специфике и проблемах диагностики пограничных психических расстройств / А. Ю. Тычков, А. В. Агейкин, А. К. Алимуратов, В. Б. Калистратов, С. Ю. Митрошина // Психическое здоровье. – 2017. – № 5. – С. 69–75.
2. **Pantic, K. M.** A dynamic texture-based approach to recognition of facial actions and their temporal models / Koelstra M. Pantic, Ioannis Patras // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2010. – Vol. 32. – P. 1940–1954.
3. **Бобков, А. С.** Модели и методы определения эмоционального состояния человека на основе автоматизированной обработки и анализа видеоинформации : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Бобков Артем Сергеевич. – Москва, 2013. – 170 с.
4. **Кислова, О. О.** Психофизиологические предпосылки успешности распознавания эмоциональной речевой экспрессии : дис. ... канд. биол. наук : 03.00.13 / Кислова Ольга Олеговна. – Москва, 2009. – 151 с.
5. **Agrafioti, F.** ECG in Biometric Recognition: Time Dependency and Application Challenges / Foteini Agrafioti, Doctor of Philosophy Graduate Department of Electrical and Computer Engineering University of Toronto. – Toronto, 2011.
6. **Kappeler-Setz, C.** Towards long term monitoring of electrodermal activity in daily life / Cornelia Kappeler-Setz, Franz Gravenhorst, Johannes Schumm, Bert Arnrich, Gerhard Tröster // Journal Personal and Ubiquitous Computing. – 2013. – Vol. 17, iss. 2. – P. 261–271.
7. **Farwell, L. A.** Brain fingerprinting: a comprehensive tutorial review of detection of concealed information with event-related brain potentials / Lawrence A. Farwell // Cogn Neurodyn. – 2012. – Vol. 6. – P. 115–154. DOI 10.1007/s11571-012-9192-2.

8. **Quan, C.** Sentence Emotion Analysis and Recognition Based on Emotion Words Using Ren-CECps / Changqin Quan, Fuji Ren // *International Journal of Advanced Intelligence*. – 2010. – Vol. 2, № 1. – P.105–117.
9. **Заболеева-Зотова, А. В.** Задача создания системы автоматизированного распознавания эмоций / А. В. Заболева-Зотова, Ю. А. Орлова, В. Л. Розалиев, А. С. Бобков // *Материалы международной научно-технической конференции OSTIS*. – Минск : БГУИР, 2012. – С. 347–350.
10. **Likforman-Sulem, L.** EMOTHAW: A Novel Database for Emotional State Recognition From Handwriting and Drawing / Laurence Likforman-Sulem, Anna Esposito, Marcos Faundez-Zanuy, Stéphan Cléménçon, Gennaro Cordasco // *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. – 2017. – Vol. 47, iss. 2. – P. 273–284. DOI: 10.1109/THMS.2016.2635441.
11. **Барабаншиков, В. А.** Методы регистрации движений глаз в психологии: основы учебно-методического комплекса / В. А. Барабаншиков, А. В. Жегалло // *Экспериментальная психология*. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 132–137.
12. **Loughland, C. M.** Visual scanpaths to positive and negative facial emotions in an outpatient schizophrenia sample / C. M. Loughland, L. M. Williams, E. Gordon // *Schizophrenia Research*. – 2002. – Vol. 55, iss. 1-2. – P. 159–170.
13. **Филатова, Н. Н.** Модель интерпретации знака эмоций по естественной речи / Н. Н. Филатова, К. В. Сидоров // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2012. – № 9 (134). – С. 39–45.
14. **Давыдов, А. Г.** Выбор оптимального набора информативных признаков для классификации эмоционального состояния диктора по голосу / А. Г. Давыдов, В. В. Киселев, Д. С. Кочетков, А. В. Ткачяня // *Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии : по материалам ежегод. Междунар. конф. «Диалог»*. – Вып. 11 : в 2 т. Т. 1 : Основная программа конференции. – М. : Изд-во РГГУ, 2012. – С. 122–128.
15. **Williamson, J. R.** Vocal and facial biomarkers of depression based on motor incoordination and timing / James R Williamson, Thomas F. Quatieri, Brian S. Helfer, Gregory Ciccarelli, Daryush D. Mehta // *Proceedings of the 4th International Workshop on Audio-Visual Emotion*. – Challenge, 2014. – С. 65–72.
16. **Darley, F. L.** Differential diagnostic patterns of dysarthria / F. L. Darley, A. E. Aronso, J. R. Brown // *J. Speech Lang. Hear. Res.* – 1969. – Vol. 12. – P. 47–57.
17. **Dorry, M. K.** Emotion Identification from Spontaneous Communication: A Thesis Submitted to the Department of Computer Science in Partial Fulfilment for the Degree of Master of Science in Computer Science / Mikiyas Kebede Dorry ; Addis Ababa University College of Natural Sciences. – Addis Ababa, Ethiopia, 2016. – P. 93.
18. **Schwenzer, M.** Impaired pitch identification as a potential marker for depression / Michael Schwenzer, Eva Zattarin, Michael Grozinger and Klaus Mathiak // *BMC Psychiatry*. – 2012. – Vol. 12, iss. 1. – P. 32–37.
19. **Morist, M. U.** Emotional speech synthesis for a radio dj: corpus design and expression modeling: master thesis MTG-UPF dissertation / M. U. Morist. – Barcelona, 2010.
20. **Yingthawornsuk, T.** Analysis of Speech Based on Spectral Entropy in Detecting Depressed among Control Subjects / Thaweesak Yingthawornsuk // *International Conference on Computer and Communication Technologies (ICCCCT'2012)*, May 26–27, 2012. – Phuket, 2012.
21. **Yu, B.** Cognitive impairment prediction in the elderly based on vocal biomarkers / Bea Yu, Thomas F. Quatieri, James R. Williamson, James C. Mundt // *Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. – Dresden Germany, 2015. – P. 3734–3738.
22. **Grossberg, S.** The Adaptive Self-organization of Serial Order in Behavior: Speech, Language / Stephen Grossberg // *Pattern recognition by humans and machines: Speech perception*. – 2013. – P. 187.

23. **Staudacher, M.** Fast fundamental frequency determination via adaptive autocorrelation / Michael Staudacher, Viktor Steixner, Andreas Griessner and Clemens Zierhofer // EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing. – 2016. – Issue 1. Dec. – P. 8.
24. **Kumar, S.** Efficient Time Domain Fundamental Frequency Estimation (Pitch Estimation) / Sunil Kumar, Manisha Jangra, // International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT). – 2015. – Vol. 6, iss. 3.
25. **Eun-Joo, S.** Feature Extraction Method for Predicting Depression by Frequency Domain Analysis / Eun-Joo Seo, Kwang-Seok Hong // International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences (CMES 2015). – London, UK, 2015. – P. 600–603.
26. **Haraa, Y.** Method for estimating pitch independently from power spectrum envelope for speech and musical signal / Yoshifumi Haraa, Mitsuo Matsumoto, Kazunori Miyoshi // Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment, 2009. – Vol. 9, iss. 9. – P. 121–124.
27. **Shahnaz, C.** A Spectro-Temporal algorithm for pitch frequency estimation from noisy observations / C. Shahnaz, W.-P. Zhu, and M. O. Ahmad // IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2008), May 18–21, 2008. – Seattle USA, 2008. – P. 1704–1707.
28. **Klapuri, A. P.** Multiple Fundamental Frequency Estimation Based on Harmonicity and Spectral Smoothness / Anssi P. Klapuri // IEEE Transactions on speech and audio processing. – 2003. – Vol. 11, № 6. – P. 804–816.
29. **Cheveigne, A.** «YIN» a fundamental frequency estimator for speech and music / A. Cheveigne, H. Kawahara // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2002. – Vol. 111, № 4. – P. 1917–1930.
30. **Talkin, D.** A Robust Algorithm for Pitch Tracking (RAPT) // Chapter 14 in Speech Coding & Synthesis / D. Talkin ; ed. by W. B. Kleijn and K. K. Paliwan. – New York, USA, Elsevier Science, 1995. – P. 495–518.
31. **Camacho, A.** A sawtooth waveform inspired pitch estimator for speech and music / A. Camacho, J. G. Harris // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2008. – Vol. 123, № 4. – P. 1638–1652.
32. **Alimuradov, A. K.** Research of Frequency-Selective Properties of Empirical Mode Decomposition Methods for Speech Signals' Pitch Frequency Estimation / A. K. Alimuradov // International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Nov. 18–19, 2015, Russia, Moscow, – Moscow, 2015. – P. 77–79. DOI: 10.1109/EnT.2015.9.
33. Speech/pause detection algorithm based on the adaptive method of complementary decomposition and energy assessment of intrinsic mode functions / A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, A. V. Ageykin, P. P. Churakov, Y. S. Kvitka and A. P. Zaretskiy // XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), May 24–26, 2017, Russia, St. Petersburg. – St. Petersburg, 2017. – P. 610–613. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970665.
34. **Huang, N. E.** The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Sh. Zheng, and R. L. Steven // Proc. R. Soc. Lond. – 1998. – Vol. A454. – P. 903–995.
35. **Zhaohua, Wu.** Ensemble empirical mode decomposition: A noise - assisted data analysis method / Wu Zhaohua, N. E. Huang // Advances in Adaptive Data Analysis. – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 1–41.
36. **Yeh, J.-R.** Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method / J.-R. Yeh, J.-S. Shieh, and N. E. Huang // Adv. Adapt. Data Anal. – 2010. – Vol. 2, № 2. – P. 135–156.
37. **Torres, M. E.** A complete Ensemble Empirical Mode decomposition with adaptive noise / M. E. Torres, M. A. Colominas, G. Schlotthauer, P. Flandrin // International

- Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-11). – Prague (CZ), 2011. – P. 4144–4147,
38. **Colominasa, M. A.** Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing / Marcelo A. Colominasa, Gaston Schlotthauer, Maria E. Torres // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2014. – Vol. 14. – P. 19–29.
39. **Huang, X.** Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development / X. Huang, A. Acero, H.-W. Hon // Prentice Hall. – New Jersey, 2001. – 980 p.
40. **Фант, Г. К.** Акустическая теория речеобразования / Г. К. Фант ; пер. с англ. Л. А. Варшавского и В. И. Медведева ; науч. ред. В. С. Григорьева. – М. : Наука, 1964. – 284 с.
41. **Попов, Д. И.** Оптимизация цифровых систем обработки сигналов / Д. И. Попов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2017. – № 1 (41). – С. 96–105.
42. **Alimuradov, A. K.** An Algorithm for Measurement of the Pitch Frequency of Speech Signals Based on Complementary Ensemble Decomposition Into Empirical Modes / A. K. Alimuradov // *Measurement techniques*. – 2017. – Vol. 59, № 12. – P. 1316–1323. DOI 10.1007/s11018-016-0994-1.
43. **Alimuradov, A. K.** Program Implementation of an Algorithm for Recognition of Speech Signals in the Labview Graphics Programming Environment / A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, M. V. Frantsuzov, P. P. Churakov // *Measurement techniques*. – 2015. – Vol. 58, iss. 9. – P. 965–969.

### **References**

1. Tychkov A. Yu., Ageykin A. V., Alimuradov A. K., Kalistratov V. B., Mitroshina S. Yu. *Psikhicheskoe zdorov'e* [Mental health]. 2017, no. 5, pp. 69–75.
2. Pantic K. M., Patras Ioannis *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2010, vol. 32, pp. 1940–1954.
3. Bobkov A. S. *Modeli i metody opredeleniya emotsional'nogo sostoyaniya cheloveka na osnove avtomatizirovannoy obrabotki i analiza videoinformatsii: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.01* [Human emotional condition determination methods and models on the basis of automatic videoinformation processing and analysis: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Moscow, 2013, 170 p.
4. Kislova O. O. *Psikhofiziologicheskie predposylki uspehnosti raspoznavaniya emotsional'noy rechevoy ekspresii: dis. kand. biol. nauk: 03.00.13* [Psychophysical prerequisites of successful detection of emotion speech expression: dissertation to apply for the degree of the candidate of biological sciences]. Moscow, 2009, 151 p.
5. Agraftoti F. *ECG in Biometric Recognition: Time Dependency and Application Challenges*. Toronto, 2011.
6. Kappeler-Setz C., Gravenhorst Franz, Schumm Johannes, Arnrich Bert, Tröster Gerhard *Journal Personal and Ubiquitous Computing*. 2013, vol. 17, iss. 2, pp. 261–271.
7. Farwell L. A. *Cogn Neurodyn*. 2012, vol. 6, pp. 115–154. DOI 10.1007/s11571-012-9192-2.
8. Quan C., Ren F. *International Journal of Advanced Intelligence*. 2010, vol. 2, no. 1, pp. 105–117.
9. Zaboлева-Zotova A. V., Orlova Yu. A., Rozaliev V. L., Bobkov A. S. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii OSTIS* [Proceedings of an International Scientific and Technical Conference OSTIS]. Minsk: BGUIR, 2012, pp. 347–350.
10. Likforman-Sulem L., Esposito A., Faundez-Zanuy M., Clémencion S., Cordasco G. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2017, vol. 47, iss. 2, pp. 273–284. DOI: 10.1109/THMS.2016.2635441.
11. Barabanshchikov V. A., Zhegallo A. V. *Ekspierimental'naya psikhologiya* [Experimental psychology]. 2014, vol. 7, no. 1, pp. 132–137.

12. Loughland C. M., Williams L. M., Gordon E. *Schizophrenia Research*. 2002, vol. 55, iss. 1-2, pp. 159–170.
13. Filatova N. N., Sidorov K. V. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskije nauki* [Proceedings of South Federal University. Engineering sciences]. 2012, no. 9 (134), pp. 39–45.
14. Davydov A. G., Kiselev V. V., Kochetkov D. S., Tkachenya A. V. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii: po materialam ezhegod. Mezhdunar. konf. «Dialog»*. Vyp. 11: v 2 t. T. 1: *Osnovnaya programma konferentsii* [Computer linguistics and intelligent technologies: based on proceedings of the annual International Conference “Dialogue”. Issue 11: in 2 volumes. Vol.1: Main conference program]. Moscow: Izd-vo RGGU, 2012, pp. 122–128.
15. Williamson J. R., Quatieri T. F., Helfer B. S., Ciccarelli G., Mehta D. D. *Proceedings of the 4th International Workshop on Audio-Visual Emotion*. Challenge, 2014, pp. 65–72.
16. Darley F. L., Aronso A. E., Brown J. R. *J. Speech Lang. Hear. Res.* 1969, vol. 12, pp. 47–57.
17. Dorry M. K. *Emotion Identification from Spontaneous Communication: A Thesis Submitted to the Department of Computer Science in Partial Fulfilment for the Degree of Master of Science in Computer Science*. Addis Ababa University College of Natural Sciences. Addis Ababa, Ethiopia, 2016, p. 93.
18. Schwenzer M., Zattarin E., Grozinger M., Mathiak K. *BMC Psychiatry*. 2012, vol. 12, iss. 1, pp. 32–37.
19. Morist M. U. *Emotional speech synthesis for a radio dj: corpus design and expression modeling: master thesis MTG-UPF dissertation*. Barcelona, 2010.
20. Yingthawornsuk T. *International Conference on Computer and Communication Technologies (ICCCT'2012), May 26–27, 2012*. Phuket, 2012.
21. Yu B., Quatieri T. F., Williamson J. R., Mundt J. C. *Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. Dresden Germany, 2015, pp. 3734–3738.
22. Grossberg S. *Pattern recognition by humans and machines: Speech perception*. 2013, p. 187.
23. Staudacher M., Steixner V., Griessner A., Zierhofer C. *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*. 2016, iss. 1, Dec., p. 8.
24. Kumar S., Jangra M. *International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT)*. 2015, vol. 6, iss. 3.
25. Eun-Joo S., Kwang-Seok Hong *International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences (CMES 2015)*. London, UK, 2015, pp. 600–603.
26. Haraa Y., Matsumotob M., Miyoshi K. *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment*. 2009, vol. 9, iss. 9, pp. 121–124.
27. Shahnaz C., Zhu W.-P., Ahmad M. O. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2008), May 18–21, 2008*. Seattle USA, 2008, pp. 1704–1707.
28. Klapuri A. P. *IEEE Transactions on speech and audio processing*. 2003, vol. 11, no. 6, Nov., pp. 804–816.
29. Cheveigne A., Kawahara H. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2002, vol. 111, no. 4, pp. 1917–1930.
30. Talkin D. *Chapter 14 in Speech Coding & Synthesis*. Ed. by W. B. Kleijn and K. K. Paliwan. Elsevier Science. New York USA, 1995, pp. 495–518.
31. Camacho A., Harris J. G. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2008, vol. 123, no. 4, pp. 1638–1652.
32. Alimuradov A. K. *International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Nov. 18–19, 2015, Russia, Moscow*. Moscow, 2015, pp. 77–79. DOI: 10.1109/EnT.2015.9.
33. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Ageykin A. V., Churakov P. P., Kvitka Y. S., Zaretskiy A. P. *XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements*

- (SCM), May 24–26, 2017, Russia, St. Petersburg. Saint-Petersburg, 2017, pp. 610–613. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970665.
34. Huang N. E., Zheng Sh., Steven R. L. *Proc. R. Soc. Lond.* 1998, vol. A454, pp. 903–995.
35. Zhaohua Wu., Huang N. E. *Advances in Adaptive Data Analysis.* 2009, vol. 1, no. 1, pp. 1–41.
36. Yeh J.-R., Shieh J.-S., Huang N. E. *Adv. Adapt. Data Anal.* 2010, vol. 2, no. 2, pp. 135–156.
37. Torres M. E., Colominas M. A., Schlotthauer G., Flandrin P. *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-11)*. Prague (CZ), 2011, pp. 4144–4147.
38. Colominasa M. A., Schlotthauera G., Torres M. E. *Biomedical Signal Processing and Control.* 2014, vol. 14, pp. 19–29.
39. Huang X., Acero A., Hon H.-W. *Prentice Hall*. New Jersey, 2001, 980 p.
40. Fant G. K. *Akusticheskaya teoriya recheobrazovaniya: per. s ang. L. A. Varshavskogo i V. I. Medvedeva; nauch. red. V. S. Grigor'eva* [The acoustic theory of speech production: translation from English language by L.A. Varshavskiy and V.I. Medvedev: scientific editing by V.S. Grigoryev]. Moscow: Nauka, 1964, 284 p.
41. Popov D. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 1 (41), pp. 96–105.
42. Alimuradov A. K. *Measurement techniques.* 2017, vol. 59, no. 12, pp. 1316–1323. DOI 10.1007/s11018-016-0994-1.
43. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Frantsuzov M. V., Churakov P. P. *Measurement techniques.* 2015, vol. 58, iss. 9, pp. 965–969.

---

**Алимуратов Алан Казанферович**

кандидат технических наук,  
директор студенческого научно-  
производственного бизнес-инкубатора,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: alansapfir@yandex.ru

**Тычков Александр Юрьевич**

кандидат технических наук, заместитель  
директора, Научно-исследовательский  
институт фундаментальных  
и прикладных исследований, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

**Чураков Петр Павлович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительной  
техники и метрологии, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ivan@pniei.penza.ru

**Alimuradov Alan Kazanferovich**

Candidate of engineering sciences,  
director of the student research  
and production business- incubator,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Tychkov Aleksandr Yur'evich**

Candidate of engineering sciences,  
deputy director, Research Institute  
of Fundamental and Applied Research,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Churakov Petr Pavlovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of information measuring  
technologies and metrology, Penza  
State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

**Агейкин Алексей Викторович**

младший научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт  
фундаментальных и прикладных  
исследований, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: keokushinka@yandex.ru

**Ageykin Aleksey Viktorovich**

Junior researcher, Research Institute  
of Fundamental and Applied Research,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

---

УДК 616.89

**Алимурадов, А. К.**

**Разработка алгоритма обработки речевых сигналов для определения информативно значимых параметров пограничных психических расстройств / А. К. Алимурадов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, А. В. Агейкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 4–25. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-1**

## ОБНАРУЖЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются методы и алгоритмы обнаружения стохастических радиолокационных сигналов на фоне нормального белого шума. Целью работы является синтез алгоритмов и построение соответствующих структурных схем обнаружения стохастических сигналов.

*Материалы и методы.* На основе многомерной плотности вероятности отсчетов сигнала в дискретные моменты времени введено описание последовательности стохастических сигналов с использованием функционала плотности вероятности. Методом исследования является статистический синтез алгоритмов обнаружения, использующий операции вычисления отношения правдоподобия.

*Результаты.* В результате вычисления отношения правдоподобия синтезирован адаптивный алгоритм обнаружения последовательности стохастических сигналов на фоне нормального белого шума и приведена структурная схема обнаружителя. В адаптивном линейном фильтре из наблюдаемого колебания формируется опорный сигнал, который умножается снова на принятое колебание, а затем интегрируется. Результаты интегрирования накапливаются в межпериодном накопителе.

*Выводы.* При априорной неопределенности статистических характеристик сигнала (корреляционной функции) определяется оценка соответствующей функции, преобразуемая в оценку обратной корреляционной функции, используемой при адаптации линейного фильтра. Предложенный модифицированный алгоритм обнаружения и соответствующая структурная схема обнаружителя аналогична энергетическому приемнику, в котором решающей статистикой является суммарная энергия принятых реализаций, предварительно пропущенных через адаптивный линейный фильтр.

**Ключевые слова:** адаптивный алгоритм обнаружения, корреляционная матрица, корреляционная функция, многомерная плотность вероятности, нормальный белый шум, обратная корреляционная матрица, обратная корреляционная функция, отношение правдоподобия, стохастический сигнал.

D. I. Popov

## DETECTION OF STOCHASTIC RADAR SIGNALS

### Abstract.

*Background.* The objects of the study are methods and algorithms for detecting stochastic radar signals against the background of normal white noise. The aim of the work is synthesize algorithms and design construction of appropriate structural schemes for detecting stochastic signals.

*Materials and methods.* On the basis of the multidimensional probability density of signal samples at discrete instants of time, a description of the sequence of stochastic signals using the probability density functional is introduced. The method of investigation is statistical synthesis of detection algorithms using the operations of likelihood ratio calculation.

*Results.* As a result of calculating the likelihood ratio, an adaptive algorithm for detecting the sequence of stochastic signals against the background of normal white noise is synthesized and a scheme of the detector is given. An adaptive linear filter generates a reference signal from the observed oscillation, which is multiplied again by the received oscillation, and then integrated. The integration results are accumulated in the inter-period storage.

*Conclusions.* With a priori uncertainty of statistical characteristics of the signal (correlation function), the corresponding function is determined. It is transformed into an estimate of the inverse correlation function used in linear filter adaptation. The proposed modified detection algorithm and the corresponding detector scheme are similar to the energy receiver, in which the decisive statistics is the total energy of the received realizations previously passed through the adaptive linear filter.

**Key words:** adaptive detection algorithm, correlation matrix, correlation function, multi-dimensional probability density, normal white noise, inverse correlation matrix, inverse correlation function, likelihood ratio, stochastic signal.

## Введение

Обнаружение сигналов является первой задачей, решаемой при обработке разнообразных радиолокационных эхо-сигналов [1, 2]. Алгоритм обнаружения и структура соответствующего обнаружителя зависят от вида и статистических свойств поступающих сигналов [3, 4]. Широкое распространение при синтезе алгоритмов обнаружения получили так называемые квазидетерминированные сигналы, т.е. детерминированные сигналы со случайными параметрами [5, 6]. Однако на практике от ряда целей поступают сигналы, имеющие шумоподобный (случайный) характер, например от вертолетов, дронов и т.п. Кроме того, в доплеровских метеорологических радиолокаторах получили применение стохастические (случайные) зондирующие радиосигналы [7]. Стохастические сигналы встречаются также в радиоастрономии, радиоразведке, пассивной локации, биоэлектронике и т.д. В связи с этим актуальна задача синтеза алгоритмов обнаружения стохастических сигналов.

### 1. Статистическое описание сигналов и шумов

Стохастический характер отраженных сигналов обусловлен либо применением стохастических зондирующих сигналов, например в доплеровских метеорологических радиолокаторах [7], либо множественным характером независимо и случайно расположенных элементарных отражателей радиолокационной цели, перемещающихся друг относительно друга и относительно радиолокатора. Сигнал от такой совокупности отражающих элементов на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей представляет собой нормальный случайный процесс [8], многомерная плотность вероятности которого имеет вид

$$P(s_1, s_2, \dots, s_m) = (2\pi)^{-m/2} (\det \| R_{jk}^c \|)^{-1/2} \exp \left( -\frac{1}{2} \sum_{j, k=1}^m s_j W_{jk}^c s_k \right), \quad (1)$$

где  $s_j = s(t_j)$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) – совокупность отсчетов сигнала  $s(t)$  в дискретные моменты времени  $t = t_j$ ;  $\det \| R_{jk}^c \|$  – определитель корреляционной

матрицы, составленной из значений корреляционной функции  $R_{jk}^c = R_c(t_j, t_k) = \overline{s(t_j)s(t_k)}$  сигнала  $s(t)$  с нулевым математическим ожиданием  $[\overline{s(t)} = 0]$ ;  $W_{jk}^c$  – элементы матрицы, обратной корреляционной, которые удовлетворяют уравнениям:

$$\sum_{i=1}^m R_{ji}^c W_{ik}^c = \delta_{jk}, \quad (2)$$

здесь  $\delta_{jk}$  – дельта-символ Кронекера,

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1 & j = k, \\ 0 & j \neq k. \end{cases}$$

Для определения элементов обратной матрицы удобно использовать равенство [8]:

$$W_{jk}^c = \frac{Ad(R_{kj}^c)}{\det \| R_{jk}^c \|},$$

где  $Ad(R_{kj}^c)$  – алгебраическое дополнение элемента  $R_{kj}^c$  корреляционной матрицы.

Перейдем к описанию стохастических сигналов с использованием функционала плотности вероятности [9], который получается из многомерной плотности вероятности для отсчетов сигнала, заданного на отрезке  $[0, T]$ , в моменты времени  $t_j = j\Delta t$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ . В результате предельного перехода при  $m \rightarrow \infty$ ,  $\Delta t \rightarrow 0$  и  $T = \text{const}$  плотность вероятности (1) преобразуется в функционал плотности вероятности. При таком переходе двойная сумма в показателе экспоненты в формуле (1) может интерпретироваться как интегральная и пределом квадратичной формы оказывается двойной интеграл:

$$\begin{aligned} \lim_{\substack{m \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \left( -\frac{1}{2} \sum_{j, k=1}^m s_j W_{jk}^c s_k \right) &= \lim_{\substack{m \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \left( -\frac{1}{2} \sum_{j, k=1}^m s_j \frac{W_{jk}^c}{\Delta t^2} s_k \Delta t^2 \right) = \\ &= -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T s(t_1) W_c(t_1, t_2) s(t_2) dt_1 dt_2, \end{aligned}$$

где

$$W_c(t_1, t_2) = \lim_{\substack{j\Delta t \rightarrow t_1 \\ k\Delta t \rightarrow t_2}} \frac{W_c(j\Delta t, k\Delta t)}{\Delta t^2} -$$

обратная корреляционная функция сигнала.

Функционал плотности вероятности нормального стохастического сигнала имеет вид

$$F[s(t)] = C \exp \left[ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T s(t_1) W_c(t_1, t_2) s(t_2) dt_1 dt_2 \right]. \quad (3)$$

Уравнение (2), определяющее элементы обратной корреляционной матрицы  $W_{ik}^c$ , можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^m R_{ji}^c \frac{W_{ik}^c}{\Delta t^2} \Delta t = \frac{\delta_{jk}}{\Delta t},$$

переходящем при  $m \rightarrow \infty$  и  $\Delta t \rightarrow 0$  в интегральное уравнение

$$\int_0^T R_c(t_1, t) W_c(t, t_2) dt = \delta(t_1 - t_2), \quad (4)$$

где  $\delta(t_1 - t_2)$  – дельта-функция Дирака.

Функция  $W_c(t_1, t_2)$  является решением интегрального уравнения (4).

В выражении (3) множитель

$$C = \lim_{m \rightarrow \infty} \left[ (2\pi)^{-m/2} (\det \| R_{jk}^c \|)^{-1/2} \right]$$

может не существовать или быть равным нулю. Однако при решении практических задач это обстоятельство не является существенным, так как при синтезе алгоритмов обнаружения отношение функционалов плотности вероятности (отношение правдоподобия) является конечной функцией.

При обзоре пространства от радиолокационной цели поступает последовательность (пачка)  $L$  эхо-сигналов  $\{s_l(t)\} = s_1(t), s_2(t), \dots, s_L(t)$ , следующих с периодом повторения зондирующих импульсов. С учетом статистической независимости сигналов функционал плотности вероятности для пачки сигналов принимает вид

$$F[\{s_l(t)\}] = C^L \prod_{l=1}^L \exp \left[ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T s_l(t_1) W_{cl}(t_1, t_2) s_l(t_2) dt_1 dt_2 \right]. \quad (5)$$

В качестве помехи рассмотрим нормальный стационарный дельта-коррелированный процесс  $n(t)$ , называемый белым шумом, с нулевым математическим ожиданием  $\overline{n(t)} = 0$  и корреляционной функцией

$$R_{\text{ш}}(t_1, t_2) = \overline{n(t_1)n(t_2)} = (N_0 / 2) \delta(t_1 - t_2),$$

где  $N_0 / 2$  – двусторонняя спектральная плотность шума, не зависящая от частоты.

Обратная корреляционная функция белого шума, удовлетворяющая с учетом выражения для  $R_{\text{ш}}(t_1, t_2)$  уравнению (4), имеет вид

$$W_{\text{ш}}(t_1, t_2) = (2 / N_0) \delta(t_1 - t_2). \quad (6)$$

Используя это в выражении (3), получим известную формулу для функционала плотности вероятности белого шума:

$$F[n(t)] = C \exp \left[ -\frac{1}{N_0} \int_0^T n^2(t) dt \right]. \quad (7)$$

Из функционала (7) следует, что вероятность реализации белого шума  $n(t)$  тем меньше, чем больше ее энергия  $\int_0^T n^2(t) dt$  на заданном интервале  $[0, T]$ .

Применительно к пачке шум может быть представлен также в виде последовательности  $\{n_l(t)\} = n_1(t), n_2(t), \dots, n_L(t)$ , для функционала плотности вероятности которой запишем

$$F[\{n_l(t)\}] = C^L \prod_{l=1}^L \exp \left[ -\frac{1}{N_0} \int_0^T n_l^2(t) dt \right]. \quad (8)$$

## 2. Синтез алгоритма обнаружения

В процессе обнаружения производится анализ принятого колебания в виде последовательности  $\{u_l(t)\} = u_1(t), u_2(t), \dots, u_L(t)$  с целью вынесения решения о наличии или отсутствии в нем последовательности сигнала  $\{s_l(t)\}$ , т.е.  $\{u_l(t)\} = \{s_l(t) + n_l(t)\}$  или  $\{u_l(t)\} = \{n_l(t)\}$ . При обнаружении возможны два неизвестных и взаимоисключающих условия, которые именуются альтернативными гипотезами: условие  $H_1$  – сигнал есть; условие  $H_0$  – сигнала нет.

Распределение последовательности стохастического сигнала  $\{s_l(t)\}$  описывается функционалом плотности вероятности (5), а шума  $\{n_l(t)\}$  – функционалом (8).

Сигнал  $s_l(t)$  является некоррелированным с шумом  $n_l(t)$ . Тогда при истинности гипотезы  $H_1$  их аддитивная смесь  $u_l(t) = s_l(t) + n_l(t)$  как сумма некоррелированных нормальных процессов будет также нормальным процессом с корреляционной функцией  $R_{\text{сшл}}(t_1, t_2)$ , равной сумме корреляционных функций сигнала  $s_l(t)$  и шума  $n_l(t)$ :

$$R_{\text{сшл}}(t_1, t_2) = R_{\text{сл}}(t_1, t_2) + (N_0 / 2) \delta(t_1 - t_2). \quad (9)$$

Функционал плотности вероятности последовательности  $\{u_l(t)\} = \{s_l(t) + n_l(t)\}$  при гипотезе  $H_1$  (т.е. при наличии сигнала и шума) определяется аналогично формуле (5):

$$F_{\text{сш}}[\{u_l(t)\}] = F[\{u_l(t)\} / H_1] =$$

$$= C^L \prod_{l=1}^L \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T u_l(t_1) W_{\text{сшл}}(t_1, t_2) u_l(t_2) dt_1 dt_2 \right\},$$

где  $W_{\text{сшл}}(t_1, t_2)$  – обратная корреляционная функция  $u_l(t)$ , получающаяся решением аналогичного (4) интегрального уравнения, принимающего с учетом (9) вид

$$\int_0^T [R_{\text{сл}}(t_1, t) + (N_0 / 2) \delta(t_1 - t)] W_{\text{сшл}}(t, t_2) dt = \delta(t_1 - t_2).$$

Функционал плотности вероятности последовательности  $\{u_l(t)\} = \{n_l(t)\}$  при гипотезе  $H_0$  (т.е. при наличии одного шума) имеет вид

$$F_{\text{ш}}[\{u_l(t)\}] = F[\{u_l(t)\} / H_0] = C^L \prod_{l=1}^L \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_0^T u_l^2(t) dt \right\} =$$

$$= C^L \prod_{l=1}^L \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T u_l(t_1) W_{\text{ш}}(t_1, t_2) u_l(t_2) dt_1 dt_2 \right\},$$

где обратная корреляционная функция белого шума  $W_{\text{ш}}(t_1, t_2)$  определяется выражением (6).

Алгоритм обнаружения последовательности стохастических сигналов определим, вычислив отношение правдоподобия:

$$\Lambda = \frac{F_{\text{сш}}[\{u_l(t)\}]}{F_{\text{ш}}[\{u_l(t)\}]} = \prod_{l=1}^L \exp \left\{ \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T u_l(t_1) [W_{\text{ш}}(t_1, t_2) - W_{\text{сшл}}(t_1, t_2)] u_l(t_2) dt_1 dt_2 \right\} \geq \Lambda_0.$$

Путем логарифмирования отношения правдоподобия найдем достаточную статистику:

$$z = \ln \Lambda = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \int_0^T \int_0^T u_l(t_1) [W_{\text{ш}}(t_1, t_2) - W_{\text{сшл}}(t_1, t_2)] u_l(t_2) dt_1 dt_2 \geq \ln \Lambda_0 = z_0,$$

откуда после несложных преобразований получим

$$z = \sum_{l=1}^L \int_0^T u_l(t_1) \frac{1}{2} \int_0^T u_l(t_2) [W_{\text{ш}}(t_1, t_2) - W_{\text{сшл}}(t_1, t_2)] dt_2 dt_1 \geq z_0,$$

где  $z_0$  – пороговый уровень обнаружения.

Полагая  $t_1 = t$  и  $t_2 = \tau$ , обозначим внутренний интеграл в виде

$$s_{ul}(t) = \frac{1}{2} \int_0^T u_l(\tau) [W_{\text{ш}}(t, \tau) - W_{\text{сшл}}(t, \tau)] d\tau =$$

$$= \int_0^T u_l(\tau) \left[ \frac{1}{N_0} \delta(\tau - t) - \frac{1}{2} W_{\text{сшл}}(t, \tau) \right] d\tau.$$

Данное соотношение определяет некоторое линейное преобразование принятых колебаний  $u_l(t)$ , осуществляемое с помощью линейного фильтра. Тогда алгоритм обнаружения последовательности стохастических сигналов имеет вид

$$z = \sum_{l=1}^L \int_0^T u_l(t) s_{ul}(t) dt \geq z_0.$$

При синтезе алгоритма обнаружения предполагалось, что статистические характеристики сигнала известны. Прежде всего это относится к корреляционной функции сигнала. Однако в практических задачах нередко имеет место априорная неопределенность вида корреляционной функции. Отклонения реальной корреляционной функции от расчетной могут привести в зависимости от степени отклонения к потерям качества алгоритмов обнаружения. Преодоление априорной неопределенности в соответствии с адаптивным байесовским подходом основывается на замене априори неизвестных параметров или характеристик их оценочными значениями [10], что приводит к построению адаптивных алгоритмов обнаружения.

В предположении эргодичности входного процесса оценка корреляционной функции для суммы сигнала и шума определяется по реализации  $u_l(t)$  в соответствии с алгоритмом

$$\hat{R}_{\text{сшл}}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T u_l(t) u_l(t + \tau) dt.$$

Оценка обратной корреляционной функции  $\hat{W}_{\text{сшл}}(\tau)$  должна удовлетворять интегральному уравнению

$$\int_0^T \hat{R}_{\text{сшл}}(t_1, t) \hat{W}_{\text{сшл}}(t, t_2) dt = \delta(t_1 - t_2).$$

Учитывая, что оценка  $\hat{R}_{\text{сшл}}(t_1, t)$  задается эмпирически, для определения оценки  $\hat{W}_{\text{сшл}}(t, t_2)$  следует использовать аппаратные функциональные преобразования.

Адаптивный алгоритм обнаружения принимает вид

$$z = \sum_{l=1}^L \int_0^T u_l(t) \hat{s}_{ul}(t) dt \geq z_0, \quad (10)$$

где

$$\hat{s}_{ul}(t) = \int_0^T u_l(\tau) \left[ \frac{1}{N_0} \delta(\tau - t) - \frac{1}{2} \hat{W}_{\text{сшл}}(t, \tau) \right] d\tau.$$

В соответствии с алгоритмом (10) осуществляется адаптивная внутри-периодная обработка поступающих сигналов, реализуемая корреляционным интегралом, и межпериодное накопление результатов интегрирования.

### 3. Структурные схемы обнаружителей

Структурная схема обнаружителя сигналов, соответствующая алгоритму (10), представлена на рис. 1, где ЛЗ – линия задержки, Ф – фильтр, × – умножитель, ∫ – интегратор, Н – накопитель, ПУ – пороговое устройство, К – коррелометр и ФП – функциональный преобразователь. Линия задержки ЛЗ обеспечивает временное согласование обработки входных данных с поступающей от функционального преобразователя ФП оценкой обратной корреляционной функции. В адаптивном линейном фильтре Ф из наблюдаемого колебания  $u_l(t)$  формируется опорный сигнал  $\hat{s}_{ul}(t)$ , который умножается снова на колебание  $u_l(t)$ , а затем интегрируется. Результаты интегрирования накапливаются в межпериодном накопителе Н. Решение о наличии сигнала выносится по результатам сравнения в пороговом устройстве ПУ накопленной суммы с пороговым уровнем обнаружения  $z_0$ .

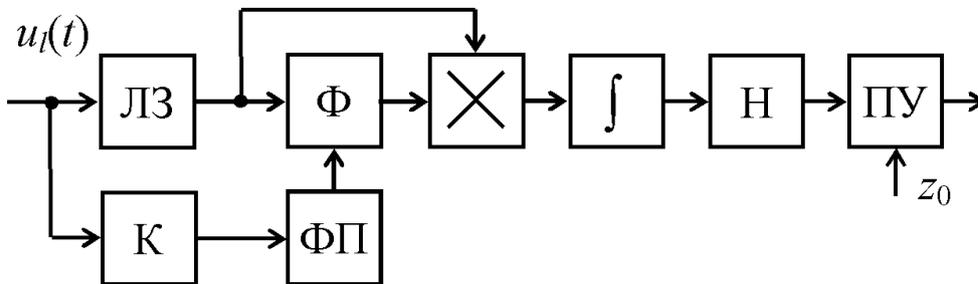


Рис. 1. Структурная схема обнаружителя сигналов

Представим в алгоритме (10) колебание  $u_l(t)$  в виде

$$u_l(t) = \hat{s}_{ul}(t) + [u_l(t) - \hat{s}_{ul}(t)].$$

Заметим, что  $\hat{s}_{ul}(t)$  и  $u_l(t) - \hat{s}_{ul}(t)$  являются функциями с неперекрывающимися спектрами: спектр первой целиком сосредоточен в полосе пропускания фильтра Ф, второй – за ее пределами [ $u_l(t) - \hat{s}_{ul}(t)$  – то, что не пропускается фильтром Ф]. Поэтому  $\hat{s}_{ul}(t)$  и  $u_l(t) - \hat{s}_{ul}(t)$  ортогональны и их корреляция равна нулю. Тогда алгоритм (10) принимает вид

$$z = \sum_{l=1}^L \int_0^T \{ \hat{s}_{ul}(t) + [u_l(t) - \hat{s}_{ul}(t)] \} \hat{s}_{ul}(t) dt = \sum_{l=1}^L \int_0^T \hat{s}_{ul}^2(t) dt \geq z_0.$$

Соответствующий данному алгоритму модифицированный обнаружитель сигналов (рис. 2) аналогичен так называемому энергетическому приемнику, в котором решающей статистикой  $z$  является суммарная энергия принятых реализаций, предварительно пропущенных через адаптивный линейный фильтр Ф.

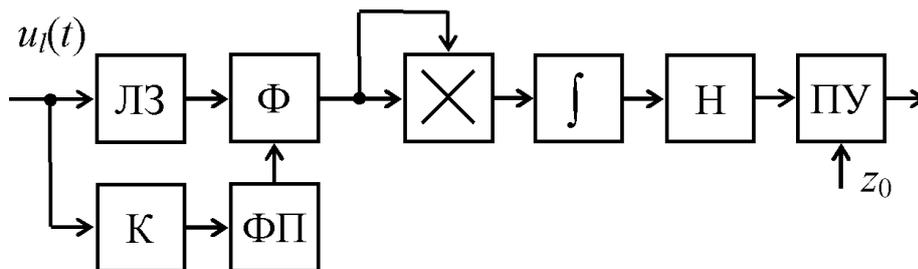


Рис. 2. Структурная схема модифицированного обнаружителя сигналов

### Заключение

Таким образом, на основе введенного функционала плотности вероятности последовательности сигналов в виде нормального случайного процесса синтезирован адаптивный алгоритм обнаружения последовательности стохастических сигналов на фоне нормального белого шума и приведена структурная схема обнаружителя. Предложен модифицированный алгоритм обнаружения последовательности стохастических сигналов и соответствующая структурная схема обнаружителя, аналогичная энергетическому приемнику, в котором решающей статистикой является суммарная энергия принятых реализаций, предварительно пропущенных через адаптивный линейный фильтр.

### Библиографический список

1. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. – 3rd ed. – McGraw–Hill, 2008. – 1352 p.
2. **Richards, M. A.** Principles of Modern Radar: Basic Principles / M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm. – New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2010. – 924 p.
3. **Melvin, W. L.** Principles of Modern Radar: Advanced Techniques / W. L. Melvin, J. A. Scheer (Eds.). – New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. – 846 p.
4. **Richards, M. A.** Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition / M. A. Richards. – New York : McGraw–Hill Education, 2014. – 618 p.
5. **Тихонов, В. И.** Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с.
6. **Попов, Д. И.** Статистическая теория радиотехнических систем / Д. И. Попов. – Рязань : РГРТУ, 2011. – 80 с.
7. **Могила, А. А.** Применение стохастических зондирующих радиосигналов для разрешения неопределенности «дальность–скорость» в доплеровских метеорологических радарх / А. А. Могила // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 12. – С. 30–42.
8. **Крамер, Г.** Математические методы статистики / Г. Крамер ; пер. с англ. А. С. Мониной, А. А. Петрова ; под ред. А. Н. Колмогорова. – М. : Мир, 1975. – 648 с.
9. **Кендалл, М.** Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М. : Наука, 1976. – 736 с.
10. **Репин, В. Г.** Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. – М. : Сов. радио, 1977. – 432 с.

### References

1. *Radar Handbook*. Ed. by M. I. Skolnik. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008, 1352 p.
2. Richards M. A., Scheer J. A., Holm W. A. (Eds.) *Principles of Modern Radar: Basic*

- Principles*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2010, 924 p.
3. Melvin W. L., Scheer J. A. (Eds.) *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013, 846 p.
  4. Richards M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition*. New York: McGraw–Hill Education, 2014, 618 p.
  5. Tikhonov V. I. *Optimal'nyy priem signalov* [Optimal signal reception]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 320 p.
  6. Popov D. I. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem* [The statistical theory of radio engineering systems]. Ryazan: RGRTU, 2011, 80 p.
  7. Mogila A. A. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika* [University proceedings. Radio engineering]. 2014, vol. 57, no. 12, pp. 30–42.
  8. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods in statistics]. Transl. from English. by A. S. Monin, A. A. Petrov; ed. by A. N. Kolmogorov. Moscow: Mir, 1975, 648 p.
  9. Kendall M., St'yuart A. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennye ryady* [Multivariate statistical analysis and time series]. Moscow: Nauka, 1976, 736 p.
  10. Repin V. G., Tartakovskiy G. P. *Statisticheskiy sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh sistem* [Statistical synthesis at a priori uncertainty and information system adaptation]. Moscow: Sov. radio, 1977, 432 p.

---

**Попов Дмитрий Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра радиотехнических систем,  
Рязанский государственный  
радиотехнический университет (Россия,  
г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)

E-mail: adop@mail.ru

**Popov Dmitriy Ivanovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of radioengineering  
systems, Ryazan State Radio Engineering  
University (59/1 Gagarina street,  
Ryazan, Russia)

---

УДК 621.391:621.396.96

**Попов, Д. И.**

**Обнаружение стохастических радиолокационных сигналов /**  
Д. И. Попов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.  
Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 26–35. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-2

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ, МОДЕЛИРУЮЩИХ РАБОТУ ЦИФРОВОГО АВТОМАТА

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Целью работы является разработка методики, позволяющей построить цветную сеть Петри, моделирующую функционирование технических процессов или объектов по их исходному автоматному описанию.

*Материалы и методы.* Формальное описание сети Петри, моделирующей заданный цифровой автомат, заключается в нахождении соответствия между множеством состояний и сигналов, описывающим цифровой автомат, и множеством позиций, переходов и разметок, описывающих цветную сеть Петри.

*Результаты.* Предложен пошаговый шаблон построения сети Петри и приведены примеры синтеза цветных сетей Петри по их исходному описанию на языке систем канонических уравнений.

*Выводы.* Предложена методика построения цветной сети Петри, обеспечивающая адекватное моделирование поведения абстрактного цифрового автомата.

**Ключевые слова:** цветная сеть Петри, абстрактный цифровой автомат, автомат Мили, автомат Мура.

Е. А. Kizilov

## A METHOD TO CONSTRUCT COLOURED PETRI NETS THAT SIMULATE DIGITAL AUTOMATON'S PERFORMANCE

### Abstract.

*Background.* The aim of the work is to develop a methodology that allows to build a coloured Petri net that simulates the functioning of technical processes or objects according to their initial automatic description.

*Materials and methods.* The formal description of the Petri net simulating the given digital automaton consists in finding correspondence between a set of states and signals describing the digital automaton and a set of positions, transitions and markings describing the coloured Petri net.

*Results.* The work proposes a step-by-step template for constructing the Petri net and gives examples of the Petri net synthesis based on their initial description in the language of canonical equation systems.

*Conclusions.* The article proposes the technique for coloured Petri net construction, which provides adequate simulation of the abstract digital automaton's performance.

**Key words:** coloured Petri net, abstract digital automaton, Mealy automaton, Moore automaton.

### Введение

Для изучения многих объектов и процессов в технике и экономике широко применяется их моделирование с использованием аппарата сетей Петри,

в том числе цветных и временных [1–4]. При этом построение сетей Петри носит эвристический характер, что вызывает трудности с обеспечением адекватности построенной модели объекту моделирования. В связи с этим был предложен композиционный подход к построению цветных временных сетей Петри, моделирующих телекоммуникационные системы [5, 6]: сеть формируется из отдельных структурных модулей – моделей коммутационных и конечных устройств, которые, в свою очередь, компонуются из функциональных модулей – подсетей Петри, моделирующих определенные этапы обработки данных и/или состояния исследуемого объекта, исходно описанных как конечные автоматы. Поэтому авторами ставится задача разработать методику, формализующую построение цветной сети Петри (СП), моделирующей поведение цифрового автомата (ЦА).

В общем случае ЦА задается множеством  $M(V, Q, q_0, \delta)$ , где  $V$  – входной алфавит (конечное множество), из которого формируются выходные цепочки, допускаемые автоматом;  $Q$  – множество состояний;  $q_0$  – начальное состояние  $q_0 \in Q$ ;  $\delta$  – функция переходов, определенная как отображение  $\delta: Q \times V \rightarrow Q$  [7].

Существует несколько вариантов формального описания цифрового автомата: граф-схема, система канонических уравнений, таблицы переходов [8, 9].

Цветная СП задается в виде множества [10]  $CPN(P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$ , где  $P$  – конечное множество позиций;  $T$  – конечное множество переходов;  $A = P \times T \cup T \times P$  – множество направленных дуг;  $\Sigma$  – не пустое конечное множество цветов;  $V$  – конечное множество типов переменных;  $C: P \rightarrow \Sigma$  – функция множества цвета;  $G: P \rightarrow EXPR_V$  – функция условия срабатывания перехода;  $E: A \rightarrow EXPR_V$  – функция выражения дуги;  $I: P \rightarrow EXPR_0$  – функция инициализации. Данное множество может быть представлено в виде графа, матрицы и т.д.

В цветных СП цвет маркера используется в функциях передачи маркера по дугам сети Петри. Функциональные СП позволяют уменьшить количество переходов за счет назначения дугам функций передачи маркера, что позволяет уменьшить количество переходов.

## 1. Методика формального описания сети Петри

Формальное описание сети Петри, моделирующей заданный цифровой автомат, заключается в нахождении соответствия между множеством  $M$ , описывающим цифровой автомат, и множеством  $CPN$ , описывающим сеть Петри:  $\delta \Rightarrow A \times G \times E; Q \Rightarrow P \times C; V \Rightarrow P \times C, V \not\subset Q$ .

Учитывая, что ЦА можно интерпретировать как частный случай сетей Петри [11], то может быть построено множество моделей сети Петри, моделирующих конкретный ЦА. Предлагается шаблон построения цветной СП, моделирующей поведение заданного абстрактного ЦА, включающий следующие шаги:

1. Входным и выходным сигналам ЦА ставятся в соответствие позиции СП.

2. Каждому состоянию автомата ставится в соответствие своя позиция. Нахождение маркера, цвет которого не имеет значения для алгоритма преоб-

разования, в этой позиции отмечает событие нахождения автомата в данном состоянии.

3. Каждому состоянию автомата ставится в соответствие один переход сети Петри.

4. Каждый переход сети Петри имеет следующие дуги:

- входные и выходные дуги, связанные с позициями состояний;
- входные и выходные дуги, связанные с позицией входного сигнала;
- входные и выходные дуги, связанные с позицией выходного сигнала.

5. Для каждого перехода задается условие срабатывания. Для дуг указывается разметка, определяющая порядок формирования и передачи маркеров, которые будут передаваться по данной дуге.

6. Задается начальная разметка:

- определяется наличие и цвет маркеров во входных и выходных позициях;
- выбирается маркированная позиция состояния, соответствующая начальному состоянию автомата.

## 2. Пример построения сети Петри, моделирующего автомат Мура

Для примера рассмотрим переход от цифрового автомата к сети Петри на примере абстрактного ЦА Мура, заданного графом переходов (рис. 1).

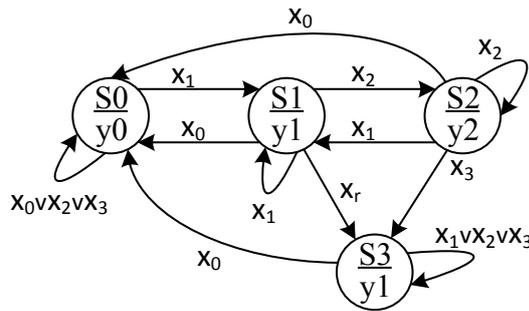


Рис. 1. Граф автомата Мура

Составим систему канонических уравнений (СКУ) и систему уравнений выходных сигналов по имеющемуся графу переходов:

$$\begin{cases} S_0 = S_1x_0 \vee S_2x_0 \vee S_3x_0 \vee S_0(x_0 \vee x_2 \vee x_3) \\ S_1 = S_0x_1 \vee S_2x_1 \vee S_1x_1 \\ S_2 = S_1x_2 \vee S_2x_2 \\ S_3 = S_1x_3 \vee S_2x_3 \vee S_3(x_1 \vee x_2 \vee x_3) \end{cases} \quad \begin{cases} y_0 = S_0 \\ y_1 = S_1 \vee S_3 \\ y_2 = S_2 \end{cases} \quad (1)$$

**Шаг 1.** Определим цвет маркеров, которые будут находиться в позициях входных и выходных сигналов.

Так как формула (1) описывает абстрактный автомат, то значения входных сигналов будем отображать цветами маркеров в позиции  $X$ .

Значение цвета маркера 0 соответствует наличию входного сигнала  $x_0$  и т.д. Саму же позицию обозначим  $X$ . Соответствие входных сигналов циф-

рового автомата и значений цветов СП определим как  $x_k \rightarrow k$ , при  $x_k \in V$ ,  $k \in X$ , где  $x_k$  – значение входной сигнал ЦА, а  $k$  – соответствующее ему значение цвета маркера в позиции  $X$ .

Аналогичным образом описываем выходные сигналы, а именно маркеры, соответствующие выходным сигналам, будут находиться в позиции  $Y$ , а значение маркеров может изменяться от 0 до 2 в соответствии с формируемым выходным сигналом согласно формуле (1).

**Шаг 2.** Определить позиции сети Петри, которые будут ставиться в соответствие состояниям автомата. Для упрощения будем обозначать позицию, соответствующую состоянию  $S_0$  –  $S0$  и т.д. Левая часть СКУ – это состояние, в которое перейдет цифровой автомат при выполнении условия, записанного в правой части. При этом условием перехода может являться как переход из другого состояния, так и сохранение состояния автомата.

Для рассматриваемого автомата получаем множество состояний автомата:  $Q = (S_0, S_1, S_2, S_3)$ .

Учитывая, что нами ранее были введены две позиции для обозначения входного и выходного сигналов ЦА, то множество позиций сети Петри определится как:  $P = (S0, S1, S2, S3, X, Y)$ .

Активное состояние цифрового автомата будем отмечать нахождением в соответствующей ему позиции сети Петри маркером цветом  $s$ , принимающими значение 1.

**Шаг 3.** Ставим каждому состоянию цифрового автомата в соответствие переход сети Петри: соответствующий состоянию  $S_0$  переход обозначим  $T0$  и т.д. Множество переходов сети Петри:  $T = (T0, T1, T2, T3)$ .

**Шаг 4.** Множество дуг  $A$  сети Петри можно разделить на подмножества дуг: входящих в переход –  $A^-$  и исходящих от перехода –  $A^+$ .

Определим дуги, связывающие переходы и позиции сети Петри, соответствующие состояниям ЦА:  $\forall j : S_j \Rightarrow A_j^-(S_j, T_j)$  – для входных дуг перехода  $T_j$ ;  $\forall (j \neq i) : S_i = S_j x_k \Rightarrow A_{ji}^+(T_j, S_i)$  – для выходных дуг перехода  $T_j$ .

Множество исходящих дуг одного перехода обозначим  $A_j^+ = \cup A_{ji}^+$ .

Особо стоит отметить ситуации сохранения состояния автомата. Так как в автомате Мура выходной сигнал соответствует определенному состоянию автомата, то сохранение состояния автомата не может привести к изменению выходного сигнала. Следовательно, при анализе правых частей уравнений СКУ не анализируются переходы, связанные с сохранением состояния автомата.

Для примера рассмотрим формирование множества исходящих дуг для перехода  $T_1$ . Так как данный переход входящей дугой связан с позицией  $S1$  сети Петри, то будем анализировать только те уравнения формулы (1), где присутствует состояние ЦА  $S1$ . В первом уравнении формулы (1) при наличии входного сигнала  $x_0$  автомат переходит из состояния  $S_1$  в  $S_0$ , следовательно в множестве дуг будет присутствовать дуга из перехода  $T1$  в позицию  $S_0$ . Во втором уравнении при наличии входного сигнала  $x_1$  автомат сохраняет свое состояние  $S_1$ . Для предотвращения заикливания сети Петри при сохра-

нении состояния автомата переход  $T1$  не срабатывает при наличии входного сигнала  $x_1$ . В третьем уравнении СКУ автомат при наличии входного сигнала  $x_2$  переходит из состояния  $S_1$  в  $S_2$ . К множеству дуг добавляется дуга от перехода  $T1$  к позиции  $S_2$ . В четвертом уравнении при наличии входного сигнала  $x_3$  автомат переходит из состояния  $S_1$  в  $S_3$ , следовательно к множеству добавляется дуга из перехода  $T1$  в позицию  $S_3$ . Получаем следующее множество дуг, связанных с переходом  $T1$ :  $A_1 = ((S1, T1), (T1, S0), (T1, S2), (T1, S3))$ .

Аналогичным образом определяем дуги, связывающие переходы и позиции, соответствующие состояниям ЦА для остальных переходов сети Петри. В результате для каждого перехода сети Петри получаем множества дуг:

$$\begin{aligned} A_0 &= ((S0, T0), (T0, S1)), \\ A_1 &= ((S1, T1), (T1, S0), (T1, S2), (T1, S3)), \\ A_2 &= ((S2, T2), (T2, S0), (T2, S1), (T2, S3)), \\ A_3 &= ((S3, T3), (T3, S0)). \end{aligned}$$

Все переходы сети Петри, которые зависят от входного сигнала и сопровождаются изменением выходного сигнала, должны быть связаны с позициями  $X$  и  $Y$  двунаправленными дугами:  $A_{iX}^-, A_{iY}^-$  – дуги от позиций  $X, Y$  к соответствующему  $i$ -му переходу;  $A_{iX}^+, A_{iY}^+$  – дуги от  $i$ -го перехода к позициям  $X, Y$ . Множества дуг связывающих позиции  $X, Y$  и переходы сети Петри, определим как

$$\begin{aligned} A_X &= A_{0X}^- \cup A_{0X}^+ \cup A_{1X}^- \cup A_{1X}^+ \cup A_{2X}^- \cup A_{2X}^+ \cup A_{3X}^- \cup A_{3X}^+ = \\ &= ((X, T0), (T0, X), (X, T1), (T1, X), (X, T2), (T2, X), (X, T3), (T3, X)); \\ A_Y &= A_{0Y}^- \cup A_{0Y}^+ \cup A_{1Y}^- \cup A_{1Y}^+ \cup A_{2Y}^- \cup A_{2Y}^+ \cup A_{3Y}^- \cup A_{3Y}^+ = \\ &= ((Y, T0), (T0, Y), (Y, T1), (T1, Y), (Y, T2), (T2, Y), (Y, T3), (T3, Y)). \end{aligned}$$

Множество дуг сети Петри  $A$  является объединением описанных выше подмножеств дуг  $A = A_0 \cup A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_X \cup A_Y$ .

**Шаг 5.** Указывается разметка, определяющая передачу маркеров по каждой исходящей из перехода дуге, что связано с необходимостью задания правил передачи маркера в соответствующую позицию при срабатывании перехода под действием внешних сигналов. С этой целью в разметке дуги указывается условие передачи маркера по данной дуге, которое соответствует уравнению СКУ для текущего состояния автомата и при наличии определенного входного сигнала:

$$\forall i, j, i \neq j: S_i = S_j \ x_k \Rightarrow (A_{ji}^+, k) \rightarrow e_{ji}, e_{ji} \in E, k \in X,$$

где  $e_{ji}$  – разметка, соответствующая дуге  $(A_{ji}^+, k)$  и принадлежащая множеству  $E$ , содержащему все разметки дуг;  $k$  – значение цвета в позиции  $X$  сети Петри.

Например для дуги  $A(T1,S2)$  разметка дуги будет следующей:

$$e_{21} = \begin{cases} s \text{ при } x = 2, \\ \emptyset \text{ при } x \neq 2, \end{cases}$$

что отражает факт передачи маркера в позицию  $S2$  при наличии входного сигнала  $x_2$ .

Особо следует отметить особенности разметки исходящих дуг перехода к выходной позиции  $Y$ : так как формировать выходной сигнала необходимо совместно с формированием очередного состояния автомата, связанного с выходным сигналом, то значение маркера в выходной позиции будет определяться значением маркера во входной позиции, при котором формируется соответствующее состояние автомата:

$$\forall m, m \neq p : S_j = S_i, y_p = S_i, y_m = S_j \Rightarrow (A_{iY}^+, m) \rightarrow e_{iY}, e_{iY} \in E, m \in Y,$$

где  $e_{iY}$  – разметка дуги сети Петри, соответствующая изменению выходного сигнала при переходе автомата в состояние  $S_j$  из  $S_i$ , а  $m$  – значение цвета в позиции  $Y$  сети Петри. При этом по дугам из позиций  $X$  или  $Y$  к переходу передается маркер с разметкой дуги  $x$  и  $y$  соответственно:

$$E = \begin{cases} (S0, T0), (S1, T1), (S2, T2), (S3, T3), (T0, S1) \rightarrow s, \\ (T1, S0), (T2, S0), (T3, S0) \rightarrow \begin{cases} s \text{ при } x = 0, \\ \emptyset \text{ при } x \neq 0, \end{cases} \\ (T1, S2) \rightarrow \begin{cases} s \text{ при } x = 2, \\ \emptyset \text{ при } x \neq 2, \end{cases} \\ (T1, S3) \rightarrow \begin{cases} s \text{ при } x = 3, \\ \emptyset \text{ при } x \neq 3, \end{cases} \\ (T2, S1) \rightarrow \begin{cases} s \text{ при } x = 1, \\ \emptyset \text{ при } x \neq 1, \end{cases} \\ (T2, S3) \rightarrow \begin{cases} s \text{ при } x = 3, \\ \emptyset \text{ при } x \neq 3, \end{cases} \\ (X, T0), (X, T1), (X, T2), (X, T3), (T0, X), (T1, X), (T2, X), (T3, X) \rightarrow x, \\ (Y, T0), (Y, T1), (Y, T2), (Y, T3) \rightarrow y, \\ (T0, Y) \rightarrow 1, \\ (T1, Y) \rightarrow \begin{cases} 0 \text{ при } x = 0, \\ 2 \text{ при } x = 2, \\ 3 \text{ при } x = 1, \end{cases} \\ (T2, Y) \rightarrow \begin{cases} 0 \text{ при } x = 0, \\ 1 \text{ при } x = 1, \\ 3 \text{ при } x = 1, \end{cases} \\ (T3, Y) \rightarrow 0. \end{cases}$$

Условие срабатывания перехода определяется как дизъюнкция условий передачи маркера по всем исходящим дугам для данного перехода. Для рассматриваемого примера множество условий срабатывания переходов  $G$  сети Петри определится как

$$G = \begin{cases} T0 \rightarrow x = 1, \\ T1 \rightarrow x = 0 \vee x = 2 \vee x = 3, \\ T2 \rightarrow x = 0 \vee x = 1 \vee x = 3, \\ T3 \rightarrow x = 0. \end{cases}$$

**Шаг 6.** Определим наличие маркеров в позициях сети Петри в начальный момент времени. Так как значение и цвет маркера не играют существенной роли в функционировании сети Петри, для удобства можно использовать цвет, описывающий целые числа, а маркеру присвоить значение 1.

Далее необходимо определить начальную разметку сети Петри. В начальный момент времени цифровой автомат находится в состоянии  $S_0$ , следовательно и в сети Петри в начальный момент времени маркер со значением «1» будет находиться в позиции  $S_0$ . В соответствии с системой уравнений выходных сигналов, так как в начальный момент времени автомат находится в состоянии  $S_0$ , формируется выходной сигнал  $y_0$ , следовательно в позиции  $Y$  сети Петри будет находиться маркер со значением «0». До формирования какого-либо входного сигнала автомат должен сохранять свое состояние.

Исходя из этого из первого уравнения СКУ определяем, что автомат сохраняет свое состояние при входных сигналах  $x_0, x_2, x_3$ . Примем, что в начальный момент времени имеется входной сигнал  $x_0$ , следовательно в позиции  $X$  сети Петри будет находиться маркер со значением «0». Получаем множество начальной разметки сети Петри:

$$I = \begin{cases} S0 \rightarrow 1, \\ S1 \rightarrow \emptyset, \\ S2 \rightarrow \emptyset, \\ S3 \rightarrow \emptyset, \\ X \rightarrow 0, \\ Y \rightarrow 0. \end{cases}$$

Выполнив рассмотренные выше шаги, мы получили формальное описание сети Петри, моделирующей алгоритм работы заданного ЦА.

В пакете CPN Tools, используя полученное выше формальное описание сети Петри, построим модель (рис. 2), имитирующую поведение абстрактного цифрового автомата. Для проверки адекватности построенной сети Петри исходному ЦА был выполнен анализ с использованием пакета CPN Tools изменения разметки сети Петри при изменении цвета маркера в позиции входного сигнала, который показал ее полное соответствие реакции автомата на различные входные сигналы.

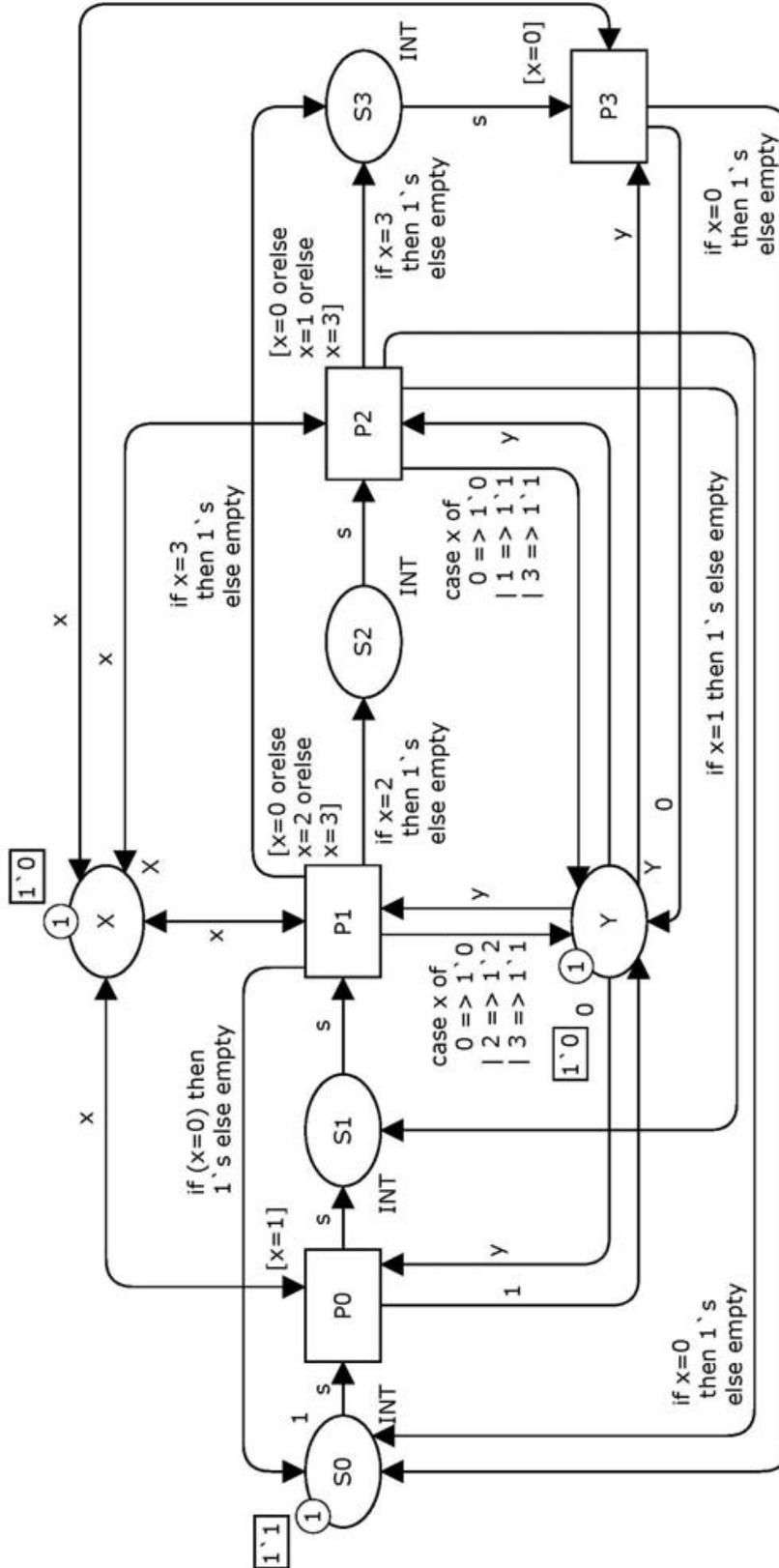


Рис. 2. Сеть Петри, моделирующая автомат Мура

### 3. Пример построения сети Петри, моделирующей автомат Мили

Отличия цифровых автоматов Мили и Мура заключаются в формировании выходного сигнала:

- для цифрового автомата Мура выходной сигнал формируется при нахождении цифрового автомата в определенном состоянии:  $S \rightarrow Y$ ;
- в цифровом автомате Мили выходной сигнал формируется при переходе цифрового автомата из текущего состояния под действием входного сигнала:  $S \times X \rightarrow Y$ .

Отличие в функционировании СП, моделирующей автомат Мили, заключается в том, что выходной сигнал  $Y$  может изменять свое значение при сохранении состояния  $S_i$  в случае изменения сигнала  $X$ , т.е. соответствующий переход  $T_i$  будет срабатывать не только при передаче маркера в новую позицию, но и при изменении цвета маркера в позиции  $Y$ , в отличие от автомата Мура.

Для примера рассмотрим цифровой автомат Мили, заданный графом на рис. 3.

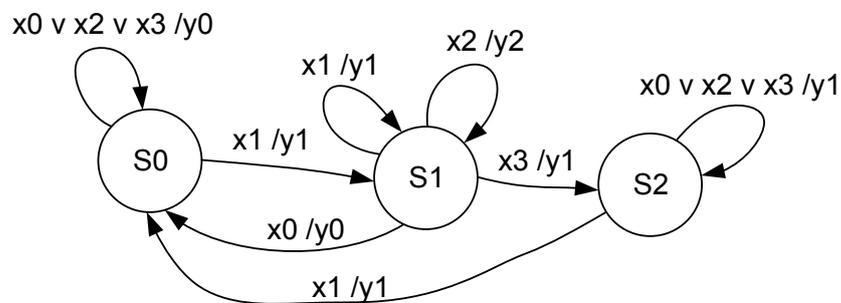


Рис. 3. Граф автомата Мили

Заданному цифровому автомату будут соответствовать следующие СКУ и система уравнений выходных сигналов:

$$\begin{cases} S_0 = S_1 x_0 \vee S_2 x_0 \vee S_0 (x_0 \vee x_2 \vee x_3), \\ S_1 = S_0 x_1 \vee S_1 (x_1 \vee x_2), \\ S_2 = S_1 x_3 \vee S_2 (x_1 \vee x_2 \vee x_3), \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_0 = (S_1 \vee S_2) x_0, \\ y_1 = S_0 x_0 \vee (S_0 \vee S_1 \vee S_2) x_1 \vee (S_0 \vee S_2) x_2 \vee (S_0 \vee S_1 \vee S_2) x_3, \\ y_2 = S_1 x_2. \end{cases}$$

Применяя рассмотренную выше методику, получим формальное описание сети Петри и, используя пакет моделирования *CPN Tools*, получим сеть Петри (рис. 4), моделирующую поведение заданного цифрового автомата Мили.

Предложенная методика может быть распространена на моделирование автомата с унитарным кодированием входных и выходных сигналов.

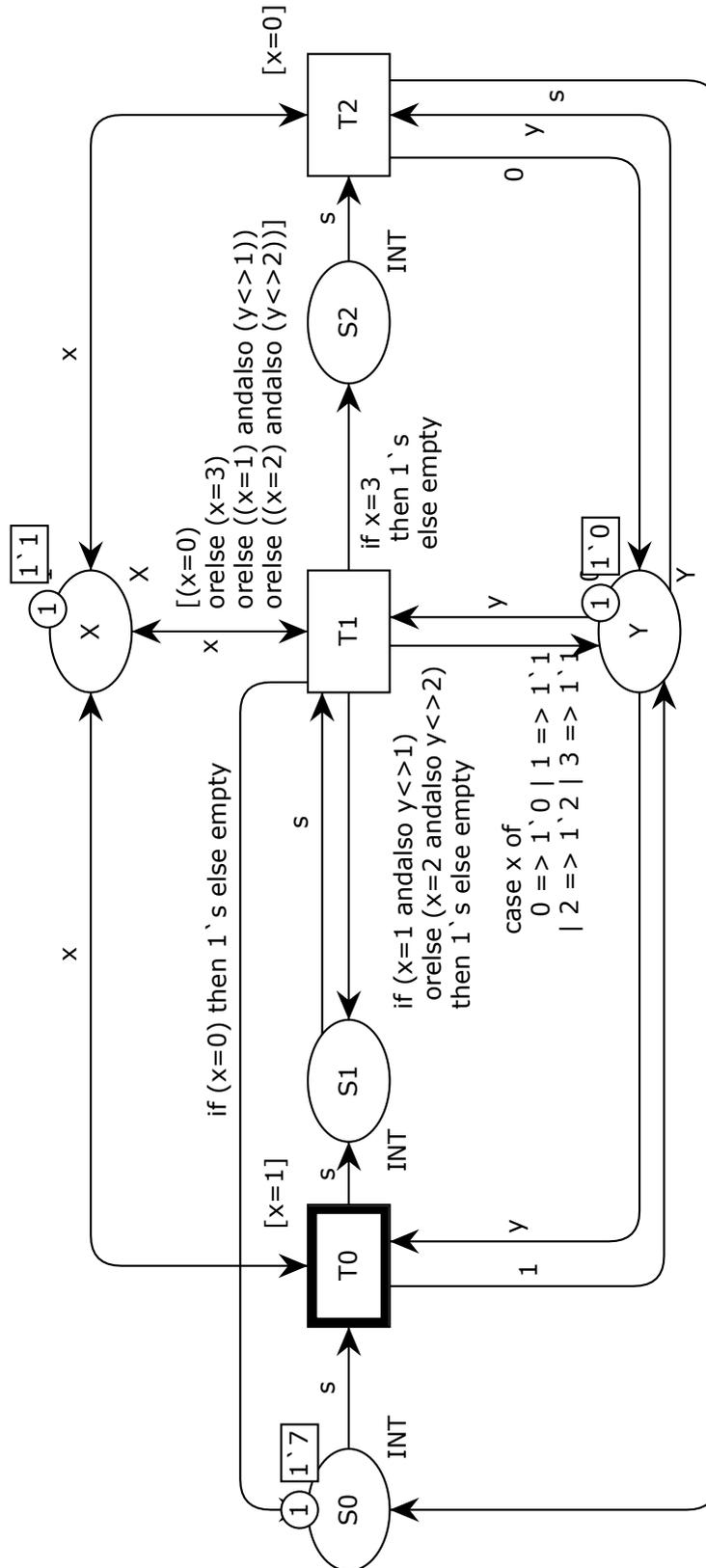


Рис. 4. Сеть Петри, моделирующая цифровой автомат Мили

### Заключение

Таким образом, предложенная методика по заданному описанию ЦА позволяет построить цветную сеть Петри, адекватно моделирующую его поведение. Методика апробирована авторами для моделирования в среде *CPN Tools* различных алгоритмов диспетчеризации очередей в телекоммуникационной аппаратуре с поддержкой качества обслуживания, при выполнении работ ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития разработки научно-технологического комплекса России на 2014–2020» (соглашение № 14.574.21.0045 от 06.19.2014).

### Библиографический список

1. **Котов, В. Е.** Сети Петри / В. Е. Котов. – М. : Наука, 1984. – 161 с.
2. **Питерсон, Дж.** Теория сетей Петри и моделирование систем : пер. с англ. / Дж. Питерсон. – М. : Мир, 1984. – 264 с.
3. **Jensen, K.** Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use / K. Jensen. – New York : Springer-Verlag, 1992. – 234 p.
4. **Зайцев, Д. А.** Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools / Д. А. Зайцев, Т. Р. Шмелева. – Одесса : ОНАТ, 2006. – 68 с.
5. **Механов, В. Б.** Применение сетей Петри для моделирования телекоммуникаций с поддержкой качества обслуживания / В. Б. Механов // Телематика-2010 : тр. XVII Всерос. науч.-метод. конф. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2010. – Т. 2. – С. 283–284.
6. **Механов, В. Б.** Преобразование конечного автомата в цветную сеть Петри / В. Б. Механов, Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов // Телематика-2010 : тр. XVIII Всерос. науч.-метод. конф. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2011. – Т. 1. – С. 238–240.
7. **Hopcroft, J. E.** Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation / John E. Hopcroft, Rajeev Motwani, Jeffrey D. Ullman. – М. : Вильямс, 2002. – 528 p.
8. **Вашкевич, Н. П.** Достоинство формального языка, основанного на концепции недетерминизма, при структурной реализации параллельных систем логического управления процессами и ресурсами / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 3–11.
9. **Вашкевич, Н. П.** Недетерминированные автоматы и их использование для реализации систем параллельной обработки информации : монография / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев – Пенза : Ид-во ПГУ, 2016. – 394 с.
10. **Jensen, K.** Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems / Kurt Jensen, Lars M. Kristensen. – New York : Springer, 2009. – 382 p.
11. **Захаров, Н. Г.** Синтез цифровых автоматов : учеб. пособие / Н. Г. Захаров, В. Н. Рогов. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 136 с.

### References

1. Kotov V. E. *Seti Petri* [Petri nets]. Moscow: Nauka, 1984, 161 p.
2. Piterson Dzh. *Teoriya setey Petri i modelirovanie sistem: per. s angl.* [The theory of petri nets and system simulation: translation from English]. Moscow: Mir, 1984, 264 p.
3. Jensen K. *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use.* New York: Springer-Verlag, 1992, 234 p.
4. Zaytsev D. A., Shmeleva T. R. *Modelirovanie telekommunikatsionnykh sistem v CPN Tools* [Telecommunication system simulation via CPN Tools]. Odessa: ONAT, 2006, 68 p.
5. Mekhanov V. B. *Telematika-2010: tr. XVII Vseros. nauch.-metod. konf.* [Telematics-2010: proceedings of XVII All-Russian scientific and methodological conference]. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO, 2010, vol. 2, pp. 283–284.

6. Mekhanov V. B., Kizilov E. A., Konnov N. N. *Telematika-2010: tr. XVIII Vseros. nauch.-metod. konf.* [Telematics-2010: proceedings of XVII All-Russian scientific and methodological conference]. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO, 2011, vol. 1, pp. 238–240.
7. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Moscow: Vil'yams, 2002, 528 p.
8. Vashkevich N. P., Biktashev R. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 1 (17), pp. 3–11.
9. Vashkevich N. P., Biktashev R. A. *Nedeterminirovannye avtomaty i ikh ispol'zovanie dlya realizatsii sistem parallel'noy obrabotki informatsii: monografiya* [Stochastic automata and their application in data parallel processing systems: monograph]. Penza: Id-vo PGU, 2016, 394 p.
10. Jensen K., Kristensen L. M. *Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems*. New York: Springer, 2009, 382 p.
11. Zakharov N. G., Rogov V. N. *Sintez tsifrovyykh avtomatov: ucheb. posobie* [Digital automata synthesis: teaching aid]. Ulyanovsk: UIGTU, 2003, 136 p.

---

**Кизилев Евгений Александрович**

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

E-mail: jk6001@yandex.ru

**Kizilov Evgeniy Aleksandrovich**

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

---

УДК 681.31

**Кизилев, Е. А.**

**Методика построения цветных сетей Петри, моделирующих работу цифрового автомата / Е. А. Кизилев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 36–47. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-3**

## ПРОГРАММНАЯ КИБЕРНЕТИКА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Программная кибернетика – это сравнительно молодое научное направление, сосредоточенное на применении методов классической кибернетики к задачам программной инженерии. И хотя базовые принципы обеих дисциплин в настоящее время хорошо проработаны и изучены, в программной кибернетике до сих пор не существует общепринятых взглядов на представление программных процессов как кибернетических. Также довольно размытыми остаются границы рассматриваемой области исследований. Цель данной статьи – провести краткий обзор основных работ в данной сфере и на его основе определить структуру, магистральные направления и текущие достижения программной кибернетики.

*Материалы и методы.* В качестве основного материала для исследования были использованы работы ведущих мировых ученых в области системного анализа, программной инженерии и искусственного интеллекта.

*Результаты.* К основным результатам следует отнести: проведенный обзор существующих работ в области программной кибернетики, классификацию ее основных задач, проблем и направлений.

*Выводы.* Проведенный обзор показал актуальность программной кибернетики как научного направления, в рамках которого возможно успешное решение ряда актуальных на сегодня задач, связанных с созданием и эксплуатацией сложных самоадаптируемых и масштабируемых программных систем.

**Ключевые слова:** программная инженерия, кибернетика, программная кибернетика, программные системы, теория управления, искусственный интеллект.

Yu. I. Evseeva

## SOFTWARE CYBERNETICS: CURRENT STATE AND PROBLEMS

### **Abstract.**

*Background.* Software cybernetics is a relatively young scientific direction focused on applying the methods of classical cybernetics to the tasks of software engineering. And although the basic principles of both disciplines are now well-developed and studied, in software cybernetics there is still no universally accepted view of the representation of software processes as cybernetic. Also, the boundaries of the field under consideration are rather blurred. The purpose of this article is to briefly review the main works in this field and on its basis to determine the structure, trunk directions and current achievements of software cybernetics.

*Materials and methods.* Works by world's leading scientists in the field of system analysis, software engineering and artificial intelligence were used as the main material for the study.

*Results.* The main results include: a review of existing works in the field of program cybernetics, a classification of its main tasks, problems and directions.

*Conclusions.* The review showed the relevance of software cybernetics as a scientific direction, within the framework of which it is possible to successfully solve a number of topical tasks nowadays, related to the creation and operation of complex self-adaptive and scalable software systems.

**Key words:** software engineering, cybernetics, program cybernetics, software systems, control theory, artificial intelligence.

### **Введение**

Программные системы являются сложными по своей природе. Сложность проектирования, реализации и сопровождения экспоненциально растет с увеличением размеров системы. Затруднительно, а зачастую и вовсе невозможно перечислить все состояния и взаимодействия, характеризующие компоненты современного программного обеспечения (ПО).

Помимо сложности, программные системы зачастую характеризуются необходимостью модификации в процессе эксплуатации. Это может быть вызвано как изменениями в предметной области системы, так и различными аппаратными проблемами.

Исследования в области кибернетики дают возможность контролировать сложность программных систем и наделять их адаптивными свойствами, делая тем самым более гибкими и эффективными.

Термин «программная кибернетика» был впервые использован К. Каи в 2002 г. [1] и изначально обозначал попытку применить методы классической кибернетики и теории управления к программным системам. С тех пор эта новая область научного знания претерпела существенные изменения и в настоящее время включает в себя не только реализацию базовых кибернетических принципов применительно к программному обеспечению, но и достаточно оригинальные концепции и методологии. Последние представляют собой элементы так называемой «новой» кибернетики [2]. Данная статья включает в себя полноценный обзор как классических, так и новаторских подходов в программной кибернетике.

### **1. Кибернетика: определение и принципы**

Термин «кибернетика» был впервые предложен Н. Винером в 1948 г. в работе [3]. Согласно Н. Винеру, кибернетика – это междисциплинарный подход к изучению систем, основное внимание при котором отводится тому, как системы используют информацию, модели и управляющие воздействия для саморегулирования и достижения своих целей.

Предложенный Н. Винером подход позже был назван кибернетикой первого порядка, или кибернетикой наблюдаемых систем [4]. Он описывает управление замкнутой системой в устойчивом состоянии на основе механизма отрицательной обратной связи и полностью игнорирует роль наблюдателя.

В 1978 г. Р. Гайером и Ж. Ван Дер Зувеном была поднята тема кибернетики второго порядка, или метакибернетики [5]. Существенными ее отличиями от кибернетики первого порядка являются зависимость рассматриваемой системы от наблюдателя и ее непрерывная связь с окружающей средой. Кибернетика второго порядка акцентирует связь между несколькими системами, пытающимися оказывать друг на друга управляющие воздействия.

Хотя кибернетика второго порядка способна рассматривать существенно более широкий класс систем, чем ее предшественница, этих возможностей

может быть недостаточно для полноценного описания взаимодействия системы со средой. Решить эту проблему должна кибернетика третьего порядка – направление, которое только начало зарождаться. Согласно мнению отдельных специалистов [6] в основе кибернетики третьего порядка должны лежать концепция жизнеспособных систем, т.е. систем, которые, не являясь живыми в биологическом смысле, способны к динамическому выживанию благодаря самоорганизации, самосозданию и даже воспроизводству, а также предсказанию, предвидению и прогнозированию.

К фундаментальным принципам кибернетики относят:

1. Принцип необходимого разнообразия. Предложенный В. Эшби в 1956 г. [7], этот принцип гласит: невозможно создать простую систему управления для сложного объекта управления (сложность системы управления должна совпадать со сложностью объекта управления).

2. Принцип обратной связи. Заключается в воздействии результатов функционирования системы на характер ее дальнейшей работы.

3. Принцип гомеостаза. Гомеостатическое состояние является одной из целей управления системой. Под гомеостазом понимается способность открытой системы (т.е. системы, способной обмениваться веществом и энергией с внешним по отношению к системе миром) сохранять постоянство своего внутреннего состояния посредством скоординированных реакций, направленных на поддержание динамического равновесия.

4. Принцип управляемости. Управляемость является одним из важнейших свойств системы управления и объекта управления. Оно заключается в возможности целенаправленного переключения системы из одного состояния в другое.

Перечисленные принципы кибернетики нашли применение во многих областях. Кибернетика оказала влияние на ряд научных направлений и дисциплин, наиболее широкое распространение получив в сфере информатики, искусственного интеллекта и инженерии управления. «Новая» кибернетика акцентирует автономию, самоорганизацию, познавательные способности и роль наблюдателя в моделировании системы.

## **2. Теоретические основы программной кибернетики**

В работе К. Каи [8] программная кибернетика представлена в простейшей своей форме как способ организации взаимодействия между программной системой и блоком управления. Блоком управления в данном случае является отдельный программный модуль, координирующий работу остальных модулей системы. Согласно другой, более поздней работе этого автора [9], программная кибернетика должна быть направлена на решение следующих задач:

1) формализации и количественной оценки обратных связей в программных процессах и системах;

2) адаптации принципов и концепции теории управления к программным процессам и системам; к числу таких принципов относят принцип обратной связи, разомкнутого управления и управления по возмущениям, а также различные принципы интеллектуального управления (робастное, адаптивное, оптимальное и плановое управление);

3) применении принципов программной инженерии к управляющим системам и процессам; к числу таких принципов относят принцип модульности, конфигурационного управления, а также коллективной экспертизы и тестирования;

4) интеграции программной инженерии и инженерии управления.

На рис. 1 представлена структура типичного замкнутого контура управления. Хотя такая структура разрабатывалась для технических систем, она может быть использована и для управления программными системами и процессами (например, процессом тестирования программного обеспечения). Блок «Система» может обозначать программную систему или программный процесс, а в качестве исполнительного устройства может выступать, например, операционная система, выделяющая память для работающего приложения.

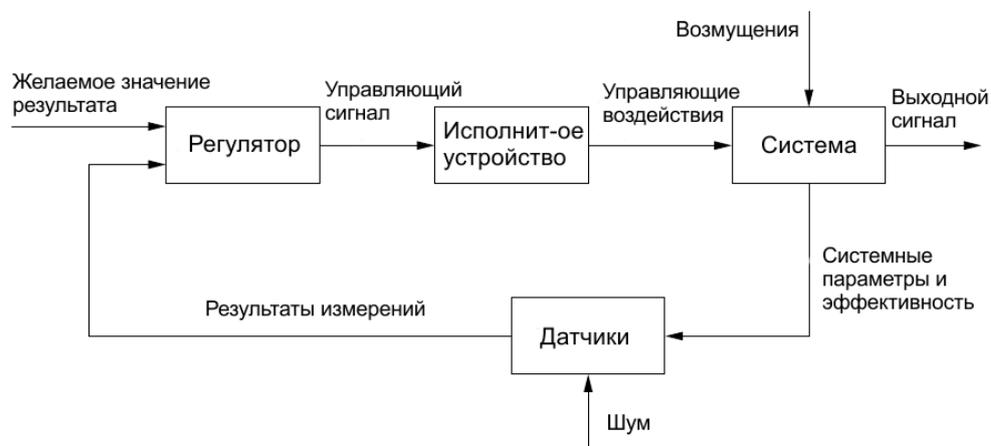


Рис. 1. Замкнутый контур управления

В наши дни, когда широкое распространение получили социальные сети, распределенные и облачные вычисления, программная кибернетика вынуждена существенно расширить круг рассматриваемых проблем. Р. Кеннет в своей работе [10] подчеркивает роль программной кибернетики в эпоху облачных вычислений. Он также предполагает, что данное научное направление способно решить многие проблемы, связанные с проектированием программного обеспечения в рамках концепций сервис-ориентированной и самоадаптируемой архитектуры.

Согласно работе [11] программную кибернетику, как и классическую, можно разделить на кибернетику первого и второго порядка. Программная кибернетика первого порядка сосредоточена на моделировании программных систем как управляемых на основе обратных связей. Наиболее распространенной моделью для формализации процессов управления в данном случае выступает конечный автомат. Программная кибернетика второго порядка рассматривает более сложные системы, составными частями которых являются как программное обеспечение, так и процессы разработки и сопровождения программных средств, а также коллективы разработчиков. Все элементы таких систем оказывают влияние друг на друга.

Основная модель кибернетики второго порядка предполагает наличие второй петли обратной связи. Критически важно, что передается по второй внешней петле. Условно говоря, по внутренней петле циркулируют машинные данные, а по внешней – доступная только человеку информация, которую иногда называют управляющей. В случае с программными системами в качестве внешней информации может выступать, например, информация, необходимая программному обеспечению некоторой медицинской диагностической системы для осуществления корректной диагностики.

В настоящее время программная кибернетика включает в себя две основные группы методов исследования и моделирования программных систем: модельно-ориентированные и логико-ориентированные.

Первая группа включает в себя различные математические методы, основанные на применении конечных автоматов и цепей Маркова, а также моделей линейных динамических систем. Например, в работе [12] приводится описание процесса тестирования программного обеспечения как линейной динамической системы. П. Уонг и К. Каи разработали алгоритмы, позволяющие преобразовать расширенные конечные автоматы, используемые для описания процессов в языке спецификаций SDL [13], в модели управления дискретно-событийными системами [14]. Их исследования показали, что расширенный конечный автомат может использоваться для описания системы управления с замкнутым контуром. В свою очередь Д. Лоренцоли предложен метод автоматической генерации моделей для определения поведения программных систем, основанных на конечных автоматах [15].

Прогресс в области искусственного интеллекта способствует развитию второй группы методов. Программная инженерия стала одной из основных сфер применения алгоритмов машинного обучения. К. Янг применил аппарат нечеткой логики для создания программного инструментария, позволяющего разрабатывать самоадаптируемые программные системы [16]. Конечная цель работы состояла в повышении производительности и отказоустойчивости критически важного программного обеспечения. З. Динг предложил концепцию адаптивной системы управления на основе нечетких правил [17]. К. Парк и К. Йом использовали идею обратной связи для реализации метода валидации правил языка SWRL (Semantic web rule language [18]). Согласно предложенному подходу каждое рассматриваемое правило SWRL представляет собой объект управления, а проверка правильности правил осуществляется путем использования специфического блока управления [19].

Внедрение технологий искусственного интеллекта позволит в конечном счете вывести программную кибернетику на качественно новый уровень – уровень кибернетики третьего порядка.

### **3. Практические приложения программной кибернетики**

На сегодня программная кибернетика первого порядка нашла применение в следующих областях программной инженерии:

- 1) разработка спецификаций и требований к программному обеспечению;
- 2) проектирование архитектуры программных систем;
- 3) реализация (программирование);
- 4) тестирование;

- 5) реконструкция и развитие программного обеспечения;
- 6) управление проектами;
- 7) информационная безопасность.

Сферами применения программной кибернетики второго порядка являются:

- 1) облачные вычисления;
- 2) сервис-ориентированные взаимодействия;
- 3) агентные технологии.

Также программная кибернетика тесно интегрирована со следующими технологическими тенденциями, лежащими в основе киберфизических систем:

- 1) сетевые системы;
- 2) интернет вещей;
- 3) большие данные;
- 4) творческие вычисления.

Рассмотрим последние исследования в сфере программной инженерии.

Наибольший интерес в области разработки спецификаций представляет работа Л. Лиу, опубликованная в 2015 г. [20]. В ней автор предлагает механизм выявления требований к программному обеспечению на основе анализа пользовательских поведенческих данных. Процесс выявления требований представлен как система управления на основе обратной связи. Выявление требований при таком подходе сводится к непрерывной оптимизации пользовательских моделей поведения.

Сообщество разработчиков программного обеспечения на протяжении многих лет занято проблемой создания адаптивных программных систем. Было предложено множество подходов к построению таких систем, многие из которых основаны на принципах машинного обучения и теории управления [21]. Особое внимание было уделено теории управления, поскольку она предоставляет общую методологию для создания адаптивных систем. На основе накопленного в сфере разработки адаптивных программных систем опыта в 2005 г. была сформулирована концепция автономных вычислений [22]. Автономные вычисления – это интеллектуальный подход к построению самоуправляемых программно-аппаратных комплексов, способных поддерживать стабильное состояние вычислительного окружения с минимальным участием человека. Программное обеспечение таких комплексов способно изменять собственную структуру и поведение в процессе выполнения с целью обеспечения стабильной работы системы при постоянно изменяющихся требованиях и условиях внешней среды.

В программной инженерии реконструкция программного обеспечения – это подход, позволяющий предотвратить снижение производительности и другие проблемы, связанные с устареванием программ. Существующие методы реконструкции можно разделить на две группы: модельно-ориентированные методы и методы, основанные на измерениях [23]. Большая часть работ в этом направлении сосредоточена на прогнозировании возможного выхода программы из строя и планировании оптимальной стратегии обновления [24]. Р. Агепати предлагает модель реконструкции программного обеспечения, основанную на механизме обратной связи [25]. Предлагаемая модель реконструкции включает в себя описание процесса износа программы, набор

действий по обновлению и стратегию обнаружения износа. Оптимальная стратегия реконструкции системы основана на принципе минимальной стоимости и реализуется с помощью марковского процесса принятия решений.

Управление проектами – это область деятельности, в ходе которой определяются и достигаются четкие цели проекта при балансировании между объемом работ, ресурсами (такими как деньги, труд, материалы, энергия, пространство и др.), временем, качеством и рисками. Ключевым фактором успеха проектного управления является наличие четкого заранее определенного плана, минимизации рисков и отклонений от плана, эффективного управления изменениями. В этой области наибольший интерес представляет работа Ж. Кунди и А. Македжи, посвященная эффективному распределению человеческих ресурсов [26], а также статья Ж. Парк, в которой изложены принципы мониторинга состояния проекта на каждой стадии выполнения [27].

М. Адамс в своей работе [28] выдвигает идею использования базовых принципов кибернетики для создания нового подхода в области обеспечения информационной безопасности. Автор рассматривает возможное применение основных положений теории управления, теории систем и теории игр в системах кибербезопасности и предлагает собственные фундаментальные принципы построения таких систем. Схожие идеи интеграции принципов кибернетики и информационной безопасности изложены также в работах Т. Виннакота [29] и М. Ко [30].

Результатом эволюции программного обеспечения стал переход от автономных систем с монолитной архитектурой к сложным распределенным системам. Следствием такого перехода стало возникновение ряда специфических проблем, для решения которых необходимо создание новых принципов, методов и практик программной инженерии. В наши дни люди и программные системы играют практически одинаковую роль в рабочих процессах компаний и предприятий. Это обуславливает возрастающую роль программной кибернетики второго порядка.

Облачные технологии стали доминирующей вычислительной средой текущего десятилетия благодаря возможности оперативного предоставления вычислительных ресурсов с минимальными эксплуатационными затратами. Поскольку системы, построенные на облачных технологиях, являются сложными, крупномасштабными, распределенными и гетерогенными, управление их ресурсами представляет собой непростую задачу. П. Майер для решения данной задачи предлагает концепцию автономного облака [31] – облака, использующего принцип добровольных вычислений и построенного на основе одноранговой сети. Под добровольными вычислениями понимаются распределенные вычисления с использованием предоставленных добровольно вычислительных ресурсов. Управление выполнением приложений осуществляется на основе идей многогранговой рефлексии и самоадаптации. Однако многие аспекты реализации такой концепции на данный момент требуют исследований.

Помимо облачных вычислений, большой интерес в последние годы стали вызывать системы на основе сервис-ориентированных взаимодействий. Сервис-ориентированные вычисления – это вычислительная парадигма, использующая сервисы в качестве основных ресурсов для создания программ-

ных систем. Сервис-ориентированная архитектура представляет собой композицию из различных программных сервисов, каждый из которых отвечает за решение своей собственной автономной задачи. К. Лиу разработал метод, призванный решить проблемы адаптации в сервис-ориентированных системах, основанный на идеях теории управления [32].

В настоящее время существует сравнительно мало работ, посвященных интеграции программной кибернетики и агентных технологий, несмотря на то, что природа мультиагентных систем кажется очень близкой данному направлению. С кибернетической точки зрения агентная система представляет собой систему индивидуумов, которые, взаимодействуя и обмениваясь информацией, стремятся решить некоторую общую задачу. К. Сим предлагает агентно-ориентированную парадигму для управления ресурсами в облачных системах [33]. К числу инновационных элементов его работы относят: основанную на агентах поисковую машину для обнаружения облачных сервисов, механизм согласования ресурсов на основе агентов, технику решения проблем, возникающую при интеграции облачных сервисов.

Киберфизические системы являются следующим поколением инженерных систем, в которых тесно интегрированы вычислительные, коммуникационные и управляющие технологии. Встроенные компьютерные и сетевые системы контролируют различные физические процессы. В основе киберфизических систем лежит принцип обратной связи и взаимное влияние физических и вычислительных процессов друг на друга.

К. Рэвидрэн применяет программную кибернетику для управления поведением сложных сетевых систем [34]. Предложенный им подход предполагает использование модельно-ориентированных техник программной инженерии для оценки качества адаптации сетевой системы в условиях неконтролируемой внешней среды. В работе Т. Чои [35] обсуждается возможность применения кибернетических принципов в области сбора и анализа больших данных. Также проблемы интеграции информационных и технических систем с точки зрения оптимальной управляемости, принятия решений и адаптируемости актуальны в рамках методологии интернета вещей. Парадигма интернета вещей основана на повсеместном внедрении в общество интеллектуальной техники, что порождает ряд новых проблем для программной инженерии: организация взаимодействия интеллектуальных объектов в больших масштабах, сбор и обработка данных и т.д. [36].

### **Заключение**

Не вызывает сомнения то, что современное общество живет в эпоху повсеместного распространения программного обеспечения. Современные продукты и услуги все чаще включают в себя в качестве компонента программные системы либо находятся под их управлением. Непредсказуемость окружающей среды, быстро меняющиеся требования и условия эксплуатации требуют создания новых способов разработки программ. Программное обеспечение должно стать более умным, самоорганизующимся, ресурсоэффективным и надежным. Современная программная кибернетика ставит перед исследователями новые задачи и предлагает разработчикам новые возможности, связанные с созданием, эксплуатацией и развитием программных систем.

**Библиографический список**

1. **Cai, K. Y.** Optimal software testing and adaptive software testing in the context of software cybernetics / K. Y. Cai // *Information and Software Technology*. – Hong Kong, 2002. – P. 841–855.
2. **Chang, V. A.** *Cybernetics Social Cloud* / V. A. Chang. – New York : Electronics & Computer Science, 2015.
3. **Wiener, N.** *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine* / N. Wiener. – Paris : Hermann & Cie, 1948.
4. **Von Foerster, H.** *Cybernetics of cybernetics* / H. Von Foerster. – New York : Gordon and Breach, 1979.
5. **Geyer, R. F.** *Socio-cybernetics* / R. F. Geyer, J. von der Zouwen. – London : Martinus Nijhoff, 1978.
6. **Новиков, Д. А.** *Кибернетика (навигатор)* / Д. А. Новиков. – Москва : Ленанд, 2015. – 160 с.
7. **Ashby, W. R.** *An Introduction to Cybernetics* / W. R. Ashby. – London : Chapman & Hall, 1956.
8. **Cai, K. Y.** Towards research on software cybernetics / K. Y. Cai, T. Y. Chen, T. H. Tse // 7th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE'02). – Washington : IEEE Computer Society, 2002. – P. 240.
9. **Cai, K. Y.** An overview of software cybernetics / K. Y. Cai, J. W. Cangussu, R. A. DeCarlo, A. P. Mathur // IEEE International Workshop on Software Technology and Engineering Practice. – Washington : IEEE Computer Society, 2003. – P. 77–86.
10. **Kenett, R. S.** Future directions of software cybernetics: A position paper / R. S. Kenett // 35th IEEE Annual Computer Software and Applications Conference Workshops. – Washington : IEEE Computer Society, 2003. – P. 43–44.
11. **Ravindran, K.** Software cybernetics to infuse adaptation intelligence in networked systems / K. Ravindran, M. Rabby // IEEE International Conference on the Network of the Future (NOF). – Washington : IEEE Computer Society, 2013. – P. 1–6.
12. **Cai, K. Y.** An experimental study of adaptive testing for software reliability assessment // K. Y. Cai, C. H. Jiang, H. Hu, C. G. Bai // *J. Syst. Software*. – Norwell : Kluwer Academic Publishers, 2008. – P. 1406–1429.
13. **Wang, P.** Representing extended finite state machines for SDL by a novel control model of discrete event systems / P. Wang, K. Y. Cai // Sixth IEEE International Conference on Quality Software (QSIC 2006). – Washington : Ieee Computer Society, 2006. – P. 159–166.
14. **Wang, P.** Supervisory control of a kind of extended finite state machines / P. Wang, K. Y. Cai // 24th IEEE Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – Washington : Ieee Computer Society, 2012. – P. 775–780.
15. **Lorenzoli, D.** Automatic generation of software behavioural models / D. Lorenzoli, L. Mariani, M. Pezzè // 30th international ACM conference on Software engineering. – New York : ACM, 2008. – P. 501–510.
16. Fuzzy control-based software self-adaptation: A case study in mission critical systems / Q. Yang, J. Lü, J. Xing, X. Tao, H. Hu, Y. Zou // IEEE 35th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW). – Washington : IEEE Computer Society, 2011. – P. 13–18.
17. **Ding, Z.** A software cybernetics approach to self-tuning performance of on-line transaction processing systems / Z. Ding, Z. Wei, H. Chen // *J. Syst. Software*. – Amsterdam : Elsevier, 2016. – P. 13–18.
18. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML // W3C. – URL: <https://www.w3.org/Submission/SWRL/> (дата обращения: 24.05.2017).
19. **Park, K.** A feedback-based approach to validate SWRL rules for developing situation-aware software / K. Park, K. Yeom // 37th Annual Computer Software and Appli-

- cations Conference Workshops (COMPSACW). – Washington : IEEE Computer Society, 2013. – С. 41–46.
20. **Liu, L.** Requirements cybernetics: elicitation based on user behavioural data / L. Liu, Q. Zhou, J. Liu, Z. Cao // *J. Syst. Software*. – Amsterdam : Elsevier, 2016.
  21. **Patikirikorala, T.** A systematic survey on the design of self-adaptive software systems using control engineering approaches / T. Patikirikorala, A. Colman, J. Han, L. Wang // *7th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (IEEE Press)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2012. – P. 33–42.
  22. **Ahuja, K.** Autonomic Computing: An emerging perspective and issues / K. Ahuja, H. Dangey // *IEEE International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT 2014)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2014. – P. 471–475.
  23. **Cotroneo, D.** Software aging and rejuvenation: Where we are and where we are going / D. Cotroneo, R. Natella, R. Pietrantuono, S. Russo // *IEEE Third International Workshop on Software Aging and Rejuvenation (WoSAR 2011)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2011. – P. 1–6.
  24. **Okamura, H.** Application of reinforcement learning to software rejuvenation / H. Okamura, T. Dohi // *10th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2011. – P. 647–652.
  25. **Agepati, R.** Optimal software rejuvenation policies / R. Agepati, N. Gundala, S. V. Amari // *IEEE conference on Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2013)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2013. – P. 1–7.
  26. **Kundu, J.** Self-Healing model for software application / J. Kundu, A. Mukherjee // *Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2014. – P. 1–6.
  27. **Park, J. S.** Essence-based, goal-driven adaptive software engineering / J. S. Park // *IEEE/ACM 4th SEMAT Workshop on General Theory of Software Engineering (GTSE)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2015. – P. 33–38.
  28. Application of cybernetics and control theory for a new paradigm in cybersecurity / M. D. Adams, S. D. Hitefield, B. Hoy, M. C. Fowler, T. C. Clancy // *Computing Research Repository*. – Washington : IEEE Computer Society, 2013.
  29. **Vinnakota, T.** A cybernetics paradigms framework for cyberspace: key lens to cybersecurity / T. Vinnakota // *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Cybernetics (CYBERNETICSCOM)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2013. – P. 85–91.
  30. A lightweight software control system for cyber awareness and security / M. Co, C. L. Coleman, J. W. Davidson, S. Ghosh, J. D. Hiser, J. C. Knight, A. Nguyen-Tuong // *2nd International Symposium on Resilient Control Systems (ISRC'S'09)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2009. – P. 19–24.
  31. **Mayer, P.** The autonomic cloud: a vision of voluntary, peer-2-peer cloud computing / P. Mayer, A. Klarl, R. Hennicker // *7th IEEE International Conference on Self-Adaptation and Self-Organizing Systems Workshops (SASOW)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2013. – P. 89–94.
  32. Control-based approach to balance services performance and security for adaptive service based systems (ASBS) / C. Liu, C. Jiang, H. Hu, K. Y. Cai, D. Huang, S. S. Yau // *33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'09)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2009. – P. 473–478.
  33. **Sim, K. M.** Agent-based cloud computing / K. M. Sim // *IEEE Transactions on Services Computing*. – Washington : IEEE Computer Society, 2012. – P. 564–567.
  34. **Ravindran, K.** Software cybernetics to infuse adaptation intelligence in networked systems / K. Ravindran, M. Rabby // *Fourth IEEE International Conference on the Network of the Future (NOF)*. – Washington : IEEE Computer Society, 2013. – P. 1–6.

35. **Choi, T.** Recent development in big data analytics for business operations and risk management / T. Choi, H. Chan, X. Yue // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – Washington : IEEE Computer Society, 2016. – P. 1–12.
36. **Бершадский, А. М.** Разработка и моделирование гетерогенных инфраструктур для беспроводного информационного обеспечения процессов мониторинга / А. М. Бершадский, А. Г. Финогеев, А. С. Бождай // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2010. – № 1 (13). – С. 36–46.

### **References**

1. Cai K. Y. *Information and Software Technology*. Hong Kong, 2002, pp. 841–855.
2. Chang V. A. *Cybernetics Social Cloud*. New Yourk: Electronics & Computer Science, 2015.
3. Wiener N. *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Paris: Hermann & Cie, 1948.
4. Von Foerster H. *Cybernetics of cybernetics*. New Yourk: Gordon and Breach, 1979.
5. Geyer R. F., J. von der Zouwen *Socio-cybernetics*. London: Martinus Nijhoff, 1978.
6. Novikov D. A. *Kibernetika (navigator) [Cybernetics (navigator)]*. Moscow: Lenand, 2015, 160 p.
7. Ashby W. R. *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall, 1956.
8. Cai K. Y., Chen T. Y., Tse T. H. *7th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineer-ing (HASE'02)*. Washington: IEEE Computer Society, 2002, p. 240.
9. Cai K. Y., Cangussu J. W., DeCarlo R. A., Mathur A. P. *IEEE International Workshop on Software Technology and Engineering Practice*. Washington: IEEE Computer Society, 2003, pp. 77–86.
10. Kenett R. S. *35th IEEE Annual Computer Software and Applications Conference Workshops*. Washington: IEEE Computer Society, 2003, pp. 43–44.
11. Ravindran K., Rabby M. *IEEE International Conference on the Network of the Future (NOF)*. Washington: IEEE Computer Society, 2013, pp. 1–6.
12. Cai K. Y., Jiang C. H., Hu H., Bai C. G. *J. Syst. Software*. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2008, pp. 1406–1429.
13. Wang P., Cai K. Y. *Sixth IEEE International Conference on Quality Software (QSIC 2006)*. Washington: Ieee Computer Society, 2006, pp. 159–166.
14. Wang P., Cai K. Y. *24th IEEE Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Washington: Ieee Computer Society, 2012, pp. 775–780.
15. Lorenzoli D., Mariani L., Pezzè M. *30th international ACM conference on Software engineering*. New York: ACM, 2008, pp. 501–510.
16. Yang Q., Lü J., Xing J., Tao X., Hu H., Zou Y. *IEEE 35th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW)*. Washington: IEEE Computer Society, 2011, pp. 13–18.
17. Ding Z., Wei Z., Chen H. *J. Syst. Software*. Amsterdam: Elsevier, 2016, pp. 13–18.
18. *SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML W3C*. Available at: <https://www.w3.org/Submission/SWRL/> (accessed April 24, 2017).
19. Park K., Yeom K. *37th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW)*. Washington: IEEE Computer Society, 2013, pp. 41–46.
20. Liu L., Zhou Q., Liu J., Cao Z. *J. Syst. Software*. Amsterdam: Elsevier, 2016.
21. Patikirikoralala T., Colman A., Han J., Wang L. *7th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (IEEE Press)*. Washington: IEEE Computer Society, 2012, pp. 33–42.
22. Ahuja K. *IEEE International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT 2014)*. Washington: IEEE Computer Society, 2014, pp. 471–475.

23. Cotroneo D., Natella R., Pietrantuono R., Russo S. *IEEE Third International Workshop on Software Aging and Rejuvenation (WoSAR 2011)*. Washington: IEEE Computer Society, 2011, pp. 1–6.
24. Okamura H., Dohi T. *10th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS)*. Washington: IEEE Computer Society, 2011, pp. 647–652.
25. Agepati R., Gundala N., Amari S. V. *IEEE conference on Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2013)*. Washington: IEEE Computer Society, 2013, pp. 1–7.
26. Kundu J., Mukherjee A. *Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*. Washington: IEEE Computer Society, 2014, pp. 1–6.
27. Park J. S. *IEEE/ACM 4th SEMAT Workshop on General Theory of Software Engineering (GTSE)*. Washington: IEEE Computer Society, 2015, pp. 33–38.
28. Adams M. D., Hitefield S. D., Hoy B., Fowler M. C., Clancy T. C. *Computing Research Repository*. Washington: IEEE Computer Society, 2013.
29. Vinnakota T. *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Cybernetics (CYBERNETICSCOM)*. Washington: IEEE Computer Society, 2013, pp. 85–91.
30. Co M., Coleman C. L., Davidson J. W., Ghosh S., Hiser J. D., Knight J. C., Nguyen-Tuong A. *2nd International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCS'09)*. Washington: IEEE Computer Society, 2009, pp. 19–24.
31. Mayer P., Klarl A., Hennicker R. *7th IEEE International Conference on Self-Adaptation and Self-Organizing Systems Workshops (SASOW)*. Washington: IEEE Computer Society, 2013, pp. 89–94.
32. Liu C., Jiang C., Hu H., Cai K. Y., Huang D., Yau S. S. *33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'09)*. Washington: IEEE Computer Society, 2009, pp. 473–478.
33. Sim K. M. *IEEE Transactions on Services Computing*. Washington: IEEE Computer Society, 2012, pp. 564–567.
34. Ravindran K., Rabby M. *Fourth IEEE International Conference on the Network of the Future (NOF)*. Washington: IEEE Computer Society, 2013, pp. 1–6.
35. Choi T., Chan H., Yue X. *IEEE Transactions on Cybernetics*. Washington: IEEE Computer Society, 2016, pp. 1–12.
36. Bershadskiy A. M., Finogeev A. G., Bozhday A. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 1 (13), pp. 36–46.

---

**Евсеева Юлия Игоревна**

кандидат технических наук, ассистент,  
кафедра систем автоматизированного  
проектирования, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: shymoda@mail.ru

---

**Evseeva Yuliya Igorevna**

Candidate of engineering sciences, assistant,  
sub-department of CAD, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

УДК 004.4

**Евсеева, Ю. И.**

**Программная кибернетика: современное состояние и проблемы /**  
Ю. И. Евсеева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.  
Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 48–59. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-4

## МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ КУСОЧНО-ПОСТОЯННЫХ ФУНКЦИЙ И ПОДХОД К АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДАННОГО МЕТОДА

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются методы спектрального анализа сигналов с более низкой вычислительной сложностью по сравнению с дискретным преобразованием Фурье. Предметом исследования является метод спектрального анализа сигналов при помощи кусочно-постоянных функций. Цель работы – сопоставить результаты спектрального анализа гармонических сигналов с помощью предлагаемого метода и дискретного преобразования Фурье, привести способ схемотехнической реализации основных блоков алгоритма.

*Результаты.* Проведено моделирование метода с 16, 32 и 64 кусочно-постоянными отрезками на период. Определено распределение ошибки предлагаемого метода относительно результата дискретного преобразования Фурье. Обнаружена зависимость ошибки метода от анализируемой частоты. Описана реализация основных блоков алгоритма.

*Выводы.* Сопоставление точностных характеристик метода спектрального анализа сигналов при различном числе кусочно-постоянных областей и дискретного преобразования Фурье позволило сделать вывод о возможности использования анализируемого метода для спектрального анализа сигналов.

**Ключевые слова:** частотный анализ, дискретное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, аппаратная реализация, точностные характеристики.

А. А. Bashkov

## A METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS OF SIGNALS USING PIECEWISE CONSTANT FUNCTIONS AND AN APPROACH TO HARDWARE IMPLEMENTATION OF THIS METHOD

### Abstract.

*Background.* Methods of spectral analysis of signals with lower computational complexity than the discrete Fourier transform (DFT) are the object of the study. The subject of the study is a method of spectral analysis of signals using piecewise constant functions. The purpose of this work is to compare the results of spectral analysis of harmonic signals using the proposed method and the discrete Fourier transform, and to introduce a hardware implementation method for main blocks of the algorithm.

*Results.* The method was simulated with 16, 32 and 64 piecewise constant segments for a period. We determined the proposed method's error distribution with respect to the DFT result. The method's error appears to be dependent on the analyzed frequency. The article outlines implementation of the main blocks of the algorithm.

*Conclusions.* A comparison of the accuracy characteristics of the method for a different number of piecewise constant regions and the discrete Fourier transform led to a conclusion that the method can be used for spectral analysis of signals.

**Key words:** frequency analysis, discrete Fourier transform, fast Fourier transform, hardware implementation.

### Введение

С середины прошлого века ведется работа над совершенствованием алгоритмов спектрального анализа дискретных сигналов [1–13]. В одних алгоритмах значение амплитуды гармонической составляющей дискретного сигнала определяется с помощью тригонометрических функций дискретного преобразования Фурье (ДПФ), в других – с помощью единичной функции, принимающей значения  $-1$  и  $+1$  (функции и преобразование Уолша) [14].

В работе [10] показана принципиальная возможность использования метода ступенчатой аппроксимации тригонометрических функций при спектральном анализе.

Важность данного метода обуславливается повышенным быстродействием современных вычислительных систем при выполнении сложения и вычитания целых чисел и чисел с плавающей запятой небольшой (половиной или одинарной) точности.

Рассмотрим работу метода на примере исходного сигнала с равномерной дискретизацией (рис. 1). Количество отсчетов 17.

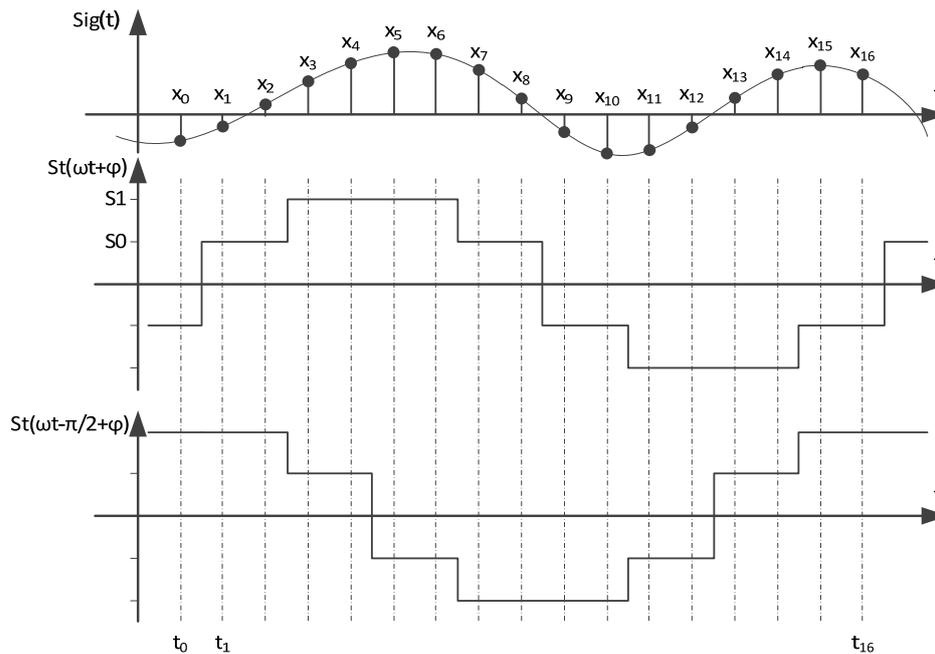


Рис. 1. Соответствие между отсчетами исходного сигнала и значениями кусочно-постоянных функций, применяемых при анализе

Поскольку ступеньки имеют одинаковую ширину, имеет смысл сформировать 8 сумм, затем умножить на значения ступенек:

$$\text{Re} = -x_0S_0 + x_1S_0 + x_2S_0 + x_3S_1 + x_4S_1 + x_5S_1 + x_6S_1 + \dots - x_{15}S_0 - x_{16}S_0,$$

$$\text{Im} = +x_0S_1 + x_1S_1 + x_2S_1 + x_3S_0 + x_4S_0 - x_5S_0 - x_6S_0 - \dots + x_{15}S_1 + x_{16}S_1.$$

Выполним группировку  $x_i$ , принадлежащих одной области:

$$x_{12} = x_1 + x_2, \quad x_{34} = x_3 + x_4, \quad \dots, \quad x_{1516} = x_{15} + x_{16},$$

$$\text{Re} = -x_0S_0 + x_{12}S_0 + x_{34}S_1 + x_{56}S_1 + \dots - x_{1516}S_0,$$

$$\text{Im} = +x_0S_1 + x_{12}S_1 + x_{34}S_0 - x_{56}S_0 - \dots + x_{1516}S_1.$$

Сгруппируем суммы с одинаковыми множителями перед вычислением:

$$\text{Re} = (-x_0 + x_{12} + \dots - x_{1516})S_0 + (x_{34} + x_{56} + \dots)S_1,$$

$$\text{Im} = (x_0 + x_{12} + \dots + x_{1516})S_1 + (x_{34} - x_{56} + \dots)S_0.$$

Из этого следует, что для вычисления действительной и мнимой части требуется 4 умножения.

### Аппаратная реализация

Ниже показаны варианты реализации устройства спектрального анализа для некоторого множества частот  $\{F_0, F_1, F_2, \dots, F_n\}$ . Схема, изображенная справа, позволяет проводить анализ с плавающим окном (рис. 2).

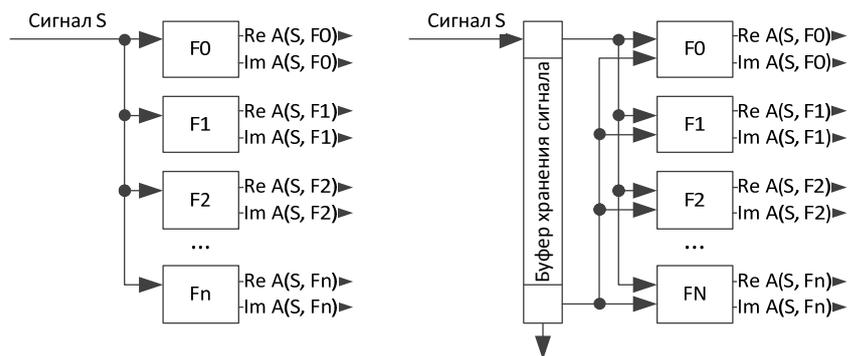


Рис. 2. Функциональная схема спектрального анализатора

Буфер хранения сигнала используется для хранения текущего окна. В данной реализации используется прямоугольное окно. Блоки, обозначенные как  $F_0, F_1, \dots, F_N$ , предназначены для анализа сигнала на наличие соответствующей частоты.

Функциональная схема анализатора одной частоты приведена на рис. 3.

Схема анализа одной частоты состоит из трех основных частей: блока суммирования и двух блоков умножения.

Блок сложения выполняет функции суммирования и хранения полученных результатов в группе регистров:  $RG_0, \dots, RG_n$ . На вход сумматора  $SM$  подаются текущее значение сигнала и содержимое одного из регистров

RG0, ..., RGn (выбор осуществляется управляющим сигналом Y2). Результат сложения записывается в один из регистров. Запись в выбранный регистр осуществляется подачей одним из сигналов группы Y1 (рис. 4).

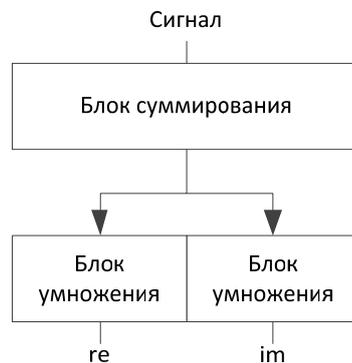


Рис. 3. Функциональная схема анализатора одной частоты

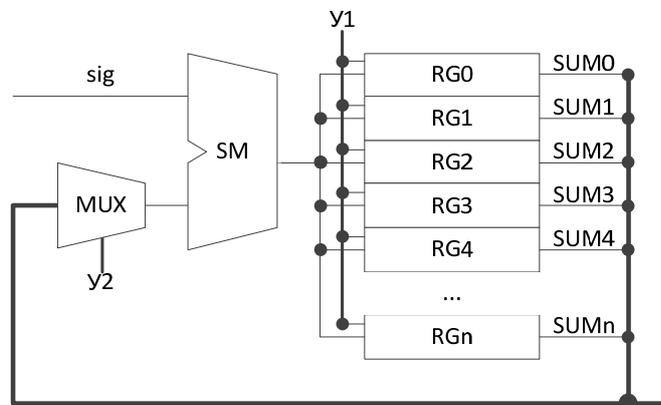


Рис. 4. Функциональная схема блока сложения

Блоки умножения, на которые подаются значения сумм для каждой из анализируемых частот, содержат сумматоры и умножители на константы (определяется параметрами кусочно-постоянной аппроксимации синуса и косинуса) (рис. 5).

Схема присоединения блока умножения к выводам блока сложения для получения действительной и мнимой части при 8-ступенчатой аппроксимации показана в табл. 1. В столбцах – номер входа блока умножения, в ячейках – индекс соответствующей суммы.

Таблица 1

Схема присоединения вычислительного блока

№ входа	0	1	2	3	4	5	6	7
<b>Индекс суммы</b>								
RE	0	3	4	7	2	3	5	6
IM	1	6	2	5	0	7	3	4

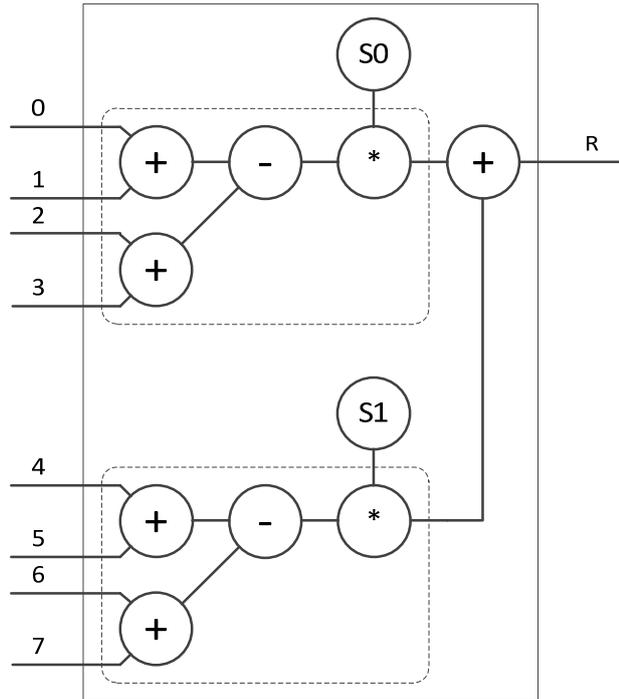


Рис. 5. Схема реализации блока умножения

### Реализация схемы выбора регистра в блоке сложения

Схема управляет выбором используемого регистра при обработке текущего отсчета сигнала, в простейшем виде представляет собой М-разрядный сумматор, К старших разрядов которого являются индексом суммы в массиве (рис. 6).

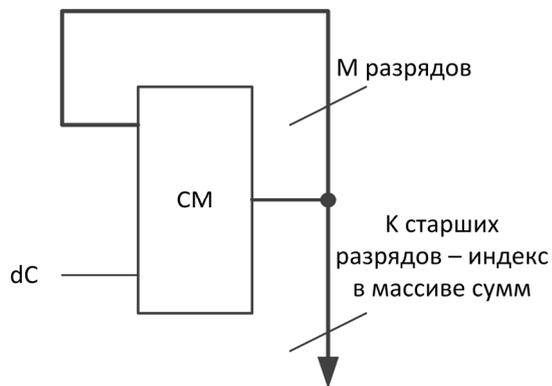


Рис. 6. Схема выбора регистра

Величина dC определяет значение анализируемой частоты. Анализируемая частота определяется по формуле

$$F(i) = \frac{1}{dT_2^K 2^{(M-K)}} \times i = \frac{1}{dT_2^M} \times i,$$

где  $dT$  – шаг дискретизации сигнала;  $i$  – индекс частоты (выбирается от 1 до  $2^K 2^{(M-K) / 2}$ ).

Таблица 2

Шаг изменения частоты в зависимости от шага дискретизации сигнала и количества разрядов  $M$

$dT, c$	$M$	$dF, Гц$
0,001	8	3,906
0,001	10	0,977
0,001	12	0,244
0,001	14	0,061
0,001	16	0,015

### Оценка быстродействия

После получения последнего значения требуется сделать следующие действия:

- в блоке сохранения сумм:
  - 1) получить индекс;
  - 2) выполнить суммирование;
- в вычислительном блоке:
  - 3) выполнить сложение, вычитание, умножение;
  - 4) выполнить сложения в количестве  $\log_2 \frac{N}{4}$ .

Учитывая, что индекс можно высчитать предварительно, при параллельной реализации результат вычисления RE и IM можно получить за два сложения, вычитание, умножение и еще одно сложение, т.е. 5 действий вне зависимости от длительности анализируемого сигнала.

### Моделирование

Моделирование осуществляется с помощью формулы

$$A(f) = \sqrt{\left[ \int_0^T S(t) \sin(2\pi ft) dt \right]^2 + \left[ \int_0^T S(t) \cos(2\pi ft) dt \right]^2}. \quad (1)$$

В работе [10] показана возможность замены функций  $\sin x$  и  $\cos x$  на их аппроксимации с помощью кусочно-постоянных функций:

$$A(f) = \sqrt{\left[ \int_0^T S(t) st(SN, 2\pi ft) dt \right]^2 + \left[ \int_0^T S(t) st(SN, 2\pi ft + \frac{\pi}{2}) dt \right]^2}. \quad (2)$$

Функции  $\sin x$  ставится в соответствие  $st(SN, x)$ , а  $\cos x$  –  $st(SN, x + \pi / 2)$ , где  $SN$  – количество кусочно-постоянных областей на период.

Уровень шума определялся по алгоритму:

1. Вычисление разности между эталонным и полученным значениями для каждой частоты  $d[j] = |A_{ex}[j] - A_{et}[j]|$ .

2. Вычисление максимального значения спектра, полученного эталонным методом:  $\max A_{et} = MAX(A_{et}[j])$ .

3. Для каждой частоты полученного спектра вычислялось значение:

$$e[j] = \frac{d[j]}{\max A_{et}} = \frac{|A_{ex}[j] - A_{et}[j]|}{\max A_{et}}$$

4. Для каждого полученного спектра вычислить максимальное значение  $e[j]$ :

$$err[j] = MAX(\{e[j]\})$$

Пусть ERR – множество  $err[i]$  для всех итераций M.

Анализируемый сигнал формировался следующим образом:

$$s(t) = \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) + \dots + \sin(2\pi f_{30} t + \varphi_{30})$$

Переменные  $f_1, \dots, f_{30}$  принимали значения 1, 2, ..., 999 Гц, а  $\varphi_1, \dots, \varphi_{30}$  принимали случайные значения из диапазона  $[0; 2\pi)$ .

Распределение значений множества ERR при разных способах кусочно-постоянной аппроксимации тригонометрических функций приведено в табл. 3. Количество обработанных сигналов: 131072.

Таблица 3

Распределение значений множества ERR

%	ST = 16	ST = 32	ST = 64
<b>1</b>	0	0	0
<b>2</b>	0	0	0
<b>3</b>	6	1350	61351
<b>4</b>	1130	13957	67943
<b>5</b>	3953	72547	1773
<b>6</b>	8465	33802	4
<b>7</b>	30168	8075	0
<b>8</b>	40954	1169	1
<b>9</b>	23547	133	0
<b>10</b>	11726	33	0
<b>11</b>	6393	1	0
<b>12</b>	3193	3	0
<b>13</b>	1075	0	0
<b>14</b>	306	1	0
<b>15</b>	99	0	0
<b>16</b>	26	0	0
<b>17</b>	19	0	0
<b>18</b>	8	1	0
<b>19</b>	3	0	0
<b>20</b>	1	0	0
<b>Предельная ошибка, %</b>	<b>27</b>	<b>17,2</b>	<b>7,6</b>

Распределение частот, на которых обнаруживается максимальная ошибка для SN = 32, показано на рис. 7.

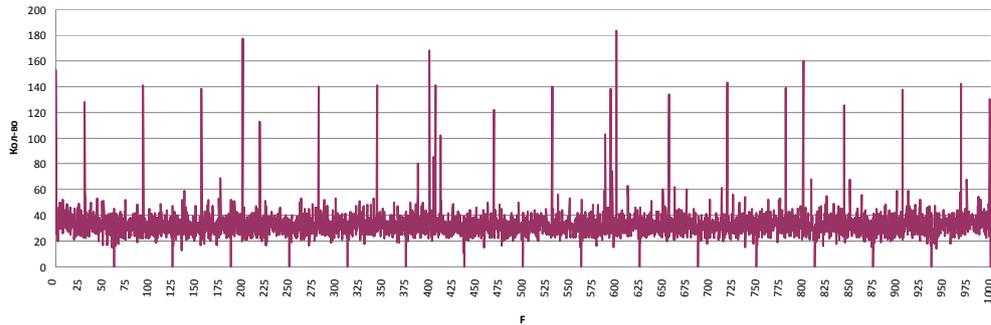


Рис. 7. Распределение частот с максимальной ошибкой при 32-ступенчатой аппроксимации

На графике отчетливо видны закономерности, означающие зависимости размера ошибки от частоты. Видны последовательности максимумов

$$\frac{1000}{32} + \frac{1000}{16}i, i = 0 \dots 15 \text{ и } \{200, 400, 600, 800\} \text{ Гц}$$

и последовательность минимумов:

$$\frac{1000}{16}i, i = 0 \dots 15.$$

Распределение частот, на которых обнаруживается максимальная ошибка для SN = 64 приведено на рис. 8.

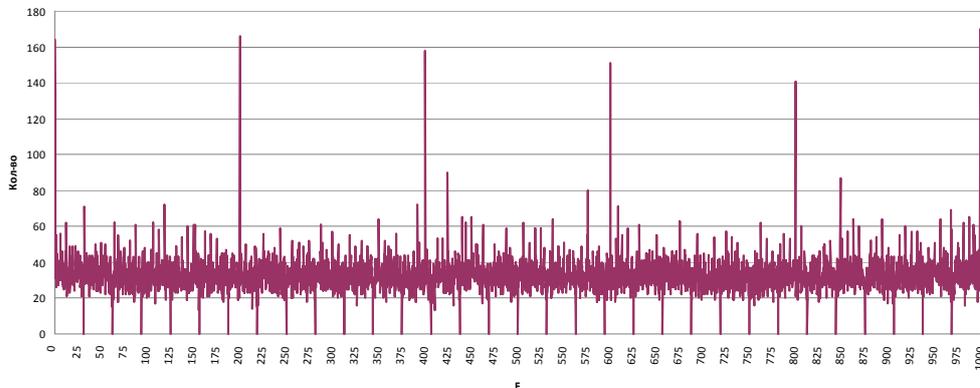


Рис. 8. Распределение частот с максимальной ошибкой при 64-ступенчатой аппроксимации

На графике отчетливо видна последовательность максимумов: {200, 400, 600, 800} Гц и последовательность минимумов:

$$\frac{1000}{32}i, i = 0 \dots 31.$$

### **Заключение**

Моделирование показывает возможность использования данного решения для спектрального анализа сигналов.

Величина ошибки зависит от следующих параметров реализации:

- количества кусочно-постоянных областей при реализации синуса и косинуса;
- размерности операндов;
- множества анализируемых частот.

### **Библиографический список**

1. **Харкевич, А. А.** Спектры и анализ / А. А. Харкевич. – М. : Физматлит, 1962. – С. 111.
2. **Смит, С.** Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников (+CD) / Стивен Смит ; пер. с англ. А. Ю. Линовича, С. В. Витязева, И. С. Гусинского. – М. : Додэка-XXI, 2008. – 720 с. – (Схемотехника).
3. **Гольденберг, Л. М.** Цифровая обработка сигналов. Справочник / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – М. : Радио и связь, 1985. – 312 с.
4. **Марпл, С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
5. **Рабинер, П.** Теория и применение цифровой обработки сигналов / П. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 848 с.
6. **Оппенгейм, А.** Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер ; пер. с англ. С. А. Кулешов, С. Ф. Боев. – М. : Техносфера, 2012. – 1048 с.
7. **Сергиенко, А. Б.** Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2002. – 608 с.
8. **Воробьев, С. Н.** Цифровая обработка сигналов : учеб. для студентов учреждений высш. проф. образ. / С. Н. Воробьев. – М. : Академия, 2013. – 320 с.
9. **Лайонс, Р.** Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. / Р. Лайонс. – М. : Бинном-Пресс, 2013. – 656 с.
10. **Bashkov, A.** Investigating the possibility of using piecewise constant functions in spectral analysis of signals / A. Bashkov, D. Silnov // International Journal of Applied Engineering Research. Research India Publication. – 2015. – № 10. – P. 44211–44213.
11. **Lyubomudrov, A.** On some problems and approach to solution thereof upon computing in residue number system / A. Lyubomudrov, A. Bashkov // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. Asian Research Publishing Network. – 2016. – № 86. – P. 377–381.
12. **Любомудров, А. А.** Усовершенствованный метод спектрального анализа акустических сигналов для ограниченного диапазона частот / А. А. Любомудров, А. А. Башков // Естественные и технические науки. – 2011. – № 1 (51). – С. 240–241.
13. **Любомудров, А. А.** Увеличение точности метода спектрального анализа / А. А. Любомудров, А. А. Башков // Вестник РУДН. – 2011. – № 1. – С. 118–120.
14. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1971. – С. 697.

### **References**

1. Kharkevich A. A. *Spektry i analiz* [Spectra and analysis]. Moscow: Fizmatlit, 1962, p. 111.
2. Smit S. *Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskoe rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov (+CD)* [Digital signal processing. Practical guide for engineers and scientific workers (+CD)]. Moscow: Dodéca-XXI, 2008. – 720 p. – (Schemotekhnika).

- and researchers (+CD)]. Transl. from English by A. Yu. Linovich, S. V. Vityazev, I. S. Gusinskiy. Moscow: Dodeka-XXI, 2008, 720 p.
3. Gol'denberg L. M., Matyushkin B. D., Polyak M. N. *Tsifrovaya obrabotka signalov. Spravochnik* [Digital signal processing. Reference book]. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 312 p.
  4. Marpl S. L. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozhenie* [Digital spectral analysis and its application]. Moscow: Mir, 1990, 584 p.
  5. Rabiner P., Gould B. *Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov* [The theory and application of digital signal processing]. Moscow: Mir, 1978, 848 p.
  6. Oppengeym A., Shafer R. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Transl. from English by S. A. Kuleshov, S. F. Boev. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 1048 p.
  7. Sergienko A. B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Saint-Petersburg: Piter, 2002, 608 p.
  8. Vorob'ev S. N. *Tsifrovaya obrabotka signalov: ucheb. dlya studentov uchrezhdeniy vyssh. prof. obraz* [Digital signal processing: textbook for university students]. Moscow: Akademiya, 2013, 320 p.
  9. Layons R. *Tsifrovaya obrabotka signalov: per. s angl.* [Digital signal processing: translation from English]. Moscow: Binom-Press, 2013, 656 p.
  10. Bashkov A., Silnov D. *International Journal of Applied Engineering Research. Research India Publication*. 2015, no. 10, pp. 44211–44213.
  11. Lyubomudrov A., Bashkov A. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology. Asian Research Publishing Network*. 2016, no. 86, pp. 377–381.
  12. Lyubomudrov A. A., Bashkov A. A. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and engineering sciences]. 2011, no. 1 (51), pp. 240–241.
  13. Lyubomudrov A. A., Bashkov A. A. *Vestnik RUDN* [Bulletin of RUDN]. 2011, no. 1, pp. 118–120.
  14. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematics reference book for researchers and engineers]. Moscow: Nauka, 1971, p. 697.

---

**Башков Алексей Александрович**

ведущий инженер,  
Научно-производственное предприятие  
«Гамма» (Россия, г. Москва,  
ул. Профсоюзная, 78, стр. 4)  
E-mail: a-a-bashkov@yandex.ru

**Bashkov Aleksey Aleksandrovich**

Lead engineer, Research and  
Production Enterprise “Gamma”  
(building 4, 78 Profsoyuznaya  
street, Moscow, Russia)

---

УДК 53.08

**Башков, А. А.**

**Метод спектрального анализа сигналов при помощи кусочно-постоянных функций и подход к аппаратной реализации данного метода / А. А. Башков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 60–69. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-5**

## ТЕСТИРОВАНИЕ АНАЛОГОВОГО И КВАНТОВОГО ОРАКУЛОВ ЛИНЕЙНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ, ПРЕДСКАЗЫВАЮЩИХ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ НА МАЛОЙ ВЫБОРКЕ В 32 ОПЫТА

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Целью работы является снижение ошибок вычисления коэффициентов корреляции на малых тестовых выборках.

*Материалы и методы.* Используются средства имитационного моделирования для получения непрерывной и дискретной функций плотности распределения значений коэффициентов корреляции. Рассматривается математическая корреляционная молекула, порождающая на выходе спектр из 16 состояний. Дается общая схема синтеза аналоговой формы оракула и квантовой формы оракула, предсказывающих значения коэффициентов корреляции на малой выборке из 32 опытов.

*Результаты.* Аналоговый вариант оракула позволяет снизить стандартное отклонение ошибок вычисления до 11,6 %, что эквивалентно повышению числа опытов с 32 до 39. Квантовый вариант оракула с линейной вычислительной сложностью позволяет снизить стандартное отклонение ошибки до 85 %, что эквивалентно повышению размеров выборки с 32 до 109 опытов.

*Выводы.* Квантовые оракулы, построенные с использованием корреляционной математической молекулы, намного эффективнее аналоговых форм оракулов. Предположительно переход от квантовых оракулов с линейной вычислительной сложностью к квантовым оракулам с квадратичной вычислительной сложностью позволит дополнительно снизить погрешность вычисления коэффициентов корреляции. Происходит специфическая регуляризация вычислений, позволяющая обменивать ресурсы вычислительной машины на эквивалентный объем тестовой выборки.

**Ключевые слова:** коэффициент корреляции, квантовая суперпозиция, корреляционная молекула, дискретный спектр состояний, статистический анализ малых выборок.

V. I. Volchikhin, A. I. Ivanov, A. V. Serikov, Yu. I. Serikova

## TESTING OF ANALOG AND QUANTUM ORACLES OF LINEAR COMPUTATIONAL COMPLEXITY, PREDICTING THE VALUES OF THE CORRELATION COEFFICIENT ON A SMALL SAMPLE IN 32 EXPERIMENTS

### Abstract.

*Background.* The aim of the paper is to reduce errors in calculating correlation coefficients for small test samples.

*Materials and methods.* Simulation means are used to obtain continuous and discrete functions of the distribution density of correlation coefficients. We consider a mathematical correlation molecule that generates a spectrum of 16 states at the output. The article describes the general scheme for synthesizing the analog oracle's

form and the quantum oracle's form, which predicts the values of the correlation coefficients for a small sample of 32 experiments.

*Results.* The oracle's analog version allows to reduce the standard deviation of calculation errors to 11.6 %, which is equivalent to an increase in the number of experiments from 32 to 39. The quantum version with linear computational complexity allows reducing the standard deviation of the error to 85 %, which is equivalent to increasing the sample sizes from 32 to 109 experiments.

*Conclusions.* Quantum oracles constructed using correlation mathematical molecules are much more efficient than analog forms of oracles. Presumably, the transition from quantum oracles with linear computational complexity to quantum oracles with quadratic computational complexity will additionally reduce the error in calculating the correlation coefficients. There is a specific regularization of calculations, allowing to exchange computer's resources for an equivalent test sample volume.

**Key words:** correlation coefficient, quantum superposition, correlation molecule, discrete spectrum of states, statistical analysis of small samples.

### **Общие положения непрерывных вычислений младших статистических моментов и коэффициентов корреляции на малых выборках**

На практике данных всегда мало. Особенно остро эта проблема стоит при решении задачи биометрической идентификации личности [1–3]. Человек является очень сложным объектом высокой размерности, что значительно усложняет статистические многомерные оценки. Такие же проблемы возникают при переходе от личной биометрии человека к коллективной биометрии групп людей. Например, при тестировании новых лекарств требуется привлекать достаточно большое число биометрических данных больных с нужным фармацевтам заболеванием. Далее следует провести их лечение, а затем, набрав нужный объем статистики, подтвердить безвредность нового фармакологического препарата. Такой подход к тестированию новых лекарств обычно занимает несколько лет.

Очевидно, что при прочих равных условиях сокращение в два-три раза объема тестовой выборки может в два-три раза сократить время тестирования биометрических данных и, соответственно, сократить сроки вывода фармацевтических препаратов на рынок.

Следует отметить, что задача тестирования биометрических технологий на малом объеме данных стандартизована [4], однако этот стандарт действует только для средств нейросетевой биометрии в случае, если обучение нейронных сетей выполнено по стандарту [5].

Если оставаться в рамках биометрии, то проблема будет сводиться к снижению ошибки вычисления математического ожидания  $\Delta E$  и стандартного отклонения  $\Delta \sigma$  биометрических параметров на выборках малого объема  $n$ . При этом ошибка вычисления  $\Delta E$  обычно намного меньше, чем ошибка  $\Delta \sigma$ , наблюдается эффект накопления ошибок:

$$\begin{cases} \Delta E(v_1) = f(v_1, n), \\ \Delta \sigma(v_1) = f(v_1, \Delta E(v_1), n). \end{cases} \quad (1)$$

Еще больше оказывается ошибка вычисления коэффициента корреляции, так как на нее влияют уже четыре ошибки статистических моментов более низких порядков:

$$\Delta r(v_1, v_2) = f(v_1, v_2, \Delta E(v_1), \Delta E(v_2), \Delta \sigma(v_1), \Delta \sigma(v_2), n). \quad (2)$$

Вместе с ростом числа переменных, от которых зависит ошибка, растет неустойчивость вычислений. В связи с этим актуальными являются попытки компенсации погрешностей вычисления промежуточных данных, что следует рассматривать как некоторые процедуры регуляризации. В работах [6–8] показана возможность снижения методических и случайных составляющих ошибок вычисления от 1,5 до 30 % в зависимости от размеров тестовой выборки  $n$ . Все вычисления в работах [6–8] выполняются в континуальной (аналоговой) форме.

### Статистические вычисления в дискретной (квантовой) форме спектрального представления данных малых выборок

Когда речь идет о статистической обработке данных малых выборок, возникает так называемая проблема шумов квантования. На рис. 1 шумы квантования для выборки в 9 примеров отмечены заливкой.

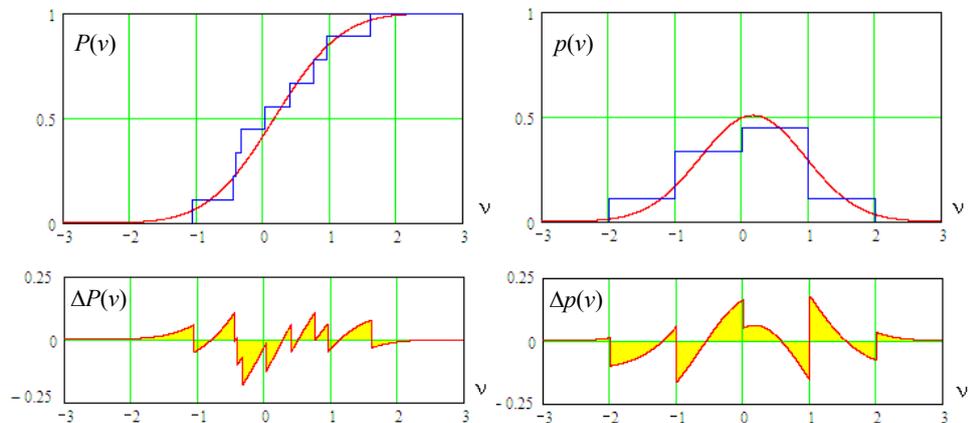


Рис. 1. Шумы квантования данных, представленные выборкой из 9 примеров при приближении функции вероятности –  $P(v)$  (левая часть рисунка) и плотности распределения вероятности –  $p(v)$  (правая часть рисунка)

Очевидно, что мощность шумов квантования монотонно падает при росте объема тестовой выборки. Все процедуры, использованные в работах [6–8], следует рассматривать как совокупность аналоговых (континуальных) мер по подавлению шумов квантования.

Можно подойти к решению задачи совершенно иначе и создать специальные условия, подчеркивающие спектральные компоненты шумов квантования. Вместо того чтобы бороться с шумом квантования, его нужно использовать, переходя к анализу его спектра и приняв меры по стабилизации его спектральных компонент. Впервые такая возможность была продемонстрирована для хи-квадрат критерия в работе [9]. В ней даны условия, при которых спектральные составляющие шумов квантования становятся абсолютно стабильными. В этом отношении хи-квадрат функционал оказывается подобен обычной молекуле водорода со строго фиксированными положениями спек-

тральных линий. Вместо анализа континуум распределений состояний хи-квадрат критерия на больших выборках  $n \rightarrow \infty$ , на малых выборках выгоднее анализировать дискретный спектр его состояний [9–12]. Более того, по аналогии с математической хи-квадрат молекулой может быть построена корреляционная молекула с конечным дискретным спектром состояний [13].

Задачей данной работы является сравнение возможностей аналоговой (континуальной) и дискретной (квантовой) статистической регуляризации вычислений. В первой части работы мы рассмотрим привычную для всех нас континуальную регуляризацию вычисления коэффициентов корреляции на выборке в 32 примера. Во второй части работы будут проанализированы возможности квантового (спектрального) статистического анализа малой выборки в контексте более точного вычисления коэффициента корреляции Пирсона.

### Квантово-континуальная форма вычисления коэффициента корреляции

Статистическая обработка артиллерийских стрельб [14] традиционно велась исходя из гипотезы нормального закона распределения данных, дающего эллипсоиды рассеивания. При этом для большого числа некоррелированных опытов  $N$  вероятности попадания в каждую из четвертей круга рассеивания будут одинаковы:

$$P_1 \approx \frac{n_1}{N} \approx P_2 \approx \frac{n_2}{N} \approx P_3 \approx \frac{n_3}{N} \approx P_4 \approx \frac{n_4}{N}, \quad (3)$$

где  $n_1, n_2, n_3, n_4$  – число попаданий в первую, вторую, третью и четвертую четверти круга.

В случае, если данные коррелированы (зависимы), соотношение между вероятностями попадания в разные фрагменты эллипса рассеивания становятся иными:

$$P_1 \approx \frac{n_1}{N} \approx P_3 \approx \frac{n_3}{N} > P_2 \approx \frac{n_2}{N} \approx P_4 \approx \frac{n_4}{N}. \quad (4)$$

Эта ситуация отображена на рис. 2.

Можно показать, что для коррелированных данных вероятности попадания в выделенные заливкой сектора эллипса (рис. 2) пропорциональны малому и большому диаметрам эллипса:

$$\frac{d}{D} = \frac{P_2 + P_4}{P_1 + P_3} \approx \frac{n_2 + n_4}{n_1 + n_3}. \quad (5)$$

Подставляя соотношение

$$R(x_1, x_2) = \frac{D - d}{D + d}, \quad (6)$$

в известную формулу вычисления коэффициента корреляции [14], мы получаем формулу для вычисления дискретных значений конечного спектра коэффициентов корреляции:

$$R(x_1, x_2) = \frac{P_1 + P_3 - P_2 - P_4}{P_1 + P_3 + P_2 + P_4} \approx \frac{n_1 + n_3 - n_2 - n_4}{n_1 + n_3 + n_2 + n_4}. \quad (7)$$

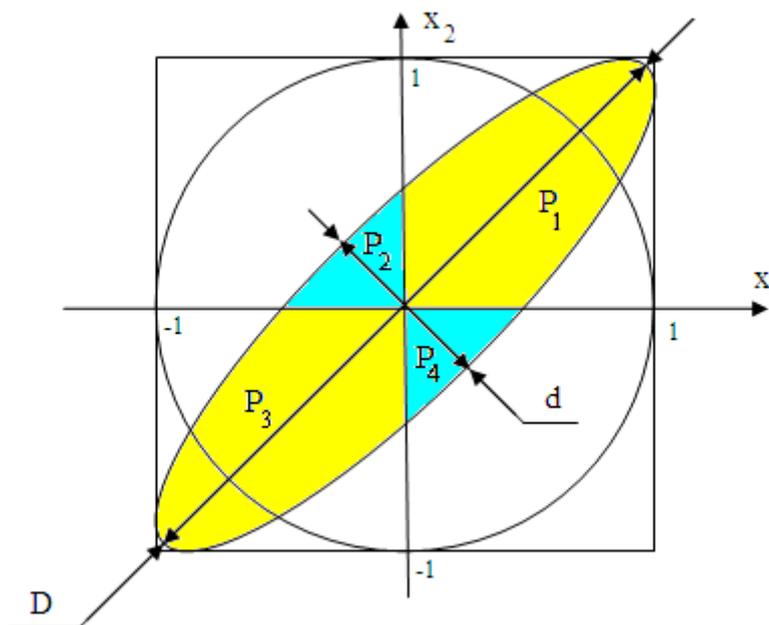


Рис. 2. Описание центрированных и нормированных площадей рассеивания нормальных данных (независимые данные – круг, зависимые данные – эллипс)

Получается, что эллипс распределения зависимых данных является двумерным континуумом корреляционной молекулы, а оси нормированной и центрированной систем координат играют роль двух квантователей, делящих площадь эллипса на четыре части. Получается достаточно простая и понятная математическая конструкция, преобразующая внутренний (не наблюдаемый) двумерный континуум в конечный спектр дискретных выходных состояний. То есть мы получили желаемую корреляционную молекулу, аналогичную хи-квадрат математической молекуле [9–11] или молекуле водорода, состояния которой описываются уравнением Шредингера [15].

### Математическая корреляционная молекула с конечным спектром выходных состояний для конечной выборки

Принципиально важным является то, что реализовать решение уравнения Шредингера при большом числе электронов технически невозможно [15]. Именно в этом и состоит основная проблема квантовой механики, ресурсов современных вычислительных машин не хватает, если мы попытаемся вычислять волновые функции для 32 электронов.

Для математической корреляционной молекулы все кардинально меняется. Огромным преимуществом математической корреляционной молекулы является то, что для ее моделирования достаточно 9 строк кода на языке высокого уровня. Пример программной реализации математической молекулы дан на рис. 3.

Получается, что для воспроизведения волновых функций и спектра состояний математической корреляционной молекулы нет необходимости использовать большую вычислительную машину. Подходит любой вычисли-

тель с любым процессором. Именно в простоте имитационного моделирования хи-квадрат молекул [9–11], молекулы стандартного отклонения [12] и корреляционной молекулы [13] состоит техническое преимущество квантовой нейродинамики [16] по сравнению с квантовой механикой [15]. Для решения уравнения Шредингера и моделирования физически существующих химических молекул требуется программа, состоящая из нескольких тысяч строк кода [17], а для математических молекул достаточно программы всего из 9 строк кода (рис. 3).

```

x1 := norm(16,0,1)  x2 := norm(16,0,1)  r := 0.1

⎛ y1 ⎞   ⎛ 1  r ⎞   ⎛ x1 ⎞
⎜ y2 ⎟ := ⎜ r  1 ⎟ · ⎜ x2 ⎟

n1 := | s ← 0
      | for i ∈ 0..15
      |   s ← s + 1 if (y1i > mean(y1)) ∧ (y2i > mean(y2))
      | s

n2 := ...          n3 := ...          n4 := ...

R :=  $\frac{n1 + n3 - n2 - n4}{n1 + n2 + n3 + n4}$ 
    
```

Рис. 3. Программная реализация корреляционной математической молекулы (9 строк кода на языке моделирования MathCAD) для выборки из 16 опытов

Уравнение Шредингера и уравнения математических молекул [9–13] похожи между собой тем, что порождают непрерывно квантовые эффекты, приводящие к выходным дискретным (линейчатым) спектрам. Но вот вычислительные затраты на их воспроизведение (моделирование) принципиально разные.

**Аналоговая (континуальная) форма коррекции значений коэффициентов парной корреляции**

Обычно коэффициент корреляции вычисляют по формуле Пирсона:

$$r(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{32} \frac{(E(x_1) - x_{1,i})(E(x_2) - x_{2,i})}{\sigma(x_1)\sigma(x_2)}. \tag{8}$$

При этом возникает значительная ошибка  $\Delta r$ . Наибольшее значение ошибки возникает при попытках вычислить значение коэффициентов корреляции, близких к нулю ( $\max(\sigma(r))$  при  $r = 0$ ). Соответственно наибольший практический интерес представляет коррекция ошибок вычисления слабо коррелированных данных [8]. Результат подобной линейной коррекции для

«фрактальных корреляционных функционалов» [8] позволяет снизить ошибку вычислений до 11,1 %.

В нашем случае применение корреляционной молекулы корректировки данных может быть осуществлено путем простого усреднения:

$$\tilde{r}(x_1, x_2) = \frac{r(x_1, x_2) + R(x_1, x_2)}{2}. \quad (9)$$

При этом корреляция двух форм вычисления показателей (7), (8) высока и положительна ( $\text{corr}(r, R) = +0,65$ ). То есть независимая компонента ошибок вычислений все-таки присутствует, и потому усреднение данных выборки в 32 опыта приводит к снижению стандартного отклонения  $\sigma_{32}(\tilde{r})$  на 11,6 % по отношению к стандартному отклонению корреляции Пирсона  $\sigma_{32}(r)$ .

Снижение ошибок измерения на 11,6 % является значительным достижением с позиций обычной измерительной техники. Для статистики это означает, что выборка из 32 опытов удивительным образом увеличилась до 39 опытов (рост примерно на 30 %). Мы получили ощутимый рост числа опытов из-за того, что вместо одной классической формы корреляционных функционалов (9) дополнительно применили вторую форму корреляционных функционалов (8). Два наблюдателя коэффициента корреляции оказались не полностью зависимы, их погрешность оказалась различной:

$$\Delta r_{32}(x_1, x_2) \neq \Delta R_{32}(x_1, x_2). \quad (10)$$

#### Квантовый корректор показателя корреляции для выборки в 32 опыта

Следует подчеркнуть, что для математической корреляционной молекулы (программная реализация на рис. 4) для 16 опытов спектр выходных состояний может иметь до 16 спектральных линий. На рис. 4 (данные из источника [13]) даны два спектра, полученные для  $r = 0$  и  $r = 0,5$  на выборке в 999 реализаций по 16 опытов.

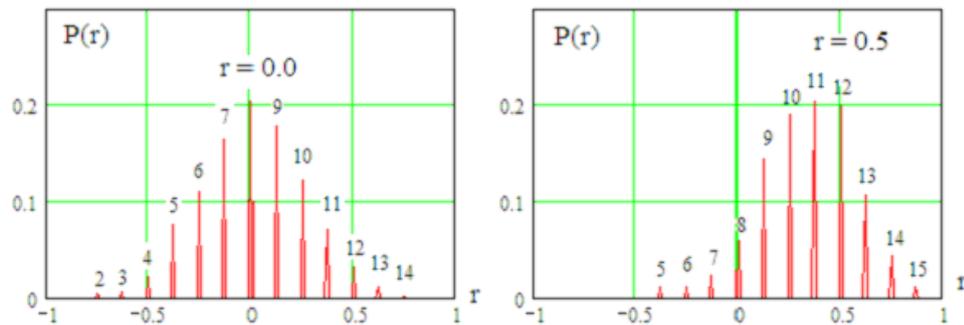


Рис. 4. Примеры спектров коэффициентов корреляции для выборок из 16 опытов

Из левой части рис. 4 видно, что десятая спектральная линия с ординатой  $r = 0$  имеет максимальное значение вероятности появления, более того,

спектр симметричен. Это означает, что коэффициент корреляции по спектру вычисляется как математическое ожидание всех обнаруженных спектральных линий:

$$\tilde{R} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} P(r_i) = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} P\left(-1 + \frac{1}{16+1} + \frac{i}{16+1}\right) = E(P(r_i)). \quad (11)$$

Два предельных значения  $P(r = -1)$  и  $P(r = +1)$  в расчет не берутся, так как их спектральные компоненты полностью детерминированы и вероятность их появления в спектре близка к нулю.

Очевидно, что для наблюдения спектральных линий выходного состояния корреляционной молекулы нужна выборка порядка 999 реализаций по 16 опытов. Такую выборку можно получить, воспользовавшись одной выборкой в 32 опыта, путем случайного извлечения из нее множества реализаций меньших выборок по 16 опытов. Всего возможно получение:  $C_{32}^{16} = \frac{32!}{16!(32-16)!}$ ,

что составляет 601 миллион неповторяющихся серий опытов. Эта величина предельна, проверять столь большое число серий нет необходимости. Близкие выборки мало информативны, их следует отбрасывать.

### Заключение

Приведенные выше теоретические положения были проверены путем численного эксперимента. В итоге было получено снижение стандартного отклонения  $\sigma_{32}(r)$  на 85,3 %, что эквивалентно увеличению тестовой выборки с 32 опытов до 109 опытов. Получается, что разработка квантового корректора ошибок вычисления коэффициентов корреляции примерно в 8 раз выгоднее попыток коррекции в континуальной (аналоговой) форме (9).

Фактически мы получили некоторого континуально-квантового оракула, более точно предсказывающего значение коэффициента корреляции, чем формула Пирсона (8). Этот квантовый оракул осуществляет гораздо более сложные вычисления по программе, состоящей из примерно 250 строк кода на языке высокого уровня. Обработка данных этой программой имеет линейную вычислительную сложность и занимает порядка 2 с машинного времени. Фактически создан квантовый оракул, более точно предсказывающий значение коэффициента корреляции для выборок из 32 опытов, который позволяет обменять сложность вычислений на точность оценки. Предположительно повышение сложности вычислений с линейной до квадратичной в будущем приведет к незначительному усложнению программного обеспечения и допустимому увеличению времени вычислений. При этом ожидается существенный рост точности предсказания коэффициента корреляции на малых выборках. Это крайне важно для развития линейки алгоритмов типа ГОСТ Р 52633.5 для автоматического обучения искусственных нейронных сетей преобразователей биометрия-код.

### Библиографический список

1. **Волчихин, В. И.** Быстрые алгоритмы обучения нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации : монография / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. – 273 с.

2. **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.
3. 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.
4. ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. – М., 2011.
5. ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. – М., 2011.
6. **Волчихин, В. И.** Компенсация методических погрешностей вычисления стандартных отклонений и коэффициентов корреляции, возникающих из-за малого объема выборок / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Ю. И. Серикова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 1 (37). – С. 103–110.
7. **Кулагин, В. П.** Корректировка методических и случайных составляющих погрешностей вычисления коэффициентов корреляции, возникающих на малых выборках биометрических данных / В. П. Кулагин, А. И. Иванов, Ю. И. Серикова // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22, № 9. – С. 705–710.
8. **Волчихин, В. И.** Фрактально-корреляционный функционал, используемый при поиске пар слабо зависимых биометрических данных в малых выборках / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Б. Б. Ахметов, Ю. И. Серикова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4 (40). – С. 27 – 36.
9. **Ахметов, Б. Б.** Дискретный характер закона распределения хи-квадрат критерия для малых тестовых выборок / Б. Б. Ахметов, А. И. Иванов, Н. И. Серикова, Ю. В. Фунтикова // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. – 2015. – № 1. – С. 17–25.
10. **Кулагин, В.** Циклические континуально-квантовые вычисления: усиление мощности хи-квадрат критерия на малых выборках / В. Кулагин, А. Иванов, А. Газин, Б. Ахметов // Аналитика. – 2016. – № 5 (30). – С. 22–29.
11. Перспективы создания циклической континуально-квантовой хи-квадрат машины для проверки статистических гипотез на малых выборках биометрических данных и данных иной природы / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Д. В. Пашенко, Б. Б. Ахметов, С. Е. Вятчанин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 1 (41). – С. 5–15
12. **Волчихин, В. И.** Использование эффектов квантовой суперпозиции при регуляризации вычислений стандартного отклонения на малых выборках биометрических данных / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. В. Сериков, Ю. И. Серикова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1. – С. 57–63.
13. **Волчихин, В. И.** Квантовая суперпозиция дискретного спектра состояний математической молекулы корреляции для малых выборок биометрических данных / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. В. Сериков, Ю. И. Серикова // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 2. – С. 230–243.
14. **Абезгауз, Г. Г.** Справочник по вероятностным расчетам / Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина. – М. : Воениздат, 1970. – 536 с.
15. **Нильсон, М.** Квантовые вычисления и квантовая информация / М. Нильсон, И. Чанг. – М. : Мир, 2006. – 821 с.
16. **Иванов, А. И.** Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции /

А. И. Иванов. – Пенза : Изд-во АО «ПНИЭИ», 2016. 133 с. – URL: <http://пниэи.рф/activity/science/BOOK16.pdf>

17. Степанов, Н. Ф. Квантовая механика и квантовая химия / Н. Ф. Степанов. – М. : Мир, 2001. – 519 с.

### References

1. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A. *Bystrye algoritmy obucheniya neyrosetevykh mekhanizmov biometriko-kriptograficheskoy zashchity informatsii: monografiya* [Fast learning algorithms for neural network mechanisms of biometric cryptographic data protection: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2005, 273 p.
2. Malygin A. Yu., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A. *Bystrye algoritmy testirovaniya neyrosetevykh mekhanizmov biometriko-kriptograficheskoy zashchity informatsii* [Fast testing algorithms for neural network mechanisms of biometric cryptographic data protection]. Penza: Izd-vo PGU, 2006, 161 p.
3. Yazov Yu. K., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Nazarov I. G. *Neyrosetevaya zashchita personal'nykh biometricheskikh dannykh* [Neural network protection of personal biometric data]. Moscow: Radiotekhnika, 2012, 157 p.
4. GOST R 52633.3–2011. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Testirovanie stoykosti sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy zashchity k atakam podbora* [Data protection. Data protecting technology. Testing of highly reliable biometric protective means' resistance to breaking attacks]. Moscow, 2011.
5. GOST R 52633.5–2011. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Avtomaticheskoe obuchenie neyrosetevykh preobrazovateley biometriya-kod dostupa* [Data protection. Data protecting technology. Automatic learning of neural network “biometrics- access code” converters]. Moscow, 2011.
6. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Serikova Yu. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 1 (37), pp. 103–110.
7. Kulagin V. P., Ivanov A. I., Serikova Yu. I. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies]. 2016, vol. 22, no. 9, pp. 705–710.
8. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Akhmetov B. B., Serikova Yu. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 4 (40), pp. 27–36.
9. Akhmetov B. B., Ivanov A. I., Serikova N. I., Funtikova Yu. V. *Vestnik Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Kazakhstan]. 2015, no. 1, pp 17–25.
10. Kulagin V., Ivanov A., Gazin A., Akhmetov B. *Analitika* [Analytics]. 2016, no. 5 (30), pp. 22–29.
11. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Pashchenko D. V., Akhmetov B. B., Vyatchanin S. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 1 (41), pp. 5–15
12. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Serikov A. V., Serikova Yu. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurment. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 1, pp. 57–63.
13. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Serikov A. V., Serikova Yu. I. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Bulletin of Mordovia University]. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 230–243.
14. Abezgauz G. G., Tron' A. P., Kopenkin Yu. N., Korovina I. A. *Spravochnik po veroyatnostnym raschetam* [Probability calculations reference book]. Moscow: Voenizdat, 1970, 536 p.
15. Nil'son M., Chang I. *Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informatsiya* [Quantum calculations and quantum information]. Moscow: Mir, 2006, 821 p.

16. Ivanov A. I. *Mnogomernaya neyrosetevaya obrabotka biometricheskikh dannykh s programnym vosproizvedeniem effektivov kvantovoy superpozitsii* [Multidimensional neural network processing of biometric data with program representation of quantum superposition effects]. Penza: Izd-vo AO «PNIEI», 2016, 133 p. Available at: <http://pniei.pf/activity/science/BOOK16.pdf>
17. Stepanov N. F. *Kvantovaya mekhanika i kvantovaya khimiya* [Quantum mechanics and quantum chemistry]. Moscow: Mir, 2001, 519 p.
- 

***Волчихин Владимир Иванович***

доктор технических наук, профессор,  
президент Пензенского государственного  
университета (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [president@pnzgu.ru](mailto:president@pnzgu.ru)

***Volchikhin Vladimir Ivanovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
President of Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***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](mailto:ivan@pniei.penza.ru)

***Ivanov Aleksandr Ivanovich***

Doctor of engineering sciences, associate  
professor, head of the laboratory  
of biometric and neural network  
technologies, Penza Research Institute  
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya  
street, Penza, Russia)

***Сериков Андрей Васильевич***

начальник отделения, АО «Рубин»  
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: [aosv68@bk.ru](mailto:aosv68@bk.ru)

***Serikov Andrey Vasil'evich***

Head of department, "Rubin" enterprise  
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

***Серикова Юлия Игоревна***

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

E-mail: [julia-ska@yandex.ru](mailto:julia-ska@yandex.ru)

***Serikova Julia Igorevna***

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

---

УДК 519.24; 53; 57.017

**Волчихин, В. И.**

**Тестирование аналогового и квантового оракулов линейной вычислительной сложности, предсказывающих значения коэффициента корреляции на малой выборке в 32 опыта / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. В. Сериков, Ю. И. Серикова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 70–80. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-6**

УДК 616.89

DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-7

*А. К. Алимуратов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, С. И. Торгашин*

## СПОСОБ СЕГМЕНТАЦИИ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА ДЛЯ СИСТЕМ ОЦЕНКИ ПСИХОГЕННЫХ СОСТОЯНИЙ<sup>1</sup>

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Низкая точность распознавания речевых сигналов в условиях психических отклонений у человека является одной из главных причин практической реализации систем оценки психогенных состояний. Это связано с использованием неустойчивых к шумам и неадаптивных методов обработки сложных нестационарных сигналов. В статье предложен способ сегментации сигнал/пауза, работающих в условиях зашумленной обстановки.

*Материалы и методы.* В разработке способа сегментации речевого сигнала для систем оценки психического здоровья использовались: комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды (КМДЭМ) и метод разграничения на основе физиологического аспекта формирования речи и функционала слухового аппарата человека.

*Результаты.* Представлена структурная схема способа. Указаны преимущества разрабатываемого решения в сравнении с известными способами сегментации сигнал/пауза *STE+ZCR*, *IE* и *MFCC*.

*Выводы.* Представленный способ обеспечивает повышение коэффициента действительного обнаружения речевого сигнала до 6 %. Сравнение результатов исследований позволяет сделать вывод, что разработанный способ сегментации сигнал/пауза может быть применен для практического применения в системах оценки психогенных состояний.

**Ключевые слова:** психическое здоровье, речевые сигналы, сигнал/пауза, распознавание, метод комплементарной множественной декомпозиции.

*A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, P. P. Churakov, S. I. Torgashin*

## A METHOD OF SPEECH SIGNAL SEGMENTING FOR EVALUATION OF PSYCHOGENIC STATES

### **Abstract.**

*Background.* The low accuracy of recognition of speech commands is one of the main problems in practical implementation of systems for assessing psychogenic states. This is due to the use non-adaptive methods unstable to noise for processing complex speech signals. The article proposes a method of signal / pause segmentation to work in a noisy environment.

*Materials and methods.* In the development of the method we used: the method of adaptive processing of speech signals – complementary multiple decomposition into empirical modes (KMDE) and the method of differentiation based on the physiological aspect of speech formation and human hearing apparatus' functional.

*Results.* The article presents a block diagram of the method with detailed mathematical description. The advantages are shown in comparison with the known signaling / pause signaling / *STE + ZCR*, *IE* and *MFCC*.

---

<sup>1</sup> Работа подготовлена в рамках поддержки РФФИ №16-31-00194 мол\_а «Определение биомаркеров речевых и ЭЭГ сигналов и исследование их взаимосвязи для экспресс-диагностики психогенных состояний».

*Conclusions.* The developed method provides an increase in the coefficient of actual detection by an average of 6%. A comparison of the study results allows us to conclude that the developed signal / pause segmentation method is recommended for practical application in psychogenic states assessment systems.

**Key words:** processing of speech signals, signal/pause segmentation, speech recognition, voice control system, complementary multiple decomposition method.

### Введение

Сегментация сигнала на информативные участки и паузы является одной из важных задач при обработке контрольных речевых предложений в системах оценки психогенных состояний. Точное обнаружение границ речевого предложения не только повышает качество распознавания, но и уменьшает количество вычислительных и расчетных операций. Поэтому исследование и разработка способов сегментации, повышающих эффективность голосовой идентификации маркеров психогенных состояний, являются весьма актуальными задачами.

На сегодня существует много различных подходов к сегментации сигнал/пауза, которые успешно решают проблему эффективного обнаружения границ речевого сигнала. Среди наиболее известных способов сегментации можно выделить следующие:

- способы, основанные на применении значений кратковременной энергии (*Short-time Energy, STE*) [1, 2];
- способы, основанные на применении значений информационной энтропии (*Information Entropy, IE*) [3, 4];
- способы, основанные на применении мел-частотных кепстральных коэффициентов (*Mel-frequency cepstrum coefficients, MFCC*) [5, 6];
- способы, основанные на статических моделях: скрытых марковских моделях (*Hidden Markov Model, HMM*), моделях нейронных сетей (*MHC, Neural Network model, NMM*), моделях гауссовой смеси (*Gaussian mixture model, GMM*) [7, 8]; расстоянии Малаханобиса [9];
- способы, основанные на вейвлет-преобразовании (*Wavelet Transform, WT*) [10, 11].

Наиболее известными и получившими широкое практическое применение являются: способ на основе совместного использования *STE* и *ZCR* [1] и способ с использованием статистических свойств фонового шума и одномерного расстояния Махаланобиса [9].

Проведенные авторские исследования [12] упомянутых выше способов сегментации выявили низкую эффективность в условиях зашумленной обстановки. При отношении сигнал/шум (*Signal-to-Noise Ratio, SNR*) 10 дБ коэффициент действительного обнаружения (*Detection rate, DR*) у способа на основе *STE + ZCR* равен всего лишь 72,1 %, а у способа на основе одномерного расстояния Махаланобиса – 81,4 %.

Эффективность сегментации речевого сигнала зависит от корректной его обработки, которая определяется точностью измерения амплитудных, временных, частотных и энергетических параметров. Перспективным является применение адаптивных технологий обработки сигналов. В данной

статье авторами предлагается способ сегментации сигнал/пауза с использованием:

– метода адаптивного анализа на основе методов комплементарной множественной декомпозиции на эмпирические моды (КМДЭМ) [13];

– правила разграничения на основе физиологического аспекта формирования речи и функционала слухового аппарата человека [14].

Статья является продолжением ранее опубликованных работ авторов [15–19].

### 1. Описание разработанного способа сегментации сигнал/пауза

На основе обзора известных способов сегментации, использующих методы адаптивного анализа, авторами разработан способ, блок-схема которого представлена на рис. 1. Суть способа заключается в сегментации речевого сигнала на кратковременные фрагменты для адаптивного анализа методом КМДЭМ с последующим формированием адаптивного порога на основе физиологического аспекта формирования речи, функционала слухового аппарата человека и оценки энергии эмпирических мод (ЭМ). Рассмотрим подробнее основные этапы работы предложенного способа.

В представленном способе ввод речевого сигнала  $x(n)$  ( $n$  – дискретный отсчет времени,  $0 < n \leq N$ ;  $N$  – количество дискретных отсчетов в сигнале) выполняется со следующими параметрами: длительность записи – не более 5000 мс, частота дискретизации 8000 Гц, разрядность квантования 16 бит.

Сегментация речевого сигнала на фрагменты осуществляется по следующим формулам:

$$S = \frac{x(n)}{L}, \quad (1)$$

где  $x(n)$  – речевой сигнал;  $S$  – количество фрагментов в речевом сигнале;  $L$  – количество дискретных отсчетов в одном фрагменте;

$$x_{s+1}(n) = x_i((s \cdot L) + 1; (s + 1) \cdot L), \quad (2)$$

где  $x_{s+1}(n)$  – фрагмент речевого сигнала;  $n$  – дискретный отсчет времени,  $s = (0, 1, 2, \dots, S - 1)$  – номер фрагмента.

После завершения сегментации речевой сигнал представляет собой набор фрагментов, где  $s$  – номер фрагмента,  $S$  – общее количество фрагментов. Далее устанавливается номер фрагмента, так как дальнейшая работа способа осуществляется с каждым фрагментом в отдельности.

Важным условием сегментации сигналов является возможность формирования адаптивного базиса, функционально зависящего от содержания самого сигнала. Данный подход реализуется посредством КМДЭМ, который представляет собой адаптивную технологию разложения сигнала на ЭМ. Особенностью КМДЭМ является то, что базисные функции, используемые для разложения, извлекаются из самого речевого сигнала. При разложении с помощью КМДЭМ сигнал не задается заранее, ЭМ вычисляются в процессе отсеивания с учетом локальных особенностей (таких как экстремумы и нули сигнала) и внутренней структуры исследуемого речевого сигнала.

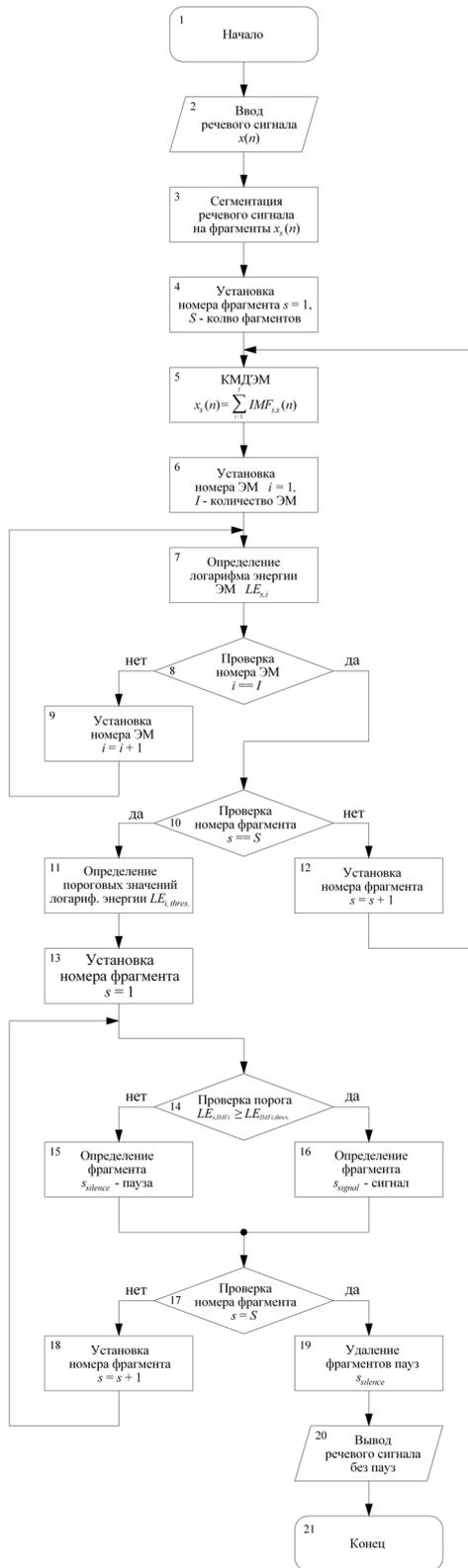


Рис. 1. Блок-схема способа сегментации

В результате КМДЭМ из каждого фрагмента речевого сигнала  $x_s(n)$  извлекается конечное число ЭМ:

$$x_s(n) = \sum_{i=1}^{I-1} IMF_{s,i}(n), \quad (3)$$

где  $IMF_{s,i}(n)$  – полученные ЭМ;  $i = 1, 2, \dots, I$  – номер ЭМ.

В отличие от других методов декомпозиции, особенностью КМДЭМ является добавление к сигналу белого шума с прямыми и инверсными значениями [13]:

$$\begin{bmatrix} y_{s,j}(n) \\ y_{s,j}(n)^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_s(n) \\ w_j(n) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $w_j(n)$  – добавленный белый шум;  $y_j(n)$  – сумма зашумленного фрагмента речевого сигнала  $x_s(n)$  с белым шумом;  $y_j(n)^*$  – сумма зашумленного фрагмента речевого сигнала  $x_s(n)$  с инверсным значением амплитуды белого шума;

$$IMF_{s,i}(n) = \frac{\sum_{j=1}^J IMF_{s,ji}(n)}{J}, \quad (5)$$

где  $IMF_{s,ji}(n)$  – ЭМ, полученные при вариантах декомпозиции сигналов  $y_{s,j}(n)$  и  $y_{s,j}(n)^*$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  – количество циклов декомпозиций.

После получения ЭМ устанавливается номер моды фрагмента, так как дальнейшая работа способа осуществляется с каждой ЭМ в отдельности.

Изменение амплитуды сигнала во времени называется амплитудным распределением. Амплитуда невокализованных участков сигнала или участков пауз меньше амплитуды вокализованных участков. Изменение амплитуды сигнала описывается посредством функции кратковременной энергии. Вычисление энергии ЭМ фрагмента осуществляется по формуле

$$E_{s,i} = \sum_{n=1}^N [IMF_{s,i}(n)]^2, \quad (6)$$

где  $E_{s,i}$  – энергия ЭМ фрагмента речевого сигнала.

Человеческий слуховой аппарат фиксирует речь нелинейно, различия между энергиями участков полезного сигнала и паузы должны быть более чем в два раза, чтобы человек фиксировал изменение амплитуды. Для увеличения амплитуды необходимо увеличить энергию в 8 раз [20]. Для сжатия амплитуды сигнала при большом динамическом диапазоне [20] применяют логарифмирование энергии фрагментов, максимально приближая работу способа к функционалу слухового аппарата человека:

$$LE_{s,i} = \log_2 \sum_{n=1}^N [IMF_{s,i}(n)]^2, \quad (7)$$

где  $LE_{s,i}$  – логарифм энергии ЭМ фрагмента речевого сигнала.

После завершения анализа первой ЭМ осуществляется сравнение номера ЭМ с их конечным числом ЭМ ( $i == I$ ) (блок 8). При невыполнении данного условия устанавливается следующий по счету номер ЭМ ( $i = i + 1$ ) (блок 9) и выполняется переход к блоку 7 для анализа следующей ЭМ. Если условие выполняется, то осуществляется переход к следующему блоку 10.

После завершения анализа ЭМ проводится сравнение номера фрагмента речевого сигнала с их конечным числом ( $s == S$ ) (блок 10). При невыполнении условий устанавливается следующий по счету номер фрагмента ( $s = s + 1$ ) (блок 12) и выполняется переход к блоку 5 для анализа последующего фрагмента. Если условие выполняется, то осуществляется переход к следующему блоку 11.

В соответствии с физиологическими особенностями формирования речевого аппарата человека перед произношением человек делает паузу – не менее 200 мс. Этот участок не содержит речи и соответствует тишине с фоновым шумом, т.е. значения логарифмов энергии ЭМ фрагментов первых 200 мс (10 фрагментов по 160 отсчетов при частоте дискретизации 8000 Гц) будут соответствовать значениям паузы. Используя усредненные значения логарифмов энергии ЭМ, можно сформировать пороговые значения логарифмов энергии для обнаружения границы полезного сигнала и паузы. Определение пороговых значений логарифмов энергии ЭМ осуществляется по формуле

$$LE_{i,thres.} = \frac{1}{10} \sum_{s=0}^9 LE_{IMFs,i}, \quad (8)$$

где  $i = 1, 2, \dots, I$  – количество ЭМ;  $s = 0, 1, \dots, 9$  – первые 10 фрагментов, соответствующие тишине.

На рис. 2 представлена графическая интерпретация определения пороговых значений логарифмов энергии для восьми ЭМ первых десяти фрагментов.

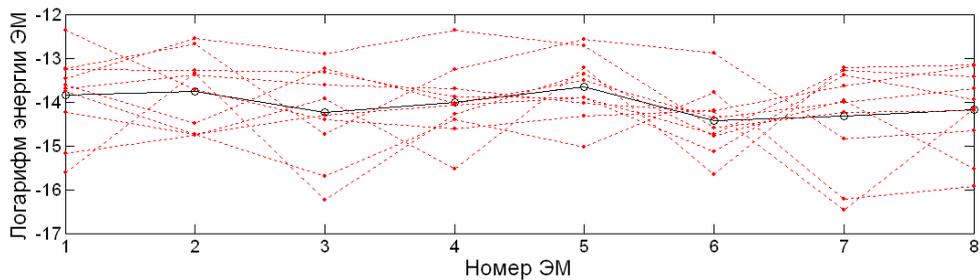


Рис. 2. Графическая интерпретация примера определения пороговых значений логарифмов энергии (точками отмечены значения логарифмов энергии восьми ЭМ для первых десяти фрагментов, кругами отмечены пороговые значения логарифмов энергии восьми ЭМ)

После определения пороговых значений логарифмов энергии для выполнения пороговой обработки всех фрагментов сигнала значение номера фрагмента устанавливается равным единице,  $s = 1$ .

Далее выполняется сравнение значений логарифмов энергии ЭМ остальных фрагментов с пороговыми значениями  $LE_{s,IMFi} \geq LE_{IMFi,thres}$ . В случае если условие выполняется, то фрагмент считается полезным сигналом  $s = s_{signal}$ , а если условие не выполняется, то фрагмент считается паузой  $s = s_{silence}$ .

На рис. 3 представлена графическая интерпретация проверки условия  $LE_{s,IMFi} \geq LE_{IMFi,thres}$ . Для полезного фрагмента сигнала необходимо выполнение условия: число значений логарифмов энергии должно быть больше или равно половине общего числа значений.

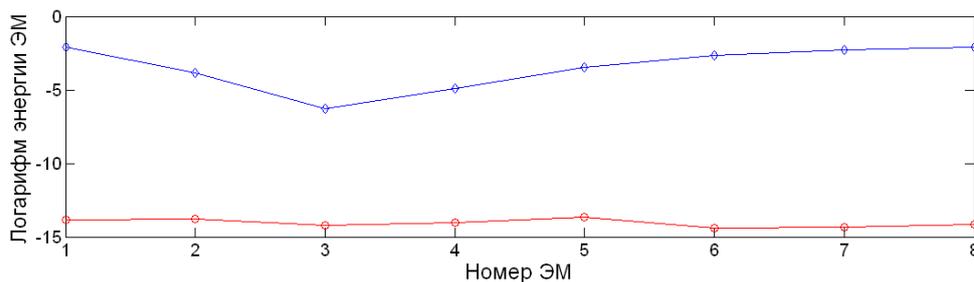


Рис. 3. Графическая интерпретация примера проверки условия  $LE_{s,IMFi} \geq LE_{IMFi,thres}$  (кругами отмечены пороговые значения логарифмов энергии восьми ЭМ, ромбами отмечены значения логарифмов энергии восьми ЭМ фрагмента полезного сигнала)

На рис. 3 все значения логарифмов энергии восьми ЭМ превышают пороговые значения логарифмов энергии, следовательно, фрагмент является полезным сигналом.

После пороговой обработки осуществляется проверка номера фрагмента с их конечным числом ( $s == S$ ) (блок 17). В случае если условие не выполняется, то устанавливается следующий по счету номер фрагмента ( $s = s + 1$ ) (блок 18) и осуществляется переход к блоку 14 для анализа следующего фрагмента. Если условие выполняется, то осуществляется переход к следующему блоку 19.

После пороговой обработки и определения статуса всех фрагментов фрагменты пауз  $s_{silence}$  в дальнейшем не используются. В итоге на выходе сегментации формируется речевой сигнал без пауз.

## 2. Исследование разработанного способа сегментации сигнал/пауза

В качестве критерия эффективности разработанного способа применялся коэффициент действительных обнаружений (*Detection rate, DR*) [13], представляющий собой безразмерную величину, равную отношению правильно обнаруженных фрагментов сигнала к общему числу фрагментов:

$$DR_{speech} = \frac{S_{cor.speech}}{S_{cor.speech} + S_{n.cor.speech}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $S_{cor.speech}$  – действительный фрагмент исследуемого речевого сигнала,  $S_{n.cor.speech}$  – мнимый фрагмент исследуемого речевого сигнала.

Для исследования разработанного способа была сформирована выборка из 50 сигналов, представляющая собой односложные и многосложные словосочетания. Далее к каждому сигналу добавлялся белый шум. Изменяя уровень шума, получили сигналы со значениями отношения сигнал/шум (10–35) дБ.

Результаты исследования разработанного способа сравнивались с известными способами сегментации (табл. 1):

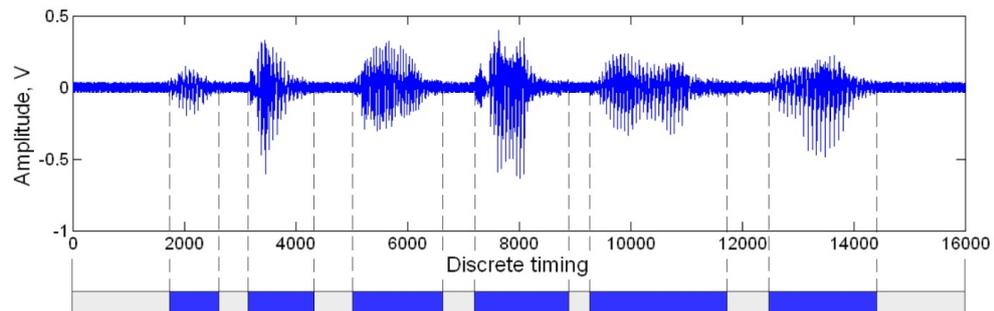
- способы на основе  $STE$  и  $ZCR$ ;
- способы на основе  $IE$ ;
- способы на основе  $MFCC$ .

На рис. 4 представлены осциллограммы примера, иллюстрирующего результаты работы способа сегментации.

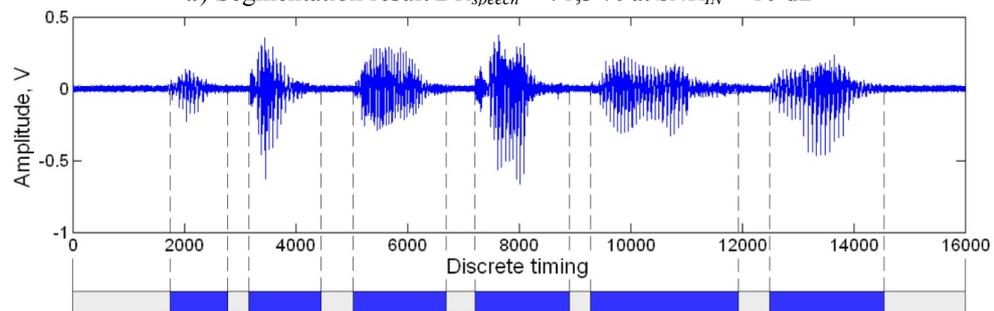
Таблица 1

Сравнительный анализ результатов

Параметр входного сигнала $SNR_{IN}$ , дБ	$DR_{speech}$ , %				
	$STE$	$STE + ZCR$	$IE$	$MFCC$	Разработанный способ
10	66,3	67,1	73,2	76,2	71,3
15	71,5	74,9	80,5	81,4	84,3
20	77,9	79,3	82,1	84,5	87,6
25	80,2	82,6	87,4	88,1	92,5
30	85,4	88,3	90,3	90,7	94,3
35	88,3	90,2	92,4	92,1	95,2



а) Segmentation result  $DR_{speech} = 71,3$  % at  $SNR_{IN} = 10$  dB



б) Segmentation result  $DR_{speech} = 84,3$  % at  $SNR_{IN} = 15$  dB

Рис. 4. Осциллограммы, иллюстрирующие результат работы узла сегментации: серый цвет – участки пауз, синий цвет – участки сигнала

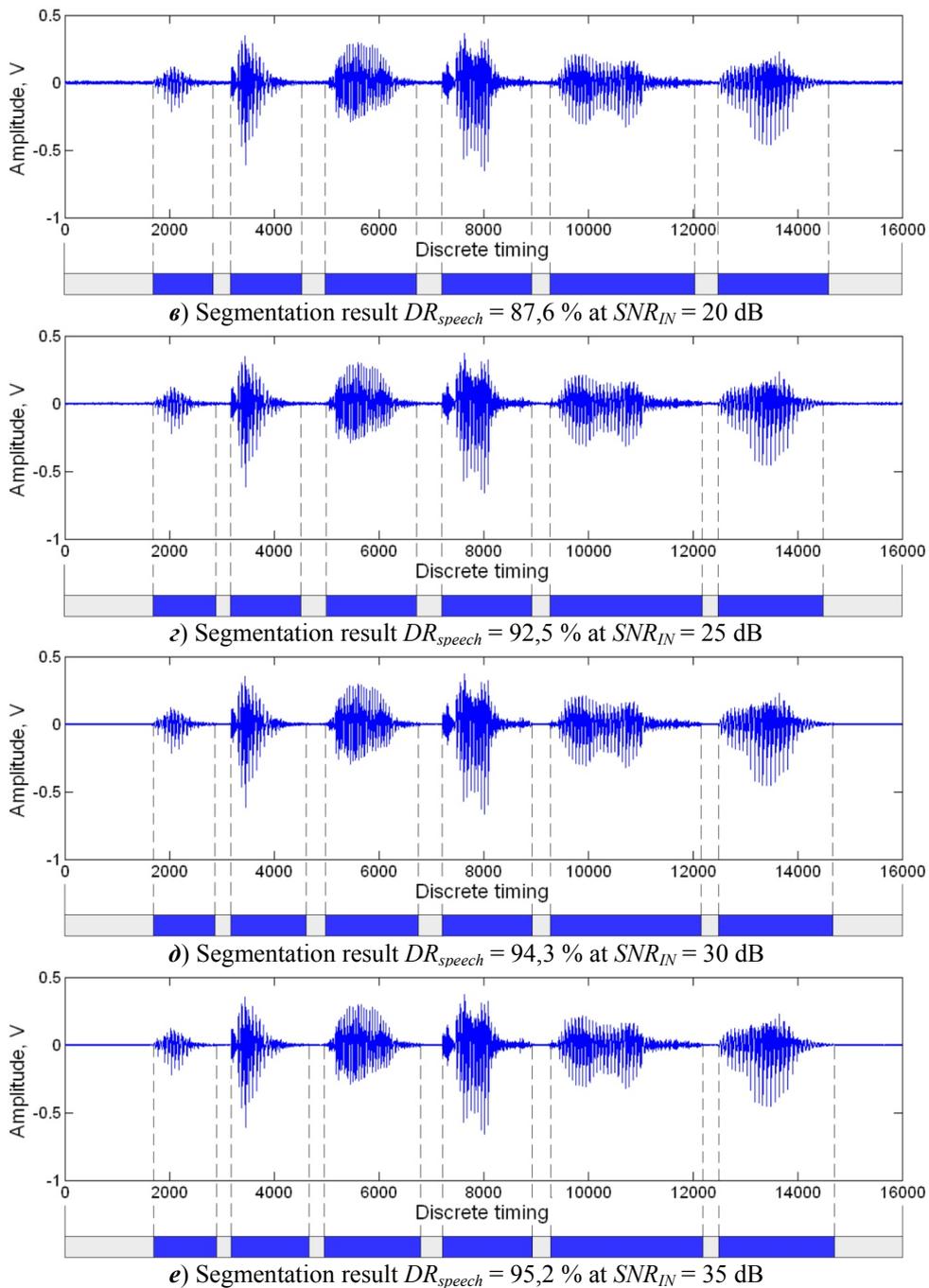


Рис. 4. Окончание

Как видно из результатов исследования, разработанный способ обеспечивает следующие результаты сегментации:

- на 9 % лучше в сравнении с методом *STE*;
- на 9 % лучше в сравнении с методом *STE+ZCR*;
- на 5 % лучше в сравнении с методом *IE*;
- на 4 % лучше в сравнении с методом *MFCC*.

Таким образом, использование разработанного способа позволит значительно повысить эффективность сегментации сигнал/пауза и точность распознавания речевых команд.

### **Заключение**

Разработан и исследован способ сегментации сигнал/пауза для систем оценки психогенных состояний. Представлены результаты работы алгоритма в сравнении с известными способами *STE + ZCR*, *IE* и *MFCC*. В соответствии с результатами представленный способ обеспечивает точность обнаружения сигнал/пауза до 6 %. Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод, что представленный способ сегментации может быть применен в системах оценки психогенных состояний.

### **Библиографический список**

1. **Bachu, R. G.** Separation of Voiced and Unvoiced Using Zero Crossing Rate and Energy of the Speech Signal / R. G. Bachu, S. Kopparthi, B. Adapa, B. D. Barkana // American Society for Engineering Education (ASEE) Zone Conference Proceedings. – Pittsburgh, USA, 2008. – P. 1–7.
2. **Moattar, M. H.** A simple but efficient real-time voice activity detection algorithm / M. H. Moattar, M. M. Homayounpour // EUSIPCO-2009 : 17-th European Signal Processing Conference, Glasgow, Scotland, August 24–28, 2009. – Glasgow, Scotland, 2009. – P. 2549–2553.
3. **Huaping, L.** Speech endpoint detection based on improved adaptive band-partitioning spectral entropy / Liu HuaPing, Li Xin // J. System Simulation. – 2008. – P. 51–59.
4. **Mattias, N.** Entropy and Speech / N. Mattias // Sound and Image Processing Laboratory School of Electrical Engineering KTH (Royal Institute of Technology). – Stockholm, 2006. – 54 p.
5. Ma Jingxia Research on Noisy Voice Activity Detection Method [D]. – Yanshan : Yanshan University, 2007.
6. **Jancovic, P.** Estimation of Voicing-Character of Speech Spectra Based on Spectral Shape / P. Jancovic, M. Kokuer // IEEE Signal Processing Letters. – 2006. – Vol. 14, iss. 1. – P. 66–69.
7. **Ahmadi, S.** Cepstrum-Based Pitch Detection Using a New Statistical V/UV Classification Algorithm / S. Ahmadi, A.S. Spanias // IEEE Transactions on Speech and Audio Processing. – 2002. – Vol. 7, iss. 3. – P. 333–338.
8. **Shah, J. K.** Robust Voiced/Unvoiced Classification Using Novel Features and Gaussian Mixture Model / J. K. Shah, A. N. Iyer, B. Y. Smolenski, R. E. Yantorno // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processin. – Philadelphia, 2004. – P. 17–21.
9. **Saha, G.** A New Silence Removal and Endpoint Detection Algorithm for Speech and Speaker Recognition Applications / G. Saha, Ch. Sandipan, S. Suman // Proceedings of the NCC 2005. – 2005. – Jan. – P. 5.
10. **Rahman, M. S.** Pitch Determination Using Autocorrelation Function in Spectral Domain / M. S. Rahman, T. Shimamura // Eleventh Annual Conference of the International Speech Communication Association. – Makuhar, 2010. – P. 653–656.
11. **Juang, C. F.** Speech detection in noisy environments by wavelet energy-based recurrent neural fuzzy network / Juang Chia Feng, Cheng Chun Nan // Expert Systems with Applications. – 2009. – Vol. 1. – P. 321–332.
12. Noise-Robust Algorithm for "Speech/Pause" Segmentation in Diagnostic Systems of Psychogenic States / A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, P. P. Churakov, Yu. S. Kvit-

- ka, A. P. Zaretskyi, G. V. Vishnevskaya // 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Nov. 29–30, 2016. – Moscow, Russia, 2016. – P. 3–6. DOI: 10.1109/EnT.2016.009.
13. **Yeh, J.-R.** Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method / J.-R. Yeh, J.-S. Shieh, and N. E. Huang // *Advances in Adaptive Data Analysis*. – 2010. – Vol. 2, № 2. – P. 135–156. DOI: 10.1142/S1793536910000422.
  14. **Sarma, V.** Studies on pattern recognition approach to voiced-unvoiced-silence classification / V. Sarma, D. Venugopal // *ICASSP '78. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 1978. – Vol. 3, Apr. – P. 1–4.
  15. Improvement of the Efficiency of Voice Control Based on the Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition / A. K. Alimuradov, P. P. Churakov, A. Yu. Tychkov, I. I. Artemov, A. V. Kuzmin // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016)*, May 12–14, 2016. – Moscow, Russia, 2016. – P. 6. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491754.
  16. **Alimuradov, A. K.** Methods to Improve the Efficiency of Recognition of Speech Signals in Voice Control Systems / A. K. Alimuradov, F. Sh. Murtazov // *Measurement techniques*. – 2016. – Vol. 58, iss. 10. – P. 1107–1112. DOI 10.1007/s11018-015-0850-8.
  17. **Tychkov, A. Yu.** Program Implementation of an Algorithm for Recognition of Speech Signals in the Labview Graphics Programming Environment / A. Yu. Tychkov, A. K. Alimuradov, M. V. Frantsuzov, P. P. Churakov // *Measurement techniques*. – 2015. – Vol. 58, iss. 9. – P. 965–969. DOI 10.1007/s11018-015-0826-8.
  18. **Попов, Д. И.** Оптимизация цифровых систем обработки сигналов / Д. И. Попов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2017. – № 1 (41). – С. 96–105.
  19. **Рабинер, Л. Р.** Цифровая обработка речевых сигналов : пер. с англ. / Л. Р. Рабинер, Р. В. Шафер. – М. : Радио и связь, 1981. – 496 с.
  20. Analysis of heart rate variability with temporary ventricular pacing / A. Kuleshov, A. Zaretskyi, A. Piyin, A. Poteryakhina, A. Poteryakhin // *Iranian Hear Journal*. – 2015. – Vol. 16, № 2. – P. 41–53.

### References

1. Bachu R. G., Kopparthi S., Adapa B., Barkana B. D. *American Society for Engineering Education (ASEE) Zone Conference Proceedings*. Pittsburgh, USA, 2008, pp. 1–7.
2. Moattar M. H., Homayounpour M. M. *EUSIPCO-2009: 17-th European Signal Processing Conference, Glasgow, Scotland, August 24–28, 2009*. Glasgow, Scotland, 2009, pp. 2549–2553.
3. Huaping L., Xin Li J. *System Simulation*. 2008, pp. 51–59.
4. Mattias N. *Sound and Image Processing Laboratory School of Electrical Engineering KTH (Royal Institute of Technology)*. Stockholm, 2006, 54 p.
5. *Ma Jingxia Research on Noisy Voice Activity Detection Method [D]*. Yanshan: Yanshan University, 2007.
6. Jancovic P., Kokuer M. *IEEE Signal Processing Letters*. 2006, vol. 14, iss. 1, pp. 66–69.
7. Ahmadi S., Spanias A. S. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*. 2002, vol. 7, iss. 3, pp. 333–338.
8. Shah J. K., Shah J. K., Iyer A. N., Smolenski B. Y., Yantorno R. E. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processin*. Philadelphia, 2004, pp. 17–21.
9. Saha G. A., Sandipan Ch., Suman S. *Proceedings of the NCC 2005*. 2005, Jan., p. 5.
10. Rahman M. S., Shimamura T. *Eleventh Annual Conference of the International Speech Communication Association*. Makuhar, 2010, pp. 653–656.
11. Juang C. F., Cheng Chun Nan *Expert Systems with Applications*. 2009, vol. 1, pp. 321–332.

12. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Churakov P. P., Kvitka Yu. S., Zaretskiy A. P., Vishnevskaya G. V. *2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Nov. 29–30, 2016*. Moscow, Russia, 2016, pp. 3–6. DOI: 10.1109/EnT.2016.009.
13. Yeh J.-R., Shieh J.-S., Huang N. E. *Advances in Adaptive Data Analysis*. 2010, vol. 2, no. 2, pp. 135–156. DOI: 10.1142/S1793536910000422.
14. Sarma V., Venugopal D. *ICASSP '78. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1978, vol. 3, Apr., pp. 1–4.
15. Alimuradov A. K., Churakov P. P., Tychkov A. Yu., Artemov I. I., Kuzmin A. V. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016), May 12–14, 2016* [ ]. Moscow, Russia, 2016, p. 6. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491754.
16. Alimuradov A. K., Murtazov F. Sh. *Measurement techniques*. 2016, vol. 58, iss. 10, pp. 1107–1112. DOI 10.1007/s11018-015-0850-8.
17. Tychkov A. Yu., Alimuradov A. K., Frantsuzov M. V., Churakov P. P. *Measurement techniques*. 2015, vol. 58, iss. 9, pp. 965–969. DOI 10.1007/s11018-015-0826-8.
18. Popov D. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 1 (41), pp. 96–105.
19. Rabiner L. R., Shafer R. V. *Tsifrovaya obrabotka rechevykh signalov: per. s angl.* [Digital speech signal protection: translation from English]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 496 p.
20. Kuleshov A., Zaretskiy A., Ilyin A., Poteryakhina A., Poteryakhin A. *Iranian Hear Journal*. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 41–53.

---

***Алимурадов Алан Казанферович***

кандидат технических наук,  
директор студенческого научно-  
производственного бизнес-инкубатора,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [alansapfir@yandex.ru](mailto:alansapfir@yandex.ru)

***Alimuradov Alan Kazanferovich***

Candidate of engineering sciences,  
Director of the Student Research and  
Production Business-Incubator, Penza  
State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Тычков Александр Юрьевич***

кандидат технических наук, заместитель  
директора, Научно-исследовательский  
институт фундаментальных  
и прикладных исследований, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [tychkov-a@mail.ru](mailto:tychkov-a@mail.ru)

***Tychkov Aleksandr Yur'evich***

Candidate of engineering sciences,  
deputy director, Research Institute  
of Fundamental and Applied Research,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

***Чураков Петр Павлович***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительной  
техники и метрологии, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [ivan@pniei.penza.ru](mailto:ivan@pniei.penza.ru)

***Churakov Petr Pavlovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of information measuring  
technology and metrology, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

**Торгашин Сергей Иванович**

кандидат технических наук, заведующий  
кафедрой ракетно-космического  
и авиационного приборостроения,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: rkap@pnzgu.ru

**Torgashin Sergey Ivanovich**

Candidate of engineering sciences,  
head of sub-department of rocket-space  
and aircraft instrument engineering,  
Penza State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

УДК 616.89

**Алимурадов, А. К.**

**Способ сегментации речевого сигнала для систем оценки психогенных состояний** / А. К. Алимурадов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, С. И. Тор-  
гашин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Техниче-  
ские науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 81–93. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-7

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 621.317.733

DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-8

*В. П. Арбузов, М. А. Мишина*

## КОРРЕКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Эксплуатация датчиков в широком температурном диапазоне требует осуществления дополнительной коррекции температурной погрешности. Целью работы является разработка измерительной цепи высокотемпературного емкостного датчика давления, позволяющей исключить температурную погрешность и обеспечить инвариантность выходного сигнала к параметрам кабеля.

*Материалы и методы.* При разработке измерительных цепей использовались основы схемотехнического проектирования измерительных устройств.

*Результаты и выводы.* Рассмотрены способы коррекции температурной погрешности датчика с использованием термозависимой емкости. Разработана микропроцессорная измерительная цепь высокотемпературного емкостного датчика давления и предложен алгоритм вычисления выходного сигнала измерительной цепи.

**Ключевые слова:** емкостный датчик, температурная погрешность, термозависимая емкость, коррекция погрешности.

*V. P. Arbuzov, M. A. Mishina*

## CORRECTION OF CAPACITIVE PRESSURE SENSOR'S TEMPERATURE ERROR

### **Abstract.**

*Background.* Operation of sensors in a wide temperature range requires additional temperature error correction. The aim of this work is to develop a measuring circuit for high-temperature capacitive pressure sensors allowing to eliminate the temperature error and to ensure the invariance of the output signal to cable parameters.

*Materials and methods.* When developing the measuring circuit the authors used fundamentals of measuring device's circuit design.

*Results and conclusions.* The article considers methods of sensors' temperature error correction using the temperature-dependent capacity. The author's have developed a microprocessor-based measuring circuit for high-temperature capacitive pressure sensors and suggested a calculation algorithm for the measuring circuit's output signal.

**Key words:** capacitive sensor, temperature error, temperature-dependent capacity, error correction.

### Введение

Изменение температуры приводит к изменению не только геометрических размеров изделия, но и к изменению свойств или характеристик материалов, из которых выполнен датчик. Это относится ко всем датчикам, в том числе и к емкостным, хотя они имеют самый широкий температурный диапазон среди параметрических датчиков. В то же самое время для обеспечения работоспособности измерительной цепи ее необходимо разместить в условиях, «комфортных» для работы электроники, соединив кабелем с параметрическим преобразователем датчика. Поэтому наряду с коррекцией температурной погрешности возникает необходимость коррекции погрешности, вызванной паразитными емкостями кабеля.

### 1. Особенности функционирования параметрических преобразователей емкостных датчиков

Измеряемая величина, например давление  $P_x$  (рис. 1,а), воздействуя на упругий элемент емкостного датчика, изменяет значение расстояния  $d_x$  между пластинами рабочего конденсатора (чувствительного элемента датчика)  $C_x$ . В то же время изменение температуры датчика также приводит к изменению значения рабочей емкости и, следовательно, к погрешности датчика. В таком случае температура датчика является «влияющей» величиной, а возникающая от ее действия температурная погрешность в зависимости от условий эксплуатации датчика может быть как основной, так и дополнительной.

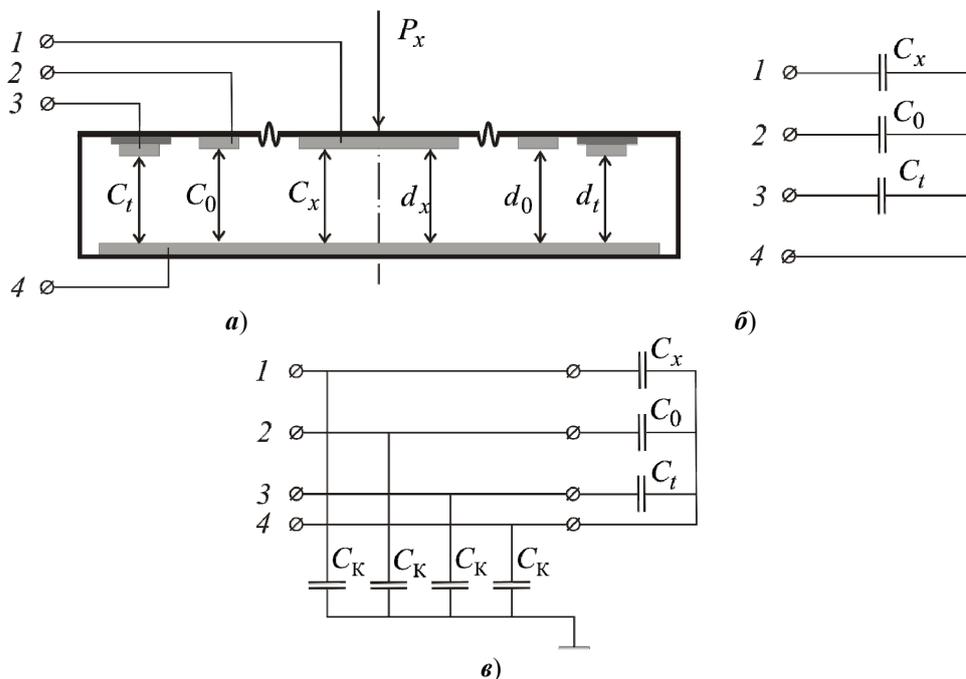


Рис. 1. Конструкция (а) и схемы замещения параметрического преобразователя датчика: без кабеля (б) и с кабелем (в)

Исследование влияния соотношений площади электрода рабочего конденсатора и значения зазора между электродами, толщины «жесткого центра» и модуля упругости упругого элемента (мембраны) на температурную погрешность позволило создать конструкции емкостных датчиков, обладающих максимальной чувствительностью к измеряемому давлению и минимальной к температуре. Специально подобранные материалы для изготовления датчика позволили обеспечить равенство приращения емкости рабочего конденсатора, вызванное изменением геометрических размеров пластин рабочего конденсатора и модуля упругости материала мембраны, при изменении температуры датчика. В результате этого емкостные датчики давления имеют самый широкий температурный диапазон эксплуатации среди параметрических датчиков ( $\pm 200^\circ\text{C}$ ) [1]. При более высокой температуре указанные выше приращения емкостей начинают отличаться друг от друга и температурная погрешность резко возрастает. Для коррекции этой погрешности предложено ввести в конструкцию датчика термозависимую емкость  $C_t$  [2] (рис. 1,а) и, используя ее зависимость от температуры, ввести поправку в выходной сигнал датчика.

Следует отметить, что измеряемая датчиком величина преобразуется в приращение емкости рабочего конденсатора относительно его начального значения. Следовательно измерительная цепь (ИЦ) датчика должна реализовывать дифференциальный метод измерения  $C_x$ , причем для его реализации нужна образцовая емкость  $C_0$ , значение которой равно начальному значению рабочей емкости параметрического преобразователя (ПП) датчика  $C_x$ . С этой целью в ПП датчика располагают дополнительный конденсатор, емкость которого зависит от влияющих факторов так же, как емкость рабочего конденсатора, и не зависит от измеряемой датчиком величины. Кроме того, межэлектродное пространство этих конденсаторов должно быть заполнено одной и той же средой (рис. 1,а). Наиболее оптимальная схема соединения конденсаторов ПП датчика приведена на рис. 1,б [3].

В процессе производства датчиков практически невозможно обеспечить идентичность образцовых емкостей датчиков для всей партии изделий, но соотношение между рабочей и образцовой емкостями при отсутствии измеряемой величины остается постоянным. Поэтому для конкретного экземпляра датчика (с точки зрения измерительного преобразования) эта емкость является образцовой или опорной, а измерительная цепь осуществляет относительное преобразование рабочей емкости в активную величину, пропорциональную отношению либо сопротивлений, либо проводимостей рабочего и опорного конденсаторов ПП датчика ( $C_0 / C_x$  или  $C_x / C_0$ ), а затем реализует дифференциальный метод измерений, используя полученные активные величины. Кроме того, преобразование отношения емкостей ПП датчика осуществляет логометрическую коррекцию погрешности, обеспечивая инвариантность к диэлектрической проницаемости межэлектродного пространства и процедуру коррекции температурной погрешности ПП датчика в диапазоне от минус 200 до плюс 200  $^\circ\text{C}$  [1], а наличие термозависимой емкости  $C_t$  позволяет расширить температурный диапазон работы датчика.

На рис. 1, в приведена схема ПП датчика с учетом схемы замещения кабеля, где  $C_K$  – емкости кабеля, значения которых, как правило, в несколько раз больше значения рабочей и опорной емкостей ПП датчика.

## 2. Способы коррекции температурной погрешности

Первым, наиболее простым вариантом уменьшения температурной погрешности является мультипликативная коррекция рассматриваемой погрешности, которая достигается изменением наклона функции преобразования информативного параметра ПП датчика в зависимости от изменения термозависимой емкости  $C_t$  при изменении температуры датчика [2]. Мультипликативная коррекция осуществляется за счет последовательного включения преобразователя отношения рабочей и опорной емкостей ПП датчика в напряжение и преобразователя термозависимой емкости в напряжение. Измерительная цепь с мультипликативной коррекцией температурной погрешности емкостного датчика приведена на рис. 2, где  $Y_1$  и  $Y_2$  – операционные усилители;  $C_K$  – емкости кабеля. Поскольку температурная погрешность емкостных датчиков давления становится существенной при температуре выше  $+200\text{ }^\circ\text{C}$ , то и изменение значение термозависимой емкости  $C_t$  должно начинаться при этой же температуре [2]. Недостатком приведенной измерительной цепи является наличие двух погрешностей статизма, обусловленных конечным значением коэффициента усиления усилителей ( $K_Y \neq \infty$ ) и емкостью кабеля, шунтирующей входное сопротивление усилителя.

Выходное напряжение ИЦ описывается выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \frac{C_0}{C_x} \left( 1 - \frac{1}{1 + K_Y \beta_1} \right) \cdot \frac{C_t}{C} \left( 1 - \frac{1}{1 + K_Y \beta_2} \right),$$

где  $K_Y$  – коэффициент усиления операционного усилителя;  $\beta_1, \beta_2$  – коэффициенты отрицательной обратной связи операционных усилителей  $Y_1$  и  $Y_2$  соответственно, причем:

$$\beta_1 = \frac{C_x}{C_x + C_0 + C_K} \text{ и } \beta_2 = \frac{C_x}{C_t + C + C_K}.$$

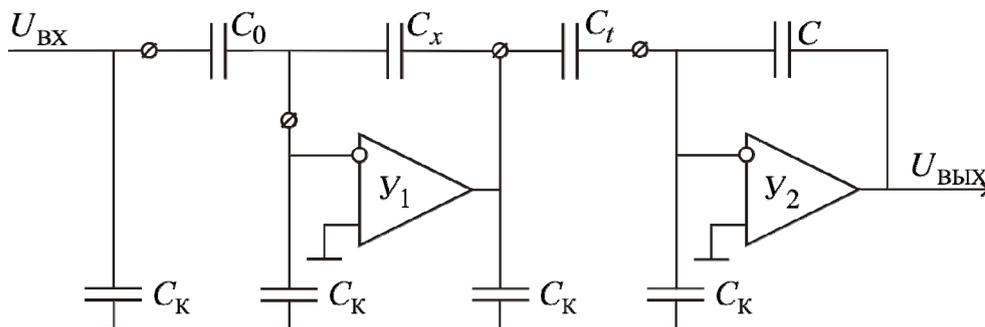


Рис. 2. ИЦ с мультипликативной коррекцией температурной погрешности емкостного датчика

Зависимость значений коэффициентов отрицательной обратной связи  $\beta_1$  и  $\beta_2$  от емкостей  $C_x$ ,  $C_K$  и  $C_t$ , значения которых изменяются как при изменении измеряемой величины, так и при изменении температуры, не позволяет скорректировать погрешности известными методами, а незначительное изменение их значений, например от температуры или вибрации, существенно влияет на изменение их значений, а следовательно, и погрешности преобразования. В результате этого существенного снижения температурной погрешности не достигается.

Другой вариант уменьшения рассматриваемой погрешности емкостного датчика заключается в применении аддитивно-логометрической коррекции, сущность которой состоит в аддитивной коррекции температурного изменения и рабочей и опорной емкостей с последующим делением полученных результатов аддитивной коррекции. На рис. 3,а изображена одна из таких реализаций коррекции температурной погрешности, для обеспечения которой необходимо знать зависимость емкости и рабочего  $C_x$ , и опорного  $C_0$ , и термозависимого  $C_t$  конденсаторов от температуры датчика [3]. Выходной сигнал рассматриваемой измерительной цепи описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{C_0 - C_t \frac{R}{R_{t_1}}}{C_x - C_t \frac{R}{R_{t_2}}},$$

в соответствии с которым с изменением значений резисторов  $R_{t_1}$  и  $R_{t_2}$  осуществляется настройка аддитивной коррекции погрешности.

В приведенной схеме ИЦ входные сопротивления всех усилителей шунтированы емкостями кабеля  $C_K$ , а коэффициенты отрицательной обратной связи всех усилителей являются комплексными величинами и, следовательно, каждая из трех погрешностей статизма становится комплексной величиной, имеющей не только амплитуду, но и фазу. Наличие фазового сдвига, зависящего от изменения значений емкостей  $C_x$ ,  $C_0$ ,  $C_t$  и  $C_K$ , в цепи, содержащей последовательно соединенные дифференциатор, выполненный на усилителе  $U_1$ , и интегратор (усилитель  $U_2$ ) обуславливает необходимость обеспечения устойчивости ИЦ.

На рис.3,б приведен еще один вариант реализации аддитивно-логометрической коррекции температурной погрешности, обеспечивающий ту же функцию преобразования, что и предыдущая измерительная цепь, но обладающий более высокой точностью реализации процедуры коррекции погрешности [3]. Значение погрешности сумматора, выполненного на операционном усилителе  $U_1$ , определяется только параметрами усилителя и резисторами  $R$ ,  $R_{t_1}$  и  $R_{t_2}$ , которые после настройки ИЦ остаются неизменными и, следовательно, погрешность суммирования можно скорректировать. Коэффициент отрицательной обратной связи операционного усилителя  $U_2$ , равный

$$\beta = \frac{C_x}{C_x + C_0 + C_t + C_K},$$

является величиной скалярной, а следовательно, обратная связь не вносит фазовый сдвиг в выходное напряжение измерительной цепи  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

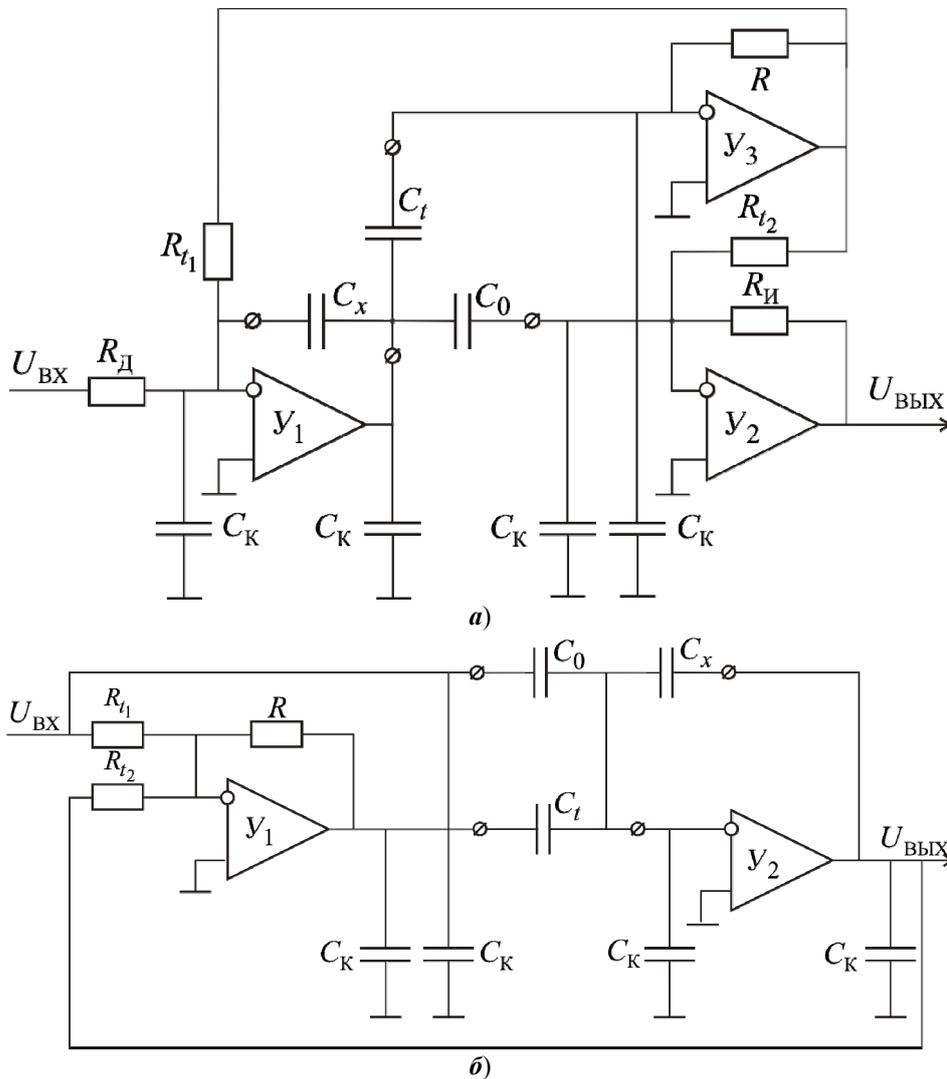


Рис. 3. Измерительные цепи с аддитивно-логометрической коррекцией температурной погрешности

Как в случае с мультипликативной, так и в случае с аддитивно-логометрической коррекцией температурной погрешности, возникающей в параметрическом преобразователе емкостного датчика, необходимо иметь модели рабочей  $C_x$  и опорной  $C_0$  емкостей в виде линейной зависимости от температуры:

$$C_x(t^o) = C_x(1 + \alpha_x \cdot t^o) \text{ и } C_0(t^o) = C_0(1 + \alpha_0 \cdot t^o),$$

где  $\alpha_x$  и  $\alpha_0$  – температурные коэффициенты изменения рабочей  $C_x$  и опорной  $C_0$  емкости, которые до температуры  $+200^\circ\text{C}$  практически совпадают.

Модель термозависимой емкости  $C_t$  для ИЦ с мультипликативной коррекцией должна отражать изменение  $C_t$  при температуре выше  $+200\text{ }^\circ\text{C}$ :

$$C_t(t^o) = C_t \left( 1 + (200 - t^o) \cdot \alpha_t \right),$$

а для реализации аддитивно-логометрической коррекции модель термозависимой емкости  $C_t$  должна иметь вид

$$C_t(t^o) = C_t \left( 1 + \alpha_t \cdot t^o \right),$$

где  $\alpha_t$  – температурный коэффициент изменения термозависимой  $C_t$  емкости.

Поскольку зависимости емкостей датчика  $C_x$ ,  $C_0$  и  $C_t$  от температуры далеки от линейных, то результаты рассмотренной выше коррекции погрешности определяются степенью адекватности моделей  $C_x(t^o)$ ,  $C_0(t^o)$  и  $C_t(t^o)$  объектам (емкостям  $C_x$ ,  $C_0$  и  $C_t$ ).

### **3. Коррекция температурной погрешности и обеспечение инвариантности к параметрам кабельной перемычки**

Другим фактором, влияющим на погрешность высокотемпературных емкостных датчиков, как было показано выше, является шунтирующее входное сопротивление операционного усилителя, сопротивление кабеля, который необходим не только для соединения механической и электронной частей датчика, но и для «развязки» их по температуре. Наиболее эффективным методом коррекции погрешности, вносимой емкостью кабеля, является разделение каналов преобразования емкостей датчика, причем чаще всего используется разделенное во времени преобразование  $\left( C_0 - C_t \frac{R}{R_{t_1}} \right)$  и

$\left( C_x - C_t \frac{R}{R_{t_2}} \right)$  с последующим их делением как аналоговым, так и дискретным

способом [3, 4]. В то же время независимое преобразование каждой из емкостей датчика ( $C_0$ ,  $C_x$  и  $C_t$ ) предоставит более широкие возможности для коррекции рассматриваемых составляющих погрешности датчика. На рис. 4 приведена измерительная цепь емкостного датчика, состоящая из микроконтроллера МК, сумматора  $\Sigma$  и операционного усилителя У, которая, во-первых, обеспечивает одновременное и независимое преобразование трех емкостей датчика; во-вторых, исключает влияние емкости кабеля на результат преобразования  $C_0$ ,  $C_x$ ,  $C_t$ ; в-третьих, позволяет вычислить выходной сигнал датчика по полученным значениям его емкостей в соответствии с заранее известной функцией преобразования.

Тест-сигналами для рассматриваемой ИЦ служат синусоидальные напряжения одинаковой частоты, но с разными фазовыми сдвигами, формируемые цифроаналоговыми преобразователями ЦАП1  $U_1(t)$  и ЦАП2  $U_2(t)$  микроконтроллера, а третьим тест-сигналом  $U_3(t)$  является результат суммирования двух предыдущих сигналов:

$$\begin{cases} U_1(t) = U_0 \sin \omega t, \\ U_2(t) = -U_0 \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t + \frac{\varphi}{2} \right), \\ U_3(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi). \end{cases}$$

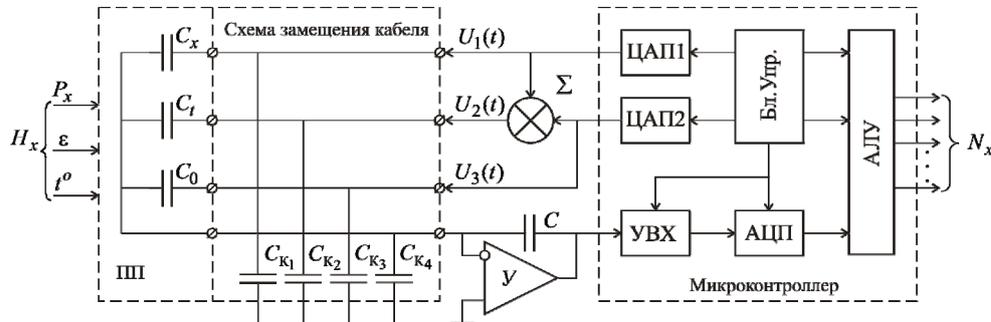


Рис. 4. Микропроцессорная измерительная цепь

В этом случае выходной сигнал усилителя У будет равен:

$$U_y(t) = - \left[ U_1(t) \frac{C_x}{C} - U_2(t) \frac{C_t}{C} + U_3(t) \frac{C_0}{C} \right] (1 + \gamma_M),$$

или

$$U_y(t) = - \frac{U_0}{C} \left( C_x \sin \omega t - C_t \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t + \frac{\varphi}{2} \right) + C_0 \sin(\omega t + \varphi) \right) (1 + \gamma_M), \quad (1)$$

где  $\gamma_M$  – погрешность, обусловленная конечным значением коэффициента усиления операционного усилителя и наличием емкости кабеля.

Для получения выходного сигнала ИЦ, пропорционального информативному параметру, необходимо из выражения (1) найти неизвестные  $C_0$ ,  $C_x$ ,  $C_t$ . С этой целью определим мгновенные значения выходного сигнала  $U_y(t)$  усилителя в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ :

$$\begin{cases} U_{y_1} = - \frac{U_0}{C} \left( C_x \sin \omega t_1 - C_t \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_1 + \frac{\varphi}{2} \right) + C_0 \sin(\omega t_1 + \varphi) \right) (1 + \gamma_M), \\ U_{y_2} = - \frac{U_0}{C} \left( C_x \sin \omega t_2 - C_t \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_2 + \frac{\varphi}{2} \right) + C_0 \sin(\omega t_2 + \varphi) \right) (1 + \gamma_M), \\ U_{y_3} = - \frac{U_0}{C} \left( C_x \sin \omega t_3 - C_t \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_3 + \frac{\varphi}{2} \right) + C_0 \sin(\omega t_3 + \varphi) \right) (1 + \gamma_M). \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку формированием тест-сигналов управляет микроконтроллер, то частота  $\omega$  и фазовый сдвиг  $\varphi$  известны. Синхронизация начала выборки мгновенных значений с одним из тест-сигналов, например  $U_1(t)$ , и последующее срабатывание устройства выборки и хранения (УВХ) и аналого-

цифрового преобразователя (АЦП) через фиксированные промежутки времени, равные  $\Delta t$ , ( $t_1 = 0$ ,  $t_2 = \Delta t$ ,  $t_3 = 2\Delta t$ ), позволяет исключить из-под знака синуса все неизвестные. В результате получим систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} U_{y_1} = a_{11}C_x + a_{12}C_t + a_{13}C_0, \\ U_{y_2} = a_{21}C_x + a_{22}C_t + a_{23}C_0, \\ U_{y_3} = a_{31}C_x + a_{32}C_t + a_{33}C_0, \end{cases} \quad (3)$$

аналитическое решение которой относительно  $C_0$ ,  $C_x$ ,  $C_t$  показало, что множитель  $-U_0(1 + \mu_M) / C$ , входящий в каждый из коэффициентов  $a_{ij}$  системы, сокращается и в конечном выражении для вычисления выходного сигнала отсутствует. Поэтому в системе (3) примем

$$a_{11} = \sin \omega t_1; \quad a_{12} = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_1 + \frac{\varphi}{2} \right); \quad a_{13} = \sin(\omega t_1 + \varphi);$$

$$a_{21} = \sin \omega t_2; \quad a_{22} = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_2 + \frac{\varphi}{2} \right); \quad a_{23} = \sin(\omega t_2 + \varphi);$$

$$a_{31} = \sin \omega t_3; \quad a_{32} = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_3 + \frac{\varphi}{2} \right); \quad a_{33} = \sin(\omega t_3 + \varphi).$$

Решим систему линейных уравнений (3) относительно  $C_0$ ,  $C_x$ ,  $C_t$  методом Крамера:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C_x \\ C_t \\ C_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_{y_1} \\ U_{y_2} \\ U_{y_3} \end{vmatrix}.$$

В результате решения получим:

$$C_x = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad C_t = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad C_0 = \frac{\Delta_3}{\Delta} \quad \text{при } \Delta \neq 0,$$

где  $\Delta$  – определитель матрицы  $A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$ ;  $\Delta_i$  – определитель матри-

цы, полученной из  $A$  путем замены  $i$ -го столбца столбцом свободных членов.

Затем определим выходной сигнал ИЦ:

$$N_x = \frac{C_x - C_t}{C_0 - C_t} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\Delta_3 - \Delta_2}.$$

Следовательно, для вычисления выходного сигнала ИЦ необходимо получить и запомнить мгновенные значения  $U_y(t)$  в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$

и  $t_3$ , рассчитать коэффициенты  $a_{ij}$ , а затем определители  $\Delta_i$ . На рис. 5–7 представлены блок-схемы алгоритма вычисления выходного сигнала ИЦ.

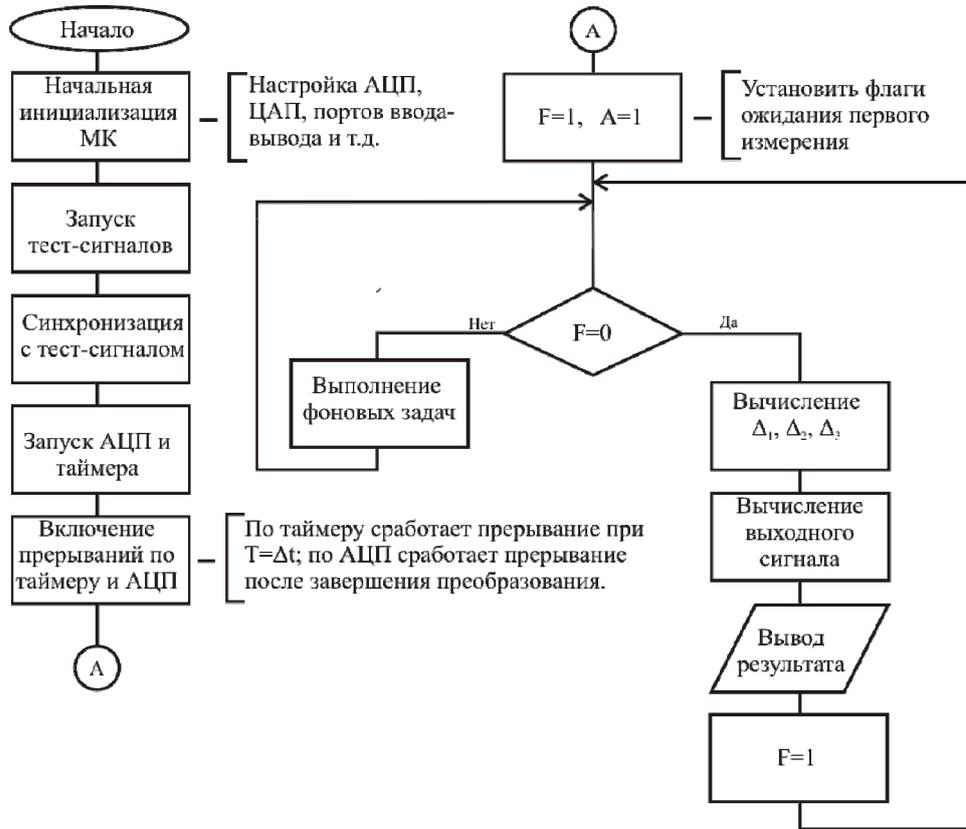


Рис. 5. Блок-схема основного алгоритма

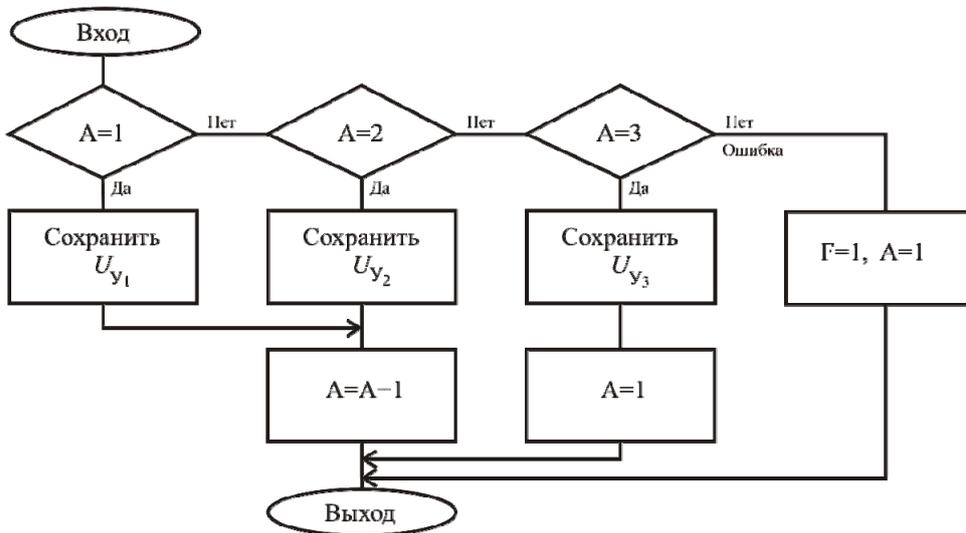


Рис. 6. Блок-схема основного алгоритма обработки прерывания от АЦП

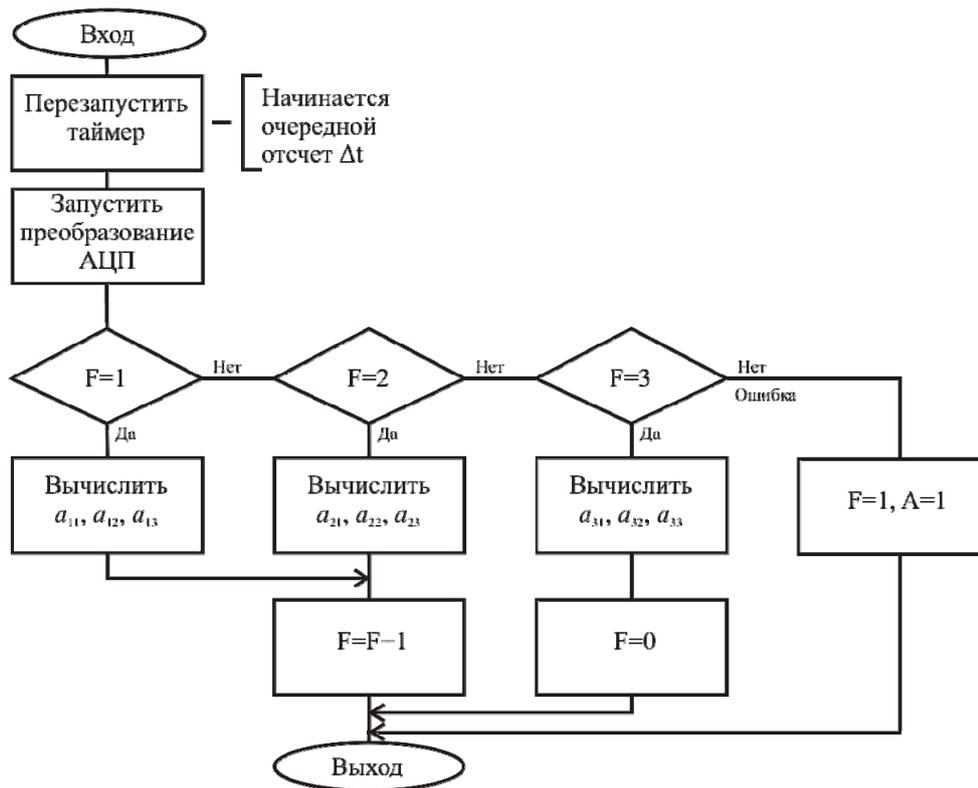


Рис. 7. Блок-схемы основного алгоритма обработки прерывания по таймеру

### Заключение

Предложенная измерительная цепь высокотемпературного датчика давления обеспечивает исключение как температурной погрешности, так и погрешности, вызванной конечным значением коэффициента усиления операционного усилителя и наличием емкости кабельной перемычки. Разработан алгоритм обработки измерительной информации и вычисления выходного сигнала ИЦ.

### Библиографический список

1. **Лебедев, Д. В.** Совершенствование датчиков на базе современных технологий / Д. В. Лебедев // Приборы и системы управления. – 1988. – № 4. – С. 17–19.
2. **Карпов, В. А.** Универсальный измерительный преобразователь для дифференциального емкостного чувствительного элемента / В. А. Карпов, В. А. Хананов // Вестник ГГТУ им. Сухова. – 2014. – № 1. – С. 91–96.
3. **Арбузов, В. П.** Измерительные цепи высокотемпературных емкостных датчиков давления / В. П. Арбузов, М. А. Мишина, П. Н. Бельнцева, И. Ю. Ананьина // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1 (11). – С. 81–88.
4. **Аверин, И. А.** Особенности формирования микроэлектромеханических элементов первичных преобразователей информации / И. А. Аверин, В. Е. Пауткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 24–32.

### References

1. Lebedev D. V. *Pribory i sistemy upravleniya* [Control devices and systems]. 1988, no. 4, pp. 17–19.
2. Карпов В. А., Кхананов В. А. *Vestnik GGTU im. Sukhogo* [Bulletin of GSTU named after Sukhoy]. 2014, no. 1, pp. 91–96.
3. Arbuzov V. P., Mishina M. A., Belyntseva P. N., Anan'ina I. Yu. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurmeent, Monitoring, Management. Control]. 2015, no. 1 (11), pp. 81–88.
4. Averin I. A., Pautkin V. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 2 (30), pp. 24–32.

---

#### **Арбузов Виктор Петрович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра автоматики и телемеханики,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная,40)

E-mail: arbuzov\_vp@mail.ru

#### **Arbuzov Viktor Petrovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of automation  
and remote control, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

#### **Мишина Марина Александровна**

кандидат технических наук, инженер,  
кафедра автоматики и телемеханики,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная,40)

E-mail: marina\_mishina81@mail.ru

#### **Mishina Marina Aleksandrovna**

Candidate of engineering sciences,  
engineer, sub-department of automation  
and remote control, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 621.317.733

**Арбузов, В. П.**

**Коррекция температурной погрешности емкостных датчиков давления / В. П. Арбузов, М. А. Мишина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 94–105. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-8**

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

УДК 531.01, 621

DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-9

*М. Г. Акоюн*

## МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС, УЧИТЫВАЮЩАЯ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ХАРАКТЕР ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Математическая модель взаимодействия пары зубчатых колес, учитывающая процесс изнашивания в зубчатой паре, вызванный трением при взаимодействии зубьев, обладает высокой точностью и пригодна для использования в целях ресурсных испытаний зубчатых колес. Представленная модель позволит значительно сократить затраты на многочисленные этапы испытаний вновь разрабатываемых элементов зубчатых зацеплений. Цель работы – описание математической модели сопряжения зубчатых колес, учитывающей эволюционный характер взаимодействия.

*Материалы и методы.* Исследование математических моделей взаимодействия зубчатых колес производилось методом научного познания. В основе описанной математической модели взаимодействия зубчатых колес, учитывающей процессы трения и изнашивания, лежит метод моделирования.

*Результаты.* Произведено описание эволюционной математической модели зубчатой пары. Предлагаемая модель обладает достаточной для использования в целях ресурсных испытаний точностью, что поможет значительно сократить временные и материальные затраты на натурные испытания разрабатываемых зубчатых колес.

*Выводы.* Приведенная математическая модель взаимодействия зубчатых колес, учитывающая эволюционную природу процессов взаимодействия, обладает высокой точностью, что позволяет рекомендовать его для внедрения в специальное программное обеспечение, используемое при испытаниях, замещающих натурные.

**Ключевые слова:** зубчатое колесо, зубчатая пара, зубчатое зацепление, изнашивание зубчатых колес, математическая модель зубчатого колеса, математическая модель зубчатой пары, двухпарное зацепление, нагрузка в зацеплении, трение в зубчатом зацеплении.

*М. Г. Акоюн*

## GEARS WEARING SIMULATION TAKING INTO ACCOUNT THE EVOLUTIONARY NATURE OF INTERACTION

### **Abstract.**

*Background.* A mathematical model of gears interaction, taking into account toothed gear wearing caused by friction during teeth interaction, has high accuracy

and is suitable for resource testing of gears. The model will significantly reduce the cost of many testing stages of newly developed elements of gearing. The purpose of the study is to describe a mathematical model of toothed mating gears, taking into account the evolutionary nature of interaction.

*Materials and methods.* The research of mathematical models of gears interaction was carried out by the method of scientific knowledge. The described mathematical model of gears interaction is based on the simulation method, taking into account friction and wearing.

*Results.* The article describes an evolutionary mathematical model of a pair of toothed gears. The proposed model has enough precision to be used to test the accuracy of resources that can help significantly reduce the time and material costs for full-scale testing of gears under development.

*Conclusions.* The given mathematical model of gears interaction, taking into account the evolutionary nature of interaction, is highly accurate and can be recommended for introduction into special software intended to be used in less resource consuming tests than full-scale tests.

**Key words:** toothed gear, a pair of toothed gears, gearing, wearing of gears, gearwheel's mathematical model, double-tooth contact, gearing friction.

### Введение

Современные механизмы и машины содержат в себе множество подвижных сопряжений, значительная часть которых представляет собой зубчатое зацепление. Этот вид механического сопряжения используется практически во всех сферах деятельности человека. Зубчатое зацепление применяется в технических средствах, используемых на земле, под землей, в воздухе, под водой, в космосе и т.д.

В современной науке вопросы долговечности элементов зубчатых сопряжений зачастую остаются без должного внимания. Также следует отметить большие временные и материальные затраты, необходимые для проведения испытаний на надежность и долговечность. В этой связи большое значение имеет применение моделирования зубчатого зацепления, которое способно значительно ускорить, упростить и удешевить ресурсные испытания.

Причиной выхода из строя элементов зубчатых зацеплений в большинстве случаев является износ, вызванный процессами трения. По этой причине моделирование зубчатого зацепления должно учитывать процессы трения поверхностей в зубчатых парах, а также вызванные ими изменения геометрических форм колеса и шестерни. Математические эволюционные модели зубчатого зацепления имеют большую практическую значимость как в вопросах теоретического исследования свойств материалов и технологий, так и в сфере практического применения и производства элементов зубчатого зацепления.

Целью данной работы является описание математической модели сопряжения зубчатых колес, учитывающей эволюционный характер взаимодействия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач: произвести описание модели, описать методику решения, описать математическое представление геометрических параметров зубчатого зацепления, описать процессы в зубчатом зацеплении.

### 1. Описание модели

Моделирование цилиндрической прямозубой передачи во многих аспектах основывается на положениях упруго-статической модели.

Принятые дополнительные допущения:

- зубья каждого колеса изнашиваются одинаково;
- условия работы передачи считаются неизменными;
- к выходному валу приложен постоянный момент сопротивления;
- шестерня вращается с постоянной угловой скоростью;
- частота вращения шестерни достаточно мала, чтобы динамическими нагрузками, обусловленными неравномерностью вращения колеса, можно было пренебречь;
- износ считается достаточно малым для игнорирования изменения упругих свойств зубьев;
- трение в зацеплении не учитывается.

В основе эволюционного подхода к моделированию лежит деление процесса изнашивания на ряд шагов. Изменение наработки  $\Delta n$  на каждом шаге выбирается настолько малым, что в его пределах условия изнашивания можно считать постоянными [1]. Отсюда следует, что приращение износа  $\Delta H_i$  можно считать постоянным и в любой  $i$ -й точке профиля с достаточной степенью точности можно выразить уравнением

$$\Delta H_i = I_i \cdot \Delta n, \quad (1)$$

где  $I_i$  – интенсивность изнашивания в  $i$ -й точке профиля.

Износ эквивалентен перемещению точки по нормали к поверхности трения (рис. 1), и при известных координатах достаточно большого ( $m$ ) числа точек, задающих профиль зуба в начале шага изнашивания  $\{x_i, y_i\}_{i=1}^{i=m}$ , их координаты в  $\{x_i^h, y_i^h\}_{i=1}^{i=m}$  конце этого шага равны:

$$\begin{aligned} x_i^h &= x_i + I_i \cdot e_{ix} \cdot \Delta n; \\ y_i^h &= y_i + I_i \cdot e_{iy} \cdot \Delta n, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $e_{ix}$ ,  $e_{iy}$  – проекции орта нормали на оси координат;  $I_i$  – интенсивность изнашивания.

Координаты точек  $\{x_i^h, y_i^h\}_{i=1}^{i=m}$  определяют новую форму профилей зубьев. Дальнейшее моделирование процесса в каждой из этих точек требует поиска новых значений ортов нормалей и аргументов функции интенсивности изнашивания, т.е. скорости, нагрузки и радиусы кривизны общей точки по профилям зубьев зубчатого зацепления. Это осуществляется при решении обратной задачи теории зацепления. Отсюда следует, что в основе всех эволюционных моделей процесса изнашивания зубчатого зацепления лежит алгоритм решения обратной задачи при точечном задании профилей.

Классическая постановка обратной задачи основывается на аналитическом задании профилей зубьев в виде функций или систем уравнений, опи-

сывающих инструмент и станочное зацепление [1]. Следовательно, первый этап решения этой задачи – это переход от координатного к аналитическому описанию профилей изнашивающихся зубьев.

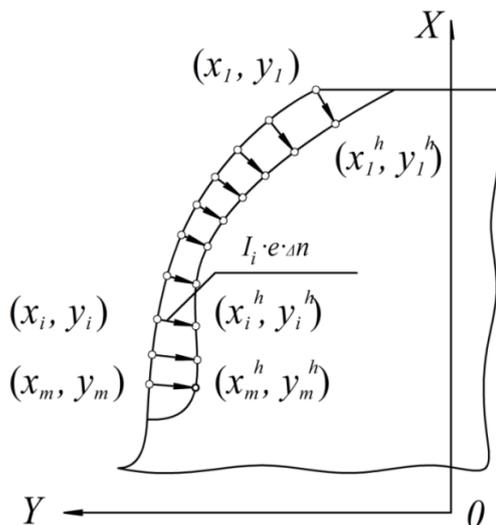


Рис. 1. Математическая модель процесса трения

Для удобства и упрощения моделирования задается шаг износа  $\Delta H$ , равный приращению износа в точке с максимальной интенсивностью изнашивания  $I_m$ .

## 2. Методика решения задачи

Решение задачи на каждом шаге изнашивания включает следующие этапы:

1. Переход от точного к аналитическому заданию профилей.
2. Решение обратной задачи в окрестности каждой точки профилей, определение ортов нормалей и геометро-кинематических показателей.
3. Определение нагрузки в контактных точках для зон однопарного зацепления и упругого пересопряжения зубьев.
4. Определение интенсивностей изнашивания  $I_i$  и шага наработки  $\Delta l$ .
5. Расчет координат точек изношенных профилей.

Профили исходного зацепления задаются наборами попарно сопряженных точек:  $i$ -я точка профиля зуба шестерни в процессе передачи движения контактирует с  $i$ -й точкой профиля зуба колеса. За шаг изнашивания каждая точка перемещается по нормали к соответствующему профилю на величину износа  $\Delta H_i$ , не превосходящую заданный шаг износа  $\Delta H$ . Контактующие между собой точки профилей после шага износа перестают иметь общую точку контакта, они становятся несопряженными (квасисопряженными) [2]. При решении обратной задачи в окрестности каждой пары квазисопряженных точек отыскивается пара сопряженных точек. Их координаты в конце шага изнашивания вновь становятся координатами квазисопряженных точек.

### 3. Используемые системы координат

При исследовании плоских зацеплений будем применять следующие системы координат: подвижные  $S_1(x_1, y_1)$ ,  $S_2(x_2, y_2)$ , жестко связанные с шестерней и колесом, и неподвижную систему координат  $S(x, y)$  (рис. 2). Оси  $o_1, x_1$  и  $o_2, x_2$  подвижных систем являются осями симметрии зубьев исходной передачи. Отсчет углов поворота шестерни ( $a_1$ ) и колеса ( $a_2$ ) производится по направлению стрелок.

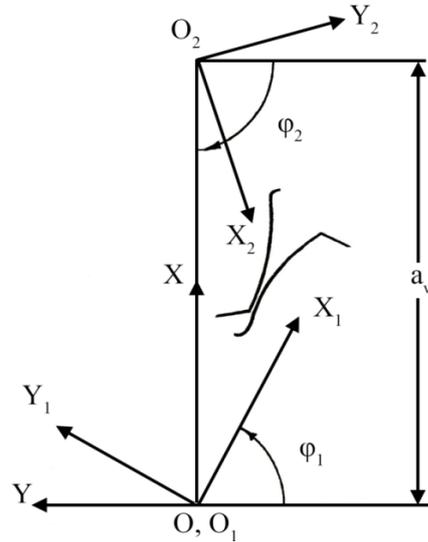


Рис. 2. Применяемые системы координат

Для упрощения переходов от одной системы координат к другой используются однородные координаты. Матрицы перехода имеют вид

$$M_{01} = \begin{vmatrix} \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ -\cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3)$$

$$M_{02} = \begin{vmatrix} -\sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 \\ -\cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (4)$$

$$M_{21} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & -\sin(\varphi_1 + \varphi_2) & a_w \sin(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_1 + \varphi_2) & \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & -a_w \cos(\varphi_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (5)$$

$$M_{12} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & \sin(\varphi_1 + \varphi_2) & a_w \sin(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_1 + \varphi_2) & \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & a_w \cos(\varphi_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Радиус-вектор точки  $\vec{r}_i$  и свободный вектор  $\vec{e}_i$  будем отождествлять с матрицами-столбцами:

$$\vec{r}_i = \begin{vmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{vmatrix}; \quad \vec{e}_i = \begin{vmatrix} e_{ix} \\ e_{iy} \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты точки в системе  $S_i$ ;  $e_{ix}, e_{iy}$  – проекции орта нормали.

Введем дополнительные подвижные системы координат  $S_{1*}$  и  $S_{2*}$  с осями, параллельными системам  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 3). Это уменьшает погрешность вычисления величин изнашивания профилей на одном шаге. Системы  $S_1$  и  $S_2$  применяются при решении обратной задачи. Матрица перехода от систем  $S_{i*}$  к  $S_i$  имеет вид

$$M_{ii*} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & x_{i0} \\ 0 & 1 & y_{i0} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

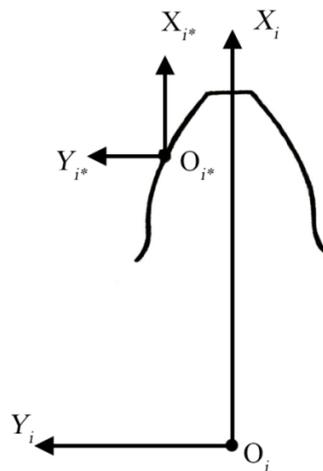


Рис. 3. Дополнительные системы координат

#### 4. Задание геометрических параметров профилей наборами точек

Обратная задача в окрестности каждой пары квазисопряженных точек может быть решена, если известны радиусы кривизны профилей и положение ортов нормалей в этих точках. Анализ различных методов аппроксимации профиля [3, 4], заданного координатами ряда точек, позволил сделать вывод, что наиболее приемлемой для этих целей является аппроксимация кубическим сплайном с непрерывной второй производной.

Кубическая сплайновая интерполяция позволяет на каждом отрезке  $(x_{i-1}, x_i)$  использовать интерполяцию полиномом третьей степени, что исключает возможность осцилляции. Непрерывность сплайна вместе с двумя

первыми производными, на всем отрезке  $x_i, x_m$  обеспечивает хорошую точность определения производных аппроксимируемой функции. Звено сплайна, расположенное на отрезке  $x_{i-1}, x_i$ , описывается уравнением

$$y = a_{i0} + a_{i1}x + a_{i2}x^2 + a_{i3}x^3.$$

Наилучшие результаты построения кубического сплайна дает глобальный способ, приводящий к необходимости решения системы  $m$  линейных уравнений с  $m$  неизвестными [5]. При этом  $(m - 2)$  уравнений являются условиями обеспечения второго порядка гладкости сплайна во внутренних узлах. Два недостающих уравнения определяются краевыми условиями, в качестве которых приняты значения первой производной в начальном и конечном узлах  $f'_1$  и  $f'_m$ .

Производные  $f'_1$  и  $f'_m$  определяются по формулам численного дифференцирования второго порядка точности:

$$f'_1 = d_2 - \frac{\Delta_2}{\Delta_2 + \Delta_3}(d_3 - d_2); \quad (9)$$

$$f'_m = d_m - \frac{\Delta_m}{\Delta_m + \Delta_{m-1}}(d_{m-1} - d_m), \quad (10)$$

где  $\Delta_i = x_i - x_{i-1}$ ,  $d_i = (y_i - y_{i-1}) / \Delta_i$ .

Система линейных уравнений построена относительно вторых производных  $f''_i$  в узлах  $x_i$ . Трехдиагональная матрица коэффициентов этой системы представлена в виде

$$\begin{vmatrix} 2\Delta_2 & \Delta_2 & & & 0 \\ \Delta_2 & 2(\Delta_2 + \Delta_3) & \Delta_3 & & \\ \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & \Delta_{m-1} & 2(\Delta_{m-1} + \Delta_m) & \Delta_m & \\ & 0 & \Delta_m & 2\Delta_m & \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} f''_1 \\ f''_2 \\ \vdots \\ f''_{m-1} \\ f''_m \end{vmatrix} = b \begin{vmatrix} d_2 - f'_1 \\ d_3 - d_2 \\ \vdots \\ d_m - d_{m-1} \\ f'_m - d_m \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Аппроксимация профилей производится в системах координат  $S_{1*}$  и  $S_{2*}$ . Так как профили изношенных зубьев не могут иметь касательных, перпендикулярных этим осям, для всех  $i = 1, \dots, m_1$  выполняется условие

$$|2(\Delta_i + \Delta_{i+1})| \geq |\Delta_i| + |\Delta_{i+1}| \geq |\Delta_i| > 0.$$

Решение системы уравнений производится методом прогонки. На прямом ходе прогонки определяются коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  в уравнениях:

$$f''_i = a_i - b_i f''_{i+1}, \quad i = 1, \dots, m-1; \quad (12)$$

– при  $i = 1$ :

$$a_1 = \frac{3(d_2 - f'_1)}{\Delta_2}; \quad b_1 = 0,5,$$

при  $i = 2, \dots, m-1$ :

$$a_i = \frac{6(d_{i+1} - d_i) - \Delta_i a_{i-1}}{2(\Delta_{i+1} + \Delta_i) - \Delta_i b_{i-1}}; \quad b_i = \frac{\Delta_{i+1}}{2(\Delta_{i+1} + \Delta_i) - \Delta_i b_{i-1}}.$$

В конце прямого хода определяется:

$$f_m'' = \frac{6(f_m' - d_m) - \Delta_m}{\Delta_m(2 - b_{m-1})}.$$

На каждом шаге обратного хода по формуле (12) последовательно рассчитываются  $f_i''$  для  $i = m-1, \dots, 1$ . Одновременно определяются значения первых производных проекции ортов нормалей и радиусы кривизны во всех узловых точках:

$$f_i' = d_{i+1} - \frac{1}{3} \left( f_i'' + \frac{1}{2} f_{i+1}'' \right) \Delta_{i+1}; \quad (13)$$

$$e_{xi} = \frac{f_i'}{\gamma}; \quad e_{yi} = -\frac{1}{\gamma}; \quad (14)$$

$$\rho_i = \frac{\gamma^3}{f_i''}; \quad (15)$$

где  $\gamma = \sqrt{1 + (f_i')^2}$ .

**Решение** обратной задачи в окрестности пары квазисопряженных точек. Пусть  $A$  и  $B$  – точки профилей шестерни, образующие квазисопряженную пару;  $\rho_A$  и  $\rho_B$  – радиусы кривизны;  $e_A, e_B$  – орты нормалей в этих точках [6, 7]. Будем считать, что векторы с индексом  $A$  заданы в системе координат  $S_1$  и  $B$  – в  $S_2$ .

При решении обратной задачи необходимо отыскать пару сопряженных точек в ближайших окрестностях точек  $A$  и  $B$ , определить соответствующие им углы поворота шестерни  $\varphi_1$  и колеса  $\varphi_2$ , значение передаточного отношения  $i_2$ , орты нормалей  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$ , плечи нормалей  $h$  относительно осей вращения звеньев, удельные скольжения  $v_1, v_2$  и положение общей точки линии зацепления. Профили зуба шестерни и колеса заменяются сопрягающимися окружностями с радиусами  $\rho_A$  и  $\rho_B$ .

Если принять одну из точек  $A$  или  $B$  за контактную, то радиусы-векторы центра кривизны профиля в другой точке в системах  $S, S_1, S_2$  определяются несложными построениями [1]. Далее, решая уравнения,

$$\vec{r}_c = M_{01} r_{c1}; \quad \vec{r}_c = M_{02} r_{c2},$$

можно получить выражения для определения углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ :

$$\varphi_1 = \arccos \left( \frac{x_c y_{c1} - y_c x_{c1}}{r_{c1}^2} \right); \quad (16)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left( \frac{(x_c - a_w)y_{c2} - y_c x_{c2}}{r_{c2}^2} \right). \quad (17)$$

В качестве контактной точки удобнее принимать точку профиля с большим по абсолютной величине радиусом кривизны. Рассмотрим случай, когда  $|\rho_A| > |\rho_B|$ ,  $A$  – контактная точка,  $C$  – центр кривизны профиля колеса в точке  $A$ :

$$\begin{aligned} \vec{r}_{c1} &= \vec{r}_A - \vec{e}_A \rho_B; \\ \vec{r}_{c2} &= \vec{r}_B + \vec{e}_B \rho_B. \end{aligned} \quad (18)$$

Координаты точки  $C$  в неподвижной системе координат определяются пересечением окружностей, радиуса  $\vec{r}_{c1}$  с центром в  $O_1$  и радиуса  $\vec{r}_{c2}$  с центром в  $O_2$ .

$$\begin{aligned} x_c &= 0,5 \left( a_w + \frac{r_{c1}^2 - r_{c2}^2}{a_w} \right); \\ y_c &= \pm \sqrt{r_{c1}^2 - x_c^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

Знак  $y_c$  зависит от соотношения радиусов кривизны  $\rho_A$  и  $\rho_B$ . Для начального периода изнашивания эвольвентной передачи  $y_c > 0$ . Зная радиус-вектор и орт нормали в контактной точке на профиле зуба шестерни ( $\vec{e}_1 = \vec{e}_A, \vec{r}_1 = \vec{r}_A$ ) и значение углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , можно определить соответствующие величины  $\vec{e}_2$  и  $\vec{r}_2$  для сопряженной контактной точки на профиле зуба колеса:

$$\begin{aligned} \vec{r}_2 &= M_{21} \vec{r}_1, \\ \vec{e}_2 &= M_{21} \vec{e}_1. \end{aligned} \quad (20)$$

Плечи нормалей относительно оси вращения колеса определяются по формуле

$$h = |\vec{e}_2 \times \vec{r}_2|. \quad (21)$$

Отношение плеч нормалей определит передаточное отношение:

$$i_{21} = \frac{|\vec{e}_1 \times \vec{r}_1|}{|\vec{e}_2 \times \vec{r}_2|}. \quad (22)$$

Линия зацепления определяется при переписывании контактной точки в неподвижную систему координат:

$$\vec{r} = M_{01} \vec{r}_1. \quad (23)$$

При решении обратной задачи для каждой пары квазисопряженных точек получают профили парами сопряженных точек и таблично заданные функции  $\varphi_2(\varphi_1), h(\varphi_2), i_{21}(\varphi_1)$ .

### 5. Удельные скольжения при произвольной форме профилей зубьев

Для общего случая плоского зацепления удельное скольжение в контактной точке шестерни  $v_1$  и колеса  $v_2$  получаются из выражений:

$$v_1 = \frac{V_{F2} - V_{F1}}{V_{F1}}; \quad v_2 = \frac{V_{F1} - V_{F2}}{V_{F2}}, \quad (24)$$

где  $V_{F1}, V_{F2}$  – скорости перемещения общей точки по профилям зубьев.

Искомые скорости находятся из уравнений связи между кривизнами взаимоогibaемых поверхностей. Для этого используется система векторных уравнений, описывающих контакт поверхностей зубьев:

$$\left. \begin{aligned} \vec{r}_1 &= M_{12} \vec{r}_2 \\ \vec{e}_1 &= M_{12} \vec{e}_2 \end{aligned} \right\}$$

При дифференцировании по параметру движения получается

$$\begin{aligned} d\vec{r}_1 &= M_{12} d\vec{r}_2 + \frac{dM_{12}}{d\varphi_1} \vec{r}_2; \\ d\vec{e}_1 &= M_{12} d\vec{e}_2 + \frac{dM_{12}}{d\varphi_1} \vec{e}_2. \end{aligned}$$

При использовании матрицы обратного преобразования  $M_{21}$  можно переписать уравнения в форме

$$\begin{aligned} d\vec{r}_1 &= M_{12} d\vec{r}_2 + L \vec{r}_1; \\ d\vec{e}_1 &= M_{12} d\vec{e}_2 + L \vec{e}_1, \end{aligned} \quad (25)$$

где  $L$  – матрица-аналог относительной скорости,

$$L = \frac{dM_{12}}{d\varphi_1} M_{21} = \begin{vmatrix} 0 & i_{21} + 1 & -i_{21} a_w \cos \varphi_1 \\ -(i_{21} + 1) & 0 & i_{21} a_w \sin \varphi_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (26)$$

При проецировании векторных уравнений (26) на орт касательной  $\vec{\tau}$  к профилям в общей точке контакта зубьев, получается

$$\begin{aligned} V_{F1} &= V_{F2} + \left( \vec{\tau}_1^T \cdot L \cdot \vec{r}_1 \right); \\ \dot{e}_{r1} &= \dot{e}_{r2} + \left( \vec{\tau}_1^T \cdot L \cdot \vec{e}_1 \right). \end{aligned} \quad (27)$$

Из уравнения (24), используя уравнение Радрига, которое для плоского зацепления имеет вид  $\dot{e}_r = -xV_F$ , где  $x$  – кривизна профиля в рассматриваемой точке, получаются искомые выражения для удельных скольжений:

$$v_1 = \frac{x_1 - x_2}{B + x_2}; \quad v_2 = \frac{x_2 - x_1}{B + x_2}, \quad (28)$$

где  $x_1 = \frac{1}{\rho_1}$ ,  $x_2 = \frac{1}{\rho_2}$  – кривизна профиля;

$$B = \frac{\bar{\tau}_1^T \cdot L \cdot \bar{e}_1}{\bar{\tau}_1^T \cdot L \cdot \bar{r}_1}. \quad (29)$$

## 6. Нагрузка в зацеплении

В зоне однопарного зацепления:

$$Ph = M_2, \quad (30)$$

в зонах двухпарного зацепления нагрузка  $P$  распределяется между двумя парами зубьев:

$$Ph + P'h' = M_2. \quad (31)$$

Для нахождения нагрузки уравнения (31) следует дополнить еще одним уравнением, которое может быть получено исходя из условия совместной деформации двух пар зубьев. Для этого воспользуемся определением податливости по методике, учитывающей изгибную и контактную деформации зубьев, а также деформацию прилегающей к их основанию части обода колеса.

Знание податливости зацепления  $S$  позволяет определить отставание колеса от нагрузки на угол:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{PS}{h}. \quad (32)$$

Любая прямозубая передача, даже если она первоначально была абсолютно точной, уже в начальный период изнашивания становится приближенной. Геометрический коэффициент перекрытия при снятии нагрузки у такой передачи равен единице. Существующие при работе под нагрузкой участки двухпарного зацепления являются участками упругого пересопряжения зубьев. На рис. 4 показаны функции положения  $\varphi_2(\varphi_1)$ , соответствующие предшествующей (I), рассматриваемой (II) и последующей (III) парам зубьев при отсутствии деформации.

Пусть  $\delta\varphi_2$  – угловой зазор, соответствующий фазе  $\varphi_1$  ненагруженной передачи. При увеличении нагрузки от нуля до полного значения сначала отставание колеса будет происходить вследствие деформации предшествующей пары зубьев. После выборки зазора  $\delta\varphi_2$  обе пары деформируются одновременно. Таким образом, угловая деформация одной пары зубьев будет больше на величину углового зазора деформации другой пары:

$$\Delta\varphi_{2y} = \Delta\varphi'_{2y} - \delta\varphi_2. \quad (33)$$

При подстановке (32) в (33) получаем

$$\frac{PS}{h} = \frac{P'S'}{h'} - \delta\varphi_2. \quad (34)$$

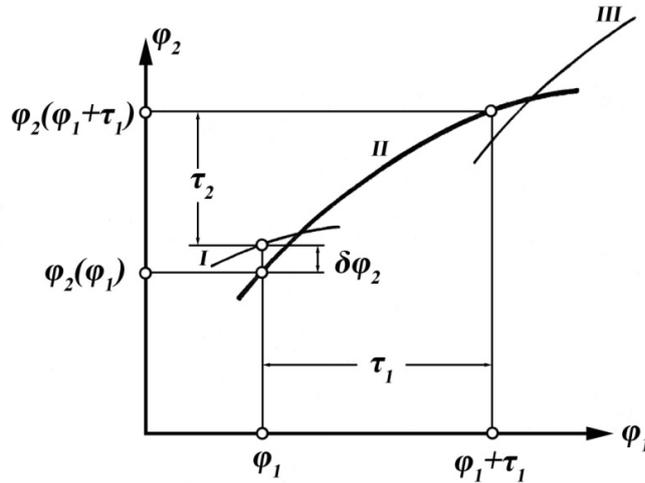


Рис. 4. Функции положения  $\varphi_2(\varphi_1)$

Если в рассматриваемой паре интенсивность изнашивания больше, чем в другой, то угловой зазор в ней будет возрастать, что в соответствии с уравнением (34) приведет к уменьшению нагрузки в зацеплении и к уменьшению интенсивности изнашивания. Одновременно интенсивность изнашивания в другой паре увеличится. Указанный процесс приводит к выравниванию интенсивностей изнашивания зацепления в обеих парах зубьев.

Для нахождения выбираемого углового зазора  $\delta\varphi_2$  используется функция положения, соответствующая паре абсолютно жестких зубьев, которая определяется в ходе решения обратной задачи в начале каждого шага изнашивания. Функции положения для предшествующей и последующей пар зубьев имеют вид

$$\varphi_2 = \varphi_2(\varphi_1 \pm \tau_1) \pm \tau_2, \tag{35}$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – угловые шаги зубьев шестерни и колеса.

Здесь верхний знак соответствует упругому входу, а нижний – упругому выходу рассматриваемой пары зубьев из зацепления.

Угловой зазор определяется разностью функции положения выходящей (входящей) и рассматриваемой пары зубьев:

$$\delta\varphi_2 = \varphi_2(\varphi_1 \pm \tau_1) \pm \tau_2 - \varphi_2(\varphi_1). \tag{36}$$

При известном угловом зазоре и совместном решении (32) и (34) получаем

$$P = h \frac{S'M_2 - \delta\varphi_2 h'^2}{h'^2 S + h^2 S'}. \tag{37}$$

Углы  $\varphi_1$ , при которых нагрузка, рассчитанная по формуле (37), удовлетворяет условию  $0 < P < M_2 / H$ , соответствуют участку упругого пересопряжения зубьев. В точках, где  $P < 0$ , нагрузка передается только предше-

ствующей парой зубьев. При  $P > M_2 / H$  предшествующая пара зубьев уже вышла из зацепления, упругий вход рассматриваемой пары зубьев закончился. Аналогично рассматривается участок упругого выхода из зацепления.

### **7. Оценка точности математической модели**

Анализ литературных источников показал, что в описании условий экспериментов отсутствует единообразие, а методы обработки результатов существенно отличаются. Наиболее подходящими для оценки точности модели изнашивания зубчатых колес, учитывающей эволюционный характер процесса взаимодействия, являются результаты экспериментов Х. Плева [8–10] и Г. Адама [11].

Малая частота вращения шестерни в процессе проведения эксперимента во многом предопределила выбор этих результатов для оценки точности модели. Именно при таких условиях реальная передача наиболее полно описывается выбранной упруго-статической моделью, не учитывающей динамические нагрузки, возникающие в зацеплении.

Сравнение результатов экспериментов и расчетов с использованием модели изнашивания зубчатых колес, учитывающей эволюционный характер процесса взаимодействия, показало, что математическая модель наглядно демонстрирует такую характерную черту процесса изнашивания реальных передач, как наличие периода приработки и последующего устойчивого изнашивания, которому соответствует устойчивая форма естественного износа зубьев.

Полученные в ходе выполнения сравнения данные демонстрируют хорошее совпадение результатов эксперимента и математического моделирования. Эпюры износа достаточно близки для различных этапов изнашивания передачи, сопоставление экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод, что разработанная математическая модель учитывает основные связи и явления, существенные для процесса изнашивания зубчатого зацепления и может быть использована для изучения его закономерностей.

Математическая модель процесса изнашивания позволила численным методом рассчитать форму естественного износа для прямозубых цилиндрических передач.

### **Заключение**

Развитие вычислительной техники позволило внедрить современные ЭВМ практически во все сферы деятельности человека. Не стала исключением и производственная сфера. На производственных предприятиях широко применяются современные вычислительные системы на всех этапах.

Исключением является этап испытаний зубчатых колес. Как правило, на этом этапе производится многократное изготовление образцов для проведения натурных испытаний. Это обстоятельство значительно увеличивает как временные затраты, так и материальные. Улучшить показатели эффективности возможно за счет математического моделирования, внедренного в специальное компьютерное программное обеспечение.

Приведенное математическое моделирование с высокой точностью описывает зубчатое зацепление и подходит для применения в компьютерных

системах, предназначенных для виртуальных испытаний. Такого рода системы сейчас активно разрабатываются и внедряются в предприятия всего мира. Преимущества таких систем очевидны и заключаются в высокой эффективности, низкой стоимости процесса испытаний, высоком быстродействии, высокой точности получаемых результатов и т.д.

Таким образом, в статье приведено описание математической модели процесса взаимодействия зубчатых колес в зацеплении, учитывающей изнашивание и пригодной для внедрения в современные программные пакеты испытания такого рода изделий. В работе произведено подробное описание математической модели, выбрана и описана система координат, описано математическое представление геометрических параметров зубчатого зацепления и приведено описание процессов в зубчатом зацеплении.

### *Библиографический список*

1. **Егоров, И. М.** Применение методов математического моделирования для исследования и расчета изнашивания прямозубых цилиндрических передач : дис. ... канд. техн. наук / Егоров И. М. – Л. : ЛИТМО, 1985. – 160 с.
2. **Баранов, А. В.** Метод прогнозирования и способы повышения ресурса изнашивающихся подвижных сопряжений деталей машин : дис. ... канд. техн. наук / Баранов А. В. – Л., 1988. – 175 с.
3. **Айрапетов, Э. Л.** Состояние и перспективы развития методов расчета нагруженности и прочности передач зацеплением : метод. материалы / Э. Л. Айрапетов. – Ижевск ; М. : Изд-во ИжГТУ, 2000. – 118 с.
4. **Резников, С. С.** Основы построения эволюционной модели процесса изнашивания зубчатого зацепления / С. С. Резников // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (2). – С. 296–298.
5. Проблема оценки износа сопряжений зубчатых колес транспортных машин и энергетического оборудования / А. В. Баранов, В. А. Вагнер, С. В. Тарасевич, Ю. А. Баранова, А. Н. Пономарева // Ползуновский Вестник. – 2010. – № 1. – С. 99–105.
6. **Онищенко, В. П.** Прогнозирование работоспособности зубчатых передач с учетом взаимовлияния формы изношенных зубьев и характеристик контакта / В. П. Онищенко, В. А. Голдобин // Вісник Східноукраїнського університету імені Володимира Даля. – 2007. – № 9 (115). – С. 165–171.
7. **Онищенко, В. П.** Прогнозирование формы профилей зубьев зубчатых передач в результате их износа / В. П. Онищенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : Междунар. сб. науч. тр. – Вып. 5. – Донецк, ДонГТУ, 1998. – С. 155–163.
8. **Michaelis, K.** Berechnung der verschlei bedingten Flankenformänderung langsam laufender Zahnreder. Teil 2 / K. Michaelis, P. Brinck // Antriebstechnik. – 1983. – Bd. 22, № 12. – P. 47–48.
9. **Winter, H.** Abriebverschleis und Lebensdauerberechnung an geschmierten, langsam laufenden Zahnradern. Teil 1 / H. Winter, H. Plewe. – Antriebstechnik. – 1982. – Bd. 21, № 5. – P. 231–237.
10. **Winter, H.** Abriebverschleis und Lebensdauerberechnung an geschmierten, langsam laufenden Zahnradern. Teil 2 / H. Winter, H. Plewe // Antriebstechnik. – 1982. – Bd. 21, № 6. – P. 282–286.
11. **Adam, G.** Verschlei berechnung an Geradstirnrädern aus Stahl bei Kleinen Zaynumfangechwindigkeiten / G. Adam // Pengerätetechnik. – 1982. – Bd. 31, № 9. – P. 390–393.

**References**

1. Egorov I. M. *Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya dlya issledovaniya i rascheta iznashivaniya pryamozubykh tsilindricheskikh peredach: dis. kand. tekhn. nauk* [Application of mathematical simulation for research and calculation of spur gear set wearing: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Leningrad: LITMO, 1985, 160 p.
2. Baranov A. V. *Metod prognozirovaniya i sposoby povysheniya resursa iznashivayushchikh podvizhnykh sopryazheniy detaley mashin: dis. kand. tekhn. nauk* [The method of forecasting and improvement means of movable mating machine parts wearing life: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Leningrad, 1988, 175 p.
3. Ayrapetov E. L. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov rascheta nagruzhennosti i prochnosti peredach zatsepleniem: metod. materialy* [The condition and development prospects of gears engagement loading durability: methodological materials]. Izhevsk; Moscow: Izd-vo IzhGTU, 2000, 118 p.
4. Reznikov S. S. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Bulletin of Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky]. 2011, no. 4 (2), pp. 296–298.
5. Baranov A. V., Vagner V. A., Tarasevich S. V., Baranova Yu. A., Ponomareva A. N. *Polzunovskiy Vestnik* [Polzunovsky Bulletin]. 2010, no. 1, pp. 99–105.
6. Onishchenko V. P., Goldobin V. A. *Visnik Skhidnoukraïns'kogo universitetu imeni Volodimira Dalya* [Bulletin of Skhidnoukrainskiy Univrsity named after Vladimir Dal]. 2007, no. 9 (115), pp. 165–171.
7. Onishchenko V. P. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya: Mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Progressive technologies and systems of mechanical engineering: International proceedings]. Donetsk, DonGTU, 1998, iss. 5, pp. 155–163.
8. Michaelis K., Brinck P. *Antriebstechnik* [Driven machinery]. 1983, vol. 22, № 12, pp. 47–48.
9. Winter H., Plewe H. *Antriebstechnik* [Driven machinery]. 1982, vol. 21, no. 5, pp. 231–237.
10. Winter H., Plewe H. *Antriebstechnik* [Driven machinery]. 1982, vol. 21, no. 6, pp. 282–286.
11. Adam G. *Pengerätetechnik*. 1982, vol. 31, no. 9, pp. 390–393.

---

**Акопян Мисак Геворкович**

аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49)

E-mail: akopyan.miso@yandex.ru

---

**Акопян Мисак Геворкович**

Postgraduate student, Saint-Petersburg National research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (49 Kronverkskiy avenue, Saint-Petersburg, Russia)

---

УДК 531.01, 621

**Акопян, М. Г.**

**Модель изнашивания зубчатых колес, учитывающая эволюционный характер процесса взаимодействия / М. Г. Акопян // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 106–120. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-9**

УДК 62-133

DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-10

*А. А. Приходько, А. И. Смелягин, Н. В. Мевша*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПЛАНЕТАРНОГО ВОЗВРАТНО- ВРАЩАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА<sup>1</sup>

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Перемешивающие устройства широко используются для проведения большинства химических, нефтехимических, тепломассообменных процессов. В настоящее время наиболее распространенными являются перемешивающие устройства с вращательным движением рабочего органа, однако они зачастую не позволяют достичь требуемого уровня тепломассообмена. Для устранения данного недостатка предлагается использовать возвратно-вращательное перемешивающее устройство с планетарным исполнительным механизмом. Цель работы – построение и исследование кинематической модели механизма.

*Материалы и методы.* Исследование кинематики планетарного механизма выполнено с помощью метода Кутцбаха – Смирнова, обработка экспериментальных данных проведена методами статистического анализа.

*Результаты.* Построена кинематическая модель механизма, получены выражения для определения функции положения, аналога скорости и ускорения выходного звена планетарной передачи. Проведена экспериментальная проверка адекватности разработанной математической модели, оценены погрешности измерения.

*Выводы.* Полученная кинематическая модель соответствует реальному объекту, поэтому она может использоваться при дальнейшем динамическом и силовом анализе машины, а также при проектировании новых высокоэффективных возвратно-вращательных перемешивающих устройств.

**Ключевые слова:** кинематика, планетарный механизм, возвратно-вращательное перемешивающее устройство, планы скоростей, нормальное распределение, критерий согласия Пирсона, доверительный интервал.

*А. А. Prikhod'ko, A. I. Smelyagin, N. V. Mevsha*

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF KINEMATICS OF A PLANETARY ROTATIONALLY RECIPROCATING STIRRING TANK

### **Abstract.**

*Background.* Stirring tanks are widely used for most of chemical, petrochemical, heat and mass transfer processes. Currently, the most common ones are stirrers with rotational impeller motion, but they often do not achieve the required level of heat and mass transfer. To eliminate this disadvantage, it is proposed to use a rotationally reciprocating stirred tank (RRST) with a planetary actuator. The purpose of the work is to construct and study a kinematic model of the mechanism.

---

<sup>1</sup> Данное научное исследование проводится при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «У.М.Н.И.К.» по теме «Разработка и исследование инновационных перемешивающих устройств» в рамках договора № 8037У/2015 от 23.11.2015.

*Materials and methods.* The authors investigated the planetary mechanism's kinematics using the Kutzbach-Smirnov method and processed the experimental data by methods of statistical analysis.

*Results.* The article describes the constructed kinematic model of the mechanism and the obtained equations for determining functions of the position, velocity and acceleration analogues of the planetary gear output link. The adequacy of the developed mathematical model was verified experimentally; the measurement errors were estimated.

*Conclusions.* The resulting kinematic model corresponds to the real object, so it can be used for further dynamic and force analysis of the machine, as well as for design of new highly effective rotationally reciprocating stirred tanks.

**Key words:** kinematics, planetary mechanism, rotationally reciprocating stirred tank (RRST), velocity plans, normal distribution, Pearson's chi-squared test, confidence interval.

### **Введение**

Реакторы с мешалками широко используются в химической, нефтехимической, пищевой, строительной и многих других отраслях промышленности [1]. Перемешивание позволяет повысить интенсивность химических, тепловых и массообменных процессов, применяется для приготовления растворов, эмульсий и суспензий [2].

На данный момент наиболее распространенными являются перемешивающие устройства с вращательным движением рабочего органа [3, 4]. Они надежны, просты в изготовлении и эксплуатации. Однако в установленном режиме работы скорости мешалки и перемешиваемой среды уравниваются, что приводит к снижению интенсивности теплообмена.

В работах [5, 6] описаны перемешивающие устройства, оказывающие вибрационное воздействие на обрабатываемую среду за счет возвратно-вращательного движения рабочего органа. При таком способе перемешивания рабочий орган постоянно меняет направление движения, что приводит к увеличению градиента скоростей перемешиваемой жидкости и позволяет значительно повысить интенсивность процессов в реакторе.

В качестве приводного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства (ВВПУ) предложена планетарная передача с эллиптическими зубчатыми колесами (рис. 1). Преимуществами данной передачи перед рычажными преобразователями движения являются компактность и надежность, а также простота уравнивания [7].

Предложенный механизм состоит из стойки 0, входного вала 1, водила 2, выходного вала 3, солнечного цилиндрического колеса 4, эллиптического зубчатого колеса 5, цилиндрического зубчатого колеса 6 сателлита, эллиптического зубчатого колеса 7 сателлита, вала 8, соединяющего колеса сателлита.

Соединив с двигателем входной вал 1 и закрепив на выходном валу 3 рабочий орган, получим ВВПУ. Принцип работы перемешивающего устройства заключается в следующем. Двигатель сообщает вращательное движение входному валу 1 и водилу 2, благодаря этому зубчатое колесо 6 обкатывается по солнечному цилиндрическому зубчатому колесу 4, движение колеса 6 сообщается через вал 8 сателлита эллиптическому колесу 7, которое приводит в движение эллиптическое колесо 5 вместе с выходным валом 3. Выходной

вал 3 через полный оборот входного вала 1 оказывается в первоначальном положении, при этом вследствие переменного передаточного отношения пары эллиптических зубчатых колес 5 и 7 совершает возвратно-вращательное движение, которое передается жестко закрепленному на выходном валу рабочему органу.

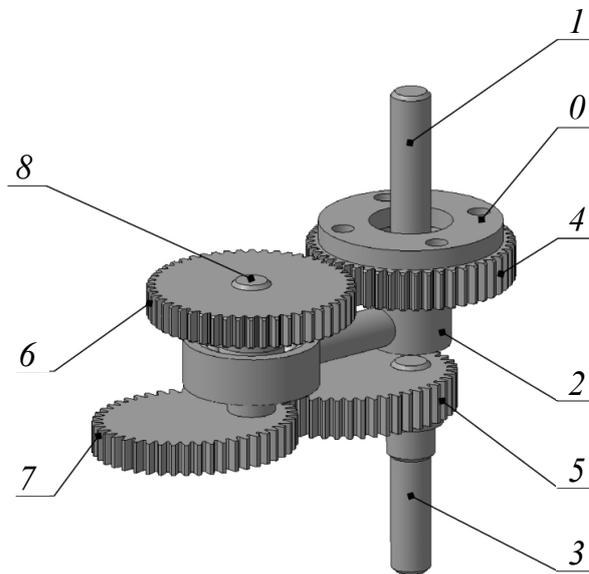


Рис. 1. Планетарный приводной механизм перемешивающего устройства

Целью работы является кинематическое исследование предложенного планетарного приводного механизма с эллиптическими зубчатыми колесами.

### 1. Кинематическая модель механизма.

Покажем, что исследуемый планетарный механизм обеспечивает возвратно-вращательное движение рабочего органа, для чего построим планы положений в диапазоне  $0 < \varphi_1 < 2\pi$  (рис. 2).

Как видно из рис. 2, при одностороннем вращательном движении входного вала вместе с водилом эллиптическое колесо вместе с выходным валом совершают возвратно-вращательное движение. Для построения кинематической модели изобразим план скоростей звеньев механизма для одного из промежуточных положений, например в положении, показанном на рис. 2,б ( $\varphi_1 = 45^\circ$ ).

Аналог угловой скорости выходного вала 3 (рис. 3) определится по формуле [8]:

$$\varphi'_3 = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{v_D \cdot AC}{v_C \cdot ED} = \frac{DD' \cdot AC}{CC' \cdot ED}, \quad (1)$$

где  $\varphi_3$ ,  $\omega_3$  – угол поворота и угловая скорость выходного вала 3;  $\varphi_1$ ,  $\omega_1$  – угол поворота и угловая скорость входного вала 1.

Учитывая подобие треугольников  $BDD'$  и  $BCC'$ , уравнение (1) можно представить в виде

$$\varphi'_3 = \frac{BD \cdot AC}{BC \cdot ED} \quad (2)$$

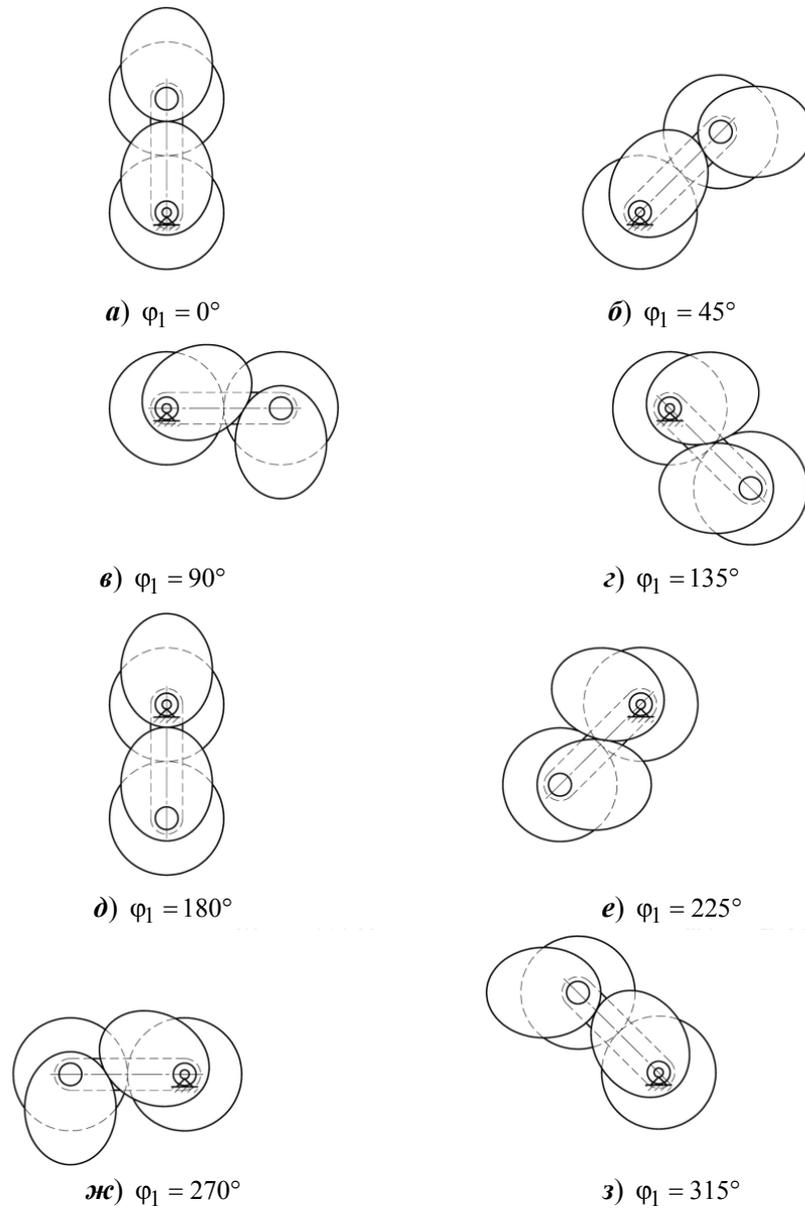


Рис. 2. Планы положений исследуемого механизма

Так как радиус зацепления в паре эллиптических колес 5 и 7 не является постоянной величиной, то точка  $D$  на плане скоростей будет менять свое положение, при этом будет меняться длина и направление вектора  $DD'$ . Для нахождения отрезков  $BD$  и  $ED$  представим уравнение эллипса в полярной системе координат [9]. Фокус ведущего эллипса  $I$  примем за полюс, а большую ось – за полярную ось (рис. 4), тогда уравнение эллипса запишется в виде

$$\rho(\varphi_x) = \frac{p}{1 - e \cos \varphi_x}, \quad (3)$$

где  $\varphi_x = \varphi_1 + \pi$  – угол поворота эллиптического колеса 7;  $e$  – эксцентриситет эллипса;  $a$  – большая полуось эллипса;  $p = a(1 - e^2)$  – фокальный параметр эллипса.

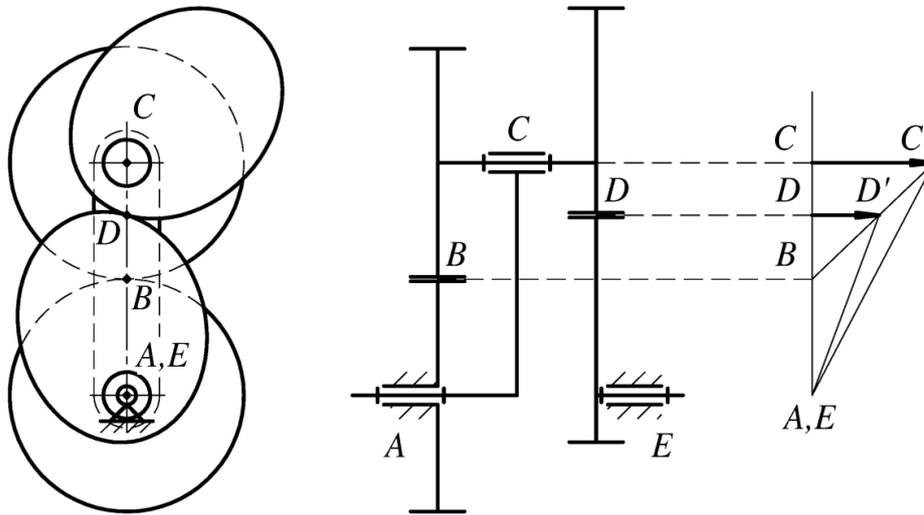


Рис. 3. План скоростей звеньев механизма

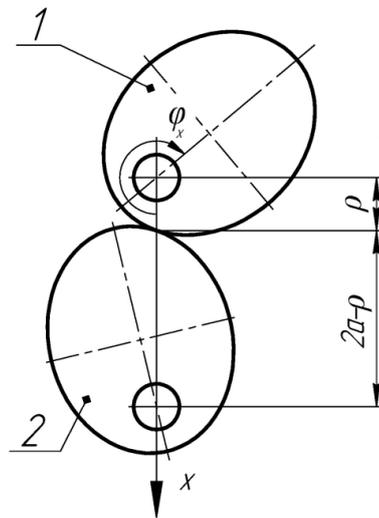


Рис. 4. Зацепление пары эллиптических колес

Тогда длины отрезков  $BD$  и  $ED$  определяются:

$$BD = a - \rho, \quad (4)$$

$$ED = 2a - \rho. \quad (5)$$

Учитывая, что  $AC = 2a$ ,  $BC = a$ , подставим (4), (5) в (2) и получим

$$\varphi_3' = \frac{(a - \rho) \cdot 2a}{a(2a - \rho)} = 1 - \frac{\rho}{2a - \rho}. \quad (6)$$

Подставляя (3) в (6), получим

$$\varphi_3' = 1 - \frac{p}{2a(1 - e \cos(\varphi_1 + \pi)) - p}. \quad (7)$$

Для определения аналога углового ускорения  $\varphi_3''(\varphi_1)$  продифференцируем (7) по обобщенной координате:

$$\varphi_3''(\varphi_1) = \frac{2p \cdot a \cdot e \cdot \sin(\varphi_1 + \pi)}{(2a(1 - e \cos(\varphi_1 + \pi)) - p)^2}. \quad (8)$$

Определим закон движения выходного вала  $\varphi_3(\varphi_1)$ , проинтегрировав (7) по обобщенной координате:

$$\varphi_3(\varphi_1) = \varphi_1 - \frac{(1 - e^2)}{\sqrt{(1 + e^2)^2 - 4e^2}} \times \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{(1 + e^2) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_1 + \pi)}{\sqrt{(1 + e^2)^2 - 4e^2}} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{2e \cdot \sin(\varphi_1 + \pi)}{\sqrt{(1 + e^2)^2 - 4e^2}} \right) \right]. \quad (9)$$

Таким образом, уравнения (7)–(9) полностью описывают кинематику исследуемого планетарного механизма.

## 2. Экспериментальное исследование положения выходного вала планетарного исполнительного механизма

Проведем проверку адекватности разработанной кинематической модели реальному механизму. Так как уравнения (7)–(9) зависят друг от друга, то достаточно проанализировать одно из них, например функцию положения (9). Для проведения исследований спроектирован и изготовлен макет планетарного механизма с набором сменных эллиптических колес, имеющих следующие геометрические параметры: диаметры цилиндрических зубчатых колес 4 и 6 равны  $d_4 = d_6 = 50$  мм; межосевое расстояние  $a = r_4 + r_6 = 50$  мм; размеры эллиптических колес приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры сменных эллиптических колес

№ пары	Большая полуось $a$	Малая полуось $b$	Фокальное расстояние $c$	Фокальный параметр $p$	Эксцентриситет $e$
1	25	20	15	16	0,6
2	25	21	13,565	17,64	0,543
3	25	22	11,874	19,36	0,475
4	25	23	9,798	21,16	0,392
5	25	24	7	23,04	0,28

Исследование функции положения проводилось путем измерения углов поворота  $\varphi_1$  и  $\varphi_3$  ведущего и ведомого валов с интервалом  $10^\circ$ , в каждом из положений по трем измерениям. Результаты измерений показаны на рис. 5.

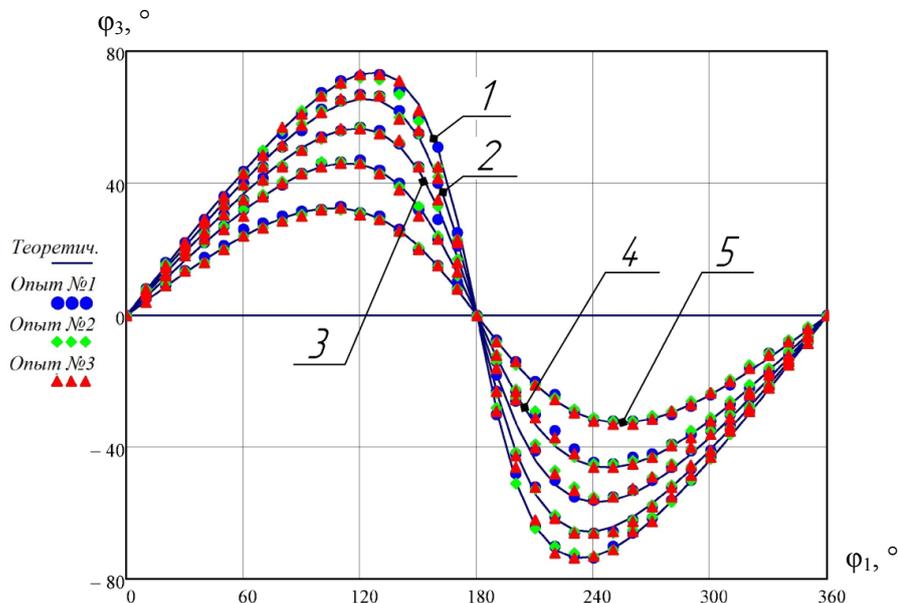


Рис. 5. Результаты измерения функции положения

Как видно из рис. 5, максимальные отклонения результатов эксперимента от расчетных данных не превышают 7 %.

Проведем статистический анализ результатов измерений на примере механизма с парой эллиптических колес № 2 ( $a = 25, b = 21$ ). На рис. 6 показаны графики абсолютных ошибок  $\xi$  для трех измерений.

Построим интервальный вариационный ряд полученных экспериментальных данных. Для определения оптимального количества интервалов  $k$  воспользуемся формулой Стерджесса [10]:

$$k = 3,32 \lg n + 1, \tag{10}$$

где  $n$  – численность совокупности ( $n = 108$ ).

Разбив выборку на  $k = 8$  интервалов, построим гистограмму рассеивания результатов измерений (рис. 7).

Проверим гипотезу о нормальном распределении исследуемой выборки. Параметры нормального распределения (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение) определим по формуле [11]:

$$M(X) = \sum_{i=1}^n (x_i p_i); \tag{11}$$

$$\sigma(X) = \sqrt{(x_i - M(X))^2 \cdot p_i}, \tag{12}$$

где  $x_i$  – среднее значение интервала;  $p_i$  – вероятность попадания величины в интервал.

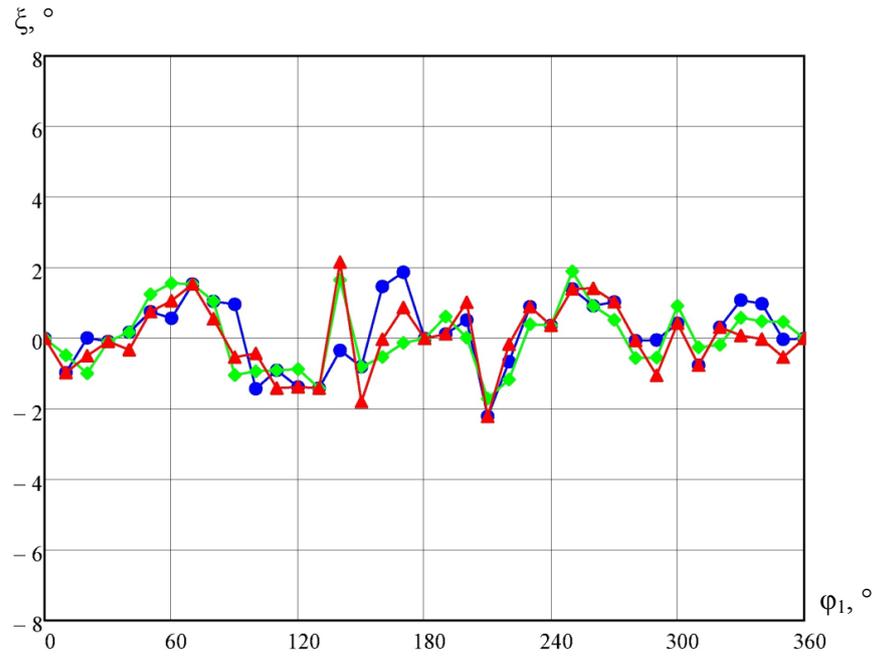


Рис. 6. Графики абсолютных ошибок

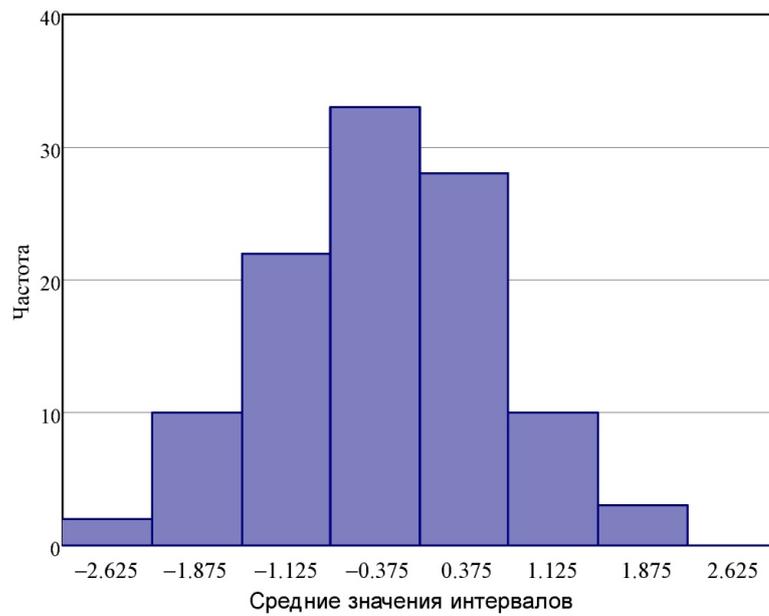


Рис. 7. Гистограмма рассеивания результатов измерений

Для исследуемой выборки  $M(X) = -0,313$  и  $\sigma(X) = 0,953$ . Вычислим теоретические вероятности попадания в интервал через интегральную функцию:

$$P_i^{\text{теор}} = F(Z_{i+1}) - F(Z_i), \quad (13)$$

где  $F(Z)$  – интегральная функция выбранного закона распределения.

Теоретические частоты попадания в интервал определим по формуле

$$n_i^{\text{теор}} = P_i^{\text{теор}} \cdot n. \quad (14)$$

Построим гистограммы эмпирических и теоретических частот на одном графике и сравним результаты (рис. 8).

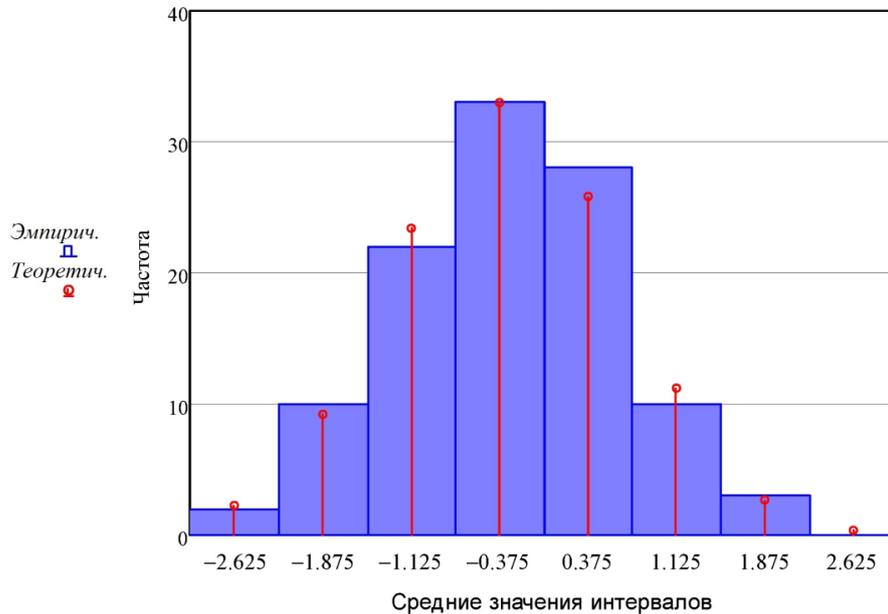


Рис. 8. Гистограммы эмпирических и теоретических частот

Из рис. 8 видно, что эмпирические и теоретические частоты попадания в интервал совпадают.

Для проверки выдвинутой гипотезы воспользуемся критерием согласия Пирсона [11]:

$$\chi_{\text{набл}}^2 = \sum \frac{(n_i - n_i^{\text{теор}})^2}{n_i^{\text{теор}}}. \quad (15)$$

Проверим, удовлетворяет ли полученное значение  $\chi_{\text{набл}}^2 = 0,918$  выбранной гипотезе по уровню значимости  $\alpha = 0,05$  и количеству степеней свободы  $k = 5$ . Так как  $\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2$ , то выбранную гипотезу считаем верной.

Оценить процент вероятности принадлежности распределения к нормальному можно по формуле, предложенной в [12]:

$$\alpha = \left[ 1 - \left( \frac{1}{k} \frac{\chi_{1-\alpha}^2(k)}{2^2 \Gamma(k/2)} \int_0^t e^{-\frac{t}{2}} \cdot t^{k-1} dt \right) \right] \cdot 100\%, \quad (16)$$

где  $\Gamma(k/2)$  – Гамма-функция;  $k$  – число степеней свободы.

Используя формулу (16), получим  $\alpha = 96,89$ . Таким образом, данное распределение относится к нормальному с вероятностью 96,89%. Используя выражения (11)–(16), вычислим  $\chi^2_{\text{набл}}$  и  $\alpha$  для других пар эллиптических колес (табл. 2).

Таблица 2

Значения  $\chi^2_{\text{набл}}$  и  $\alpha$

№ пары	$\chi^2_{\text{набл}}$	$\alpha, \%$
1	71,854	$4,2 \cdot 10^{-12}$
2	0,918	96,89
3	50,37	$1,16 \cdot 10^{-7}$
4	18,74	0,215
5	4,695	45,422

Как видно из табл. 2, гипотезу о нормальном распределении результатов измерения можно считать верной для экспериментов с парами эллиптических колес № 2 и № 5.

Определим погрешность измерений с доверительной вероятностью  $P = 0,99$ . Найдем квантиль распределения  $m$  из выражения

$$\Phi(m) - \Phi(-m) = P, \quad (17)$$

где  $\Phi(m)$  – функция Лапласа.

Так как функция Лапласа нечетная, то  $\Phi(-m) = -\Phi(m)$ . Преобразуем выражение (17) и получим

$$\Phi(m) = \frac{0,99}{2} = 0,495. \quad (18)$$

Используя таблицу значений  $\Phi(Z)$  [13], находим  $m = 2,57$ . Тогда доверительный интервал с надежностью 0,99 запишется в виде

$$M(X) - 2,57 \cdot \sigma(X) < M(X) < M(X) + 2,57 \cdot \sigma(X). \quad (19)$$

Таким образом, для механизма с парой эллиптических колес № 2 и № 5 погрешности измерения с вероятностью 0,99 попадают в интервалы  $-0,313 \pm 2,45^\circ$  и  $-0,36 \pm 1,64^\circ$  соответственно.

### Заключение

В результате работы исследована кинематика исполнительного механизма ВВПУ, который представляет собой планетарную передачу с эллиптическими зубчатыми колесами. Построены планы положений и скоростей, определены функции положения, аналога скорости и аналога ускорения выходного вала.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность построенной кинематической модели реальным механизмам с различными размерами эллиптических колес. Таким образом, полученные зависимости могут быть использованы при дальнейшем динамическом, силовом

анализе, а также при проектировании перемешивающих устройств с предложенным планетарным механизмом.

### Библиографический список

1. **Васильцов, Э. А.** Аппараты для перемешивания жидких сред / Э. А. Васильцов, В. Г. Ушаков. – Л. : Машиностроение, 1979. – 272 с.
2. **Брагинский, Л. Н.** Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
3. **Kumaresan, T.** Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks / T. Kumaresan, J. B. Joshi // *Chemical Engineering Journal*. – 2006. – Т. 115, № 3. – С. 173–193.
4. **Zadghaffari, R.** A mixing study in a double-Rushton stirred tank / R. Zadghaffari, J. S. Moghaddas, J. Revstedt // *Computers & chemical engineering*. – 2009. – Т. 33, № 7. – С. 1240–1246.
5. **Prikhodko, A. A.** Dynamic analysis of rotationally reciprocating stirred tank with multiple impellers / A. A. Prikhodko, A. I. Smelyagin // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – IEEE, 2015. – С. 1–5.
6. **Prikhodko, A. A.** Development and research of vibromixing reactor with rotationally reciprocating motion of impeller / A. A. Prikhodko, A. I. Smelyagin // *Vibroengineering Procedia*. – 2016. – Т. 8. – С. 102–107.
7. **Приходько, А. А.** Уравновешивание планетарного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А. А. Приходько, А. И. Смелягин // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2016. – № 4. – С. 62–67.
8. **Приходько, А. А.** Кинематический анализ планетарного зубчатого механизма преобразования вращательного движения в возвратно-вращательное / А. А. Приходько, А. И. Смелягин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2016. – № 12. – С. 21–27.
9. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 832 с.
10. **Гайдышев, И.** Анализ и обработка данных: Специальный справочник / И. Гайдышев. – СПб. : Питер, 2001. – 752 с.
11. **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 1972. – 386 с.
12. **Мевша, Н. В.** Методы исследования и оценки технического состояния цепных передач : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Мевша Николай Витальевич. – Краснодар, 2005. – 213 с.
13. **Львовский, Е. Н.** Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1982. – 224 с.

### References

1. Vasil'tsov E. A., Ushakov V. G. *Apparaty dlya peremeshvaniya zhidkikh sred* [Devices for liquid media stirring]. Leningrad: Mashinostroenie, 1979, 272 p.
2. Braginskiy L. N., Begachev V. I., Barabash V. M. *Peremeshivanie v zhidkikh sredakh: Fizicheskie osnovy i inzhenernye metody rascheta* [Stirring of liquid media: physical foundations and engineering calculation methods]. Leningrad: Khimiya, 1984, 336 p.
3. Kumaresan T., Joshi J. B. *Chemical Engineering Journal*. 2006, vol. 115, no. 3, pp. 173–193.

4. Zadghaffari R., Moghaddas J. S., Revstedt J. *Computers & chemical engineering*. 2009, vol. 33, no. 7, pp. 1240–1246.
5. Prikhodko A. A., Smelyagin A. I. *2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. IEEE, 2015, pp. 1–5.
6. Prikhodko A. A., Smelyagin A. I. *Vibroengineering Procedia*. 2016, vol. 8, pp. 102–107.
7. Prikhod'ko A. A., Smelyagin A. I. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation]. 2016, no. 4, pp. 62–67.
8. Prikhod'ko A. A., Smelyagin A. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [University proceedings. Mechanical engineering]. 2016, no. 12, pp. 21–27.
9. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematics reference book for reseachers and engineers]. Moscow: Nauka, 1974, 832 p.
10. Gaydyshev I. *Analiz i obrabotka dannykh: Spetsial'nyy spravochnik* [Data analysis and processing: Special reference book]. Saint-Petersburg: Piter, 2001, 752 p.
11. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [The probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1972, 386 p.
12. Mevsha N. V. *Metody issledovaniya i otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya tsepnnykh peredach: dis. kand. tekhn. nauk: 05.02.02* [Chain drive research methods and operating condition evaluation: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Krasnodar, 2005, 213 p.
13. L'vovskiy E. N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods of empirical formula construction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982, 224 p.

---

**Приходько Александр Александрович**

аспирант, Кубанский государственный технологический университет (Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2)

E-mail: sannic92@gmail.com

**Prikhod'ko Aleksandr Aleksandrovich**

Postgraduate student, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya street, Krasnodar, Russia)

**Смелягин Анатолий Игоревич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики, Кубанский государственный технологический университет (Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2)

E-mail: asmelyagin@yandex.ru

**Smelyagin Anatoliy Igorevich**

Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of theoretical mechanics, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya street, Krasnodar, Russia)

**Мевша Николай Витальевич**

кандидат технических наук, доцент, кафедра технической механики и гидравлики, Кубанский государственный технологический университет (Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2)

E-mail: mevsha@hotmail.ru

**Mevsha Nikolay Vital'evich**

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of engineering mechanics and hydraulics, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya street, Krasnodar, Russia)

УДК 62-133

**Приходько, А. А.**

**Экспериментальное исследование кинематики планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А. А. Приходько, А. И. Смелягин, Н. В. Мевша // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 121–133. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-10**

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ АРМИРУЮЩЕГО В ПОЛИМЕРНОМ СЛОИСТОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Одним из перспективных путей обеспечения высоких требований к эксплуатационным характеристикам современной авиационной, автомобильной и военной техники при уменьшении ее массы является использование полимерных слоистых композиционных материалов. Одной из причин, сдерживающих более широкое применение этих материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов, включая характеристики сопротивления деформированию и разрушению. К числу технологических дефектов относятся отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей и отклонения углов укладки слоев от проектных значений. Целью работы является исследование влияния отклонений углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей в слое и отклонений углов укладки слоев в полимерном слоистом композиционном материале на его сопротивление деформированию и разрушению, учету этого влияния при проектировании.

*Материалы и методы.* В качестве исследуемых материалов выбраны полимерные слоистые композиционные материалы. При изучении технологических дефектов использованы оптические методы исследования микро- и макроструктуры, при экспериментальном исследовании сопротивления деформированию и разрушению – методы лабораторных испытаний, при теоретическом исследовании – методы компьютерного моделирования.

*Результаты.* Установлены зависимости между характеристиками отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей и характеристиками отклонений углов укладки слоев в полимерном слоистом композиционном материале от проектных значений, с одной стороны, и характеристиками его сопротивления деформированию и разрушению, показана возможность использования этих зависимостей при проектировании, с другой стороны.

*Выводы.* Влияние отклонений углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей и отклонений углов укладки слоев в полимерном слоистом композиционном материале от проектных значений на характеристики его сопротивления деформированию и разрушению существенно и должно учитываться при проектировании.

**Ключевые слова:** полимерные слоистые композиционные материалы, дефекты полимерных слоистых композиционных материалов, микро- и макроструктура полимерных слоистых композиционных материалов, сопротивление деформированию и разрушению.

Е. Д. Kartashova, A. Yu. Muzyemnek

## THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL DEVIATIONS OF THE REINFORCEMENT'S LOCATION IN A POLYMERIC LAYERED COMPOSITE MATERIAL ON RESISTANCE TO DEFORMATION AND DESTRUCTION

### Abstract.

*Background.* One of the promising ways to ensure compliance with high requirements for the performance characteristics of modern aerospace, automotive and military equipment at reduction in mass is the use of polymeric layered composite materials. One of the reasons restraining wider use of these materials is the presence of technological defects that have a significant effect on the physico-mechanical characteristics of these materials, including resistance to deformation and fracture characteristics. Among the technological defects are deviations of thread orientation angles of unidirectional layers or fabrics, as well as deviations of layer laying angles from the design values. The aim of the paper is to investigate the influence of deviation of thread orientation angles of unidirectional layers or fabrics in the layer and deviations of layer laying angles in the polymeric layered composite material on its resistance to deformation and destruction, and to account for this influence during the design.

*Materials and methods.* Polymeric layered composite materials were chosen as the materials to be studied. In the study of technological defects the authors used optical methods for studying micro- and macrostructures; in the experimental study of resistance to deformation and fracture - methods of laboratory testing; in the theoretical studies - methods of computer modeling.

*Results.* The work establishes the dependencies between the characteristics of deviations of thread orientation angles of unidirectional layers or fabrics and the characteristics of deviations of layer stacking angles in the polymeric layered composite material from the design values and the characteristics of its resistance to deformation and fractures, as well as shows the possibility of using these dependencies in the design.

*Conclusions.* The influence of deviations of thread orientation angles of unidirectional layers or fabrics and deviations of layer laying angles in the polymeric layered composite material from the design values on the characteristics of its resistance to deformation and fracture is significant and must be taken into account in the design.

**Key words:** polymeric layered composite materials, defects in polymeric layered composite materials, micro- and macrostructure of polymeric layered composite materials, resistance to deformation and fracture.

### Введение

Одним из перспективных путей обеспечения высоких требований к эксплуатационным характеристикам современной аэрокосмической, автомобильной и военной техники при уменьшении ее массы является использование полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ). Одной из причин, сдерживающих более широкое применение этих материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов, включая характеристики сопротивления деформированию и разрушению. К числу технологических дефектов относятся отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей от проектных и отклонения углов укладки слоев [1].

Локальные отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей от проектных значений могут проявляться в виде искривлений волокон в плоскости слоев, свилей, складок или гофров. Причинами появления таких дефектов являются плохое уплотнение тканевого пакета, колебания приложенного давления при формовании, кривизна поверхности, на которую выкладывается ткань, а также сжимающие напряжения, возникающие в ткани или слое.

Причиной глобального отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей от проектных значений может являться отклонение углов укладки слоев от проектных значений. Причиной появления таких дефектов являются ошибки в раскрое и выкладке тканевого пакета.

Сопротивление деформированию ПСКМ характеризуют матрицы жесткости или податливости и инженерные константы каждого слоя. Сопротивление деформированию всего композита может быть выполнено с использованием классической теории ламинатов. Для оценки влияния технологических отклонений на сопротивление деформированию всего композита могут быть использованы [2]:

- матрицы жесткости и податливости;
- нормализованные матрицы жесткости и податливости;
- инженерные константы;
- полярные диаграммы свойств.

Сопротивление разрушению ПСКМ характеризуют прежде всего пределы прочности материала каждого слоя, определенные для одноосного растяжения, сжатия и сдвига. Дополнительно сопротивление разрушению каждого слоя характеризуют параметры критериев разрушения, которые в наилучшей степени подходят для рассматриваемого материала, например параметры критериев Цзя-Ву, Цзя-Хилла, Хоффмана, Хашина, Пака, LaRC и Кунтце. Для оценки сопротивления разрушению всего композита также могут быть использованы эти параметры и критерии. Различие в оценке прочности каждого слоя и всего ламината будет в том, что в первом случае при вычислении функций критериев разрушения будут использоваться значения напряжений или деформаций в слое, а во втором случае осредненные по толщине композита.

Целью работы является исследование влияния отклонений углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей в слое и отклонения углов укладки слоев в полимерном слоистом композиционном материале на его сопротивление деформированию и разрушению, учету этого влияния при проектировании.

## **1. Технологические отклонения расположения армирующего**

### ***1.1. Отклонение угла ориентации нитей от проектных значений***

Структуру ткани характеризует репрезентативная ячейка (*Representative Volume Element – RVE*). В ней все нити имеют определенное направление, которое может быть задано ориентационным вектором  $\mathbf{p}$ . Ориентационный вектор в системе координат RVE может быть определен с помощью сферических углов  $\theta$  и  $\varphi$ , показанных на рис. 1. Оси 1 и 2 лежат в плоскости ткани,

ось 3 образует с ними левую тройку векторов. Угол  $\theta$  – это угол между ориентационным вектором и осью 3, угол  $\varphi$  – это угол между осью 1 и проекцией ориентационного вектора на плоскость, проходящую через оси 1 и 2.

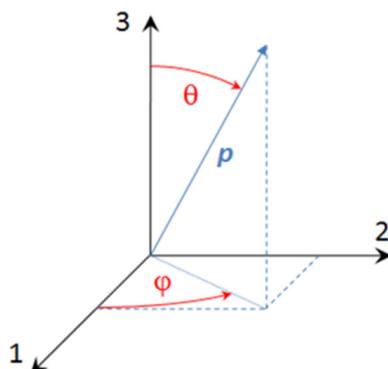
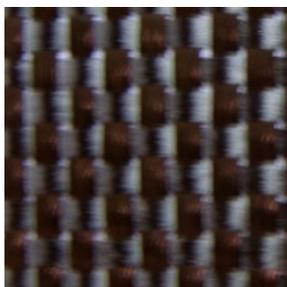


Рис. 1. Определение ориентационного вектора  $\mathbf{p}$  в системе координат RVE с помощью углов  $\theta$  и  $\varphi$

В дальнейшем будут рассматриваться технические ткани, у которых нити расположены так, что угол  $\theta$  близок к  $90^\circ$ , а угол  $\varphi$  может изменяться от нуля до  $180^\circ$ . Отклонение угла ориентации нитей  $\varphi$  от проектных значений назовем отклонением угла ориентации нитей и обозначим  $\gamma$ .

В качестве примера рассмотрим углеткань  $200 \text{ г/м}^2$ , 3К, имеющую полотняное плетение, внешний вид и характеристики которой представлены на рис. 2.



а)

Толщина ткани, мм	0,24
Ширина репрезентативной ячейки, мм	4,4
Ширина нитей, мм	2
Пористость ткани, %	53,7

б)

Рис. 2. Внешний вид (а) и параметры тканевого слоя (б)

В состоянии поставки ткани нити основы и утка расположены под углом  $\varphi_T = \varphi_o - \varphi_y = 90^\circ$ , где  $\varphi_o, \varphi_y$  – углы ориентации нитей основы и утка соответственно. Определить диапазон изменения отклонения угла ориентации нитей  $\gamma$  от этого значения можно в результате лабораторных испытаний тканей на сдвиг. Для этого было разработано приспособление, внешний вид которого показан на рис. 3,а. Приспособление представляет собой шарнирно-стержневой механизм, устанавливаемый в захваты испытательной машины МИ-40КУ. В процессе испытаний расстояние между шарнирами одной диа-

гонали увеличивается, между шарнирами другой – уменьшается. Изначально квадратная форма испытываемого лабораторного образца из ткани приобретает форму ромба (рис. 3,б,в). В процессе испытаний регистрируется усилие, необходимое для деформации образца.

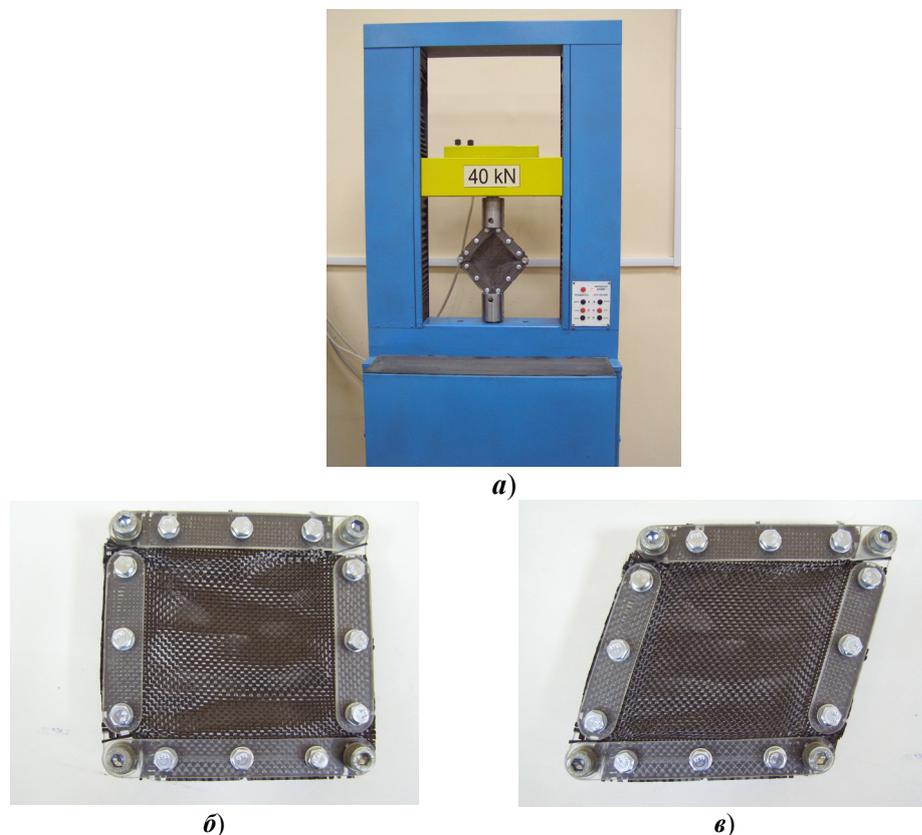


Рис. 3. Схема испытаний ткани на сдвиг: *а* – внешний вид устройства; *б* – начальное положение ткани; *в* – текущее положение ткани

В качестве примера на рис. 4 показан график изменения сопротивления сдвигу от величины сдвига углеткани  $200 \text{ г/м}^2$ , 3К. Для достаточно широкой номенклатуры технических тканей из углеродных, арамидных, стеклянных нитей графики изменения сопротивления сдвигу от величины сдвига имеют похожий вид. На графике можно выделить три характерных участка: участок свободного сдвига, переходной участок и участок стесненного сдвига.

На участке свободного сдвига ткань деформируется без приложения существенного усилия. На участке стесненного сдвига для продолжения деформации требуется значительно большее усилие. Деформация ткани на этом участке характеризуется образованием волнистости, а при продолжении деформирования – складок. Между первым и третьим участками находится достаточно узкий переходной участок. Определим два характерных для данного графика значения деформации сдвига:  $\gamma_I$  – максимальное отклонением угла ориентации нитей на первом участке;  $\gamma_{II}$  – максимальное отклонением угла ориентации нитей на втором участке. Для углеткани  $200 \text{ г/м}^2$ , 3К, значения

характерных углов ориентации нитей на первом и втором участках соответственно равны 12 и 15°.

Действительные значения отклонения угла ориентации нитей  $\gamma$  даже для выровненного по периметру тканевого слоя являются случайной величиной. С целью выявления статистических характеристик распределения этой случайной величины были выполнены измерения углов отклонения нитей основы и утка в 128 случайно выбранных точек листа ткани, имеющего ширину 1250 и длину 1000 мм. Отклонение угла ориентации нити вычислено как разность этих величин. Гистограмма эмпирической функции плотности распределения отклонения угла ориентации нити показана на рис. 5. Функция плотности распределения отклонения угла ориентации нити соответствует нормальному закону распределения.

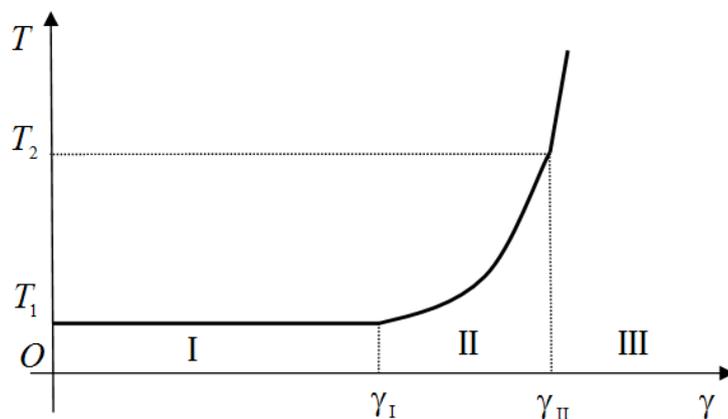


Рис. 4. График изменения сопротивления сдвигу от величины сдвига: I – свободный сдвиг; II – переходной участок; III – стесненный сдвиг

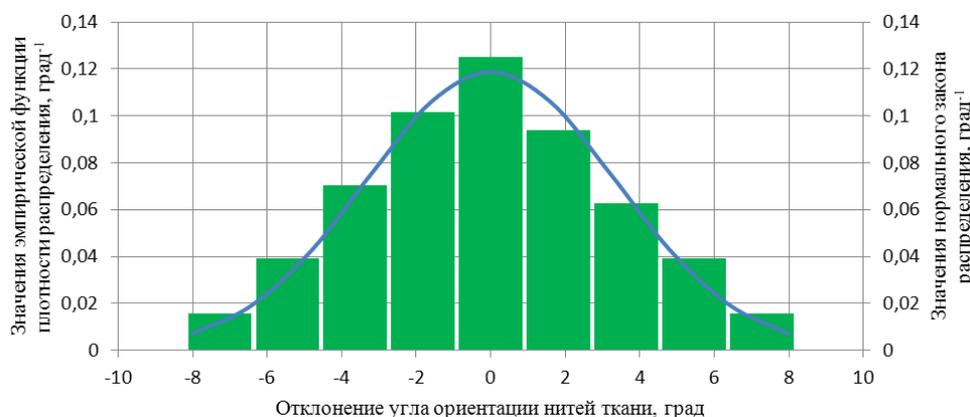


Рис. 5. Гистограмма и график функции плотности распределения отклонения угла ориентации нити

Математическое ожидание отклонения угла ориентации нити равно нулю, среднеквадратическое отклонение – 3,36°. Соответствующий график нормального закона распределения показан на рис. 5.

### 1.2. Отклонение углов ориентации тканевых слоев

ПСКМ, полученный по технологии ручного формования, вакуумного мешка, вакуумной инфузии или с использованием других технологий, состоит из нескольких слоев, вырезанных и уложенных в пакет в ручную или с использованием технических средств автоматизации этих процессов. Отклонения угла ориентации слоев от проектных значений  $\delta$  являются случайной величиной. С целью выявления статистических характеристик распределения этой случайной величины были выполнены измерения углов отклонения слоев при ручной вырезке и укладки в пакет, имеющего ширину 200 и длину 200 мм, 20 листов ткани. Исследованию подвергнуты 20 тканевых пакетов. Гистограмма эмпирической функции плотности распределения отклонения угла ориентации нити показана на рис. 6.

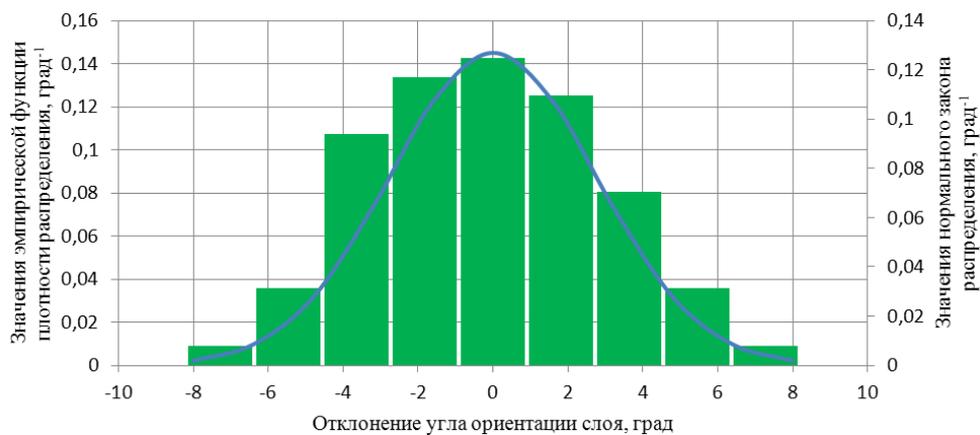


Рис. 6. Гистограмма и график функции плотности распределения отклонения угла ориентации тканевого слоя

Математическое ожидание отклонения угла ориентации тканевого слоя равно нулю, среднеквадратическое отклонение –  $2,75^\circ$ . Функции плотности вероятности отклонения угла ориентации тканевого слоя соответствуют нормальному закону распределения. Соответствующий график нормального закона распределения показан на рис. 6.

## 2. Влияние технологических отклонений расположения армирующего на сопротивление деформированию полимерных слоистых композиционных материалов

### 2.1. Отклонение угла ориентации нитей от проектных значений

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации нитей от проектных значений на сопротивление деформированию проведено компьютерное моделирование и определены матрицы жесткости и податливости, нормализованные матрицы жесткости и податливости, инженерные константы RVE слоя ПСКМ при четырех значениях отклонения угла ориентации нитей:  $\gamma_0 = m_\gamma = 0$ ;  $\gamma_1 = m_\gamma + \sigma_\gamma = 3,36^\circ$ ;  $\gamma_2 = m_\gamma + 2\sigma_\gamma = 6,72^\circ$ ;  $\gamma_3 = m_\gamma + 3\sigma_\gamma = 10,08^\circ$ . В качестве примера на рис. 7 показаны геометрические модели RVE

слоя ПСКМ из углеткани 200 г/м<sup>2</sup>, 3К, и эпоксидной системы Epolam 2017, имеющие различные значения отклонения угла ориентации нитей. Рассчитанные значения инженерных констант для этих четырех расчетных случаев приведены в табл. 1.

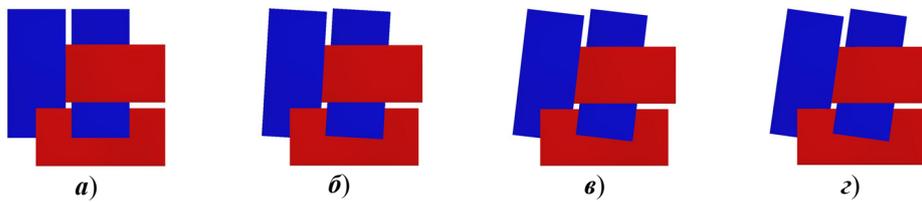


Рис. 7. Геометрическая модель RVE:

$$a - \gamma = 0; \quad б - \gamma = 3,36^\circ; \quad в - \gamma = 6,72^\circ; \quad г - \gamma = 10,08^\circ$$

Таблица 1

Инженерные константы слоя при различных значениях отклонений

Наименование инженерной константы	Значениях отклонения угла ориентации нитей			
	0	3,36°	6,72°	10,08°
Модуль продольной упругости $E_1$ , ГПа	11,5	12,5	13,9	14,5
Модуль поперечной упругости $E_2$ , ГПа	11,5	10,7	10,0	9,73
Модуль поперечной упругости $E_3$ , ГПа	9,36	9,36	9,3	9,33
Коэффициент Пуассона $\nu_{12}$	0,803	0,871	0,941	0,970
Коэффициент Пуассона $\nu_{21}$	0,803	0,737	0,674	0,650
Коэффициент Пуассона $\nu_{13}$	0,102	0,080	0,058	0,050
Коэффициент Пуассона $\nu_{31}$	0,083	0,060	0,03	0,032
Коэффициент Пуассона $\nu_{23}$	0,102	0,124	0,144	0,152
Коэффициент Пуассона $\nu_{32}$	0,083	0,109	0,135	0,146
Модуль сдвига в плоскости ламината $G_{12}$ , ГПа	25,6	25,5	25,4	25,2
Модуль сдвига вне плоскости ламината $G_{13}$ , ГПа	3,31	3,32	3,33	3,34
Модуль сдвига вне плоскости ламината $G_{23}$ , ГПа	3,31	3,30	3,28	3,28

**Примечания:**

1. Плотность композита при всех значениях отклонений угла ориентации нитей равна 1,535 г/см<sup>3</sup>.

2. Инженерные константы определены в системе координат, ось 1 которой направлена вдоль биссектрисы угла, образованного проекциями осей нитей на плоскость композита, ось 2 лежит в плоскости композита и перпендикулярна оси 1, ось 3 образует с осями 1 и 2 левую тройку.

Результаты расчета показывают, что отклонение угла ориентации нитей от проектных значений приводят к существенному увеличению модуля нормальной упругости  $E_1$  и уменьшению модуля нормальной упругости  $E_2$ . При этом изменение значений других инженерных констант менее существенно.

### 2.2. Отклонение углов ориентации тканевых слоев

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации слоев от проектных значений на сопротивление деформированию проведено компьютерное моделирование и определены распределения инженерных констант ПСКМ при случайных значениях их углов ориентации. В качестве примера на рис. 8 показана эмпирическая гистограмма плотности распределения модуля упругости  $E_1$  ПСКМ, состоящего из четырех тканевых слоев толщиной 0,24 мм, из углеткани 200 г/м<sup>2</sup>, 3К, и эпоксидной системы Erolam 2017. Расположение системы координат такое же, как и в предыдущем случае. На рис. 8 также показана эмпирическая функция распределения модуля нормальной упругости  $E_1$ . Значение математического ожидания модуля нормальной упругости  $E_1$  равно 52,7 ГПа, среднеквадратическое отклонение – 1,24 ГПа. На рис. 9 приведены полярные диаграммы упругих свойств данного ПСКМ.

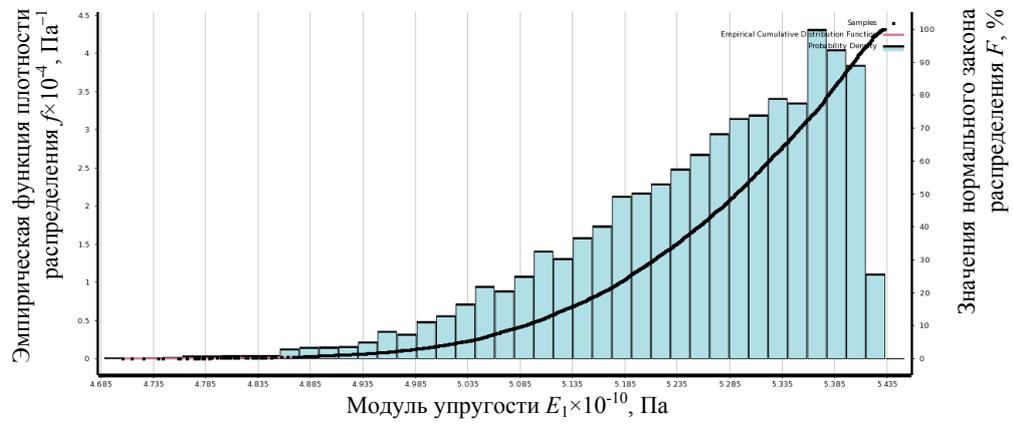


Рис. 8. Гистограмма функции плотности и график функции распределения модуля упругости  $E_1$

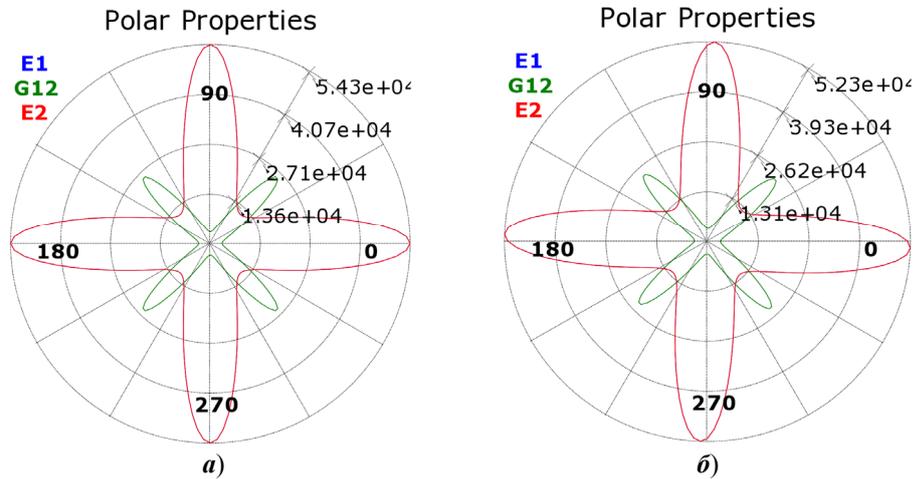
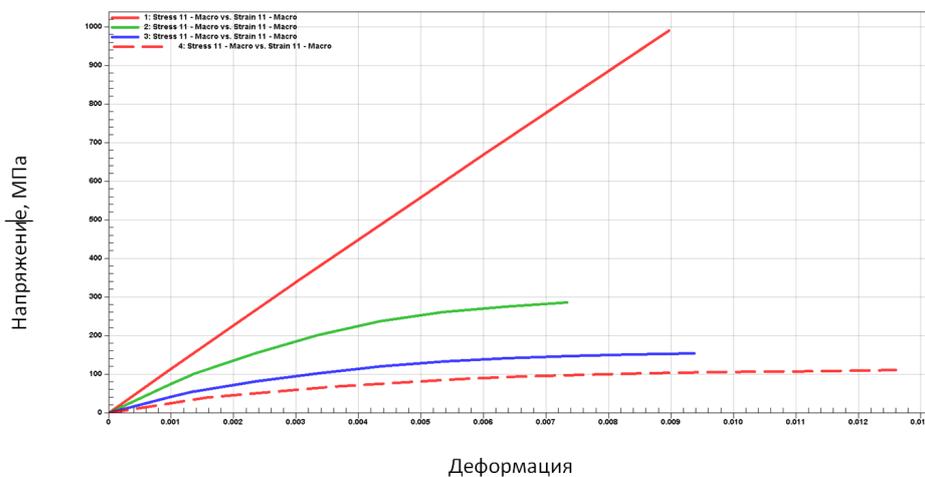


Рис. 9. Полярные диаграммы упругих свойств: *a* – укладка слоев без отклонения углов ориентации тканевых слоев; *b* – отклонения  $\delta_1 = 0^\circ$ ,  $\delta_2 = 0^\circ$ ,  $\delta_3 = 0^\circ$ ,  $\delta_4 = 8,75^\circ$

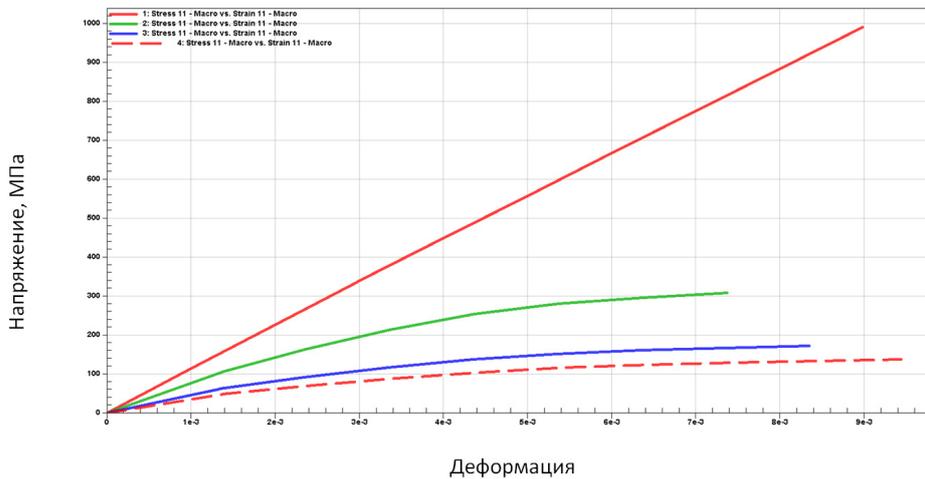
### 3. Влияние технологических отклонений расположения армирующего на сопротивление разрушению полимерных слоистых композиционных материалов

#### 3.1. Отклонение угла ориентации нитей от проектных значений

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации нитей от проектных значений на сопротивление разрушению проведено компьютерное моделирование и построены диаграммы деформирования до разрушения RVE слоя ПСКМ при четырех значениях отклонения угла ориентации нитей:  $\gamma_0 = m_\gamma = 0$ ;  $\gamma_1 = m_\gamma + \sigma_\gamma = 3,36^\circ$ ,  $\gamma_2 = m_\gamma + 2\sigma_\gamma = 6,72^\circ$ ,  $\gamma_3 = m_\gamma + 3\sigma_\gamma = 10,08^\circ$ . В качестве примера на рис. 10 показаны диаграммы деформирования до разрушения RVE слоя ПСКМ из углеткани 200 г/м<sup>2</sup>, 3К, и эпоксидной системы Epolam 2017 при отсутствии и при наличии отклонения угла ориентации нитей, равном 10,08°.



а)



б)

Рис. 10. Диаграммы деформирования ПСКМ до разрушения при углах приложения нагрузки: а –  $\gamma = 0$ ; б –  $\gamma = 10,08^\circ$

Кривые на графиках соответствуют различным углам приложения нагрузки по отношению к направлению нитей основы: кривые 1, 2 и 3 соответствуют углам приложения нагрузки 0, 11,25, 22,5 и 45° соответственно.

Результаты расчета показывают, что отклонение угла ориентации нитей от проектных значений существенно влияют на сопротивление разрушению при всех направлениях приложения нагрузки.

### 3.2. Отклонение углов ориентации тканевых слоев

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации слоев от проектных значений на сопротивление разрушению проведено компьютерное моделирование и определено распределение предела прочности в направлении наименьшего сопротивления композита при случайном распределении углов ориентации тканевых слоев. В качестве примера на рис. 11 показана эмпирическая гистограмма плотности распределения предела прочности  $S_1$  при растяжении ПСКМ, состоящего из четырех слоев толщиной 0,24 мм, из углеткани 200 г/м<sup>2</sup>, 3К, и эпоксидной системы Erolam 2017. На рис. 11 также показана эмпирическая функция распределения предела прочности. Значение математического ожидания предела прочности  $S_1$  равно 52,7 ГПа, средне-квадратическое отклонение – 1,24 ГПа.

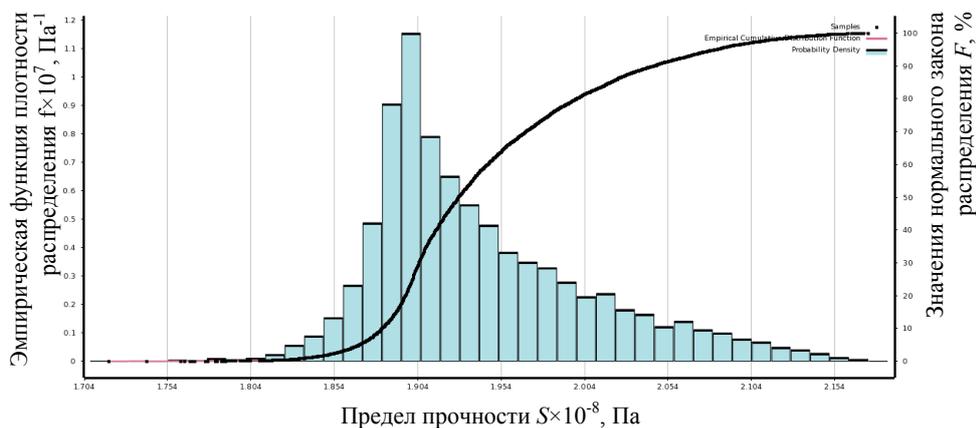


Рис. 11. Гистограмма функции плотности и график функции распределения предела прочности ПСКМ при случайном распределении углов ориентации тканевых слоев

### Заключение

В работе исследовано влияние отклонений углов ориентации нитей тканей в слое и отклонений углов укладки слоев в ПСКМ на его сопротивление деформированию и разрушению. В результате исследования:

- установлено, что отклонение угла ориентации нитей в слое и углов ориентации тканевых слоев от проектных значений приводит к существенному изменению модулей нормальной упругости  $E_1$  и  $E_2$ , а также пределов порочности композита при всех направлениях приложения нагрузки;

- определены вероятностные характеристики распределений модуля нормальной упругости и предела порочности композита в направлении

наименьшего сопротивления разрушению, которые могут быть использованы при учете влияния рассматриваемых технологических дефектов на их сопротивление деформированию и разрушению.

#### **Библиографический список**

1. **Карташова, Е. Д.** Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 79–89.
2. **Муйземнек А. Ю.** Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов : учеб. пособие / А. Ю. Муйземнек, Е. Д. Карташова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – 77 с.

#### **References**

1. Kartashova E. D., Muzyemnek A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 2 (42), pp. 79–89.
2. Muzyemnek A. Yu., Kartashova E. D. *Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya polimernykh sloistykh kompozitsionnykh materialov: ucheb. posobie* [Deformation and destruction mechanics of polymeric layered composite materials: teaching aid]. Penza: Izd-vo PGU, 2017, 77 p.

---

**Карташова Екатерина Дмитриевна**  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: katrina89@yandex.ru

**Kartashova Ekaterina Dmitrievna**  
Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

**Муйземнек Александр Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теоретической  
и прикладной механики и графики,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: muzyemnek@yandex.ru

**Muzyemnek Aleksandr Yur'evich**  
Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of theoretical  
and applied mechanics and graphics,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

---

УДК 621

**Карташова, Е. Д.**

**Влияние технологических отклонений расположения армирующего в полимерном слоистом композиционном материале на сопротивление деформированию и разрушению / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 134–145. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-11**

### **Вниманию авторов!**

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисовочными подписями.

**Формулы** в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Обращаем внимание авторов на то, что перевод имен собственных на английский язык в списке литературы осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru). Для обеспечения единообразия указания данных об авторах статей во всех реферируемых базах при формировании авторской справки при подаче статьи необходимо предоставить перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык, или он будет осуществлен автоматически в программе транслитерации в кодировке BGN.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

**Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.**