

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

№ 2 (50)

2019

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Алексеев И. В., Митрохин М. А.* Современные методы распознавания речи для построения голосового интерфейса управления системами специального назначения..... 3
- Макарычев П. П., Афонин А. Ю., Шибанов С. В.* Прогнозирование состояния объекта на основе авторегрессионной модели..... 11
- Дубинин В. Н., Войнов А. С., Сенокосов И. В., Вяткин В. В.* Функционально-блочная реализация моделей переходов состояний ..... 23
- Митрохин М. А., Щеголихин Я. П., Нешко Д. О., Семенкин М. В.* Анализ эффективности решений открытой библиотеки OpenCV в задаче распознавания автомобильных номеров..... 39

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА**

- Кривулин Н. П.* Методы идентификации мультисенсорных систем..... 47
- Колдов А. С., Светлов А. В.* Оценивание погрешностей определения параметров нерезонансных электрических цепей по результатам совокупных измерений ..... 59
- Токарев Н. Н.* Помехи радиоволновому средству обнаружения нарушителя в лесу ..... 69
- Арбузов В. П., Аракчеев А. Е.* Автоматизированное проектирование функциональных схем измерительных цепей датчиков..... 88

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

- Артемов И. И., Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е.* Силовое взаимодействие пальцев выходного вала с сателлитами в планетарно-цепочной передаче. Часть II. Алгоритмы ..... 100

**UNIVERSITY PROCEEDINGS  
VOLGA REGION  
ENGINEERING SCIENCES**

№ 2 (50)

2019

**CONTENT**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER  
ENGINEERING AND CONTROL**

---

<i>Alekseev I. V., Mitrokhin M. A.</i> Modern speech recognition methods for constructing a voice-control interface for special purpose systems .....	3
<i>Makarychev P. P., Afonin A. Yu., Shibanov S. V.</i> Object's state prediction on the basis of the autoregressive model .....	11
<i>Dubinin V. N., Voynov A. S., Senokosov I. V., Vyatkin V. V.</i> Function block-based implementation of state transition models .....	23
<i>Mitrokhin M. A., Shchegolikhin Ya. P., Neshko D. O., Semekin M. V.</i> An analysis of the OpenCV library's solutions efficiency in the problem of licence plate recognition .....	39

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT  
AND RADIO ENGINEERING**

---

<i>Krivulin N. P.</i> Methods of identifying multi-touch systems .....	47
<i>Koldov A. S., Svetlov A. V.</i> Error estimate of determining non-resonant four-element circuit parameters using the aggregate measurements method .....	59
<i>Tokarev N. N.</i> Radio-wave detector interference in the forest .....	69
<i>Arbuzov V. P., Arakcheev A. E.</i> Computer-aided design of measuring circuits of sensors .....	88

**MACHINE SCIENCE AND BUILDING**

---

<i>Artemov I. I., Chufistov E. A., Chufistov O. E.</i> Power interaction of output shaft's pins with satellites in the planetary-pin gear. Part II. algorithms .....	100
---	-----

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 004.934

DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-1

*И. В. Алексеев, М. А. Митрохин*

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГОЛОСОВОГО ИНТЕРФЕЙСА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются современные технологии распознавания речи. Предмет исследования – методы построения и обучения систем распознавания речи. Целью работы является анализ современных технологий распознавания речи на примере некоторых систем для определения возможности их применения в голосовом интерфейсе управления системами специального назначения.

*Материалы и методы.* Исследования выполнены с использованием методов теории вероятностей и методов распознавания образов.

*Результаты.* Проведен анализ требований и ограничений функционирования интерфейсов управления системами специального назначения. Рассмотрены основные аспекты реализации систем распознавания речи и некоторые особенности различных технологий определения структурных единиц речи.

*Выводы.* Рассмотренные технологии распознавания речи потенциально применимы в интерфейсах управления специальных систем, но требуются дополнительные исследования по оценке их эффективности.

**Ключевые слова:** пользовательский интерфейс, речевой интерфейс, скрытые марковские модели, нейронные сети, распознавание речи.

*I. V. Alekseev, M. A. Mitrokhin*

## MODERN SPEECH RECOGNITION METHODS FOR CONSTRUCTING A VOICE-CONTROL INTERFACE FOR SPECIAL PURPOSE SYSTEMS

### **Abstract.**

*Background.* The object of the research is modern technologies of speech recognition. The subject of the study is methods of constructing and teaching speech recognition systems. The purpose of the work is to analyze modern speech recogni-

---

© Алексеев И. В., Митрохин М. А., 2019. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

tion technologies using the example of some systems to determine the possibility of their use in the voice interface of management of special purpose systems.

*Materials and methods.* Researches were conducted with the use of methods of probability theory and methods of pattern recognition.

*Results.* The analysis of the requirements and limitations of the operation of the management interfaces for special purpose systems is carried out. The main aspects of the implementation of speech recognition systems and some features of various technologies for determining the structural units of speech are considered.

*Conclusions.* The considered speech recognition technologies are potentially applicable in the management interfaces of special systems, but further research is required to evaluate their effectiveness.

**Keywords:** user interface, speech interface, hidden markov model, neural networks, speech recognition.

## **Введение**

С момента появления электронно-вычислительных машин их пытались применять в различных областях, в том числе для использования в человеко-машинных системах специального назначения, к которым относятся автоматизированные системы управления, бортовые системы различных технических средств, а также системы массового обслуживания. Такие системы находят применение в управлении транспортными потоками, при обеспечении безопасности важных объектов, для управления технологическим и иным оборудованием. К этим системам всегда предъявлялись повышенные требования по надежности и безопасности [1, 2].

На сегодня при разработке систем специального назначения с большим числом задач порядка нескольких десятков или сотен и высоким уровнем автоматизации особое внимание уделяют пользовательскому интерфейсу в целях обеспечения максимального удобства и эффективности пользования им. С учетом особенностей функционирования систем специального назначения и требований, предъявляемых к их пользовательским интерфейсам, можно сделать вывод, что дальнейшее повышение эффективности взаимодействия оператора и вычислительной системы возможно при использовании наиболее естественных для человека способов обмена информацией – жестов, письма и речи. Так, уже обеспечивается поддержка ввода с сенсорных панелей. Однако наиболее привлекательным для использования в таких системах и наиболее перспективным является голосовой интерфейс, потому что это наиболее естественный и устойчивый способ общения. Крупнейшие мировые компании в своих разработках предлагают речевой интерфейс как альтернативу графическому. Более того, в системах специального назначения также давно применяются различные системы голосового оповещения оператора о различных событиях для повышения эффективности обратной связи. Ввиду этого для ускорения работы оператора в системе специального назначения, повышения надежности и эффективности его работы целесообразно применение прямой связи оператора с ЭВМ посредством голоса и получения в итоге полноценного речевого интерфейса.

### **1. Требования к интерфейсам управления и обобщенная структура систем распознавания речи**

Диалог человека-оператора с вычислительной техникой в любых системах представляет собой двусторонний обмен данными и командами (рис. 1).

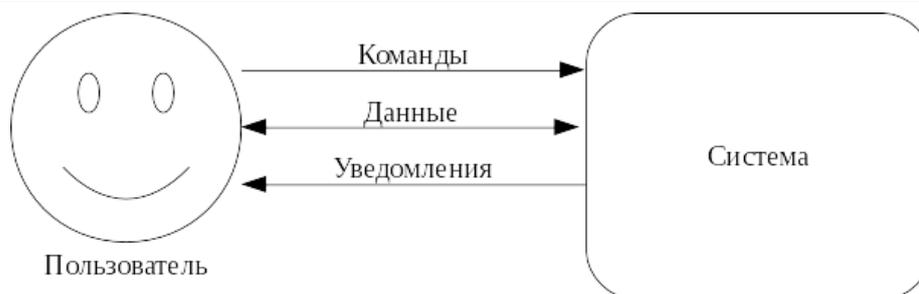


Рис. 1. Обмен информацией (диалог) оператора и ЭВМ

Для реализации речевого интерфейса в первую очередь необходима надежная эффективная подсистема (в составе рассматриваемой системы специального назначения) распознавания речи. С учетом повышенных требований к системам специального назначения эта подсистема должна задействовать лишь локальные вычислительные ресурсы и обладать высокой эффективностью.

Голосовой интерфейс программного обеспечения системы специального назначения, как и любой другой, должен удовлетворять всем требованиям к интерфейсам (естественность, интуитивность, дружелюбность, согласованность, адаптивность, непротиворечивость, избыточность), а также, ввиду своей специфики, некоторым дополнительным:

- 1) корректное распознавание. Система голосового управления должна верно распознавать все команды, в том числе при наличии различного рода помех;
- 2) высокая скорость распознавания. Система, которая распознает фразу слишком долго, может не только не повышать эффективность работы оператора, но и понижать производительность всей системы в целом;
- 3) оптимальное использование машинного времени и оперативной памяти. Поскольку распознавание речи – ресурсоемкая задача, то максимальные затраты локальных вычислительных ресурсов алгоритмом распознавания должны быть ограничены.

Все существующие системы распознавания речи имеют схожую структуру [3] (рис. 2).



Рис. 2. Структура систем распознавания речи

Технология распознавания речи следующая. Речевой сигнал читается из аудиофайла либо записывается с помощью аудиокарты. Полученный сигнал передается на внешний интерфейс (front-end) системы распознавания речи, реализующий функции получения входного сигнала, его предварительной обработки, разбиения на кадры и выделения признаков.

Обработка сигнала включает автоматическую регулировку уровней сигнала, фильтрацию шумов, выделение эха, обнаружение наличия речевого фрагмента (voice activity detection, VAD), определение конца фразы. Затем

подготовленный сигнал разбивается на короткие кадры (frames) продолжительностью от 10 до 300 мс в различных системах.

После раскадровки для каждого фрейма определяется вектор признаков, при этом используется, как правило, быстрое преобразование Фурье. Однако немногие системы распознавания речи используют такие параметры, как единственные. Обычно вместе с этими характеристиками используются другие, например кепстральные характеристики и их производные. Основным методом получения признаков для дальнейшего распознавания речи является метод выделения мел-кепстральных коэффициентов (Mel Frequency Cepstral Coefficients, MFCC) [2, 3], позволяющий по вычисленному кепстру использовать сигнал возбуждения после фильтра речевого тракта, что значительно повышает точность распознавания речи в дикторонезависимых системах.

Поток признаков поступает на вход акустического модуля системы, где происходит распознавание структурных единиц речи. Акустический модуль, реализующий конкретную технологию распознавания, – основной в системе. Каждый вектор признаков, полученный от внешнего интерфейса системы, сравнивается с имеющимися акустическо-фонетическими образцами, хранящимися в базе данных.

## 2. Основные методы распознавания структурных единиц речи

В акустическом модуле в основном применяют глубокие рекуррентные нейронные сети или скрытые марковские модели на основе гауссовых смесей распределений.

Метод скрытых марковских моделей требует представления слов в виде последовательности состояний процесса, соответствующих акустическим фрагментам (единицам) речи и в пространстве признаков описываемых функциями плотности вероятности. Математический аппарат марковских цепей, используемый в применении к случайным процессам, известен с 1960-х гг. Первые применения его к распознаванию речи относятся к 1970-м гг. [2].

Цепь Маркова для представления речи выглядит как граф состояний  $S_i$  с переходами в дискретные моменты времени. При этом вероятность  $a_{ij}$  перехода в следующее состояние определяется только предыдущим состоянием процесса (рис. 3) [2].

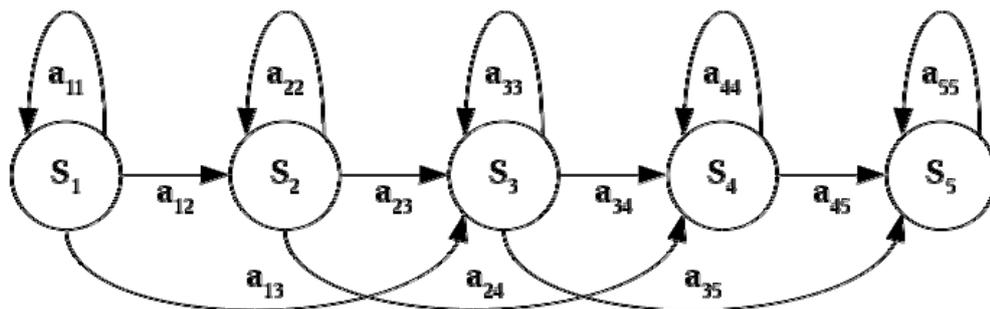


Рис. 3. Структура скрытой марковской модели в применении к речи

Обучение Марковской цепи заключается в определении функций плотности вероятности состояний и матрицы вероятности переходов по априорным данным. В качестве априорных используются аудиозаписи речевых сигна-

лов и соответствующие им тексты. Некоторые записи, используемые на первом этапе обучения, размечены специалистами в области фонетики и лингвистики на структурные единицы, для которых будут создаваться марковские модели. Эти записи разбиваются на короткие кадры и далее для каждой фонемы переводятся в последовательность векторов-признаков. По множеству признаков для фонем строятся функции плотности вероятности, которые можно аппроксимировать, например, конечным количеством гауссовых функций:

$$p(\mathbf{x} | \omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i)^t \Sigma_i^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i)\right),$$

где  $x$  – классифицируемый элемент;  $\omega_i$  – один из  $n$  возможных классов;  $\Sigma_i$  – матрица ковариации данного класса;  $\boldsymbol{\mu}_i$  – математические ожидания данного класса.

Для обучения может использоваться EM-алгоритм либо его частные реализации. Реализация EM-алгоритма представляет собой итерации двух шагов [3].

На **Е-шаге** оценивается вектор ожидаемых значений (expectation) скрытых переменных  $G$  по вектору текущих значений параметров  $\theta$ .

Для этого вычисляется условная вероятность  $p(x, \theta_j)$  того, что объект  $x$  получен из  $j$ -й компоненты смеси:  $p(x, \theta_j) = p(x)P(\theta_j | x) = \omega_j p_j(x)$ .

Из формулы Байеса по выражению

$$P(\theta_j | x_i) = g_{ij} = \frac{\omega_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k \omega_s p_s(x_i)}$$

определяется апостериорная вероятность того, что обучающий объект  $x_i$  получен из  $j$ -й компоненты смеси. При этом

$$\sum_{j=1}^k g_{ij} = 1 \text{ для любого } i = 1, \dots, m$$

есть полная вероятность принадлежности объекта  $x_i$  одной из  $k$  компонент смеси.

Величины  $p(x, \theta_j)$  и  $g_{ij}$  используют в качестве скрытых переменных.

На **М-шаге** (maximization) осуществляется максимизация логарифма полного правдоподобия:

$$Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k \omega_j p_j(x_i) \rightarrow \max_{\Theta}$$

В результате решения оптимизационной задачи Лагранжа находим

$$\omega_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_{ij}, j = 1, \dots, k.$$

$$\theta_j = \arg \max_{\theta} \sum_{i=1}^m g_{ij} \ln \varphi(x_i, \theta), \quad j = 1, \dots, k.$$

Таким образом, на М-шаге определяются веса компонент смеси  $\omega_j$  и оцениваются их параметры  $\theta_j$  путем решения  $k$  независимых оптимизационных задач.

Для смесей нормальных распределений, обычно используемых в распознавании речи, результаты E- и M-шага алгоритма запишутся следующим образом:

$\theta = (\omega_1, \dots, \omega_k; \mu_1, \dots, \mu_k; \sigma_1, \dots, \sigma_k)$  – вектор параметров,

$$p_j(x) = N(x, \mu_j, \sigma_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left(-\frac{(x - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) - \text{плотность распределения.}$$

E-шаг:

$$g_{ij} = \frac{\omega_j N(x_i, \mu_j, \sigma_j)}{\sum_{s=1}^k \omega_s N(x_i, \mu_s, \sigma_s)}.$$

M-шаг:

$$\omega_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_{ij}, \quad \mu_j = \frac{1}{m\omega_j} \sum_{i=1}^m g_{ij} x_i, \quad \sigma_j^2 = \frac{1}{m\omega_j} \sum_{i=1}^m g_{ij} (x_i - \mu_j)^2, \quad j = 1, \dots, k.$$

На этом же этапе обучения скрытых марковских моделей после выполнения EM-алгоритма программа анализирует длительности фрагментов и строит их гистограммы для вычисления вероятностей выхода из состояний, соответствующих данным структурным единицам.

Далее, зная оценки функций плотности вероятности и вероятностей перехода, используют алгоритм Баума – Уэлша или Витерби для максимизации вероятностей порождения априорных последовательностей признаков цепочками состояний [2].

На последнем этапе привлекаются неразмеченные речевые сигналы. Полученные параметры состояний итеративно применяют к фрагментам сигналов для автоматического разбиения на структурные единицы. Такой метод называется «принудительным выравниванием» (forced alignment). Далее выровненные фрагменты используются для дальнейшего уточнения параметров Марковской цепи.

Марковская модель на основе гауссовских смесей является одним из наиболее распространенных и оптимизированных аппаратов распознавания речи [4]. Поэтому эта технология распознавания остается одной из наиболее эффективных.

В последние десятилетия с развитием вычислительной техники и систем параллельных вычислений активно разрабатывалась и совершенствовалась нейросетевая технология распознавания образов, позволив повысить точность распознавания речи по сравнению с классическими моделями.

Дальнейшие успехи в распознавании речи связаны с использованием глубоких нейронных сетей, состоящих из многих слоев. Одним из методов обучения многослойных нейронных сетей является послойное обучение [1], в том числе с использованием автоэнкодерных сетей. Процесс обучения выглядит следующим образом. В качестве целевой функции для первого скрытого слоя рассматривается входной вектор признаков. Исходный вектор может содержать несколько последовательных мел-спектральных или мел-кепстральных векторов-признаков. Следующий слой нейронной сети обучают таким же образом воспроизводить выходные сигналы предыдущего слоя. Так обучают до 5–7 слоев. После того как инициализация первых слоев проведена, применяют известный алгоритм обратного распространения ошибки для всей сети с целевой функцией, отражающей принадлежность входного сигнала к соответствующему трифону.

Данный подход многократно превосходит классический подход на основе гауссовых смесей по эффективности и точности: многослойная сеть, обученная на речевом материале в 309 ч речи, показала лучшие результаты, чем метод с гауссовыми смесями, обученный на 2000 ч речи [2].

На выходе акустического блока вне зависимости от его реализации получают поток распознанных структурных единиц речи с вероятностями правдоподобия, который поступает далее на вход лингвистического модуля. Задача этой подсистемы – найти наилучшее соответствие входного потока фонем и заданных в словаре слов и затем соответствие потока слов употребляемым в языке фразам. В зависимости от объема используемого словаря и действующих синтаксических правил применяются различные стратегии поиска и отсева. При этом также часто используется вероятностная система сравнения результатов [3].

Как правило, данный блок содержит в себе реализации словаря и лингвистической модели. На основе последней часто строят конечный автомат, наиболее вероятная цепочка переходов между состояниями которого и есть произнесенная пользователем фраза. В настоящее время также находят применение другие лингвистические модели, например, на основе нейронных сетей.

### **Заключение**

Таким образом, в настоящее время существует несколько типовых реализаций систем распознавания речи. Основные их отличия заключаются в используемой технологии распознавания структурных единиц речи. Наиболее проработанной в настоящее время является технология, основанная на скрытых марковских моделях. Однако она имеет потенциальные ограничения на объем данных для описания модели при использовании в системах специального назначения. Перспективным направлением является использование нейронных сетей, однако данные технологии пока находят применение лишь при наличии больших объемов размеченных записей речи и требуют высокопроизводительных вычислительных ресурсов. Обе технологии потенциально могут применяться в голосовом интерфейсе управления систем специального назначения, но для окончательных выводов требуется проведение исследований эффективности распознавания при ограничениях на вычислительные ресурсы и особенностей функционирования в условиях работы операторов систем специального назначения.

**Библиографический список**

1. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс : пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд., испр. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с.
2. **Тампель, И. Б.** Автоматическое распознавание речи – основные этапы за 50 лет / И. Б. Тампель // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 6. – С. 957–968.
3. **Huang, X.** Spoken language processing: a guide to theory, algorithm, and system development / X. Huang, A. Acero. – Prentice Hall, 2001. – 1008 p.
4. **Bourlard, H.** Towards increasing speech recognition error rates / H. Bourlard, H. Hermansky, N. Morgan // Speech Communication. – 1996. – Vol. 18, № 3. – P. 205–231. – DOI 10.1016/0167-6393(96)00003-9

**References**

1. Khaykin S. *Neuronnye seti: polnyy kurs: per. s angl.* [Neural networks: translation from English]. 2nd ed., corr. Moscow: Vil'yams, 2006, 1104 p. [In Russian]
2. Tampil' I. B. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of informational technologies, mechanics and optics]. 2015, vol. 15, no. 6, pp. 957–968. [In Russian]
3. Huang X., Acero A. *Spoken language processing: a guide to theory, algorithm, and system development.* Prentice Hall, 2001, 1008 p.
4. Bourlard H., Hermansky H., Morgan N. *Speech Communication.* 1996, vol. 18, no. 3, pp. 205–231. DOI 10.1016/0167-6393(96)00003-9

---

**Алексеев Илья Владимирович**

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

E-mail: aius@pnzgu.ru

**Alekseev Ilya Vladimirovich**

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

**Митрохин Максим Александрович**

доктор технических наук, заведующий кафедрой вычислительной техники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: vt@pnzgu.ru

**Mitrokhin Maksim Aleksandrovich**

Doctor of engineering sciences, head of sub-department of computer engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Алексеев, И. В. Современные методы распознавания речи для построения голосового интерфейса управления системами специального назначения / И. В. Алексеев, М. А. Митрохин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 3–10. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-1.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ АВТОРЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Выявление и прогнозирование состояния технических средств, социально-экономических систем является актуальной задачей. Рассматривается метод построения моделей идентификации и прогнозирования на основе теоретических допущений регрессионного анализа и динамических систем. Отличительной особенностью методики является представление объекта в виде динамической системы с выделенной обратной связью, элементами нелинейности и запаздывания. Для оценки качества моделей использовались теоретические положения факторного и корреляционного анализа.

*Результаты.* Выполнено обоснование структуры и параметров моделей для решения задач идентификации и прогнозирования состояния технических объектов и социально-экономических систем.

*Выводы.* Предложенная авторегрессионная модель является эффективным инструментом при решении задач идентификации и прогнозирования поведения динамических объектов и социально-экономических систем.

**Ключевые слова:** авторегрессионная модель, множественная регрессия, авторегрессия, идентификация параметров, факторный и корреляционный анализ.

*P. P. Makarychev, A. Yu. Afonin, S. V. Shibanov*

## OBJECT'S STATE PREDICTION ON THE BASIS OF THE AUTOREGRESSIVE MODEL

### Abstract.

*Background.* Identification and forecasting of the state of technical means, social and economic systems is an urgent task. In the article the method of construction of models of identification and forecasting on the basis of theoretical assumptions of the regression analysis and dynamic systems is considered. A distinctive feature of the technique is the representation of the object in the form of a dynamic system with a dedicated feedback, elements of nonlinearity and delay. The concepts of factor and correlation analysis were used to assess the quality of the models.

*Results.* The substantiation of the structure and parameters of models for solving the problems of identification and forecasting the state of technical objects and socio-economic systems.

*Conclusions.* The proposed autoregressive model is an effective tool in solving the problems of identification and prediction of the behavior of dynamic objects and socio-economic systems.

**Keywords:** autoregressive model, multiple regression, autoregression, parameter identification, factor and correlation analysis.

### Введение

Регрессионный анализ представляет собой классический статистический метод. Регрессионные методы успешно используются при решении задач прогнозирования состояний объектов и идентификации параметров моделей [1–4]. Регрессионные модели могут быть как линейными, так и нелинейными с любым числом входов и выходов. Однако эти модели, как правило, отражают функциональные зависимости только в системах без обратных связей (открытых системах). Для моделирования систем с обратными связями применяют «принцип  $\Delta t$ » [3, 5], который сводится к синтезу для исследуемого объекта некоторого моделирующего алгоритма, имитирующего функционирование элементов сложной системы.

Регрессионный анализ своей целью имеет вывод, определение (идентификацию) уравнения регрессии, включая статистическую оценку его параметров. Уравнение регрессии позволяет найти значение выходной (зависимой) переменной, если известны величины независимых переменных. По числу факторов различают одно-, двух- и многофакторные уравнения регрессии. Аналогично случаю парной регрессии одна из важных задач спецификации модели множественной регрессии заключается в выборе функциональной зависимости. Экспериментальная основа построения множественной эмпирической регрессии – многомерная выборка. В случае линейной функциональной зависимости имеет вид

$$y_k = b_0 + b_1 x_k^1 + \dots + b_m x_k^m + \varepsilon_n; \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $n$  – объем выборки (объем экспериментальных данных);  $m$  – число факторов;  $x_k^i$  – наблюдение  $i$ -й объясняющей переменной в момент времени  $k\Delta t$ ;  $\varepsilon$  – случайная переменная (шум).

Выбор входных (объясняющих) переменных является основным моментом спецификации модели множественной регрессии. Если характер зависимости известен заранее и определен список объясняющих переменных, то задача спецификации модели состоит только в оценивании неизвестных параметров функциональной зависимости. В случае достаточного числа наблюдений независимых (объясняющих) переменных и отсутствия априорной модели используют различные эмпирические процедуры пошагового отбора факторов.

Авторегрессионный процесс порядка  $p$  в отсутствие входных переменных определяется следующим образом:

$$y_k = a_0 + a_1 y_{k-1} + \dots + a_{k-p} y_{k-p} + \varepsilon_k, \quad (2)$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_{k-p}$  – параметры модели авторегрессии (коэффициенты авторегрессии);  $\varepsilon_k$  – белый шум.

Простейшими примерами авторегрессии (2) являются модели процессов первого ( $p = 1$ ) и второго ( $p = 2$ ) порядков. Модель (2) служит полезной стохастической моделью описания временных рядов, которыми характеризуется система, осциллирующая под воздействием внутренних сил [6–11].

**Цель и задачи.** Предположим, что по результатам наблюдений в течение последовательности лет определено подмножество входных (независимых) показателей деятельности региона.

$$A_1 = \{PPL, PPLA, ZPL, PPO, OPF\},$$

где  $PPL$  – численность населения;  $PPLA$  – численность экономически активного населения;  $ZPL$  – средняя оплата труда (руб.);  $PPO$  – прибыль организаций (млн руб.);  $OPF$  – стоимость основных фондов (млн руб.).

При этом подмножество выходных (зависимых) показателей деятельности региона в течение той же последовательности лет имеет вид

$$A_2 = \{PIN, FOT, POUT, OGS, VI, VT, INF, VRP\},$$

где  $PIN$  – денежные доходы населения (млн руб.);  $FOT$  – фонд оплаты труда (млн руб.);  $POUT$  – покупка товаров и услуг (млн руб.);  $OGS$  – выпуск товаров и услуг (млн руб.);  $VI$  – объем промышленной продукции (млн руб.);  $VT$  – оборот торговли (млн руб.);  $VA$  – объем сельскохозяйственной продукции;  $INV$  – инвестиции в основной капитал (млн руб.);  $VRP$  – валовый региональный продукт (млн руб.).

Обобщенная схема динамической системы приведена на рис. 1.

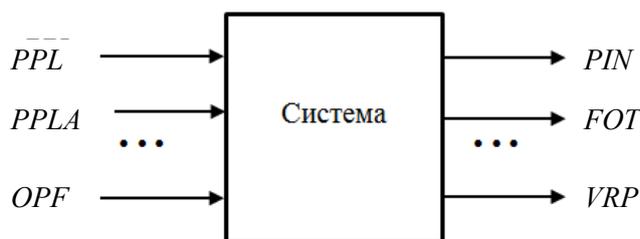


Рис. 1. Обобщенная структура системы

В соответствии с рис. 1 в базе данных должны храниться записи (кортежи данных). Запись кортежа (сущности) имеет вид

$$\langle \text{год}, PPL, PPLA, ZPL, \dots, OPF, PIN, FOT, \dots, VPR \rangle,$$

где год – год регистрации значений входных и выходного показателей.

Предположим, что аналитиком, осуществляющим регрессионный анализ, сделано предположение: показатель  $FOT$  функционально зависит от входных показателей  $PPLA, ZPL$ . Для дальнейшего изложения предлагаемого подхода к построению моделей установим соответствие между атрибутами кортежей и математическими переменными:

$$PPLA \rightarrow x_k^1, ZPL \rightarrow x_k^2, FOT \rightarrow y_k, k = 1, 2, \dots, m,$$

где  $k$  – номер кортежа;  $m$  – общее количество кортежей или записей о наблюдениях за независимыми показателями  $PPLA, ZPL$  и зависимым показателем  $FOT$ .

Представим функциональную зависимость показателя  $FOT$  от показателей  $PPLA$  и  $ZPL$  в виде концептуальной модели системной динамики (рис. 2).

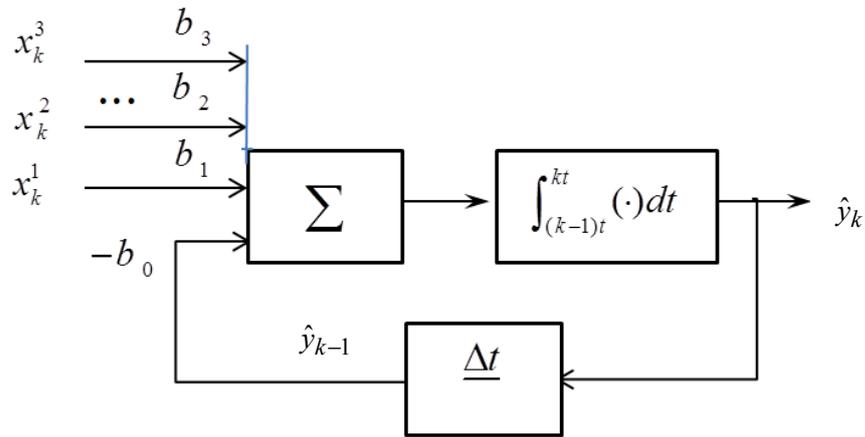


Рис. 2. Концептуальная модель системы

Концептуальная модель содержит следующие элементы. Сумматор входных сигналов  $x_k^j$ ,  $j=1,2,3$ , где  $k=1,2,\dots,m$  – сокращенная запись моментов времени  $k\Delta t$ ,  $\Delta t$  – шаг дискретизации. Интегратор осуществляет интегрирование сигнала с выхода сумматора, например методом правых прямоугольников. Рассчитанный выходной сигнал  $\hat{y}_k$  является выходным сигналом динамической системы. Сигнал  $\hat{y}_{k-1}$  – выходной сигнал системы, задержанный на шаг дискретизации. Элемент обратной связи характеризуется коэффициентом передачи  $b_0$  и задержкой на величину шага дискретизации  $\Delta t$ . Шаг дискретизации определяется интервалом времени между двумя записями о наблюдаемых переменных в хранилище данных.

Таким образом, обобщенная математическая модель анализируемой динамической системы имеет следующий вид:

$$\hat{y}_k = f(\hat{y}_{k-1}, x_k^1, x_k^2, x_k^3, \Delta t), \hat{y}_0 = y_0, k=1,2,\dots,m,$$

где  $\hat{y}_0$  – выходной сигнал, наблюдаемый в момент времени  $t_0 = 0$ .

Отличительная особенность модели, представленной на рис. 2, состоит в том, что в системе выделен элемент обратной связи, а процесс интегрирования может осуществляться различными известными методами, включая методы прямоугольников, метод трапеций и др. [5].

### Построение модели регрессионного анализа

На основе заданной структуры, элементов модельного представления динамической системы, с учетом интегрирования методом правых прямоугольников можно записать следующее конечно-разностное уравнение:

$$\hat{y}(k\Delta t) = -b_0\hat{y}((k-1)\Delta t) + b_1\Delta t \cdot x_1(k\Delta t) + \dots + b_n\Delta t \cdot x_n(k\Delta t), \quad (3)$$

где  $k=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n, \hat{y}_0 = y_0$ .

Используя сокращенную запись моментов времени  $k\Delta t = t_k$ , выражение можно записать в более компактном виде:

$$\hat{y}_k = \left( -b_0 \hat{y}_{k-1} + \sum_{j=1}^m b_j x_k^j \right) \Delta t, \quad k=1,2,\dots,m, \quad j=1,2,\dots,n. \quad (4)$$

Учитывая возможность определения параметров модели (1), (2) методами регрессионного анализа, запишем (4) в виде

$$y_k = B_0 y_{k-1} + \sum_{j=1}^n B_j x_k^j, \quad k=1,2,\dots,m, \quad (5)$$

где  $B_0 = b_0 \Delta t, B_1 = b_1 \Delta t, \dots, B_n = b_n \Delta t$ .

Из выражения (5) следует, что представление процесса  $FOT(PPLA, ZPLA)$  в виде авторегрессионной модели включает также элементы множественной нелинейной (билинейной) регрессии (рис. 3).

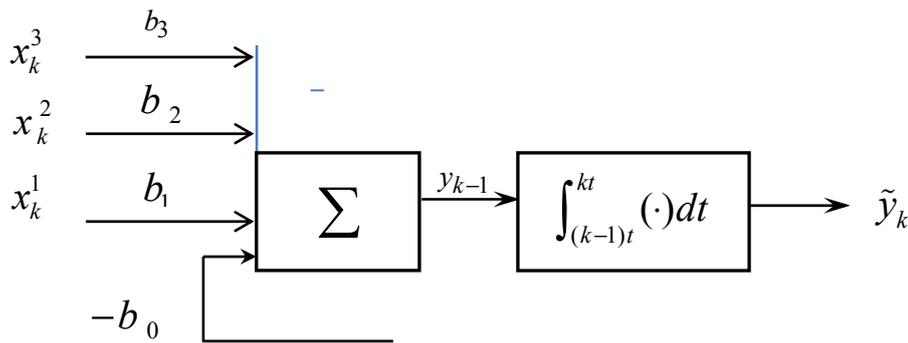


Рис. 3. Модель регрессионного анализа

Предположим, что в распоряжении аналитика имеется совокупность наблюдаемых входных и выходных показателей, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

$k$	$y_k$	$y_{k-1}$	$x_k^1$	$x_k^2$	$x_k^3 = x_k^1 x_k^2$
0	$2,889 \cdot 10^4$	2,531	714,5	$5,207 \cdot 10^3$	$714,5 \cdot 5,207 \cdot 10^3$
1	$3,441 \cdot 10^4$	$2,889 \cdot 10^4$	711,2	$6,342 \cdot 10^3$	$711,2 \cdot 6,342 \cdot 10^3$
2	$4,589 \cdot 10^4$	$3,441 \cdot 10^4$	685,9	$8,566 \cdot 10^3$	$685,9 \cdot 8,566 \cdot 10^3$
...	...	...	...	...	...
$m-2$	$1,055 \cdot 10^5$	$9,8179 \cdot 10^4$	705,6	$2,064 \cdot 10^4$	$705,6 \cdot 2,064 \cdot 10^4$
$m-1$	$1,140 \cdot 10^5$	$1,055 \cdot 10^5$	711,0	$2,239 \cdot 10^4$	$711,0 \cdot 2,239 \cdot 10^4$
$m$	$1,193 \cdot 10^5$	$1,140 \cdot 10^5$	701,9	$2,319 \cdot 10^4$	$701,9 \cdot 2,319 \cdot 10^4$

Из табл. 1 видно, что у аналитика имеется  $m+1$  наблюдение за выходным сигналом  $y_k$  и входными сигналами  $x_k^1, x_k^2$  с шагом  $\Delta t$ . Для решения задачи регрессионного анализа определим следующие математические объекты. Вектор значений выходного сигнала:

$$\mathbf{Y}^T = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad \dots \quad y_{m-2} \quad y_{m-1} \quad y_m]. \quad (6)$$

Матрица значений наблюдаемых переменных  $y_{k-1}, x_k^1, x_k^2, x_k^3$ :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} y_0 & x_1^1 & x_1^2 & x_1^3 \\ y_1 & x_2^1 & x_2^2 & x_2^3 \\ y_2 & x_3^1 & x_3^2 & x_3^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{m-3} & x_{m-2}^1 & x_{m-2}^2 & x_{m-2}^3 \\ y_{m-2} & x_{m-1}^1 & x_{m-1}^2 & x_{m-1}^3 \\ y_{m-1} & x_m^1 & x_m^2 & x_m^3 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

На основе выражений (6), (7) можно составить векторно-матричное уравнение вида

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{B}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{B}$  – вектор неизвестных параметров авторегрессии и множественной нелинейной регрессии. Используя операции транспонирования и нахождения обратной матрицы, преобразуем уравнение (8) к виду [4]:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}. \quad (9)$$

В результате решения векторно-матричного уравнения (9) при значениях  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{X}$ , приведенных в табл. 1, получим

$$\mathbf{B}^T = \left[ -1,7220 \cdot 10^{-2} \quad 4,0936 \quad 2,9581 \quad 2,9782 \cdot 10^{-3} \right].$$

Из последнего выражения следует, что коэффициент обратной связи в модели отрицательный и меньше единицы. Это обстоятельство подтверждает необходимость учета элемента обратной связи как в модели системной динамики, так и авторегрессионной модели. Следовательно, можно для расчета выходной (зависимой) переменной составить уравнение вида

$$\tilde{y}_k = B_0 X_{k,0} + B_1 X_{k,1} + B_2 X_{k,2} + B_3 X_{k,3}, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

На основе значений параметров регрессионной модели (10) можно также определить коэффициенты модели системной динамики [1, 2]. Для метода прямоугольников имеем:

$$b_0 = -B_0/\Delta t; \quad b_1 = B_1/\Delta t; \quad b_2 = B_2/\Delta t; \quad b_3 = B_3/\Delta t.$$

#### Анализ качества моделей

Наблюдаемые  $y_k$  и рассчитанные значения выходного сигнала по модели регрессионного анализа  $\tilde{y}_k$  и модели динамической системы  $\hat{y}_k$  фонда оплаты труда приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что значения  $\tilde{y}, \hat{y}$ , рассчитанные с использованием модели регрессионного анализа и модели динамической системы, практически совпадают. Графики относительных отклонений, рассчитанных значений

переменной с использованием авторегрессионной модели  $v_k = (\tilde{y}_k - y_k)/y_k$  и динамической модели  $z_k = (\hat{y}_k - y_k)/y_k$  приведены на рис. 4. Графики  $v_k$ ,  $z_k$  с целью качественного воспроизведения разнесены на величину 0,005.

Таблица 2

Значения выходных параметров  $y$ ,  $\tilde{y}$ ,  $\hat{y}$

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Год	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
$y$ (млн руб.)	6186	6673	7340	8279	9818	1055	1140	1192	$1204 \cdot 10^2$
$\tilde{y}$ (млн руб.)	6156	6705	7364	8354	9806	1056	1147	1180	$1228 \cdot 10^2$
$\hat{y}$ (млн руб.)	6157	6705	7364	8353	9805	1056	1147	1180	$1228 \cdot 10^2$

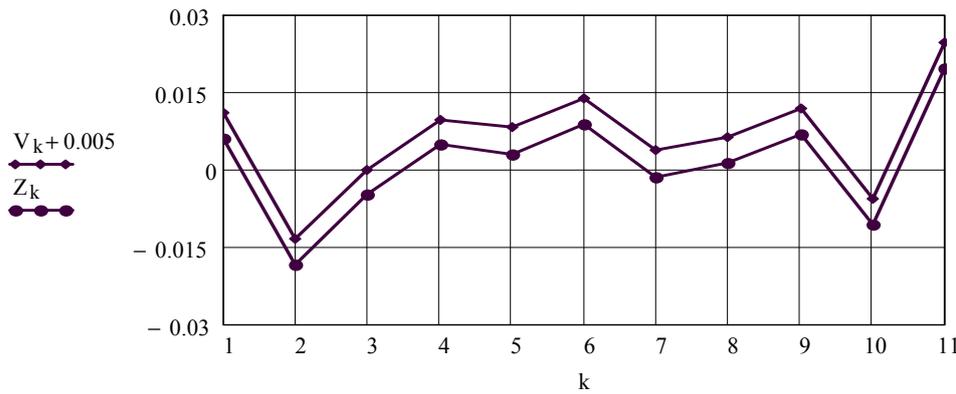


Рис. 4. Графики функциональной зависимости  $\delta\tilde{y}_k$ ,  $\delta\hat{y}_k$

Качество авторегрессионной модели оценивалось путем расчета коэффициентов парной регрессии  $R_{y,x}, R_{x,x}$  с использованием формулы для расчета линейного коэффициента корреляции [8, 9]:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (11)$$

где  $\bar{y}, \bar{x}$  – средние значения наблюдаемых выходной и входной переменных соответственно.

На основе рассчитанных линейных коэффициентов корреляции могут быть сформированы матрицы парных корреляций. Матрица корреляций между входными и выходной переменными имеет вид

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & R_{y,x_1} & R_{y,x_2} & R_{y,x_3} \\ R_{y,x_1} & 1 & R_{x_1,x_2} & R_{x_1,x_3} \\ R_{y,x_2} & R_{x_1,x_2} & 1 & R_{x_2,x_3} \\ R_{y,x_3} & R_{x_1,x_3} & R_{x_2,x_3} & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица корреляций между входными переменными имеет вид

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & R_{x_1, x_2} & R_{x_1, x_3} \\ R_{x_1, x_2} & 1 & R_{x_2, x_3} \\ R_{x_1, x_3} & R_{x_2, x_3} & 1 \end{bmatrix}.$$

Расчет множественного коэффициента корреляции выходной переменной  $y_k$  с факторами  $x_k^1, x_k^2, x_k^3$  выполнен по формуле

$$K_r = \sqrt{1 - |M_1|/|M_2|}.$$

Расчетное значение коэффициента корреляции  $K_r = 0,99$ , что подтверждает высокое качество рассмотренной выше авторегрессионной модели.

Оценка коэффициента детерминации осуществлена по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}, \quad (12)$$

где  $m$  – число наблюдений;  $y_i$  – значение объясняемой переменной;  $\bar{y}_i$  – среднее значение объясняемой переменной;  $\tilde{y}_i$  – модельные значения, рассчитанные на основе оцененных параметров регрессионной модели (7).

Для авторегрессионной модели (5) расчетное значение коэффициента детерминации  $R^2 = 0,99$ .

### Решение задачи прогнозирования

Для расчета прогнозируемых значений входных переменных  $PPLA$ ,  $ZPL$  использована модель авторегрессионного анализа одного и того же вида. Структурная схема модели приведена на рис. 4. Модель содержит сумматор, интегратор, элемент задержки, элементы умножения (возведения в квадрат) и задания весовых коэффициентов.

В соответствии со схемой на рис. 5 расчетное значение входных переменных  $PPLA$ ,  $ZPL$  определяется по формуле

$$\tilde{x}_k = b_0 + b_1 x_{k-1} + b_2 x_{k-2} + b_3 x_{k-1}^2 + b_4 x_{k-2}^2, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

Для средней оплаты труда  $ZPL$  постоянные коэффициенты авторегрессионной модели имеют следующие значения:

$$b_0 = 6,758 \cdot 10^3, \quad b_1 = -3,555 \cdot 10^{-1}, \quad b_2 = 9,545 \cdot 10^{-1},$$

$$b_3 = 3,664 \cdot 10^{-5}, \quad b_4 = -3,094 \cdot 10^{-5}.$$

Наблюдаемые  $x_k^2$  и расчетные значения  $\tilde{x}_k^2$  приведены в табл. 3.

Наблюдаемые и расчетные значения  $PPLA$  приведены в табл. 4.

Из табл. 3, 4 видно, что расчетные значения входных переменных  $\tilde{x}_k^1$ ,  $\tilde{x}_k^2$  имеют относительные отклонения  $\pm 6\%$  в начале интервала наблюдения и

$\pm 2\%$  в конце этого интервала, которые допустимы для прогнозирования значения выходной переменной. На рис. 6 приведены графики относительной величины отклонений  $\Delta Z_k = (\tilde{x}_k^1 - x_k^1) / x_k^1$  и  $\Delta Y = (\tilde{x}_k^2 - x_k^2) / x_k^2$ .

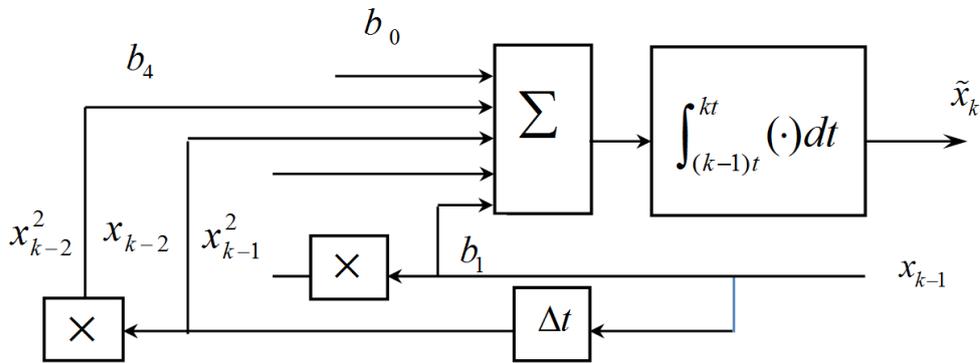


Рис. 5. Модель авторегрессионного анализа

Таблица 3

Наблюдаемые  $x_k^2$  и рассчитанные значения  $\tilde{x}_k^2$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_k^2$ (руб.)	11720	13030	14420	16360	19130	20640	22390	23190	25570
$\tilde{x}_k^2$ (руб.)	11210	13530	15290	16440	18080	20700	21970	23690	24080

Таблица 4

Наблюдаемые  $x_k^1$  и рассчитанные значения  $\tilde{x}_k^1$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_k^1$ (тыс. чел.)	709,3	688,8	682,8	689,1	702,8	705,6	711	701,9	708,6
$\tilde{x}_k^1$ (тыс. чел.)	698,0	697,6	701,5	690,3	697,7	703,3	704,2	699,3	706,5

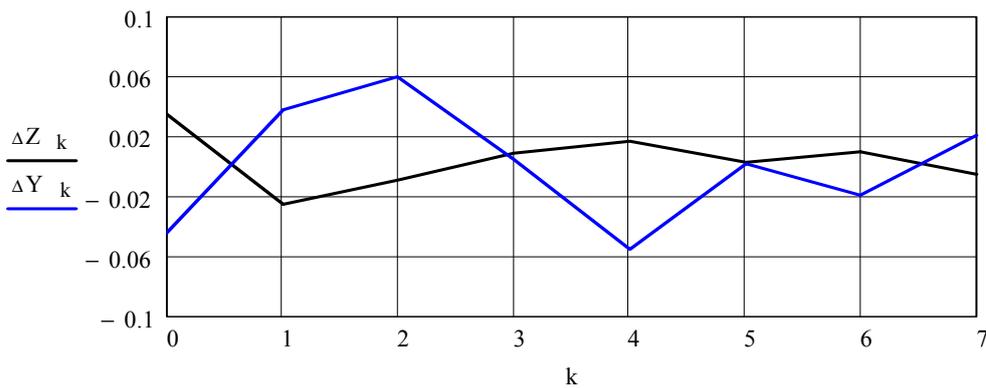


Рис. 6. Графики относительной величины отклонений  $\delta P$  и  $\delta L$

### **Результаты и обсуждения**

Анализ графиков на рис. 6 позволяет утверждать, что относительное отклонение значений  $x_k^1, x_k^2$ , рассчитанных с использованием предлагаемой модели авторегрессионного анализа, не превышает 6 %. В конце интервала наблюдения относительное отклонение значений не превышает 2 %.

### **Заключение**

При разработке моделей регрессионного и авторегрессионного анализа использовано модельное представление о наблюдаемых функциональных зависимостях «вход-выход» с использованием концепций системной динамики. Это позволяет построить более качественные регрессионные и авторегрессионные модели, содержащие элементы как линейной и нелинейной множественной регрессии, так и авторегрессии. Для оценки качества модели использованы показатели, включая коэффициенты парной регрессии, множественной корреляции, индекса корреляции. Модельные представления регрессионного анализа и системной динамики могут взаимно дополнять друг друга. Например, разработке модели регрессионного анализа может предшествовать разработка модели системной динамики, отражающей функциональные зависимости между входными и выходными переменными процесса

### **Библиографический список**

1. **Радченко, С. Г.** Основные концепции множественного регрессионного анализа / С. Г. Радченко // Математические машины и системы. – 2013. – № 1. – С. 150–155.
2. **Дилигенская, А. Н.** Идентификация объектов управления / А. Н. Дилигенская. – Самара : СамГТУ, 2009. – 136 с.
3. **Isermann, R.** Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications / Rolf Isermann, Marco Münchhof. – Darmstadt, Germany : Springer, 2010. – 710 p.
4. **Суворов, Н. В.** Метод построения регрессионных моделей с динамическими структурными параметрами / Н. В. Суворов // Проблемы прогнозирования. – 2005. – № 4. – С. 143–155.
5. **Макарычев, П. П.** Моделирование многокомпонентных систем на основе маркированных графов / П. П. Макарычев, М. А. Волгина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – 156 с.
6. **Чокоей, В. М.** Инструменты регрессионного анализа и прогнозирования процессов в авиационно-технических системах / В. М. Чокоей // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2016. – № 4 (11). – С. 1–11.
7. **Краковский, Ю. М.** Алгоритм интервального прогнозирования динамических показателей на основе робастной вероятностной кластерной модели / Ю. М. Краковский, А. Н. Лузгин // Наука и образование. – 2016. – № 11. – С. 113–126.
8. A Simple Regression Model for Electrical Energy Forecasting / J. Kumaran @ Kumar, G. Ravi // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – Vol. 3, iss. 8. – P. 11331–11335.
9. **Bates D. M.** Nonlinear Regression Analysis and Its Applications / D. M. Bates, D. G. Watts. – New York : Wiley, 2007. – 392 p. [DjVu, ENG]
10. **Montgomery, D. C.** Introduction to Linear Regression Analysis / Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, G. Geoffrey Vining. – 5th Edition. – New York : John Wiley & Sons, 2012. – 672 p.

11. **Mangan, N. M.** Model selection for dynamical systems via sparse regression and information criteria / N. M. Mangan, J. N. Kutz, S. L. Brunton, J. L. Proctor // *Proceedings of the royal society a. Mathematical, physical and engineering sciences.* – 2017. – № 8. – С. 1–16.

### References

1. Radchenko S. G. *Matematicheskie mashiny i sistemy* [Mathematical machines and systems]. 2013, no. 1, pp. 150–155. [In Russian]
2. Diligenskaya A. N. *Identifikatsiya ob"ektov upravleniya* [Identification of controlled objects]. Samara: SamGTU, 2009, 136 p. [In Russian]
3. Isermann R., Münchhof M. *Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications.* Darmstadt, Germany: Springer, 2010, 710 p.
4. Cuvorov N. V. *Problemy prognozirovaniya* [Forecasting problems]. 2005, no. 4, pp. 143–155. [In Russian]
5. Makarychev P. P., Volgina M. A. *Modelirovanie mnogokomponentnykh sistem na osnove markirovannykh grafov* [Multidimensional system simulation on the basis of marked graphs]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, 156 p. [In Russian]
6. Chokoy V. M. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk* [Crede experto: transport, society, education, language]. 2016, no. 4 (11), pp. 1–11. [In Russian]
7. Krakovskiy Yu. M., Luzgin A. N. *Nauka i obrazovanie* [Science and education]. 2016, no. 11, pp. 113–126. [In Russian]
8. J. Kumaran @ Kumar, Ravi G. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering.* 2014, vol. 3, iss. 8, pp. 11331–11335.
9. Bates D. M., Watts D. G. *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications.* New York: Wiley, 2007, 392 p. [DjVu, ENG]
10. Montgomery D. C., Peck E. A., G. Geoffrey Vining *Introduction to Linear Regression Analysis.* 5th Edition. New York: John Wiley & Sons, 2012, 672 p.
11. Mangan N. M., Kutz J. N., Brunton S. L., Proctor J. L. *Proceedings of the royal society a. Mathematical, physical and engineering sciences.* 2017, no. 8, pp. 1–16.

---

#### **Макарычев Петр Петрович**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой математического  
обеспечения и применения ЭВМ,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: makpp@yandex.ru

#### **Makarychev Petr Petrovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of software  
and computer application, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

#### **Афонин Александр Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра математического обеспечения  
и применения ЭВМ, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: afonin@pnzgu.ru

#### **Afonin Aleksandr Yur'evich**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of software  
and computer application, Penza  
State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Шибанов Сергей Владимирович***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра математического обеспечения  
и применения ЭВМ, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: serega@pnzgu.ru

***Shibanov Sergey Vladimirovich***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of software  
and computer application, Penza  
State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Макарычев, П. П. Прогнозирование состояния объекта на основе авто-регрессионной модели / П. П. Макарычев, А. Ю. Афонин, С. В. Шибанов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 11–22. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-2.

## **ФУНКЦИОНАЛЬНО-БЛОЧНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕХОДОВ СОСТОЯНИЙ**

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* В связи с широким внедрением в сфере промышленной автоматизации методологий проектирования, основанных на моделях, возникает потребность трансформации моделей в исполнимый код для контроллеров. Наиболее перспективным языком программирования распределенных контроллеров в настоящее время является язык функциональных блоков (ФБ) стандарта МЭК 61499. Целью работы является разработка методов преобразования наиболее распространенных моделей переходов состояний, в числе которых конечные и магазинные автоматы, а также сети Петри, в системы ФБ.

*Материалы и методы.* При проведении исследования использовались положения и методы теории конечных автоматов и систем переходов, магазинных автоматов, формальных грамматик и сетей Петри, а также технологии разработки программного обеспечения на основе стандарта МЭК 61499.

*Результаты.* В ходе выполнения работы были получены следующие научные и практические результаты: 1) метод реализации недетерминированных конечных автоматов на основе ФБ МЭК 61499, особенностью которого является представление состояний автомата с помощью ФБ, использование механизма передачи маркеров и двухфазной схемы выполнения; 2) подход к реализации детерминированных магазинных автоматов на основе ФБ МЭК 61499, особенностью которого является использование в качестве исходной модели графового представления магазинного автомата и представление магазина в виде отдельного ФБ; 3) формальное определение селектирующих А-сетей и методика их реализации на основе ФБ, особенностью которой является представление позиций и переходов сетевой модели в виде отдельных ФБ, а также наличие специального диспетчера переходов.

*Выводы.* Предложенные реализационные методы могут быть использованы в проектировании промышленных киберфизических систем для мониторинга и диагностики, проверки соответствия, детектирования и выборки специфицированных последовательностей событий и параметризованных объектов из входного потока, а также для управления технологическим процессом.

**Ключевые слова:** недетерминированные конечные автоматы, магазинные автоматы, сети Петри, А-сети, детектирование, выборка, проверка соответствия, функциональный блок, стандарт МЭК 61499, NxtStudio.

*V. N. Dubinin, A. S. Voynov, I. V. Senokosov, V. V. Vyatkin*

## **FUNCTION BLOCK-BASED IMPLEMENTATION OF STATE TRANSITION MODELS**

**Abstract.**

*Background.* In connection with the widespread introduction in the field of industrial automation model-based design methodologies, there is a need to develop methods and tools for transforming the models to an executable code for controllers. The most promising programming language for distributed controllers is currently the language of function blocks (FB) of the IEC 61499 standard. The purpose of this work is to develop methods for transforming the most common state transition models, including non-deterministic finite and pushdown automata, as well as Petri nets to FB systems.

*Materials and methods.* This study used the statements and methods of the theory of finite automata and transition systems, pushdown automata, formal grammars and Petri nets, as well as software development methodology based on the IEC 61499 standard.

*Results.* In the course of the work the following scientific and practical results were obtained: 1) the implementation method of non-deterministic finite automata based on the IEC 61499 FB, the features of which are the representation of the automaton's states using FBs, the use of a token transfer mechanism and a two-phase execution scheme; 2) the approach to the implementation of deterministic pushdown automata based on the IEC 61499 FB, the peculiar properties of which are the use of the graph representation of pushdown automata as an initial model and representation of the stack in the form of a separate FB; 3) the formal definition of selective A-nets and the method of their implementation based on the IEC 61499 FB, the features of which are the presentation of places and transitions of the net model as separate FBs, as well as the presence of a special transition manager.

*Conclusions.* These implementation approaches can be used in the design of industrial cyber-physical systems for monitoring and diagnostics, conformance checking, detection and selection of specified sequences of events and parameterized objects from an input stream, as well as for the control of technological operations.

**Keywords:** non-deterministic finite automata, pushdown automata, Petri nets, A-nets, detection, selection, conformance checking, function block, IEC 61499 standard, NxtStudio.

## Введение

В связи с широким внедрением в сфере разработки систем промышленной автоматизации (ПА) методологий проектирования, основанных на моделях (например: *model-driven engineering, model integrated computing, model centered design* [1]), возникает потребность в разработке методов и средств трансформации моделей в исполнимый код программ для контроллеров. Использование формальных моделей позволит избежать двусмысленности и неопределенности, произвести верификацию и оценку производительности, что в итоге повысит качество и надежность проекта и приведет к снижению издержек проектирования. В сфере промышленной автоматизации формальные модели могут использоваться в проектировании собственно управляющих алгоритмов, систем мониторинга и диагностики, систем супервизорного управления, проверки соответствия, систем обнаружения и выборки специфицированной последовательности событий и (параметризованных) объектов и т.д.

Задача детектирования и выборки специфицированной последовательности объектов из входного потока может, например, возникнуть в сборочном производстве [2]. В данном случае упорядоченность является важным свойством продукта. Кроме того, данная задача может быть адаптирована для

целей контроля правильности функционирования системы в том смысле, удовлетворяет ли поведение системы некоторому заданному шаблону. Это задача проверки соответствия (*conformance checking*), часто решаемая в рамках метода *Process mining* [3]. Детектирование специфицированных последовательностей может свидетельствовать о нормальном или, наоборот, ненормальном функционировании системы. Задача выборки специфицированной последовательности объектов является сходной с задачей распознавания языков, встречающейся, в частности, при построении трансляторов и компиляторов. В отличие от распознавателя, система выборки может явно игнорировать входные объекты, если они не иницируют в ней соответствующие изменения. Следует также отметить значительно более строгие требования по времени, предъявляемые к системам выборки, поскольку зачастую они работают в режиме реального времени. Задачи выборки не так многосторонне представлены в литературе, как задачи распознавания языков.

В ПА наиболее распространенными формальными моделями являются так называемые «модели переходов состояний» (МПС), в которых функционирование системы или процесса представляется как последовательность переходов из одного состояния в другое. Это определяется не в последнюю очередь требованиями надежности и безопасности, согласно которым в системе должны быть выделены явные состояния и их число должно быть, как правило, конечным [4]. Несмотря на общие методологические основы, данные модели довольно сильно различаются в конкретике. Примерами МПС являются конечные автоматы (КА) [4, 5], магазинные автоматы (МА) [5], сети Петри (СП), машины абстрактных состояний (МАС). Кроме «чистых» моделей, существуют их всевозможные расширения и модификации. Если в простейших моделях типа КА состояние может быть представлено одной переменной, то в сложных (например МАС) состояние представляется набором функций. Существуют значительные отличия и в сложности, и интерпретации переходов.

Основным трендом в организации систем ПА является переход от централизованных систем к распределенным. Наиболее перспективным языком программирования распределенных контроллеров в настоящее время является язык функциональных блоков стандарта МЭК 61499 [6]. Это специализированный компонентно-ориентированный язык для построения распределенных систем управления промышленными процессами.

В данной работе будут рассматриваться методы реализации моделей КА, МП и расширенных СП (А-сетей) на основе функциональных блоков (ФБ) стандарта МЭК 61499.

### 1. Реализация конечных автоматов

КА-модели являются наиболее популярными в промышленной автоматике. Существует большое разнообразие моделей данного класса – от классических конечных автоматов до диаграмм состояний UML [7], в которых, в частности, используется иерархическая структуризация состояний, составные переходы, исторические состояния и сторожевые условия переходов. Несмотря на это, основная идея ФБ-реализации КА-моделей остается примерно одной и той же.

Ниже в качестве примера рассматриваются подход к реализации недетерминированных конечных автоматов (НДКА).

Особенности предлагаемого подхода:

1) неявная детерминизация НДКА в режиме реального времени («на лету»). В этом случае состояния детерминированного КА получаются в процессе (параллельного) функционирования НДКА как комбинации его активных состояний. Существенным моментом при этом является синхронный характер функционирования НДКА;

2) двухфазная схема выполнения, при которой на первой фазе срабатывают разрешенные переходы в НДКА, а на второй производится публикация новых состояний автомата. Двухфазная схема была предложена в [8] для реализации НДКА на основе языков LD и FBD стандарта МЭК 61131-3;

3) механизм передачи маркеров для симуляции поведения НДКА.

В рамках предложенного подхода возможно провести его дальнейшую детализацию на основе следующих классификационных признаков:

1) семантика выполнения НДКА;

2) ориентация на переходы или состояния (в данной работе рассматривается второй подход, основы первого были рассмотрены в [2]);

3) способ обработки входных сигналов и организации второй фазы выполнения (последовательная и параллельная схемы).

Можно выделить две семантики выполнения НДКА, что касается условий сохранения (локальных) состояний НДКА:

1) состояние сохраняется, если в нем имеется петля, специфицирующая условие сохранения этого состояния [9];

2) состояние сохраняется, если все исходящие из данного состояния переходы не являются разрешенными.

В семантике 1 явно специфицируется сохранение состояния, неявно – сброс, а в семантике 2 наоборот – явно специфицируется сброс состояния, а неявно – сохранение.

Для реализации третьего классификационного признака в случае, когда принята ориентация на состояния, разработаны соответствующие структурные шаблоны. Основными элементами шаблона являются ФБ, моделирующие состояния НДКА (называемые также ФБ-состояниями), и ФБ, представляющий диспетчер, который организует общий процесс вычислений. На рис. 1 представлены два шаблона для организации обработки входного сигнала на первой фазе выполнения – «последовательная схема» и «параллельная схема». В последовательной схеме блоки, обрабатывающие один и тот же сигнал, связаны в дейзи-цепочку. Входной сигнал  $x_i$  подается на первый блок цепочки. Выходной сигнал с последнего блока сигнализирует, что о том, что обработка сигнала  $x_i$  во всех релевантных ФБ закончена. Этот сигнал поступает в диспетчер *disp* и служит для него основанием начать вторую фазу выполнения генерацией выходного сигнала *ph2*. Один и тот же ФБ может быть задействован в разных цепочках, поскольку в нем может быть предусмотрена обработка нескольких входных сигналов.

В параллельной схеме входной сигнал  $x_i$  поступает сразу на все релевантные ФБ. Для синхронизации завершения выполнения группы ФБ используется механизм квитирования с подсчетом числа квитанций. При этом по завершении обработки входного сигнала  $x_i$ , которая заключается в возможном изменении переменной текущего состояния, каждый ФБ посылает соответствующий сигнал-квитанцию в диспетчер. Диспетчер должен собрать все

квитанции (их число определяется по числу релевантных ФБ по входному сигналу  $x_i$ ), после чего инициирует вторую фазу выполнения. Преимуществом последовательной схемы является ее простота и применимость ко всем моделям выполнения ФБ вследствие своей детерминированности. Параллельная схема является более сложной и недетерминированной и применима далеко не для всех моделей выполнения ФБ. Преимуществом схемы является возможность параллельного выполнения ФБ.

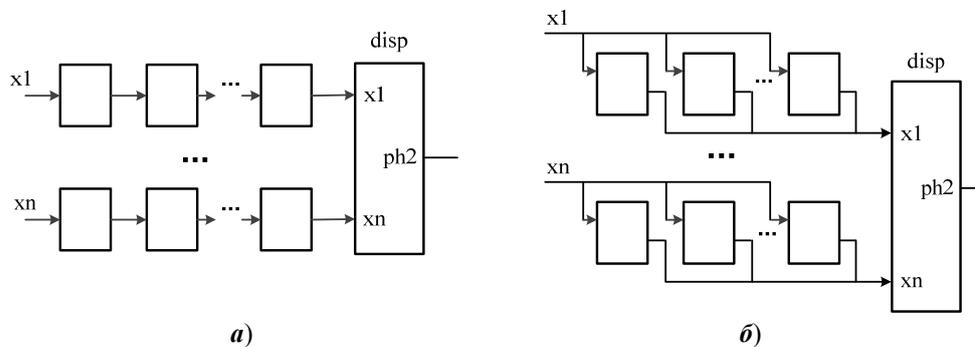


Рис. 1. Последовательная (а) и параллельная (б) схемы обработки входных сигналов (на первой фазе)

Аналогично представляются шаблоны для организации второй фазы выполнения – «последовательная схема» и «параллельная схема». В последовательной схеме блоки, реализующие действия второй фазы, выполняются последовательно, один за другим.

Параллельная реализация НДКА, приведенного на рис. 2, в виде сети ФБ составного ФБ представлена на рис. 3. Следует заметить, что в данном случае принята семантика 2, а реализация производилась в инструментальной системе NxtStudio [10].

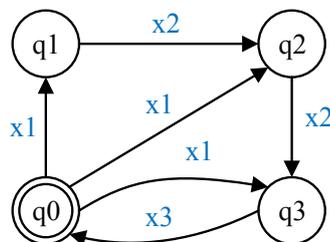


Рис. 2. Пример НДКА

На рис. 3 показаны ФБ-состояния (FB1-FB4) и ФБ-диспетчер (FB6). Через событийные входы  $x1..x3$  поступает один из входных сигналов автомата. Первая фаза выполнения была подробно описана выше. На второй фазе все ФБ-состояния параллельно выдают свои внутренние состояния на выход (для других ФБ-состояний) и сообщают об этом диспетчеру. Когда диспетчер получил квитанции от всех ФБ-состояний, выдается сигнал окончания обработки входного сигнала *Out*.

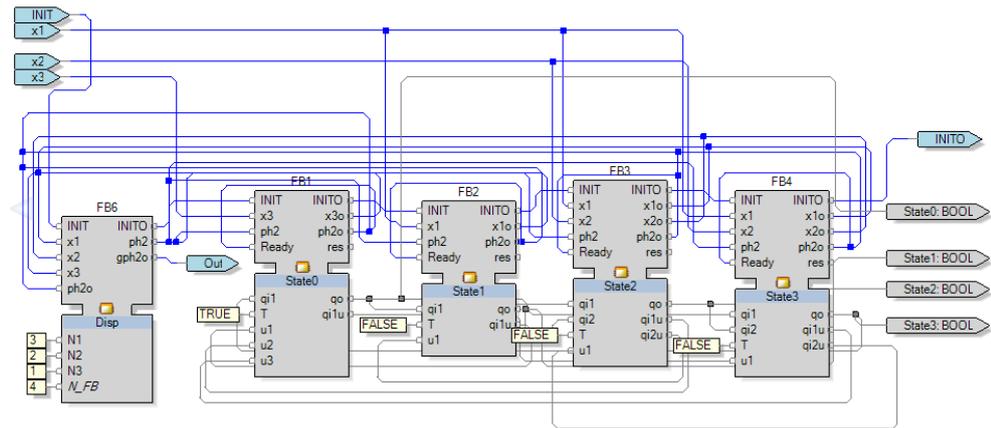


Рис. 3. Реализация НДКА в NxtStudio

Рассмотрим более подробно базисный ФБ  $FB3$  типа  $State2$ , отвечающий за реализацию состояния  $q2$ . Интерфейс данного ФБ включает следующие входы-выходы. Событийные входы:  $INIT$  – инициализация ФБ;  $x1, x2$  – входные сигналы НДКА;  $ph2$  – запуск второй фазы выполнения;  $Ready$  – сигнал готовности ФБ принимать новый входной сигнал. Информационные входы:  $qi1$  ( $qi2$ ) – значение первого (второго) состояния-предшественника (истина/ложь);  $T$  – начальное значение состояния. Событийные выходы:  $INITO$  – инициализации ФБ окончена;  $x1o$  ( $x2o$ ) – обработка входного сигнала  $x1$  ( $x2$ ) окончена;  $ph2o$  – вторая фаза выполнения окончена. Информационные выходы:  $qo$  – значение состояния НДКА  $q2$  (истина/ложь). В ФБ также используется внутренняя переменная булевого типа  $q$  для хранения статуса состояния НДКА  $q2$  (истина/ложь). На рис. 4 представлены диаграммы  $ECC$  для базисного ФБ  $State2$  (а) и ФБ-диспетчера (б).

Оценим время реакции на входной сигнал для ФБ-базированной реализации НДКА. Обозначим  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множество входных сигналов, подаваемых на НДКА;  $N_S$  – общее число состояний НДКА;  $N_{x_i}$  – число состояний НДКА, из которых выходят дуги переходов, помеченные сигналом  $x_i$ . Тогда время первой фазы обработки входного сигнала  $x_i$  будет вычисляться как  $T^I = N_{x_i}(t_1 + t_2)$ , где  $t_1$  – время обработки входного сигнала в ФБ-состоянии и выдачи соответствующей квитанции;  $t_2$  – время обработки одной квитанции первой фазы в ФБ-диспетчере.

Время второй фазы является постоянным, независимо от входного сигнала, и определяется следующим образом:  $T^{II} = N_S(t_3 + t_4) + t_5$ , где  $t_3$  – время реакции ФБ на прием сигнала начала второй фазы;  $t_4$  – время обработки одной квитанции второй фазы в ФБ-диспетчере;  $t_5$  – время выдачи сигнала завершения обработки входного сигнала.

Следует заметить, что возможна дальнейшая детализация формул, вплоть до времен перехода между состояниями  $ECC$  и выполнения алгоритмов в состояниях. Реальные измерения на системе ФБ из рис. 3, выполняемой на платформе ПК (Intel Core i5-2310 2.90GHz, ОС Windows 7), показали, что время реакции на входной сигнал лежит в пределах от 26 до 33 мкс. Это вре-

мя от момента появления входного сигнала  $x_i$  до выдачи выходного сигнала  $Out$  диспетчера.

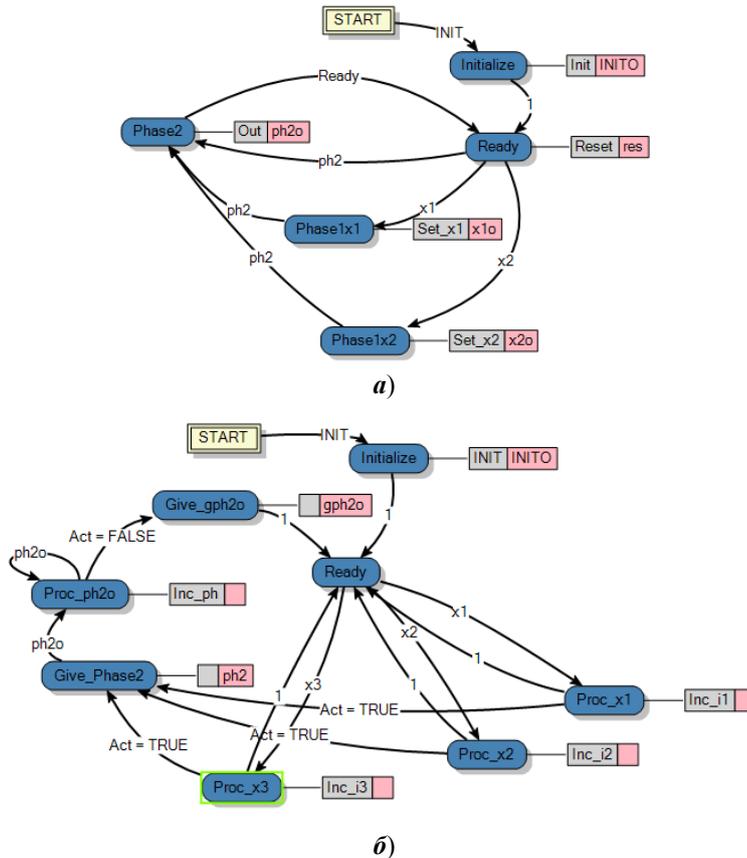


Рис. 4. Диаграммы ECC для базисного ФБ State2 (а) и ФБ-диспетчера (б)

## 2. Реализация магазинных автоматов

Конечные автоматы являются достаточно простыми моделями и не могут описать сложные процессы, например представляемые контекстно-свободными (КС) языками. Для распознавания КС-языков используются магазинные автоматы. Формальное определение МА можно найти, например, в [5]. В отличие от конечных автоматов, в МА используется магазинная память (стек, магазин).

Ниже предлагается методика реализации детерминированных МА на основе ФБ стандарта МЭК 61499. В качестве исходного описания в методике рекомендуется использовать графовое представление МА, предложенное в работе [5]. При этом переход между состояниями автомата имеет пометку, состоящую из трех компонент: А – входной символ; В – символ вершины стека; С – символ (или последовательность символов), на который будет заменяться символ вершины стека (рис. 5). Следует заметить, что сам стек в данном представлении не фигурирует.

Краткие положения методики преобразования МА в ФБ-базирующую реализацию следующие:

1) каждому переходу МА ставится в соответствие ФБ. В этом случае практически все переходы моделируются ФБ одного и того же типа, отличающимися только некоторыми параметрами при инициализации. Альтернативным подходом является подход, когда в виде ФБ представляются состояния. В этом случае каждый ФБ будет отличаться числом входных/выходных сигналов и переменных, и сложность реализации каждого отдельного блока-состояния будет довольно большой;

2) для пометки переходов, разрешенных со стороны состояний, используются маркеры. Маркер является динамическим объектом, который может быть передан из одного ФБ-перехода в другой ФБ-переход. Если ФБ имеет маркер, то он может принимать входные символы;

3) для представления стека используется отдельный ФБ, реализующий операции вталкивания и выталкивания значения в стек, а также сравнения вершины стека с заданным значением;

4) состояния МА в системе явно не представлены.



Рис. 5. Переход в магазинном автомате

На рис. 6 приведен пример фрагмента системы ФБ, задействованного в реализации некоторого перехода МА.

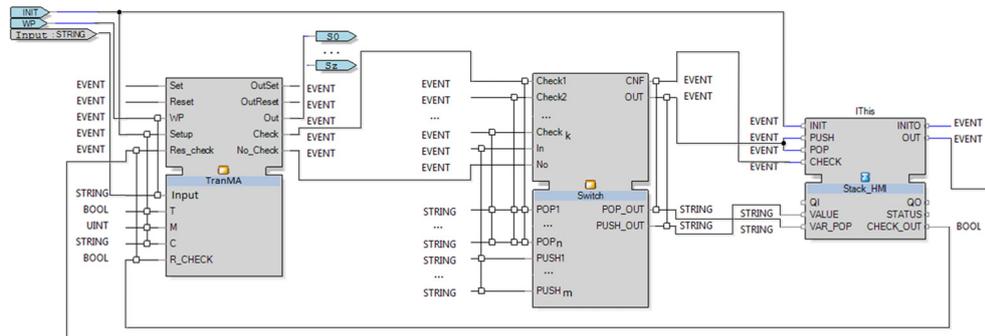


Рис. 6. Фрагмент системы ФБ для реализации перехода МА

Первый из блоков типа *TranMA* реализует собственно переход автомата. ФБ *Switch* управляет потоками данных от ФБ-переходов в ФБ стека (*Stack HMI*).

Интерфейс базисного ФБ *TranMA* состоит из следующих групп параметров: *Set/Reset* – входные сигналы установки/удаления маркера в данном ФБ; *WP* – входной сигнал поступления входного символа; *Setup* – входной сигнал установки (сброса) начальных параметров ФБ; *Res\_Check* – входной сигнал, информирующий об окончании проверки верхнего символа стека с магазинным символом ФБ-перехода; *OutSet/OutReset* – выходной сигнал, устанавливающий/сбрасывающий маркеры в других ФБ; *Out* – выходной сиг-

нал, означающий, что ФБ-переход сработал; *Check* – управляющий выходной сигнал для сравнения верхнего символа стека магазинным символом ФБ-перехода; *No\_Check* – сигнал, который выдается, если верхний символ стека не совпал с магазинным символом ФБ-перехода; *Input* – входной символ; *C* – входной символ, который имеет право принять данный ФБ; *T* – флаг наличия маркера в ФБ; *R\_CHECK* – результат сравнения верхнего символа магазина (истина/ложь).

Предложенная методика может быть использована в отношении предметной области работы [11], в которой предлагается использование модели селектирующего магазинного автомата для спецификации и выборки последовательностей деталей в промышленных системах сортировки, а также использование магазинного автомата-преобразователя в проектировании технологического процесса сборки изделий, управляемого потоком деталей и жетонов.

### 3. Реализация сетей Петри

По сравнению с автоматными моделями сетевые модели на основе сетей Петри являются более мощными. Практически отсутствуют работы по использованию СП для распознавания языков, что можно объяснить большой вычислительной сложностью процедур их анализа. Для снижения вычислительной сложности используются упрощения СП. Например, в работе [12] предлагаются структурно простые СП (S-сети), а для распознавания используется алгоритм на основе конечных автоматов, имеющий полиномиальную сложность. Если рассматривать смежные области, связанные с использованием СП для распознавания ситуаций или паттернов, то можно выделить работы [13–16]. В работе [13] СП используется для конструирования запроса к данным видеонаблюдения (в терминах событий) и далее для распознавания этого специфицированного шаблона. Авторы работы [14] предлагают раскрашенные СП для моделирования распознавания упорядоченных во времени последовательностей событий, выраженных с помощью логических и временных операторов, а также минимальных и максимальных времен задержки. В работе [15] раскрашенные СП используются для определения правильности выполнения оператором (например, пилотом) соответствующего руководства. В работе [16] для реализации проверки соответствия (*conformance checking*) авторы предлагают сети Петри с данными, позволяющими моделировать переменные, сторожевые условия и действия по вводу-выводу.

В данной работе рассматривается использование расширенных СП для детектирования и выборки параметризованных объектов вида  $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$  из входного потока. В качестве основы математического аппарата выбраны А-сети, первоначально использованные в [17] для асинхронного моделирования NCES-сетей. А-сети являются расширением СП в направлении повышения моделирующих возможностей за счет нагрузки дуг и усложнения правил разрешенности и срабатывания переходов, что позволяет эффективно представлять обработку целочисленных переменных. Кроме того, А-сети могут быть легко расширены управляющими символами и даже действиями, прикрепленными к переходам и/или позициям, что переводит их в класс сетей-преобразователей.

Селектирующая А-сеть определяется следующим кортежем:

$$(P, T, X, Y, Z, U, W_X, W_Y, W_Z, Q, A, G, m_0, T_F),$$

где  $P$  – конечное множество позиций;  $T$  – конечное множество переходов;  $X \subseteq P \times T$  – множество входных дуг переходов с порогом-минимумом (дуги с проверкой на «больше»);  $Y \subseteq T \times P$  – множество выходных дуг переходов;  $Z \subseteq P \times T$  – множество входных дуг переходов с порогом-максимумом (дуги с проверкой на «меньше»);  $U \subseteq X \times Y$  – отношение сопряженности дуг;  $W_X: X \rightarrow N_0 \times \{N_0 \cup all\}$  – функция весов дуг типа  $X$ ;  $W_Y: Y \rightarrow \{N^+ \cup *\} \times \{add, reset\}$  – функция весов дуг типа  $Y$ ;  $W_Z: Z \rightarrow N^+ \times \{N_0 \cup all\}$  – функция весов дуг типа  $Z$ ;  $Q: T \rightarrow N_0$  – функция приоритетов переходов. Должно выполняться ограничение  $\forall t_i, t_j \in T [Q(t_i) \neq Q(t_j)]$ . Это ограничение делает функционирование селектирующей СП *детерминированным*;  $A$  – множество параметров (атрибутов) объекта. Обозначим  $\bar{A} = \bigcup_{a \in A} (a \times D^a)$  – пространство

состояний параметров,  $D^a$  – домен параметра  $a$ ;  $G$  – множество сторожевых функций переходов. Каждая функция  $g^t \in G$  определяется как  $g^t: [\bar{A}] \rightarrow \{true, false\}$ , где  $[\bar{A}] = \prod_{a \in A} (\{a\} \times D^a)$  – множество кортежей, кото-

рые содержат все комбинации значений переменных, тегированных именами переменных;  $m_0$  – начальная маркировка;  $T_F \subseteq T$  – множество финальных переходов. Срабатывание любого финального перехода свидетельствует об окончании выборки последовательности объектов.

Входной объект будет представляться следующим кортежем:  $\bar{a} = ((a_1, v^{a_1}), (a_2, v^{a_2}), \dots, (a_n, v^{a_n}))$ . Переход  $t \in T$  разрешен при маркировке  $m$  и входном объекте  $\bar{a}$ , если

$$g^t(\bar{a}) \wedge \forall p \in P [(p, t) \in X \rightarrow m(p) \geq \\ \geq pr_1(W_X(p, t)) \wedge (p, t) \in Z \rightarrow m(p) < pr_1(W_Z(p, t))].$$

Иными словами, переход разрешен, если истинно сторожевое условие и имеется концессия по меткам. Правила срабатывания переходов представлены в работе [17]. Следует отметить, что сочетания весов дуг образуют некоторые паттерны дуг, имеющих собственную семантику – числовую дугу, безусловную и пороговую дугу сброса, тестирующую дугу с проверкой на «больше или равно», ингибиторную дугу (дугу с проверкой на «меньше»), сопряженные дуги для безусловного копирования/добавления/передвижения меток.

Для интеграции и встраивания селектирующих А-сетей в системы управления на основе стандарта IEC 61499 ниже предлагается методика их преобразования в системы ФБ. Основная идея методики заключается в реализации элементов А-сетей – позиций и переходов в виде отдельных ФБ. ФБ-позиция хранит маркировку позиции, а также выполняет над ней элементарные операции сложения/вычитания и сброса в ноль. ФБ-переход определяет разрешенность перехода А-сети и задает изменение маркировки сосед-

них позиций при его срабатывании. Срабатыванием переходов в сетевой модели управляет ФБ-диспетчер.

Правило преобразования перехода селектирующей А-сети в ФБ приведено на рис. 7.

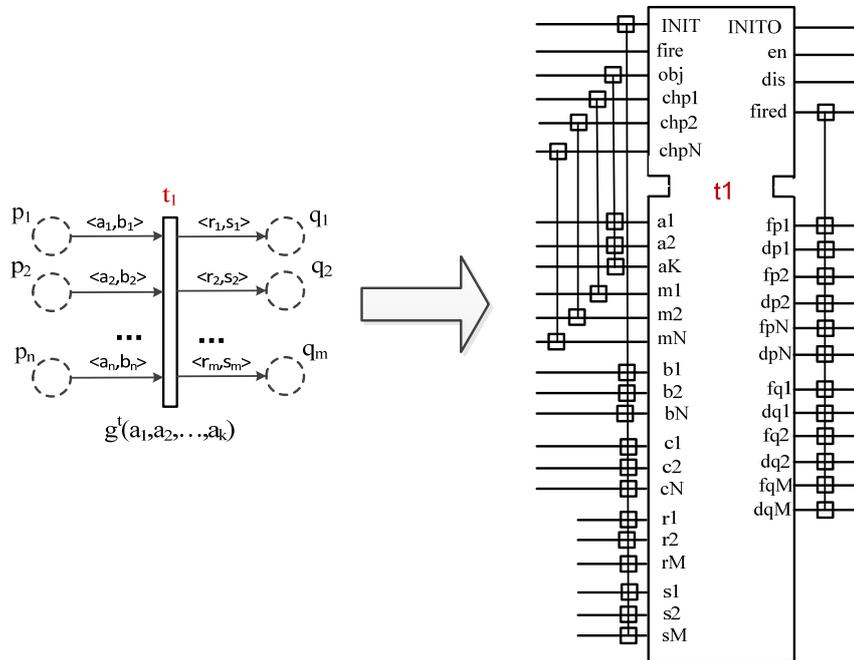


Рис. 7. Преобразование перехода селектирующей А-сети в ФБ

Описание интерфейса этого ФБ следующее. *Событийные входы*: *fire* – срабатывание разрешенного перехода; *obj* – приход нового объекта; *chp<sub>i</sub>* – изменение маркировки позиции *p<sub>i</sub>*. *Событийные выходы*: *en* – переход стал разрешенным; *dis* – переход деактивирован; *fired* – переход сработал. *Информационные входы*: *a<sub>k</sub>* – *k*-й параметр входного объекта; *t<sub>i</sub>* – (новая) маркировка позиции *p<sub>i</sub>*; *b<sub>i</sub>* (*c<sub>i</sub>*) – первый (второй) компонент веса входной дуги из позиции *p<sub>i</sub>*; *r<sub>i</sub>* (*s<sub>i</sub>*) – первый (второй) компонент веса выходной дуги в позицию *q<sub>i</sub>*.

**Примечание:** входы типов *b*, *c*, *r*, *s* являются необязательными, поскольку они могут быть жестко заложены внутри ФБ (в алгоритмах обработки). Однако выведение их «наружу» позволяет строить самомодифицируемые системы (путем модификации этих параметров).

*Информационные выходы*: *fp<sub>i</sub>* – модификатор действия над маркировкой позиции *p<sub>i</sub>*; *fq<sub>i</sub>* – модификатор действия над маркировкой позиции *q<sub>i</sub>*; *dp<sub>i</sub>* – число удаляемых меток из позиции *p<sub>i</sub>*; *dq<sub>i</sub>* – число добавляемых или назначаемых меток в позицию *q<sub>i</sub>*. Значения модификатора действия над маркировкой: 0 – указанное число меток назначается в выходную позицию, причем она предварительно обнуляется; 1 – указанное число меток добавляется в выходную позицию в дополнение к существующим; 2 – указанное число меток удаляется из входной позиции.

В диспетчере хранится текущий список разрешенных переходов. При поступлении сигнала с входа *en<sub>i</sub>* этот список пополняется переходом *t<sub>i</sub>*.

При поступлении сигнала с входа  $dis_i$  из этого списка удаляется переход  $t_i$ . При приходе сигнала на вход типа  $exe$  диспетчер выбирает наиболее приоритетный разрешенный переход для срабатывания (активации), выдает на него сигнал запуска.

ФБ, моделирующий позицию, представлен на рис. 8.

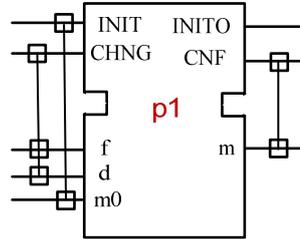


Рис. 8. ФБ-позиция

ФБ-позиция имеет следующий интерфейс. *Событийные входы:*  $CHNG$  – изменить маркировку позиции. *Событийные выходы:*  $CNF$  – маркировка позиции изменена. *Информационные входы:*  $m0$  – начальная маркировка позиции;  $f$  – модификатор действия над маркировкой позиции (установить, добавить, удалить);  $d$  – аргумент модификатора (сколько установить, добавить, удалить). *Информационный выход:*  $m$  – новое значение маркировки позиции.

Система на основе селектирующих А-сетей обрабатывает приход очередного объекта следующим образом. Заново вычисляются сторожевые условия в ФБ-переходах, где имеется концессия по меткам, статус этих переходов также обновляется. В диспетчер посылается сигнал на попытку запуска нового перехода. Следует заметить, что срабатывание какого-либо перехода может вызвать срабатывание цепочки других переходов. Для повышения быстродействия алгоритма интерпретации А-сети используется принцип локальности изменения состояний позиций и переходов. Новый переход для срабатывания может быть выбран диспетчером только после того, как закончится перевычисление: 1) маркировок входных и выходных позиций текущего сработавшего перехода; 2) статусов (разрешен / не разрешен) инцидентных им переходов.

Ниже представлен демонстрационный пример использования селектирующих А-сетей для построения линейки LEGO-конструкций (в виде «строения с прилавком внутри»). Экземпляр подобной конструкции изображен на рис. 9.

При построении LEGO-конструкций используются элементы (объекты) со следующими параметрами: 1) форма (значения I – «панель», II – «стена», III – «прямоугольный блок»); 2) цвет (значения «Green», «Yellow», «White», «Brown», «Orange», «Azule»). Предполагается, что объекты движутся по одному или нескольким конвейерам и сборочный робот, оснащенный соответствующими датчиками, производит выборку нужных объектов из потока.

Порядок выборки объектов определяется селектирующей А-сетью, представленной на рис. 10.

На рис. 10 сторожевые условия представлены в закодированном виде, с использованием значений параметров объектов LEGO-конструкции (например, IG обозначает объект типа I («панель») цвета G («зеленый»), в итоге по-

лучается сторожевое условие «ожидается зеленая панель»). В соответствии с приведенной сетевой моделью сначала последовательно выбирается «панель» зеленого или белого цвета. Далее параллельно выбираются три «стены» и два «прямоугольных блока», причем две последние «стены» должны быть одного цвета, а «прямоугольные блоки» – разного. Когда собраны все стены, может быть выбрана «зеленая панель» (в качестве «крыши»). После выборки всех требуемых объектов происходит выход из цикла, иначе цикл выборки начинается сначала. В соответствии с методикой, представленной выше, была произведена ФБ-реализация А-сети, представленной на рис. 10. Из-за ее громоздкости она в статье не приводится.

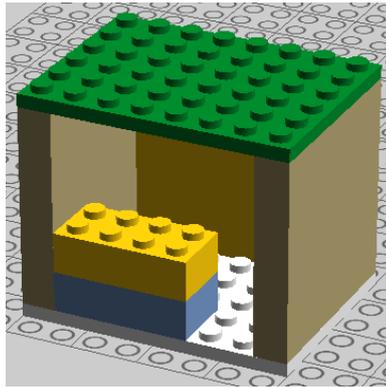


Рис. 9. Экземпляр линейки LEGO-конструкций

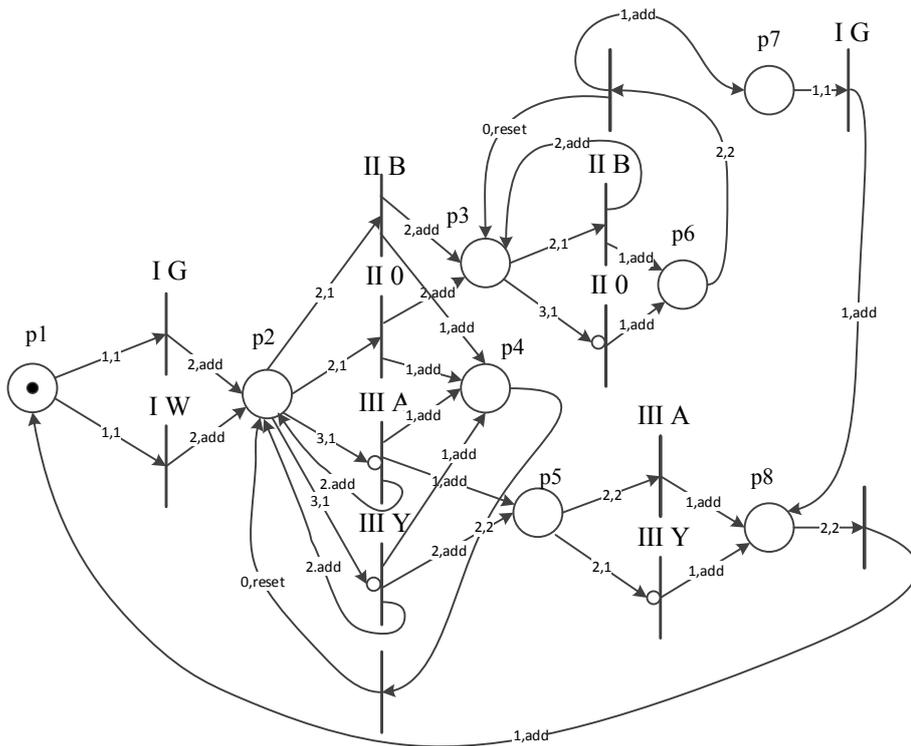


Рис. 10. Селектирующая А-сеть для построения линейки LEGO-конструкций

### **Заключение**

В работе представлены подходы к реализации наиболее популярных в промышленной автоматике моделей переходов состояний в виде ФБ стандарта МЭК 61499. В плане определения области применения ориентация была сделана на задачи детектирования и выборки. Направлением дальнейших исследований является функционально-блочная реализация более сложных моделей переходов состояний, например, раскрашенных сетей Петри и машин абстрактных состояний, а также расширение сферы их использования в различных областях промышленной автоматике.

### **Библиографический список**

1. **Дубинин, В. Н.** Модельно-центрированная методология проектирования распределенных компонентно-базированных информационно-управляющих систем промышленной автоматике / В. Н. Дубинин // *Современные информационные технологии* : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2013. – Вып. 18. – С. 7–24.
2. **Dubinini, V.** Auto-Generation of Distributed Automation Software Based on Formal Product Line Specification / V. Dubinin, I. Senokosov, V. Vyatkin // *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. – Cham : Springer, 2017. – Vol. 10444. – P. 80–91.
3. **Aalst, W. M. P.** Process Mining: Data Science in Action / W. M. P Aalst. – Springer Verlag, 2016. – 467 p.
4. **Поликарпова, Н. И.** Автоматное программирование / Н. И. Поликарпова, А. А. Шалыто. – Санкт-Петербург : Питер, 2009. – 176 с.
5. **Хопкрофт, Дж.** Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Дж. Хопкрофт, Р. Мотвани, Дж. Ульман. – Москва : Вильямс, 2002. – 528 с.
6. **Vyatkin, V.** IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design, Third Edition / V. Vyatkin. – Instrumentation Society of America (ISA), 2016. – 261 p.
7. **Drusinsky, D.** Modelling and verification using UML statecharts / D. Drusinsky. – Elsevier, 2006. – 400 p.
8. **Дубинин, В. Н.** Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов (Ч. 2. Методы и средства) / В. Н. Дубинин, Д. А. Будаговский, Д. Н. Дроздов, Д. В. Артамонов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2016. – № 2 (38). – С. 18–32.
9. **Вашкевич, Н. П.** Недетерминированные автоматы и их использование для реализации систем параллельной обработки информации : монография / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – 394 с.
10. Сайт nxtStudio (nxtControl). – URL: <http://www.nxtcontrol.com/>
11. **Дубинин, В. Н.** Использование моделей магазинных автоматов в проектировании технологических процессов сортировки и сборки изделий / В. Н. Дубинин, И. В. Сенокосов, Л. П. Климкина, В. В. Вяткин // *Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2017)* : сб. тр. Междунар. науч.-техн. и науч.-методич. конф. – Рязань, 2017. – Т. 1. – С. 10–14.
12. **Cui, T.** Recognition Algorithm Design and Complex Analysis for Languages of S-Nets / T. Cui, Q. Zeng, D. Zhang // *Information Technology Journal*. – 2011. – № 10. – P. 106–112.
13. **Ghanem, N.** Representation and Recognition of Events in Surveillance Video Using Petri Nets / N. Ghanem, D. DeMenthon, D. Doermann, L. Davis // *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPRW '04)*. – 2004. – July.

14. **Choppy, C.** Coloured Petri Nets for Chronicle Recognition / C. Choppy, O. Bertrand, P. Carle // *Int. Conf. on Reliable Software Technologies – Ada-Europe 2009. Lecture Notes in Computer Science.* – Springer, 2009. – Vol. 5570. – P. 266–281.
15. **Fernández, V. R.** Automatic Procedure Following Evaluation Using Petri Net-based Workflows / V. R. Fernández, A. G. Pardo, D. Camacho // *IEEE Transactions on Industrial Informatics.* – 2018. – Vol. 14, iss. 6. – P. 2748–2759.
16. **Leoni, M.** Decomposing Alignment-Based Conformance Checking of Data-Aware Process Models / M. Leoni, J. Munoz-Gama, J. Carmona, W. M. P. Aalst // *Lecture Notes in Computer Science.* – 2014. – Vol. 8841. – P. 3–20.
17. **Дубинин, В. Н.** Асинхронное моделирование NCES-сетей / В. Н. Дубинин // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.* – 2009. – № 2. – С. 3–14.

### References

1. Dubinin V. N. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern information technologies: proceedings of an International scientific and technical conference]. Penza, 2013, iss. 18, pp. 7–24. [In Russian]
2. Dubinin V., Senokosov I., Vyatkin V. *Lecture Notes in Artificial Intelligence.* Cham: Springer, 2017, vol. 10444, pp. 80–91.
3. Aalst W. M. P. *Process Mining: Data Science in Action.* Springer Verlag, 2016, 467 p.
4. Polikarpova N. I., Shalyto A. A. *Avtomatnoe programmirovaniye* [Automaton programming]. Saint-Petersburg: Piter, 2009, 176 p. [In Russian]
5. Khopkroft Dzh., Motvani R., Ul'man Dzh. *Vvedeniye v teoriyu avtomatov, yazykov i vychisleniy* [Introduction into the theory of automata, languages and calculations]. Moscow: Vil'yams, 2002, 528 p. [In Russian]
6. Vyatkin V. *IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design, Third Edition.* Instrumentation Society of America (ISA), 2016, 261 p.
7. Drusinsky D. *Modelling and verification using UML statecharts.* Elsevier, 2006, 400 p.
8. Dubinin V. N., Budagovskiy D. A., Drozdov D. N., Artamonov D. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 2 (38), pp. 18–32. [In Russian]
9. Vashkevich N. P., Biktashev R. A. *Nedeterminirovannyye avtomaty i ikh ispol'zovaniye dlya realizatsii sistem parallel'noy obrabotki informatsii: monografiya* [Nondeterministic automata and their use for implementing parallel data processing systems: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2016, 394 p. [In Russian]
10. *Sayt nxtStudio (nxtControl).* Available at: <http://www.nxtcontrol.com/>
11. Dubinin V. N., Senokosov I. V., Klimkina L. P., Vyatkin V. V. *Sovremennyye tekhnologii v nauke i obrazovanii (STNO-2017): sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. i nauch.-metodich. konf.* [Modern technologies in science and education: proceedings of an International scientific, technical and methodological conference]. Ryazan, 2017, vol. 1, pp. 10–14. [In Russian]
12. Cui T., Zeng Q., Zhang D. *Information Technology Journal.* 2011, no. 10, pp. 106–112.
13. Ghanem N., DeMenthon D., Doermann D., Davis L. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPRW '04),* 2004, July.
14. Choppy C., Bertrand O., Carle P. *Int. Conf. on Reliable Software Technologies – Ada-Europe 2009. Lecture Notes in Computer Science.* Springer, 2009, vol. 5570, pp. 266–281.
15. Fernández V. R., Pardo A. G., Camacho D. *IEEE Transactions on Industrial Informatics.* 2018, vol. 14, iss. 6, pp. 2748–2759.
16. Leoni M., Munoz-Gama J., Carmona J., Aalst W. M. P. *Lecture Notes in Computer Science.* 2014, vol. 8841, pp. 3–20.

17. Dubinin V. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 2, pp. 3–14. [In Russian]

---

***Дубинин Виктор Николаевич***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: dubinin.victor@gmail.com

***Dubinin Victor Nikolaevich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of computer engineering,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

***Войнов Артем Сергеевич***

аспирант, кафедра вычислительной  
техники, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: voj49@yandex.ru

***Voinov Artem Sergeevich***

Postgraduate student, sub-department  
of computer engineering, Penza  
State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

***Сенокосов Илья Владимирович***

инженер, Научно-техническое  
предприятие «Криптософт»  
(Россия, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3)

E-mail: senokosov.i@yandex.ru

***Senokosov Ilya Vladimirovich***

Engineer, “Cryptosoft” research  
and engineering enterprise  
(3 Lermontova street, Penza, Russia)

***Вяткин Валерий Владимирович***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра ответственных коммуникаций  
и вычислений, Технический университет  
Лулео (Швеция, г. Лулео,  
ул. Регнбогсаллен, корп. А)

E-mail: valeriy.vyatkin@ltu.se

***Vyatkin Valeriy Vladimirovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department communication  
and computation systems, Lulea  
University of Technology (building A,  
Regnbagallen street, Lulea, Sweden)

---

**Образец цитирования:**

Дубинин, В. Н. Функционально-блочная реализация моделей переходов состояний / В. Н. Дубинин, А. С. Войнов, И. В. Сенокосов, В. В. Вяткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 23–38. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-3.

М. А. Митрохин, Я. П. Щеголихин,  
Д. О. Нешко, М. В. Семенкин

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЙ ОТКРЫТОЙ БИБЛИОТЕКИ OPENCV В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ НОМЕРОВ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования является библиотека *OpenCV*. Предмет исследования – средства библиотеки, использование которых возможно для распознавания автомобильных номеров. Целью работы является оценка эффективности указанных средств при использовании в широком диапазоне условий.

*Материалы и методы.* Исследования выполнены с использованием методов распознавания образов и обработки изображений.

*Результаты.* Предложены механизмы совершенствования средств распознавания автомобильных номеров, на экспериментальных данных показана их эффективность.

*Выводы.* Предложенные решения позволяют повысить эффективность стандартных средств библиотеки *OpenCV*, основанных на каскадах Хаара, однако это требует дополнительных вычислительных затрат.

**Ключевые слова:** алгоритмы, обработка изображений, каскады Хаара.

М. А. Mitrokhin, Ya. P. Shchegolikhin,  
D. O. Neshko, M. V. Semenkin

## AN ANALYSIS OF THE OPENCV LIBRARY'S SOLUTIONS EFFICENCY IN THE PROBLEM OF LICENCE PLATE RECOGNITION

### Abstract.

*Background.* The object of the study is the OpenCV library. The subject of the study is the means of the library for the recognition of car licence plate. The aim of the study is to evaluate the effectiveness of OpenCV library in a wide range of image acquisition conditions.

*Materials and methods.* The research is performed with using of the pattern recognition and image processing methods.

*Results.* The technique for improving the means of recognition car licence plate are proposed, their efficiency is shown on the experimental data.

*Conclusions.* The proposed solutions allow to increase the efficiency of standard OpenCV library tools, based on Haar cascades, but it requires additional computing costs.

**Keywords:** algorithms, image processing, Haar cascades.

## **Введение**

Современные вычислительные средства позволяют решать довольно широкий круг задач автоматизации процессов человеческой деятельности. Это позволяет экономить человеческие ресурсы, сокращать затраты на персонал, не снижая при этом эффективность достижения поставленных целей. Одним из примеров автоматизации процессов являются автоматические системы контроля и наблюдения за автомобильным трафиком. Они позволяют управлять транспортными потоками через регулирование времени работы светофоров, повышать культуру вождения за счет автоматических штрафов, прогнозировать аварийные ситуации.

Создание алгоритмов работы таких систем требует проведения трудоемких исследований, поскольку они должны включать:

- обнаружение движущихся объектов;
- классификацию автомобилей и других транспортных средств;
- идентификацию водителей или владельцев движимого имущества.

Задачей настоящего исследования является определение возможностей идентификации владельцев автомобилей, а именно распознавание государственного регистрационного знака автомобиля по изображению с камер наблюдения стандартными средствами открытых библиотек. Для решения подобных задач создан ряд специализированных алгоритмов машинного зрения, реализованных в общедоступных библиотеках.

Областью интереса машинного зрения являются цифровые устройства ввода/вывода, компьютерные сети, методы и алгоритмы обработки визуальной информации. За счет возрастания сложности решаемых научно-технических задач автоматическая обработка и анализ визуальной информации становятся все более актуальными.

### **1. Каскады Хаара для распознавания изображений**

Для решения поставленной задачи распознавания автомобильных номеров использовался следующий инструментарий:

– язык программирования Python третьей версии. Python – высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода. Синтаксис ядра Python минималистичен. В то же время стандартная библиотека включает большой объем полезных функций [1];

– открытая библиотека OpenCV (Open Source Computer Vision) третьей версии. OpenCV – библиотека с открытым исходным кодом, в которой реализованы алгоритмы компьютерного зрения, обработки изображений и численных решений общего назначения, написана на языках программирования C и C++ [2].

Для распознавания автомобильных номеров применялась функция `haarcascade_russian_plate_number`. Эта функция реализована с использованием каскадных классификаторов Хаара. Этот метод использует разновидность сканирующей обработки изображения [3] и достаточно эффективно работает в реальном времени. На вход алгоритма подается изображение, для каждой части которого вычисляются признаки Хаара. Для получения признаков вычисляется свертка части изображения с примитивами Хаара:

$$I_t(x, y) = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-l}^l I(x-u, y-v) \cdot g_t(u, v),$$

где  $I(x, y)$  – часть исходного изображения;  $k = (p - 1)/2$  и  $l = (q - 1)/2$ ;  $g_t(u, v)$  –  $t$ -й примитив Хаара размером  $p \times q$ .

Каждый примитив (рис. 1) переставляет собой несколько смежных прямоугольных зон, каждая из которых может содержать одно из двух значений – плюс 1 (светлая) и минус 1 (темная). Примитивы различаются расположением светлых и темных зон и их ориентацией [4].

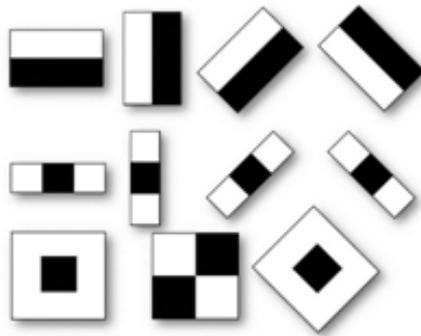


Рис. 1. Примитивы Хаара

По каждой полученной свертке вычисляется признак:

$$f^t = \sum_{(x,y) \in A} I_t(x, y) - \sum_{(x,y) \in B} I_t(x, y), \tag{1}$$

где  $A$  – множество координат, соответствующих светлой части примитива Хаара, участвующего в операции свертки;  $B$  – множество координат, соответствующих темной части примитива Хаара.

Полученные по выражению (1) признаки подаются на алгоритм классификации [5], который принимает решение в соответствии с выражением

$$h(I) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{t=1}^T a_t \cdot h_t(f^t) \geq \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T a_t, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $T$  – количество примитивов Хаара;  $a_t$  – веса, определяемые в результате работы алгоритма 1.

Алгоритм 1 – Алгоритм обучения классификатора изображений
Вход: 1 Вычисленные признаки для изображений $(f_i, s_i)_{i=1 \dots N}$ , где $f_i = (f_i^1, f_i^2, \dots, f_i^T)$ – набор признаков, вычисленных для $i$ -го изображения, $t = 1, \dots, T$ , $T$ – количество примитивов Хаара, $N$ – количество примеров, $s_i \in (0,1)$ – метка отрицательного и положительного примера соответственно
Выход: Решение алгоритма классификации

1 Для  $i = 1, \dots, N$

1.1 Для  $t = 1, \dots, T$

1.1.1 Инициализация веса  $w_{t,i} = \frac{1}{2 \cdot m}$  для  $(\forall i) (s_i = 0)$  и

$w_{t,i} = \frac{1}{2 \cdot l}$  для  $(\forall i) (s_i = 1)$ , где  $m$  и  $l$  – количество отрицательных

и положительных примеров соответственно.

2 Для  $t = 1, \dots, T$

2.1 Нормализация текущего веса  $w_{t,i} = \frac{w_{t,i}}{\sum_{j=1}^N w_{t,j}}$ .

2.2 Обучение классификатора  $h_t$

$$w_{t,i} = \arg \min_{e_t} \left( \sum_{i=1}^N w_{t,i} \cdot \left| h_t(f_i^t) - s_i \right| \right).$$

2.3 Обновление весов  $w_{t+1} = w_t \cdot a_t^{1-e_t}$ , где  $a_t = \log \left( \frac{1-e_t}{e_t} \right)$ .

3 Выход

Достоинством описанного подхода является высокая скорость работы и то, что каскады являются достаточно универсальным классификатором для большинства геометрических примитивов и объектов.

## 2. Экспериментальная оценка и совершенствование решений

При использовании данной функции была выявлена проблема, которая сильно ограничивала возможности ее применения. Функция распознает номера, расположенные лицевой частью к экрану или же с отклонениями в  $\pm 2^\circ$  от горизонтального положения. При реальной съемке трудно ожидать выполнения этих условий. Даже при высоком качестве изображения, но при повернутом номере распознавания не происходит (рис. 2).



Рис. 2. Пример изображения, на котором номер не распознается

Это является следствием того, что в наиболее распространенном наборе примитивов Хаара содержатся горизонтально ориентированные и развернутые на  $45^\circ$  примитивы. Решение данной проблемы возможно в двух направлениях. Первое направление заключается в добавлении в набор примитивов, повернутых на углы, отличные от 0 и  $45^\circ$  град. При этом необходимо переобучать алгоритм на исходном или новом наборе данных. Второе направление заключается в предварительном повороте изображения перед классификацией. При этом переобучение алгоритма классификации не потребуется. Так как требуемый угол поворота не известен для каждого изображения, то было решено классифицировать изображение, постепенно поворачивая его от  $-30^\circ$  до  $30^\circ$  с шагом в  $2^\circ$ . Такой подход дает положительные результаты (рис. 3) [6].



Рис. 3. Считывание с осуществлением поворота

После применения поворота изображения значительно увеличился диапазон обнаружения номеров, однако обнаружилась проблема, которая заключается в особенностях реализации самого поворота изображения. Когда изображение поступает на вход в программу, создается окно, которое соответствует его размерам, в котором далее и происходит последующая обработка. Однако в нашем способе осуществляется поворот изображения, поэтому края обрабатываемого изображения выходили за пределы окна, где функция не может работать. Достаточно часто за пределы окна выходят и номера, которые нужно обнаружить.

Данная проблема потребовала весьма простого решения. К изображению был добавлен контур так, чтобы за границы окна выходило не само изображение, а лишь его контур. Тогда номера будут оставаться в нужных границах и будут обнаружены. Соответственно, чтобы не добавлять лишней контур по краям фото, необходимо учитывать размеры самого изображения.

Для этого изображение приводится к квадратному виду для автоматического изменения параметров окна.

Далее считываются размеры готового квадрата и осуществляется добавление однотонных полос сверху, снизу, справа и слева. Увеличение сторон отображаемой области изображения в 1,5 раза исключает выход информативных частей за границы экрана [7]. Это значение получено расчетным путем, часть изображения именно такого размера выходит за рамки при повороте изображения на  $45^\circ$ .

Сделанные усовершенствования позволяют распознать номера, который ранее оставались нераспознанными (рис. 4).

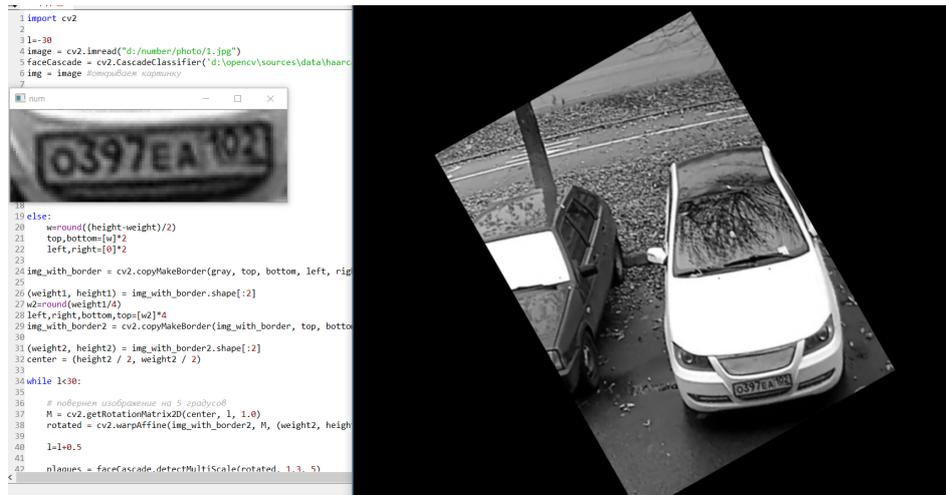


Рис. 4. Пример изображения с распознанным номером

Таким образом, усовершенствованный алгоритм запишется в виде алгоритма 2.

<b>Алгоритм 2 – Алгоритм классификации изображений</b>
<b>Вход:</b> 1 Исходная часть изображения $I(x, y)$
<b>Выход:</b> решение алгоритма
<p>1 Расширение границ изображения</p> $I(x', y') = \begin{cases} I(x, y) & \text{для всех } x' = x \text{ и } y' = y, \\ 0 & \text{для всех } x' = x \pm 0.25 \cdot x \text{ и } y' = y \pm 0.25 \cdot y. \end{cases}$ <p>2 Для <math>\alpha = -30, \dots, 30</math></p> $I_{\alpha}(x', y') = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot I(x', y').$ <p>2.1 Для <math>t = 1, \dots, T</math></p> <p>2.1.1 Вычисление свертки</p> $I_t(x', y') = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-l}^l I(x' - u, y' - v) \cdot g_t(u, v).$ <p>2.1.2 Вычисление признака <math>f^t = \sum_{(x', y') \in A} I_t(x', y') - \sum_{(x', y') \in B} I_t(x', y')</math>.</p> <p>2.2 Классификация изображения</p> $h(I) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{t=1}^T a_t \cdot h_t(f^t) \geq \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T a_t, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$ <p>3 Выход</p>

Чтобы провести тестирование, была создана тестовая база из 95 фотографий автомобилей, на которых просматриваются государственные регистрационные знаки. База была сформирована по видеозаписям, полученным с камер наблюдения. Изображения автомобилей в тестовой базе получены с разным ракурсом, качеством и разными условиями съемки (время суток, время года, загрязненность автомобилей и номеров) [8].

Тестирование на собранной базе показало, что начальный вариант программы давал неприемлемые результаты, так как распознал лишь 25 номеров из 95, что составило примерно 26 %. Первая доработка позволила повысить количество распознанных номеров до 60 из 95, т.е. 63 %. Конечное усовершенствование программы позволило довести количество распознанных номеров до 88, т.е. 93 % от общего количества.

### Заключение

Результатом проведенного исследования стало совершенствование алгоритма распознавания изображений, реализованного в библиотеке *OpenCV*, что позволило повысить эффективность распознавания автомобильных номеров ее стандартными средствами. Недостатком разработанного алгоритма является увеличение вычислительных затрат, так как одно изображение необходимо обрабатывать несколько раз с разными углами поворота. В качестве направления совершенствования для устранения указанного недостатка можно выделить автоматическое определение угла, на который необходимо повернуть изображение.

### Библиографический список

1. **Маккинни, У.** Python и анализ данных / Уэс Маккинни. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 482 с.
2. OpenCV шаг за шагом // RoboCraft. – URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/264.html> (дата обращения: 23.02.2019).
3. **Федотов, Н. Г.** Анализ полутоновых изображений и цветных текстур с позиции стохастической геометрии и функционального анализа / Н. Г. Федотов, Д. А. Голдуева, М. А. Мокшанина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 29–41. – DOI 10.21685/2072-3059-2017-2-3.
4. Комбинированный алгоритм отслеживания перемещений // Vuzlit.ru. – URL: [https://vuzlit.ru/954633/kombinirovannyy\\_algoritm\\_otслеживаниya\\_peremescheniy](https://vuzlit.ru/954633/kombinirovannyy_algoritm_otслеживаниya_peremescheniy) (дата обращения: 26.02.2019).
5. **Viola, P.** Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features / P. Viola, M. Jones // Proceedings Conference of Computer Vision and Pattern Recognition. – 2001. – Vol. 1. – P. 511–518. – DOI 10.1109/CVPR.2001.990517.
6. Играемся с изображениями в Python // Habr. – URL: <https://habr.com/ru/post/163663/> (дата обращения: 25.01.2019).
7. OpenCV Python поворачивает изображение на X градусов вокруг определенной точки // qa.ru. – URL: <http://qa.ru.site/questions/272130/opencv-python-rotate-image-by-x-degrees-around-specific-point> (дата обращения: 27.01.2019).
8. **Лукьяница, А. А.** Цифровая обработка видеоизображений / А. А. Лукьяница, А. Г. Шишкин. – Москва : Ай-Эс-Эс Пресс, 2009. – 512 с.

### References

1. Makkinni Ues *Python i analiz dannykh* [Python and data analysis]. Moscow: DМК Press, 2015, 482 p. [In Russian]

2. *RoboCraft*. Available at: <http://robocraft.ru/blog/computervision/264.html> (accessed Febr. 23, 2019).
3. Fedotov N. G., Goldueva D. A., Mokshanina M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 2 (42), pp. 29–41. DOI 10.21685/2072-3059-2017-2-3. [In Russian]
4. *Vuzlit.ru*. Available at: [https://vuzlit.ru/954633/kombinirovannyi\\_algorithm\\_otstlezhivaniya\\_peremescheniy](https://vuzlit.ru/954633/kombinirovannyi_algorithm_otstlezhivaniya_peremescheniy) (accessed Febr. 26, 2019). [In Russian]
5. Viola P., Jones M. *Proceedings Conference of Computer Vision and Pattern Recognition*. 2001, vol. 1, pp. 511–518. DOI 10.1109/CVPR.2001.990517.
6. *Habr*. Available at: <https://habr.com/ru/post/163663/> (accessed Jan. 25, 2019).
7. *OpenCV Python povorachivaet izobrazhenie na X gradusov vokrug opredelennoy tochki* [PenCV Python rotates an image X degrees around a specific point]. qa.ru. Available at: <http://qaru.site/questions/272130/opencv-python-rotate-image-by-x-degrees-around-specific-point> (accessed Jan. 27, 2019). [In Russian]
8. Lukyanitsa A. A., Shishkin A. G. *Tsifrovaya obrabotka videoizobrazheniy* [Video image digital processing]. Moscow: Ay-Es-Es Press, 2009, 512 p. [In Russian]

---

***Митрохин Максим Александрович***

доктор технических наук, заведующий кафедрой вычислительной техники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: vt@pnzgu.ru

***Mitrokhin Maksim Aleksandrovich***

Doctor of engineering sciences, head of sub-department of computer engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Щеголихин Ярослав Павлович***

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

E-mail: yaroslav.schegolikhin@yandex.ru

***Schegolikhin Yaroslav Pavlovich***

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

***Нешко Дарья Олеговна***

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

E-mail: daria-uno@yandex.ru

***Neshko Dar'ya Olegovna***

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

***Семенкин Максим Викторович***

генеральный директор, ООО “КодИнсайд” (Россия, г. Пенза, ул. Суворова, 64Б)

E-mail: maxim.semekin@codeinside.ru

***Semenkin Maksim Viktorovich***

Director general, “CodeInside” LLC (64b Suvorova street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Митрохин, М. А. Анализ эффективности решений открытой библиотеки OpenCV в задаче распознавания автомобильных номеров / М. А. Митрохин, Я. П. Щеголихин, Д. О. Нешко, М. В. Семенкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 39–46. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-4.

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 681.311

DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-5

*Н. П. Кривулин*

## МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ<sup>1</sup>

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Разработка методов динамических измерений мультисенсорных систем является актуальной проблемой ввиду того, что при эксплуатации мультисенсорных систем приходится анализировать и обрабатывать большой объем информации различной природы. Объектом исследования являются мультисенсорные системы. Предмет исследования – методы идентификации, целью которых является создание математической модели мультисенсорных систем. В работе приводится пример определения импульсной переходной функции жидкостно-аналитической измерительной системы, выполненной на волоконно-оптических сигнализаторах уровня жидкости, для определения качественного и количественного содержания примесей в контролируемой жидкости.

*Материалы и методы.* Методы, предложенные в работе, основаны на методах идентификации. Определение импульсной переходной функции проводится по результатам серии испытаний для дискретных нестационарных систем, математические модели которых описываются моделями типа «вход-выход».

*Результаты.* Предложена математическая модель жидкостно-аналитической измерительной системы для качественного и количественного содержания примесей исследуемой жидкости.

*Выводы.* Полученные результаты могут быть использованы при разработке математических моделей мультисенсорных систем, выполненных на различных элементных базах.

**Ключевые слова:** динамические измерения, мультисенсорные системы, восстановление входного сигнала, импульсная переходная функция, идентификация динамических характеристик, математические модели, жидкостно-аналитическая измерительная система, волоконно-оптический сигнализатор уровня жидкости.

*N. P. Krivulin*

## METHODS OF IDENTIFYING MULTI-TOUCH SYSTEMS

---

<sup>1</sup> Работа поддержана РФФИ. Грант 16–01–00594.

© Кривулин Н. П., 2019. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

**Abstract.**

*Background.* The work is dedicated to the development of methods for dynamic measurements of multi-touch systems, which is an important problem in view of the fact that in the operation of multi-sensor systems, it is necessary to analyze and process large amounts of information of different nature. Multisensor systems are the object of research. The subject of the study is the identification methods, the purpose of which is to create a mathematical model of Multisensor systems. The paper provides an example of determining the pulse transition function of a liquid-analytical measuring system performed on fiber-optic liquid level detectors to determine the qualitative and quantitative content of impurities in the controlled liquid.

*Methods.* The methods proposed in this paper are based on identification methods. The determination of the pulse transition function is carried out by the results of a series of tests for discrete non-stationary systems, mathematical models of which are described by the input-output models.

*Results.* A mathematical model of the liquid-analytical measuring system for the qualitative and quantitative content of impurities of the test liquid is proposed.

*Conclusions.* The obtained results can be used in the development of mathematical models of Multisensor systems performed on various element bases.

**Keywords:** dynamic measurements, multi-sensor systems, input signal recovery, pulse transient function, dynamic characteristics identification, mathematical models, liquid-analytical measurement system, fiber-optical liquid level indicator.

### Введение

Преимущество использования мультисенсорных систем обусловлено получением большого объема информации об исследуемом объекте. Однако это обстоятельство и создает существенную сложность при построении математических моделей для разработки методов динамических измерений.

В обзоре [1] отмечается, что при динамических измерениях возникают две основные задачи:

- 1) определение импульсной переходной функции;
- 2) восстановление входных сигналов.

В данной статье разработаны методы решения обеих задач, основанные на использовании математической модели типа «вход-выход». Они основаны на методах идентификации, рассмотренных в [2–4]. Разработка методов проводится на примере жидкостно-аналитической измерительной системы (ЖАИС). В работе приводится пример определения импульсной переходной функции ЖАИС, выполненной на волоконно-оптических сигнализаторах уровня жидкости (ВОСУЖ), для определения количественного содержания примесей в контролируемой жидкости.

ЖАИС представляет собой матрицу, состоящую из  $n$ -го числа сенсоров, которые различаются по каким-либо свойствам или параметрам чувствительности. Главным преимуществом такой системы является отсутствие сенсоров с полной селективностью к составу анализируемой жидкости. Подобная матрица имеет уникальный набор откликов почти для любых достаточно различающихся составом исследуемых жидкостей (рис. 1). Конструкция с большим числом сенсоров позволяет бороться с дрейфом характеристик.

Для определения анализируемой среды (жидкости) сигналы, получаемые при работе с многоэлементными сенсорами, необходимо обрабатывать. Обработка сигналов заключается в использовании разработанной математи-

ческой модели типа «вход-выход» для дискретных систем, которая описывается уравнением

$$y(k) = \sum_{l=0}^{\infty} g(k,l)x(l), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $x(l)$ ,  $l = 1, 2, \dots$ , – входной сигнал;  $y(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , – выходной сигнал;  $g(k, l)$ ,  $l = 1, 2, \dots$ ;  $k = 1, 2, \dots$ , – импульсная переходная функция системы.

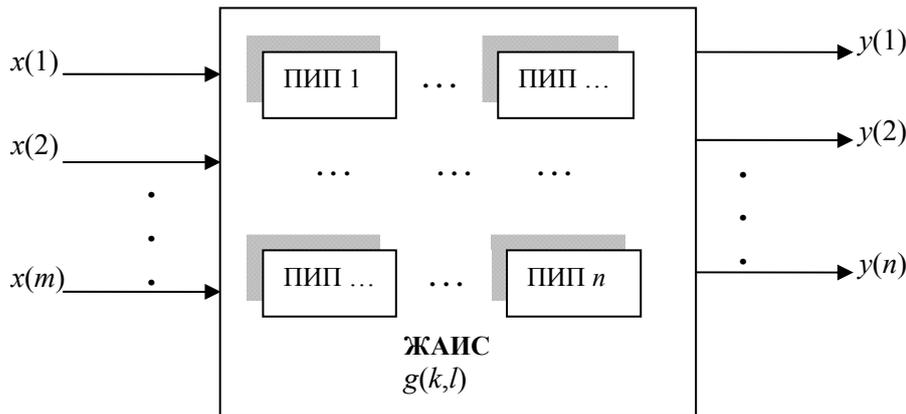


Рис. 1. Схема жидкостно-аналитической измерительной системы:  
 $x(l)$ ,  $l = 1, 2, \dots, m$ , – количественное значение содержания компонент анализируемой жидкости;  $y(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , – значения на  $k$ -м сенсоре (ПИП  $k$ );  
 $g(k, l)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $l = 1, 2, \dots, m$ , – импульсная переходная функция ЖАИС, значения которой есть весовые коэффициенты  $k$ -го сенсора на  $l$ -й компоненте анализируемой жидкости; ПИП – первичный измерительный преобразователь

### 1. Постановка задачи

В качестве математической модели ЖАИС будем использовать модель (1) типа «вход-выход». Подход, основанный на данной модели, имеет ряд преимуществ по сравнению с другими математическими моделями, которые описываются, например, дифференциальными уравнениями. Преимущества заключаются в том, что для установления зависимостей между входными и выходными величинами не требуется рассматривать физические процессы, происходящие в системе, что является достаточно сложной задачей, а во многих случаях и невозможной.

В качестве математической модели ЖАИС рассмотрим дискретную модель типа «вход-выход» для определения количественного состава  $x(l)$ ,  $l = 1, 2, \dots, m$ , анализируемой жидкости по показаниям  $y(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , – сенсоров системы. Полагая  $x_i(k) = 0$  при  $k > m$  и соответствующие  $y_i(k) = 0$  при  $k > n$ , уравнение (1) примет вид

$$y(k) = \sum_{l=0}^m g(k,l)x(l), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где  $x(l)$ ,  $l=1,2,\dots,m$ , – вектор входных сигналов, каждая компонента которого представляет собой количественное содержание  $l$ -й составляющей анализируемой жидкости,  $y(k)$ ,  $k=1,2,\dots,m$ , – вектор выходных сигналов, составленный из данных на каждом сенсоре системы;  $g(k,l)$ ,  $l=1,2,\dots,m$ ;  $k=1,2,\dots,n$ , – импульсная переходная функция ЖАИС – реакция  $k$ -го сенсора на  $l$ -ю составляющую исследуемой жидкости.

## 2. Восстановление импульсной переходной функции

Полными динамическими характеристиками систем являются импульсная переходная функция, переходная функция, передаточная функция, дифференциальные уравнения известной структуры, где коэффициенты уравнения определяют данные характеристики.

Здесь рассмотрены методы определения импульсной переходной функции для моделей, описываемых уравнениями (1).

Для определения импульсной переходной функции системы будем использовать  $Z$ -преобразование. Напомним, следуя [2], что  $Z$ -преобразование последовательности  $f(k)$ ,  $k=0,1,2,\dots$ , имеет вид

$$Z[f(k)] = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k)z^{-k},$$

где  $F(z)$  – аналитическая функция, которая является главной частью ряда Лорана в окрестности бесконечно удаленной точки.

Обратное  $Z$ -преобразование для функции  $F(z)$  находится по формуле обращения  $f(k) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C F(z)z^{k-1} dz$ , где контур интегрирования содержит все особые точки функции  $F(z)$ .

Определение импульсной переходной функции основывается на следующем утверждении.

Обозначим через  $X(z)$  и  $Y(z)$   $Z$ -преобразования последовательностей  $\{x(k)\}$ ,  $\{y(k)\}$ ,  $k=0,1,\dots$

Пусть последовательность  $\{g(k,l)\}$  удовлетворяет следующему условию:  $Z$ -преобразование последовательности  $\{g(k,l)\}$  по переменной  $k$  имеет вид

$$Z[g(k,l)] = \sum_{k=0}^{\infty} g(k,l)z^{-k} = \hat{G}(z)[q(z)]^{-l}, l=0,1,\dots, \quad (3)$$

где  $\hat{G}(z)$ ,  $q(z)$  – некоторые аналитические функции.

Тогда  $Z$ -преобразование уравнения будет иметь вид

$$Y(z) = \hat{G}(z)X(q(z)). \quad (4)$$

Отметим, что данное утверждение является аналогом обобщенной теоремы Бореля для непрерывных систем, применение которой для идентификации непрерывных систем рассмотрено в работах [5, 6].

**Постановка задачи определения импульсной переходной функции**

Пусть выполнено условие (3). Требуется по двум входным  $x_i^{\ominus}(k)$ ,  $i=1,2$ ;  $k=0,1,2,\dots,m$  ( $x_i(k)=0$  при  $k > m$ ) и соответствующим выходным сигналам  $y_i^{\ominus}(k)$ ,  $i=1,2$ ;  $k=0,1,2,\dots,n$  ( $y_i(k)=0$  при  $k > n$ ) определить импульсную переходную функцию  $g(k,l)$  системы, описываемой уравнением (1). На основании (2) приходим к системе уравнений

$$y_i^{\ominus}(k) = \sum_{l=0}^{\infty} g(k,l)x_i^{\ominus}(l), \quad i=1,2; \quad k=0,1,2,\dots \quad (5)$$

Пусть

$$X_i^{\ominus}(z) = Z[x_i^{\ominus}(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} x_i^{\ominus}(k)z^{-k}, \quad i=1,2,$$

$$Y_i^{\ominus}(z) = Z[y_i^{\ominus}(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} y_i^{\ominus}(k)z^{-k}, \quad i=1,2.$$

Учитывая условие (3) и применяя к (5) Z-преобразование, приходим к системе алгебраических уравнений относительно функций  $\hat{G}(z)$ ,  $q(z)$ :

$$\begin{cases} \hat{G}(z)X_i^{\ominus}(q(z)) = Y_i^{\ominus}(z), \\ \hat{G}(z)X_i^{\ominus}(q(z)) = Y_i^{\ominus}(z). \end{cases} \quad (6)$$

Решая систему (6), находим искомые функции  $\hat{G}(z), q(z)$ . Тогда  $G(z,l)$  будет иметь вид  $G(z,l) = \hat{G}(z)[q(z)]^{-l}$ .

Импульсную переходную функцию  $g(k,l)$  найдем как обратное Z-преобразование по формуле обращения

$$g(k,l) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C G(z,l)z^{k-1} dz = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \hat{G}(z)[q(z)]^{-l} z^{k-1} dz, \quad k,l=0,1,2,\dots, \quad (7)$$

где контур интегрирования содержит все особые точки функции  $G(z,l) = \hat{G}(z)[q(z)]^{-l}$ .

Отметим, что вычисление контурных интегралов в выражениях (7) является достаточно трудоемкой задачей. Поэтому для нахождения обратного Z-преобразования можно воспользоваться следующей вычислительной схемой, основанной на методе коллокаций.

Для этого, применяя метод редукции, уравнение (3) аппроксимируем следующим образом:

$$\sum_{k=l}^N g(k,l)z^{-k} = \hat{G}(z)[q(z)]^{-l}, \quad l=0,1,\dots,N, \quad (8)$$

где  $N$  – достаточно большое число.

В уравнении (8) для каждого фиксированного значения  $l = 0, 1, 2, \dots, N$  на окружности  $\gamma$  радиуса  $R$  ( $\gamma = \{z, |z| = R\}$ ) с центром в начале координат, в которой содержатся все особые точки функции  $\hat{G}(z)[q(z)]^{-l}$ , выбираем  $(N-l+1)$  равноотстоящую точку  $z_\nu, \nu = 0, 1, \dots, N-l$ , и приравняем левые и правые части уравнения (8) в этих точках. В результате приходим к  $N+1$  системе линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{k=l}^N g(k, l) z_\nu^{-k} = \hat{G}(z_\nu)[q(z_\nu)]^{-l}, \quad \nu = 0, 1, \dots, N-l, \quad (9)$$

где  $l = 0, 1, \dots, N$ . Система (9) однозначно разрешима, так как определитель  $l$ -й системы  $(N-l+1)$  порядка  $(l = 0, 1, \dots, N)$  есть определитель Вандермонда, который равен

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} \frac{1}{(z_0)^l} & \frac{1}{(z_0)^{l+1}} & \dots & \frac{1}{(z_0)^N} \\ \frac{1}{(z_1)^l} & \frac{1}{(z_1)^{l+1}} & \dots & \frac{1}{(z_1)^N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{(z_{N-l})^l} & \frac{1}{(z_{N-l})^{l+1}} & \dots & \frac{1}{(z_{N-l})^N} \end{vmatrix} = \\ &= \frac{1}{(z_0 \dots z_{N-l})^l} \begin{vmatrix} 1 & \frac{1}{z_0} & \dots & \frac{1}{(z_0)^{N-l}} \\ 1 & \frac{1}{z_1} & \dots & \frac{1}{(z_1)^{N-l}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \frac{1}{z_{N-l}} & \dots & \frac{1}{(z_{N-l})^{N-l}} \end{vmatrix} = \\ &= \frac{1}{(z_0 \dots z_{N-l})^l} \prod_{i>j} \left( \frac{1}{z_i} - \frac{1}{z_j} \right) \neq 0. \end{aligned}$$

Решая систему (9) при каждом значении  $l = 0, 1, 2, \dots, N$ , находим элементы последовательности  $\{g(k, l)\}$ ,  $k = 0, 1, \dots, N, l = 0, 1, \dots, N$ .

**Пример.** Рассмотрим ЖАИС, состоящую из  $n$  сенсоров, представленную на рис. 1. Требуется определить импульсную переходную функцию по серии испытаний, состоящих из двух анализов жидкостей  $x = \{x(0), x(1)\}$  – исследуемая жидкость ( $x(0)$  – количественное содержание контролируемой

жидкости,  $x(l)$  – количественное содержание примесей в исследуемой жидкости), по показаниям сенсоров  $y = \{y(0), y(1), \dots, y(n)\}$ .

В качестве первичного измерительного преобразователя (ПИП) ЖАИС выступают сенсоры, выполненные в виде волоконно-оптического сигнализатора уровня жидкости. ВОСУЖ представляет собой кварцевый стержень с шаровым сегментом со стороны контакта с жидкостью. Он описан в работе [7], где также приводятся методы расчета конструктивных параметров.

В ВОСУЖ модуляция оптического сигнала осуществляется в оптическом чувствительном элементе (ОЧЭ) за счет выполнения и нарушения условия полного внутреннего отражения, при этом в зависимости от состава жидкости значения ВОСУЖ различны.

Математическую модель ЖАИС рассмотрим в виде

$$\sum_{l=0}^1 g(k,l)x(l) = y(k), \quad k = 0, 1, \dots, n, \quad (10)$$

где  $x(l)$ ,  $l = 1, 2$ , – исследуемая жидкость;  $y(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, n$ , – показания сенсоров ЖАИС;  $g(k, l)$ ,  $k = 0, 1, \dots, n$ ;  $l = 0, 1$ , – импульсная переходная функция, подлежащая определению.

Определение  $g(k, l)$ ,  $k = 0, 1, \dots, n$ ;  $l = 0, 1$ , проведем по результатам испытания, состоящего из серии двух тестовых входных  $x_i^{\exists}(l)$ ,  $l = 1, 2$ ,  $i = 1, 2$ , и соответствующих выходных тестовых сигналов  $y_i^{\exists}(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, n$ ;  $i = 1, 2$ , что позволяет на основании уравнения (10) записать систему уравнений

$$\sum_{l=0}^{\infty} g(k, l)x_i^{\exists}(l) = y_i^{\exists}(k), \quad k = 0, 1, \dots, i = 1, 2, \quad (11)$$

где положено  $x(l) = 0$  при  $l > 1$ ,  $y(k) = 0$  при  $k > n$ ,  $g(k, l) = 0$  при  $k > n$  или  $l > 1$ .

Пусть Z-преобразование последовательностей  $x(k)$ ,  $y(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots$ , имеет вид

$$X(z) = Z[x(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(k)z^{-k} = x(0) + x(1)z^{-1}, \text{ т.е. } X(z) = \frac{zx(0) + x(1)}{z},$$

$$Y(z) = Z[y(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} y(k)z^{-k} = y(0) + y(1)z^{-1} + \dots + y(n)z^{-n},$$

$$G(z, l) = Z[g(k, l)] = \sum_{k=0}^{\infty} g(k, l)z^{-k}.$$

Пусть Z-преобразование по переменной  $k$  импульсной переходной функции (ИПФ) удовлетворяет условию  $G(z, l) = Z[g(k, l)] = \hat{G}(z)[q(z)]^{-l}$ .

Тогда изображение системы уравнений примет вид

$$\begin{cases} \hat{G}(z) \frac{q(z)x_1^{\ominus}(0) + x_1^{\ominus}(1)}{q(z)} = Y_1^{\ominus}(z), \\ \hat{G}(z) \frac{q(z)x_2^{\ominus}(0) + x_2^{\ominus}(1)}{q(z)} = Y_2^{\ominus}(z). \end{cases}$$

Откуда

$$q(z) = \frac{Y_1^{\ominus}(z)x_2^{\ominus}(1) - Y_2^{\ominus}(z)x_1^{\ominus}(1)}{Y_2^{\ominus}(z)x_1^{\ominus}(0) - Y_1^{\ominus}(z)x_2^{\ominus}(0)}, \text{ или } q(z) = \frac{\begin{vmatrix} x_1^{\ominus}(1) & x_2^{\ominus}(1) \\ Y_1^{\ominus}(z) & Y_2^{\ominus}(z) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1^{\ominus}(0) & x_2^{\ominus}(0) \\ Y_1^{\ominus}(z) & Y_2^{\ominus}(z) \end{vmatrix}},$$

$$\hat{G}(z) = \frac{Y_1^{\ominus}(z)x_2^{\ominus}(1) - Y_2^{\ominus}(z)x_1^{\ominus}(1)}{x_2^{\ominus}(1)x_1^{\ominus}(0) - x_1^{\ominus}(1)x_2^{\ominus}(0)}, \text{ или}$$

$$\hat{G}(z) = \frac{x_1^{\ominus}(1)}{\begin{vmatrix} x_1^{\ominus}(0) & x_1^{\ominus}(1) \\ x_2^{\ominus}(0) & x_2^{\ominus}(1) \end{vmatrix}} Y_2^{\ominus}(z) - \frac{x_2^{\ominus}(1)}{\begin{vmatrix} x_1^{\ominus}(0) & x_1^{\ominus}(1) \\ x_2^{\ominus}(0) & x_2^{\ominus}(1) \end{vmatrix}} Y_1^{\ominus}(z).$$

Импульсная переходная функция восстанавливается обратным Z-преобразованием по формуле (7) или из решений уравнений (9).

### 3. Восстановление входных сигналов мультисенсорных систем

При восстановлении входных сигналов мультисенсорных систем использован подход, изложенный в работе [5].

**Постановка задачи.** Пусть функционирование ПИП описывается уравнением

$$y(k) = \sum_{l=0}^{\infty} g(k,l)x(l), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

где  $x(k), y(k), k = 0, 1, 2, \dots$  – входной и выходной сигналы;  $g(k, l), k, l = 0, 1, 2, \dots$  – ИПФ.

Требуется построить измерительную систему (ИС), состоящую из ПИП и корректирующего устройства (КУ), функционирование которого описывается уравнением

$$x(k) = \sum_{l=0}^{\infty} g_C(k,l)y(l), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (13)$$

где в качестве входного сигнала выступает  $y(k), k = 0, 1, 2, \dots$  – выходной сигнал ИП (12); в качестве выходного сигнала выступает  $x(k), k = 0, 1, 2, \dots$  – входной сигнал системы (12);  $g_C(k, l)$  – ИПФ КУ.

Структурная схема включения КУ в ИС приведена на рис. 2.

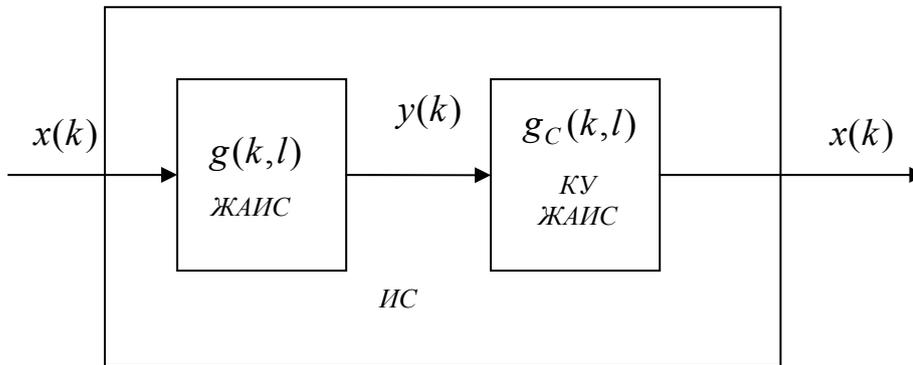


Рис. 2. Структурная схема ИС с аппаратной коррекцией:  $x(k)$  – входной сигнал ИС ПИП;  $x(k)$  – выходной сигнал КУ и ИС;  $g(k,l)$  – ИПФ ПИП;  $g_C(k,l)$  – ИПФ КУ

Рассмотрим дискретную динамическую систему, функционирование которой описывается уравнением

$$y(k) = \sum_{l=0}^{\infty} g(k,l)x(l), \quad k = 0,1,2,\dots, \quad (14)$$

где  $x(k)$ ,  $k = 0,1,2,\dots$ , – входной сигнал, подлежащий восстановлению;  $y(k)$ ,  $k = 0,1,2,\dots$ , – выходной сигнал;  $g(k,l)$  – ИПФ системы (14).

Определим КУ, которое обрабатывает выходной сигнал, формулой

$$x(k) = \sum_{l=0}^{\infty} g_C(k,l)y(l), \quad k = 0,1,2,\dots, \quad (15)$$

где в качестве входного сигнала выступает  $y(k)$ ,  $k = 0,1,2,\dots$ , – выходной сигнал ИП (14); в качестве выходного сигнала выступает  $x(k)$ ,  $k = 0,1,2,\dots$ , – входной сигнал системы (14);  $g_C(k,l)$  – ИПФ КУ.

**Постановка задачи.** Требуется по серии тестовых эталонных входных сигналов  $x_0(k)$ ,  $k = 0,1,2,\dots$ , и соответствующих выходных сигналов построить алгоритм обработки выходного сигнала  $y(k)$ ,  $k = 0,1,2,\dots$ , в результате применения которого будет восстановлен входной сигнал  $x(k)$ .

Задача сводится к определению импульсной переходной функции  $g_C(k,l)$  корректирующего устройства.

Для этого используем метод определения ИПФ по двум тестовым сигналам, описанным выше.

Пусть для ИПФ  $g_C(k,l)$  выполнено условие (3):

$$Z[g_C(k,l)] = \sum_{k=0}^{\infty} g_C(k,l)z^{-k} = \hat{G}_C(z)[q_C(z)]^{-l}, \quad l = 0,1,\dots \quad (16)$$

Определим по двум виртуальным входным сигналам  $x_i^{\exists}(k)$ ,  $i=1,2; k=0,1,2,\dots$ , и соответствующим выходным сигналам  $y_i(k)$ ,  $i=1,2; k=0,1,2,\dots$ , системы (10) ИПФ  $g_C(k,l)$  корректирующего устройства:

$$x_i^{\exists}(k) = \sum_{l=0}^{\infty} g_C(k,l)y_i(l), \quad i=1,2, \quad k=0,1,2,\dots \quad (17)$$

Пусть

$$X_i^{\exists}(z) = Z[x_i^{\exists}(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} x_i^{\exists}(k)z^{-k}, \quad Y_i(z) = Z[y_i(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} y_i(k)z^{-k}, \quad i=1,2, -$$

$Z$ -преобразования последовательностей  $x_i^{\exists}(k)$ ,  $y_i(k)$ ,  $i=1,2; k=0,1,2,\dots$

Учитывая условие (16) и применяя к (17)  $Z$ -преобразование, приходим к системе алгебраических уравнений относительно функций  $\hat{G}_C(z), q_C(z)$ :

$$\begin{cases} \hat{G}_C(z)X_1^{\exists}(q_C(z)) = Y_1(z), \\ \hat{G}_C(z)X_2^{\exists}(q_C(z)) = Y_2(z). \end{cases} \quad (18)$$

Решая систему (18), находим искомые функции  $\hat{G}_C(z), q_C(z)$ . Тогда функция  $G_C(z,l)$  будет иметь вид  $G_C(z,l) = \hat{G}_C(z)[q_C(z)]^{-l}$ .

ИПФ  $g_C(k,l)$  найдем как обратное  $Z$ -преобразование по формуле обращения

$$g_C(k,l) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C G_C(z,l)z^{k-1} dz = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \hat{G}_C(z)[q_C(z)]^{-l} z^{k-1} dz, \quad k,l=0,1,2,\dots,$$

где контур интегрирования содержит все особые точки функции  $G_C(z,l) = \hat{G}_C(z)[q_C(z)]^{-l}$ .

Учитывая, что  $x(k)=0$  при  $k > m$  ( $m$  – число компонент исследуемой жидкости) и  $y(k)=0$  при  $k > n$  ( $n$  – число сенсоров системы), на основании (15) восстановление входного сигнала в процессе эксплуатации проводится по формуле

$$x(k) = \sum_{l=0}^n g_C(k,l)y(l), \quad k=0,1,2,\dots,m.$$

### Заключение

Предложенные в работе методы динамических измерений мультисенсорных систем могут быть реализованы в виде математических моделей для нелинейных систем, динамических систем с распределенными параметрами, эрдитарных систем, как дискретных, так и непрерывных. При этом можно воспользоваться обобщением результатов работ: для непрерывных систем

[4, 6, 8], для нелинейных систем [9, 10], для динамических систем с распределенными параметрами [11, 12] и для эредитарных систем [13, 14].

### **Библиографический список**

1. **Грановский, В. А.** Динамические измерения: теория и метрологическое обеспечение – вчера и сегодня / В. А. Грановский // Датчики и системы. – 2016. – № 3 (201). – С. 57–72.
2. **Бойков, И. В.** Аналитические и численные методы идентификации динамических систем : монография / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – 398 с.
3. **Бойков, И. В.** Методы идентификации динамических систем / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Программные системы: теория и приложения. – 2014. – Т. 5, № 5 (23). – С. 79–96.
4. **Бойков, И. В.** Определение временных характеристик линейных систем с распределенными параметрами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Метрология. – 2012. – № 8. – С. 3–14.
5. **Бойков, И. В.** Восстановление входных сигналов дискретных динамических систем / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Измерительная техника. – 2017. – № 11. – С. 3–7.
6. **Бойков, И. В.** Восстановление параметров линейных систем, описываемых дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Измерительная техника. – 2013. – № 4. – С. 6–11.
7. **Серебряков, Д. И.** Расчет конструктивных параметров чувствительного элемента волоконно-оптического сигнализатора уровня жидкости / Д. И. Серебряков, Т. И. Мурашкина, Н. П. Кривулин // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – № 7. – С. 20–22.
8. **Бойков, И. В.** Определение динамических характеристик измерительных преобразователей с распределенными параметрами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Измерительная техника. – 2000. – № 9. – С. 29–32.
9. **Щербаков, М. А.** Итерационный метод оптимальной нелинейной фильтрации изображений / М. А. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 4 (20). – С. 43–56.
10. **Бойков, И. В.** Идентификация нелинейных динамических систем / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2018. – Т. XXI, № 2 (74). – С. 17–31.
11. **Кривулин, Н. П.** Определение параметров физических процессов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных с переменными коэффициентами / Н. П. Кривулин // Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем : сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов, аспирантов и студентов / под ред. И. В. Бойкова. – Пенза, 2014. – С. 172–178.
12. **Бойков, И. В.** Параметрическая идентификация линейных динамических систем с распределенными параметрами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Метрология. – 2014. – № 7. – С. 13–23.
13. **Бойков, И. В.** Параметрическая идентификация систем, математические модели которых описываются дифференциальными уравнениями с производными дробных порядков / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Метрология. – 2013. – № 9. – С. 3–16.
14. **Бойков, И. В.** Параметрическая идентификация эредитарных систем с распределенными параметрами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 120–129.

**References**

1. Granovskiy V. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2016, no. 3 (201), pp. 57–72. [In Russian]
2. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Analiticheskie i chislennyye metody identifikatsii dinamichekikh sistem: monografiya* [Analytical and numerical methods of dynamic system identification: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2016, 398 p. [In Russian]
3. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Program systems: theory and applications]. 2014, vol. 5, no. 5 (23), pp. 79–96. [In Russian]
4. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Metrologiya* [Metrology]. 2012, no. 8, pp. 3–14. [In Russian]
5. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment]. 2017, no. 11, pp. 3–7. [In Russian]
6. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment]. 2013, no. 4, pp. 6–11. [In Russian]
7. Serebryakov D. I., Murashkina T. I., Krivulin N. P. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrument engineering]. 2006, no. 7, pp. 20–22. [In Russian]
8. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment]. 2000, no. 9, pp. 29–32. [In Russian]
9. Shcherbakov M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 4 (20), pp. 43–56. [In Russian]
10. Boykov I. V., Krivulin H. P. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki* [Siberian journal of industrial mathematics]. 2018, vol. XXI, no. 2 (74), pp. 17–31. [In Russian]
11. Krivulin N. P. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie estestvenno-nauchnykh i sotsial'nykh problem: sb. st. VIII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. molodykh spetsialistov, aspirantov i studentov* [Mathematical and computer simulation of natural scientific and social problems: proceedings of VIII International scientific and technical conference of young specialists, postgraduate and undergraduate students]. Penza, 2014, pp. 172–178. [In Russian]
12. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Metrologiya* [Metrology]. 2014, no. 7, pp. 13–23. [In Russian]
13. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Metrologiya* [Metrology]. 2013, no. 9, pp. 3–16. [In Russian]
14. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 2 (26), pp. 120–129. [In Russian]

---

**Кривулин Николай Петрович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра высшей и прикладной  
математики, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: krivulin@bk.ru

**Krivulin Nikolay Petrovich**

Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department  
of higher and applied mathematics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Кривулин, Н. П. Методы идентификации мультисенсорных систем / Н. П. Кривулин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 47–58. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-5.

*А. С. Колдов, А. В. Светлов*

## **ОЦЕНИВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕРЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВОКУПНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Разработана методика оценивания погрешностей определения параметров нерезонансных многоэлементных электрических цепей по результатам совокупных измерений.

*Материалы и методы.* Указаны причины появления систематических (методических и инструментальных), а также случайных погрешностей определения параметров нерезонансных многоэлементных электрических цепей. Анализ погрешностей при поочередной вариации в установленных диапазонах номинальных значений параметров всех элементов цепей позволяет определить диапазоны допустимых соотношений измеряемых параметров элементов цепей.

*Результаты.* Показаны этапы методики и даны расчетные соотношения для оценивания погрешностей определения параметров цепей. Предложенная методика применена для оценивания погрешностей определения параметров каждого из элементов нерезонансной четырехэлементной цепи при вариации номинальных значений параметров всех элементов цепи в заданных диапазонах.

*Выводы.* На практическом примере четырехэлементной цепи подтверждена возможность применения предложенной методики для оценивания погрешностей определения параметров каждого из элементов цепи.

**Ключевые слова:** нерезонансная электрическая цепь, совокупные измерения, погрешности определения параметров цепи.

*A. S. Koldov, A. V. Svetlov*

## **ERROR ESTIMATE OF DETERMINING NON-RESONANT FOUR-ELEMENT CIRCUIT PARAMETERS USING THE AGGREGATE MEASUREMENTS METHOD**

### **Abstract.**

*Background.* The authors have developed an error estimating technique when determining the parameters of non-resonant multi-element circuits using the results of aggregate measurements.

*Materials and methods.* Causes of systematic (methodical and instrumental) and random errors of determining the parameters of non-resonant multi-element circuits are given. Error analysis with one-by-one variations of all circuit element parameters in fixed ranges of nominal values allows to determine ranges for permissible ratios of measurable circuit element parameters.

*Results.* The work shown steps of the technique and presents calculated ratios for estimating errors of determining the circuit parameters. The proposed method is ap-

plied for estimating errors when determining the parameters of non-resonant four-element circuit with variation of all circuit element parameters in fixed ranges.

*Conclusions.* The possibility of applying the proposed methodology for estimating errors when determining the parameters of every circuit elements is confirmed on a practical example.

**Keywords:** non-resonant circuit, aggregate measurements, errors of determining of circuit parameters

### Введение

Одним из важных разделов измерительной техники является разработка средств измерений параметров нерезонансных многоэлементных электрических цепей (ЭЦ) [1–3]. Измерительные преобразователи параметров таких ЭЦ отличаются сложностью аппаратной части, необходимостью последовательного выполнения нескольких аналоговых преобразований выходного напряжения измерительной цепи (ИЦ) для получения сигналов, пропорциональных искомым параметрам элементов ЭЦ, что способствует увеличению случайной погрешности измерений [4]. Существенно упростить аппаратную часть измерительных преобразователей позволяет переход от аналоговых преобразований измеряемых величин к цифровой обработке выходных сигналов ИЦ с использованием метода совокупных измерений [5]. ИЦ осуществляет преобразование сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение. С помощью быстродействующих устройств выборки и хранения (УВХ) берутся отсчеты этого напряжения в характерные моменты времени переходного процесса в ИЦ после подачи импульсного тестового воздействия. Выходные напряжения УВХ преобразуются в коды с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Все дальнейшие преобразования информации о параметрах элементов ЭЦ выполняются на программном уровне с использованием метода совокупных измерений, когда искомые значения параметров элементов ЭЦ определяются путем решения системы, составленной из уравнений вида

$$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (1)$$

представляющих выходное напряжение ИЦ в виде суммы постоянной составляющей  $A_0$ , линейно изменяющейся составляющей с крутизной  $A_1$ , спадающей экспоненциальной составляющей с начальным значением  $A_2$  и возрастающей экспоненциальной составляющей с конечным (установившимся) значением  $A_3$  и постоянной времени  $\tau$ .

Число уравнений, входящих в систему, равно числу отсчетов напряжения и, соответственно, равно числу элементов ЭЦ. Например, при измерении параметров четырехэлементных ЭЦ выбираются моменты отсчетов  $t_1$ ,  $t_2$  выходного напряжения ИЦ на экспоненциальном участке переходного процесса и моменты  $t_{1y}$  и  $t_{2y}$  в установившемся режиме. Система уравнений связывает измеренные значения отсчетов выходного напряжения ИЦ  $U(t_1)$ ,  $U(t_2)$ ,  $U(t_{1y})$ ,  $U(t_{2y})$  и параметры составляющих этого напряжения  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $\tau$ , функционально связанных с искомыми параметрами элементов ЭЦ.

Данная статья посвящена разработке методики оценивания погрешностей определения параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений.

### **1. Причины появления систематических и случайных погрешностей определения параметров нерезонансных ЭЦ**

Методические погрешности средств определения параметров многоэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений обусловлены следующими факторами:

– неточное представление исследуемых объектов эквивалентными электрическими схемами;

– определение начального значения выходного напряжения ИЦ (1) путем экстраполяции по значениям этого напряжения, измеренным в другие моменты времени, в условиях искажения функциональной зависимости между сопротивлением ЭЦ и выходным напряжением ИЦ из-за паразитных параметров операционного усилителя (ОУ), платы, подводящих проводников;

– использование упрощенных аналитических решений систем уравнений в обобщенных  $A$ -параметрах для отсчетов выходных напряжений ИЦ, полученных в условиях неполного завершения переходного процесса в ИЦ, при неполном установлении экспоненциального напряжения.

В данной работе оценивается влияние последнего из упомянутых факторов путем сравнения упрощенных аналитических решений систем уравнений относительно  $A$ -параметров и истинных значений этих параметров.

Инструментальные погрешности средств определения параметров многоэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений обусловлены неидеальностью элементной базы узлов аппаратной части этих средств:

– измерительной цепи, осуществляющей преобразование сопротивления электрической цепи в напряжение;

– формирователя входного воздействия, вызывающего такой переходный процесс в ИЦ, при котором параметры постоянной, линейно изменяющейся и экспоненциально изменяющейся составляющих выходного напряжения ИЦ связаны простыми функциональными зависимостями с параметрами исследуемой электрической цепи;

– устройства выборки и хранения напряжения, осуществляющего получение и хранение отсчетов выходного напряжения ИЦ в заданные характерные моменты времени;

– аналого-цифрового преобразователя, осуществляющего оцифровку выходного напряжения УВХ.

Причинами появления случайных погрешностей определения параметров многоэлементных ЭЦ могут быть: собственные шумы пассивных и активных элементов, нестабильность их параметров (например, напряжения смещения операционных усилителей), пульсации питающих напряжений, наводки по цепям питания и общей шине и др.

### **2. Методика оценивания погрешностей определения параметров нерезонансных ЭЦ по результатам совокупных измерений**

Наиболее высокая достоверность оценивания погрешностей средств измерений параметров ЭЦ может быть получена при проведении полномас-

штабных экспериментальных исследований, требующих больших временных и материальных затрат. Поэтому оправдывает себя практика проведения основного объема исследований путем математического моделирования, результаты которого на завершающей стадии проверяются экспериментально.

Для математического моделирования ИЦ требуется модель ОУ, учитывающая реальные значения его коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений, максимальной скорости нарастания выходного напряжения, частоты единичного усиления и т.д. Аналитическое описание выходного напряжения ОУ возможно при учете только одного-двух из перечисленных параметров. При попытке одновременного учета нескольких параметров, характеризующих неидеальность ОУ, получаются настолько громоздкие выражения, что они становятся непригодными для моделирования простейшего инвертирующего усилителя, не говоря уже о ИЦ измерителя параметров многоэлементных цепей, тем более с учетом влияния паразитных параметров платы и вспомогательных цепей обеспечения режима ОУ по постоянному току.

Возможность одновременного учета множества факторов, характеризующих неидеальность ОУ, появляется при переходе от аналитического описания свойств ОУ к схемотехническому моделированию с использованием программ PSpice [6], Multisim [7] и им подобных, а также макромоделей ОУ, создаваемых с учетом более десятка факторов, определяющих отличие реальных параметров ОУ от параметров идеальных усилителей [8].

Методика оценивания погрешностей определения параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений предусматривает следующие этапы:

1. Сравнение упрощенных аналитических решений систем уравнений относительно  $A$ -параметров и истинных значений этих параметров позволяет оценивать методические погрешности определения  $A$ -параметров:

$$\delta A_i = \frac{A_{i \text{ упрощ}} - A_i}{A_i} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $A_{i \text{ упрощ}}$  – значение  $i$ -го обобщенного  $A$ -параметра, найденное как упрощенное аналитическое решение систем, составленных из уравнений вида (1);  $A_i$  – истинное значение  $i$ -го параметра.

В результате анализа зависимости  $\delta A_i$  от выбора моментов времени получения отсчетов выходного напряжения ИЦ сформулированы обоснованные рекомендации по выбору моментов отсчетов с учетом постоянной времени экспоненциальной составляющей выходного напряжения ИЦ  $\tau$ :  $1,5\tau \geq t_1 \geq 0,5\tau$ ;  $t_2 = 2t_1$ ;  $t_{1y} \geq 8\tau$ ;  $t_{2y} - t_{1y} \geq 2\tau$ .

2. Создание модели реального входного импульсного напряжения с учетом длительности фронта импульсов [9] позволяет проводить исследование ИЦ во временной области.

3. Создание модели ИЦ с реальной передаточной функцией с учетом неидеальности ОУ, а также с учетом влияния вспомогательных цепей обеспечения режима ОУ по постоянному току (аналоговый ключ или фильтр нижних частот в цепи отрицательной обратной связи), позволяет в результате

моделирования ИЦ с реальным входным напряжением получить выходное напряжение модели ИЦ с реальной передаточной функцией  $U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t)$ .

4. Создание модели ИЦ с номинальной передаточной функцией в предположении идеальности ОУ позволяет в результате моделирования получить выходное напряжение модели ИЦ с номинальной передаточной функцией  $U_{\text{ВЫХ.НОМ}}(t)$ .

5. Сравнение выходных напряжений моделей ИЦ с реальной и номинальной передаточными функциями позволяет оценивать погрешность преобразования сопротивления ЭЦ в напряжение:

$$\delta U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t) = \frac{U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t) - U_{\text{ВЫХ.НОМ}}(t)}{U_{\text{ВЫХ.НОМ}}(t)} \cdot 100 \% . \quad (3)$$

В результате анализа зависимости погрешности  $\delta U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t)$  от времени можно оптимизировать режимы работы ИЦ путем подбора ОУ, параметров опорных элементов и параметров вспомогательных цепей.

6. Определение искомых параметров каждого  $i$ -го элемента ЭЦ  $X_{i \text{ mod}}$  и  $X_{i \text{ ном}}$  по значениям дискретных отсчетов выходных напряжений моделей ИЦ с реальной  $U_{\text{ВЫХ.МОД}}(t)$  и номинальной  $U_{\text{ВЫХ.НОМ}}(t)$  передаточными функциями может быть реализовано:

– путем решения численными методами систем уравнений – определяются параметры  $X_{i \text{ mod}}^s$  ( $s$  – верхний индекс);

– путем нахождения упрощенных аналитических решений систем уравнений в обобщенных  $A$ -параметрах для отсчетов выходных напряжений ИЦ – определяются параметры  $X_{i \text{ mod}}^u$  и  $X_{i \text{ ном}}^m$  ( $u, m$  – верхние индексы).

7. Сопоставление полученных значений искомых параметров с действительными значениями  $X_i$  параметров ЭЦ позволяет определить:

– методическую погрешность определения искомых параметров элементов ЭЦ путем нахождения упрощенных аналитических решений систем уравнений для отсчетов выходных напряжений модели ИЦ с номинальной передаточной функцией:

$$\delta X_{i \text{ ном}}^m = \frac{X_{i \text{ ном}}^m - X_i}{X_i} \cdot 100 \% ; \quad (4)$$

– инструментальную погрешность определения искомых параметров элементов ЭЦ путем решения численными методами систем уравнений для отсчетов выходных напряжений модели ИЦ с реальной передаточной функцией:

$$\delta X_{i \text{ mod}}^s = \frac{X_{i \text{ mod}}^s - X_i}{X_i} \cdot 100 \% ; \quad (5)$$

– результирующую погрешность определения искомых параметров элементов ЭЦ путем нахождения упрощенных аналитических решений

систем уравнений для отсчетов выходных напряжений модели ИЦ с реальной передаточной функцией:

$$\delta X_{i \text{ mod}}^u = \frac{X_{i \text{ mod}}^u - X_i}{X_i} \cdot 100 \% . \quad (6)$$

Результирующая погрешность  $\delta X_{i \text{ mod}}^u$  учитывает и методическую, и инструментальную погрешности определения искомых параметров элементов ЭЦ.

8. Анализ погрешности определения параметра каждого элемента ЭЦ при поочередной вариации в установленных диапазонах номинальных значений параметров всех элементов ЭЦ позволяет определить диапазоны допустимых соотношений измеряемых параметров элементов ЭЦ.

9. Оценивание случайных погрешностей результатов совокупных измерений параметров многоэлементных ЭЦ методом Монте-Карло позволяет сформулировать обоснованные рекомендации по выбору средств получения отсчетов выходного напряжения ИЦ в фиксированные моменты времени.

10. Оценивание сходимости результатов экспериментальных исследований измерителей параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ с результатами математического моделирования позволяет подтвердить корректность предложенной методики совокупных измерений параметров ЭЦ и используемых расчетных соотношений.

Практическая реализация предложенной методики рассмотрена на примере четырехэлементной ЭЦ, показанной в табл. 1 [9].

Таблица 1

$\left\{ \begin{array}{l} U(t_1) = A_0 + A_1 \cdot t_1 + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right); \\ U(t_2) = A_0 + A_1 \cdot t_2 + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}\right); \\ U(t_{1y}) = A_0 + A_1 \cdot t_{1y} + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{1y}}{\tau}}\right); \\ U(t_{2y}) = A_0 + A_1 \cdot t_{2y} + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{2y}}{\tau}}\right) \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}; \\ C_2 = \frac{A_3 C_0}{U_0}; \\ R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}; \\ R_2 = \frac{\tau U_0}{A_3 C_0} \end{array}$

В таблице 1 приведены: схема ИЦ; вид тестового импульсного сигнала; характер сопротивления опорного элемента; вид системы уравнений для

выходных напряжений ИЦ в обобщенных  $A$ -параметрах; соотношения для вычисления искомых параметров элементов ЭЦ по найденным  $A$ -параметрам.

Номинальные значения параметров:  $C_1 = 3$  нФ;  $R_1 = 150$  кОм;  $C_2 = 6,2$  нФ;  $R_2 = 12$  кОм;  $\tau = 74,4$  мкс;  $C_0 = 17$  нФ;  $U_0 = 5$  В; ОУ типа 544УД2. Стабилизация режима ОУ по постоянному току осуществляется с помощью аналогового ключа ADG736 в цепи отрицательной обратной связи ИЦ (на схеме не показано).

По результатам схемотехнического моделирования ИЦ в среде PSpice определены методические, инструментальные и результирующие погрешности определения искомых параметров каждого из элементов ЭЦ при вариации номинальных значений параметров в следующих диапазонах:  $C1n$  от 1 до 10 нФ;  $R1n$  от 50 до 500 кОм;  $C2n$  от 3 до 14 нФ;  $R2n$  от 8 до 24 кОм. В качестве примера на рис. 1 приведен один из полученных графиков зависимостей погрешностей определения одного из параметров в диапазоне номинальных значений другого параметра.

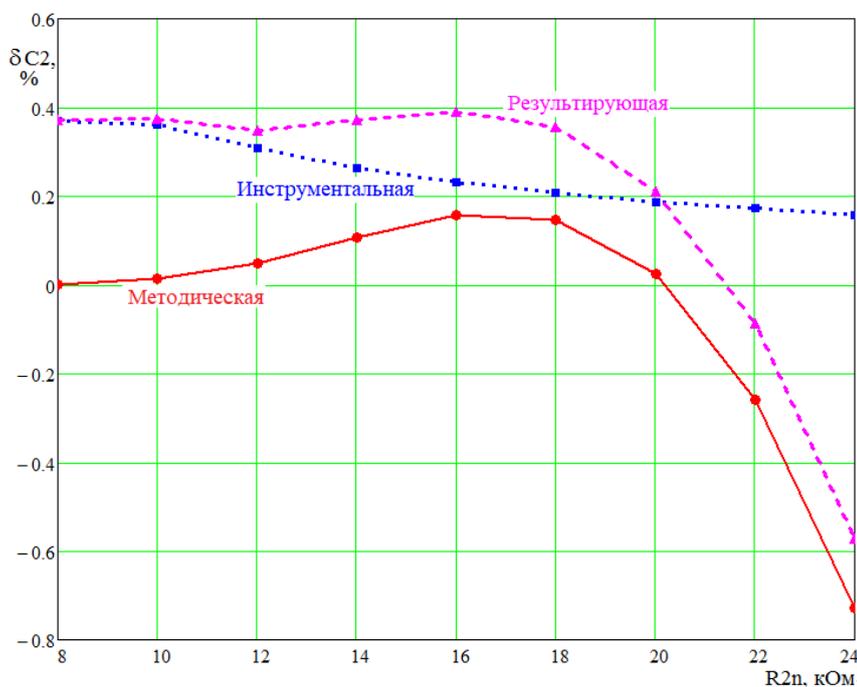


Рис. 1. Графики погрешностей определения параметра  $C_2$  в диапазоне номинальных значений параметра  $R_2$

Полученная информация может использоваться для определения границ диапазонов значений измеряемых параметров элементов ЭЦ, исходя из установленных пределов допустимой погрешности измерений.

Анализ случайных погрешностей результатов совокупных измерений параметров многоэлементных ЭЦ позволяет сформулировать обоснованные рекомендации по выбору средств получения отсчетов выходного напряжения ИЦ. В качестве примера на рис. 2 приведена оценка случайной погрешности измерений параметров рассмотренной выше четырехэлементной ЭЦ при

вариации относительной случайной погрешности результатов измерений отсчетов напряжения от  $\delta U = \pm 0,005\%$  до  $\delta U = \pm 0,05\%$ .

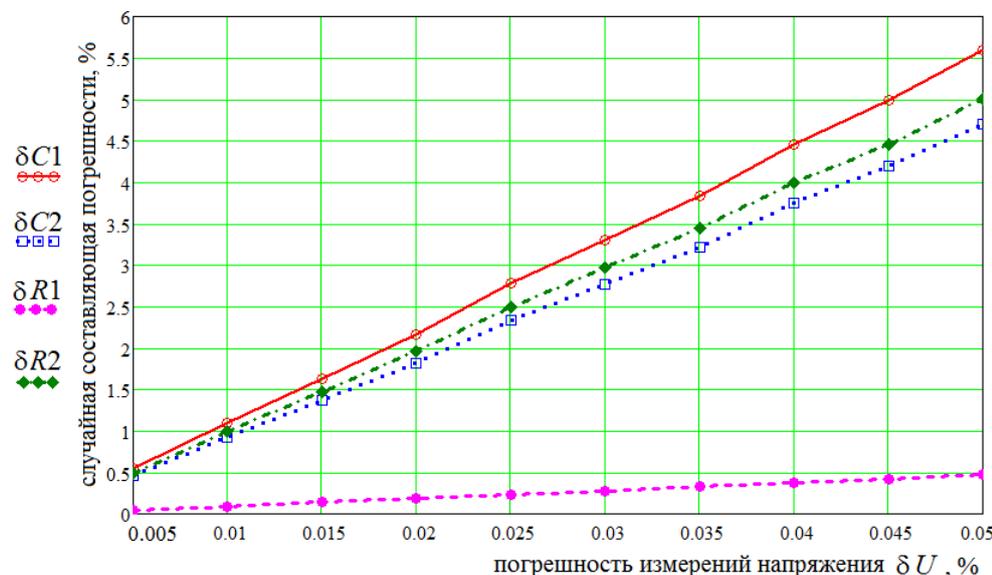


Рис. 2. Графики зависимостей случайных погрешностей измерений параметров ЭЦ от случайной погрешности измерений отсчетов напряжения

Из графиков на рис. 2 видно, что для получения случайных погрешностей совокупных измерений параметров элементов цепи не более 1 % необходимо осуществлять измерения отсчетов выходного напряжения ИС с относительной погрешностью не более 0,01 %, для этого требуется многоразрядный (не менее 16 бит) АЦП, например, МСР3424. На входе АЦП должно быть включено быстродействующее УВХ, например AD781, запоминающее текущее значение входного напряжения ИЦ и хранящее его до следующего отсчета в такой же момент времени в следующем периоде входного воздействия [10]. Использование периодической последовательности импульсов на входе ИЦ и усреднение получаемых отсчетов ее выходного напряжения за множество циклов способствует снижению результирующей погрешности измерений.

Для уменьшения дополнительных, в частности температурных, погрешностей могут применяться известные технические решения [11].

### Заключение

Подтверждена возможность применения предложенной методики для оценивания погрешностей определения параметров каждого из элементов нерезонансных многоэлементных ЭЦ.

### Библиографический список

1. **Кнеллер, В. Ю.** Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. **Мартяшин, А. И.** Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.

3. **Колдов, А. С.** Синтез измерительного преобразователя для измерения проводимости кондуктометрического датчика / А. С. Колдов, В. И. Кулапин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 250–251.
4. **Колдов, А. С.** Оценивание случайных погрешностей измерительных преобразователей / А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 76–84.
5. **Светлов, А. В.** Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей / А. В. Князьков, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 3 (25). – С. 69–78.
6. PSpice® User's Guide. includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. – Cadence. Product Version 15.7. – July 2006. – URL: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspug.pdf>.
7. **Хернитер, М. Е.** Электронное моделирование в Multisim / М. Е. Хернитер. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 488 с.
8. OrCAD Model Editor 9.1 webupdate1. – 2017. – URL: <https://software.-com/windows/apps/orcad-model-editor>.
9. **Колдов, А. С.** Оценка погрешностей совокупных измерений параметров многоэлементных электрических цепей / А. С. Колдов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 71–74.
10. **Светлов, А. В.** Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров электрических цепей / А. В. Светлов, И. В. Ушенина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 1. – С. 81–89.
11. **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.

#### References

1. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determination of parameters of multielement two-terminal circuits]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
2. Martyashin A. I., Kulikovskiy K. L., Kuroedov S. K., Orlova L. V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey* [Foundations of invariant transformation of electric circuit parameters]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 216 p. [In Russian]
3. Koldov A. S., Kulapin V. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 1, pp. 250–251. [In Russian]
4. Koldov A. S., Rodionova N. V., Svetlov A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 4 (26), pp. 76–84. [In Russian]
5. Svetlov A. V., Knyaz'kov A. V., Koldov A. S., Rodionova N. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 3 (25), pp. 69–78. [In Russian]
6. *PSpice® User's Guide. includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice*. Cadence. Product Version 15.7. July 2006. Available at: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspug.pdf>.
7. Kherniter M. E. *Elektronnoe modelirovanie v Multisim* [Electronic simulation in Multisim]. Moscow: DMK Press, 2010, 488 p. [In Russian]
8. *OrCAD Model Editor 9.1 webupdate1*. 2017. Available at: <https://software.-com/windows/apps/orcad-model-editor>.
9. Koldov A. S. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 71–74. [In Russian]

10. Svetlov A. V., Ushenina I. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2008, no. 1, pp. 81–89. [In Russian]
11. Arbuzov V. P., Mishina M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 3 (43), pp. 94–105. [In Russian]

---

***Колдов Александр Сергеевич***

старший преподаватель, кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

***Koldov Aleksandr Sergeevich***

Senior lecturer, sub-department of radio engineering and radio electronic system, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Светлов Анатолий Вильевич***

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

***Svetlov Anatoliy Vil'evich***

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

---

**Образец цитирования:**

Колдов, А. С. Оценивание погрешностей определения параметров нерезонансных электрических цепей по результатам совокупных измерений / А. С. Колдов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 59–68. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-6.

## ПОМЕХИ РАДИОВОЛНОВОМУ СРЕДСТВУ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ В ЛЕСУ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Лесные массивы способствуют скрытному приближению нарушителей к важным охраняемым объектам. Поэтому обнаружение людей и техники в лесу является актуальной задачей. Для этого применяются радиоволновые средства обнаружения (РВСО) метрового диапазона длин волн. Помехой для РВСО являются отражения от раскачивающихся при ветре крон деревьев. В статье анализируется этот тип помехи.

*Материалы и методы.* Используется модель дерева в виде ущемленной консольной конусной балки с приложением силы ветра к ее верхнему концу. С использованием этой модели оценены отклонения кроны в горизонтальном и вертикальном направлениях при воздействии ветра. Модель помехи определена как результат интерференции прямого луча и луча, отраженного колеблющейся диффузной поверхностью массива крон деревьев.

*Результаты.* Рассмотрены два случая размещения РВСО – внутри лесного массива и у кромки лесного массива. Они отличаются направлением колебаний отражающей поверхности. Внутри массива эта поверхность горизонтальная и колеблется в вертикальном направлении. На краю массива эта поверхность вертикальная и колеблется в горизонтальном направлении. Амплитуда колебаний в горизонтальном направлении на порядок больше, чем в вертикальном. Установлено, что амплитуда помехи определяется главным образом не величиной отклонения отражающей поверхности, а ее коэффициентом отражения, зависящим от плотности крон деревьев, и углом падения.

*Выводы.* В диапазоне рабочих частот РВСО величина помехи на порядок ниже сигналов от человека-нарушителя и не мешает его обнаружению.

**Ключевые слова:** отклонение крон деревьев при ветре, отражающая поверхность массива крон, прямой и отраженный сигналы, приращения суммарного сигнала при колебаниях массива крон.

N. N. Tokarev

## RADIO-WAVE DETECTOR INTERFERENCE IN THE FOREST

### Abstract.

*Background.* Forests provide the covert approach of intruders to vital protected facilities. Therefore, the detection of people and equipment in the forest is an urgent task. To fulfill this, it is necessary to use radio-wave detectors (RWD) of the meter wavelength range. Interference to RWD is reflections from tree crowns swaying in the wind. The article analyzes this type of interference.

*Materials and methods.* It is used a tree model in the form of a pinched cantilever cone beam with application of wind force to its top. Using this model, the crown

deviations in horizontal and vertical directions are estimated when exposed to wind. The interference model is determined as a result of the direct beam interference and the beam reflected by the oscillating diffuse surface of an array of tree crowns.

*Results.* Two cases of detector location are considered - inside the forest and at the edge of the forest. They differ in the direction of oscillation of the reflecting surface. In the forest, this surface is horizontal and it oscillates in the vertical direction. At the edge of the forest, this surface is vertical and oscillates in the horizontal direction. The amplitude of oscillations in the horizontal direction is greater than in the vertical. It has been established that the amplitude of interference is mainly determined not by the amount of deviation of the reflecting surface, but by its reflection coefficient, which depends on the density of tree crowns, and the angle of incidence.

*Conclusions.* In the RWD operating frequency range the magnitude of the interference is much lower than the signals generated by an intruder (a person) and does not prevent his/her detection.

**Keywords:** inclination of tree crowns in the wind, reflecting surface of crown tract, direct and reflected signals, increment of signal for deflection of crown tract.

## **Введение**

Наличие лесных массивов и растительности представляет собой естественные условия, способствующие скрытному приближению нарушителей к важным охраняемым объектам. Поэтому обнаружение людей и техники в лесу является одной из важных и сложных задач систем обеспечения безопасности этих объектов, а анализ возможностей и условий ее решения представляет собой очень актуальную задачу теории и практики систем охраны.

Применение для обнаружения людей и техники в лесу радиотехнических средств обнаружения (СО) ограничено наличием помех от раскачивающихся при ветре кустов и деревьев. Эти помехи максимально проявляются в СО диапазонов сверхвысоких частот (СВЧ), наиболее широко используемых в системах охраны. В настоящее время для блокирования участков лесистой местности используются радиоволновые СО (РВСО) метрового и дециметрового диапазонов волн [1–3]. На блокируемом участке между передатчиком (ПРД) и приемником (ПРМ) этих СО допускается наличие высокой травы, кустарника. Человек-нарушитель легко обнаруживается в этой растительности, а суммарная плотность подвижной травы, кустарника, ветвей деревьев между ПРД и ПРМ вблизи поверхности земли недостаточна для создания сколько-нибудь серьезных помех. Представляет интерес оценка влияния на РВСО раскачивающихся при ветре крон деревьев, образующих в сумме значительную отражающую поверхность для электромагнитных волн.

### **1. Характер движения крон при ветре**

В лесном массиве ветер максимально действует на верхнюю часть дерева, чем ближе к поверхности земли, тем ветер слабее. Чем гуще лес, тем меньше скорость ветра. В густых лесах на высоте 2 м от земли скорость ветра может снижаться до 0,3 % от скорости в вершине дерева [4]. В этих условиях у достаточно крупных деревьев ствол остается почти неподвижным, а крона с ветвями и листьями отклоняется под действием ветра. На рис. 1 условно показано дерево с кроной в виде круга с заливкой светлого тона в исходном состоянии и более темного тона в отклоненном состоянии. Если отклонение кроны в горизонтальном направлении составляет  $x$ , а показанные пунктиром

диаметры кроны в первоначальном и отклоненном состоянии образуют равнобедренный треугольник, то из геометрических соображений отклонение кроны в вертикальном направлении составляет

$$z = 2R_c - \sqrt{(2R_c)^2 - x^2}, \quad (1)$$

где  $R_c$  – радиус кроны.

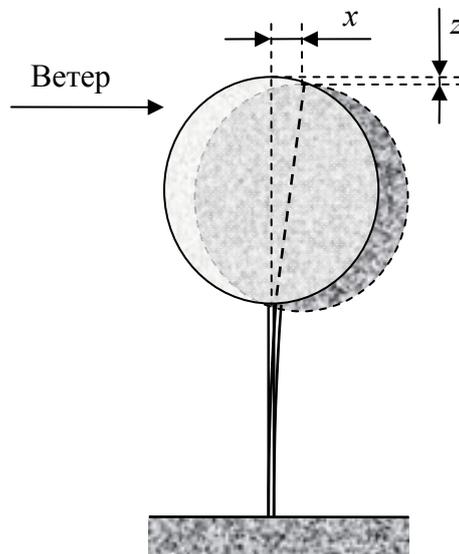


Рис. 1. Отклонение кроны дерева под действием ветра

Таким образом, при воздействии ветра, кроме смещения кроны в горизонтальном направлении на величину  $x$  происходит, смещение ее в вертикальном направлении (вниз) на величину  $z$ .

В лесном массиве при воздействии ветровой волны происходит смещение некоторого массива крон, как показано на рис. 2. Если вблизи этого массива находится РВСО, содержащее ПРД и ПРМ, разнесенные на некоторое расстояние, то от ПРД на ПРМ кроме прямой волны и других отраженных волн попадает волна, отраженная диффузной поверхностью, образованной кромками крон деревьев, как показано на рис. 2. Сигнал в ПРМ образуется в результате интерференции этих волн. При смещении отражающей поверхности изменяется длина пути отраженной волны, как показано на рис. 2 пунктирной и сплошной линиями, что приводит к изменению амплитуды сигнала ПРМ, представляющему собой помеху от воздействия ветра.

Возможны два варианта расположения РВСО относительно отражающей поверхности крон деревьев. Им соответствуют стрелки 1 и 2 с надписью «Ветер», показывающие направление ветра. В первом варианте РВСО располагается внутри лесного массива, ПРД и ПРМ находятся на некоторой высоте над землей ниже уровня крон деревьев на расстоянии от них  $R = H - h$ , где  $H$  – высота нижней кромки крон,  $h$  – высота расположения антенн РВСО. В этом случае рис. 2 следует рассматривать как вид сбоку, направление ветра на нем показано стрелкой 1, смещение кромки крон деревьев, показанное на рисунке, соответствует вертикальному смещению  $z$  сверху вниз. При этом на

участке ветровой волны уменьшаются средняя высота  $H$  крон над землей и расстояние  $R$ .

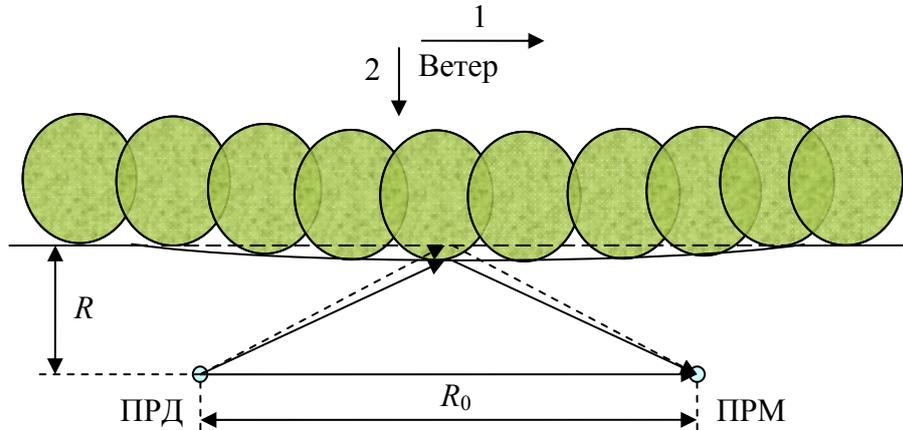


Рис. 2. Влияние смещения крон деревьев на распространение сигнала СО

Во втором варианте РВСО располагается у кромки леса на расстоянии  $R$  от нее. В этом случае рис. 2 следует рассматривать как вид сверху, направление ветра на нем показано стрелкой 2, смещение кромки крон деревьев, показанное на рисунке, соответствует горизонтальному смещению  $x$  с изменением расстояния  $R$ .

Смещение массива крон, образующих отражающую поверхность, зависит от скорости ветра  $V_v$ , характеристик деревьев, частоты  $n_t$  собственных колебаний деревьев.

Частота собственных колебаний дерева при моделировании его консольной балкой с фиксированным нижним концом и приложением силы к верхнему концу определяется его жесткостью  $k_r$  и массой  $m$  [5, 6]:

$$n_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{m}}.$$

Жесткость системы находится [6] из равенства:  
– силы, изгибающей ствол дерева:

$$F_1 = \frac{3\pi \cdot E d^4 x}{32 l^3},$$

где  $E$  – модуль упругости древесины;  $d$  – диаметр ствола дерева;  $l$  – высота ствола;  $x$  – смещение наивысшей точки;  
– и линейной восстанавливающей силы [5]:

$$F_2 = k_r x.$$

Из этого равенства ( $F_1 = F_2$ ) следует

$$k_r = \frac{3\pi \cdot E d^4}{32 l^3}.$$

Выражая массу конусообразного ствола дерева через плотность древесины  $\rho_t$  и объем ствола, получаем

$$n_t = \frac{3d}{\pi\sqrt{32} \cdot l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_t}}.$$

На рис. 3 приведены зависимости собственной частоты трех типов деревьев от их высоты при одинаковом  $d = 0,3$  м. Деревья различаются плотностью древесины  $\rho_t$  и модулем упругости  $E$ .

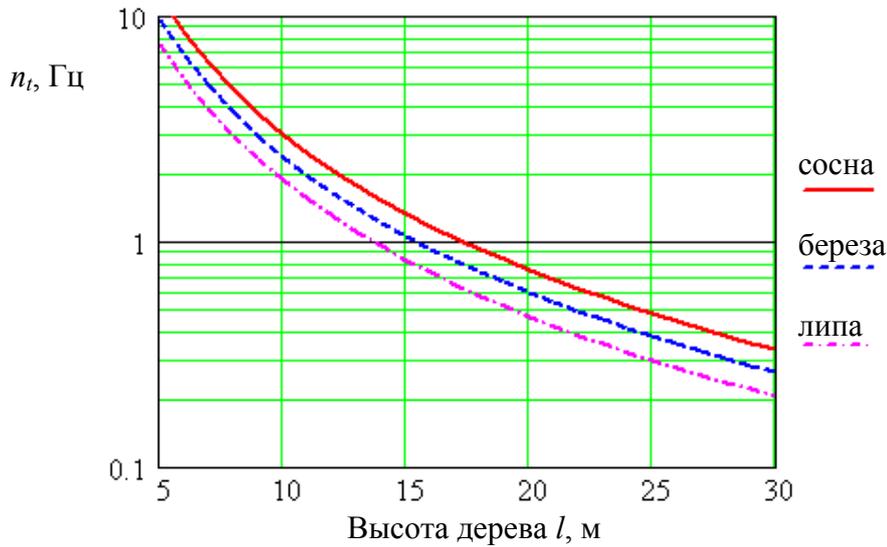


Рис. 3. Собственные частоты деревьев

Смещение крон деревьев  $x$  под действием ветра находится решением уравнения движения массы [7]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c_s \frac{dx}{dt} + k_r x = F(t),$$

где  $c_s$  – коэффициент сопротивления,  $F(t)$  – сила, действующая на массу.

При гармоническом изменении силы  $F(t) = F_0 \cos 2\pi n t$  решение уравнения в установившемся режиме [7] имеет вид:

$$x(t) = X(n) \cos(2\pi n t - \varphi),$$

где

$$X(n) = \frac{F_0}{k_r \sqrt{\left(1 - (n/n_t)^2\right)^2 + \frac{c_s^2}{k_r m} (n/n_t)^2}}, \quad (2)$$

$$\varphi = \arctg \frac{c_s (n/n_t)}{\sqrt{k_r m \left(1 - (n/n_t)^2\right)}}.$$

Амплитуда действующей на дерево силы  $F_0$  определяется скоростным напором ветра и площадью кроны, на которую действует ветер.

Скоростной напор ветра равен

$$P_v = \rho_v V_v^2 / 2,$$

где  $\rho_v = 1,29 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха.

Площадь сечения кроны дерева берется с учетом ее плотности  $\rho_{oc}$ . В данном случае имеется в виду оптическая плотность кроны. По плотности различают три типа крон [8]:

- массивные, плотные (просветы составляют до 25 %,  $\rho_{oc} > 0,75$ );
- средней плотности (просветы составляют от 25 до 50 %,  $0,5 \leq \rho_{oc} \leq 0,75$ );
- легкие сквозистые (просветы составляют 50 % и более,  $\rho_{oc} \leq 0,5$ ).

Площадь кроны, на которую действует скоростной напор ветра, составляет:

$$S_c = \pi \cdot R_c^2 \rho_{oc}$$

С учетом этого амплитуда действующей на дерево силы равна

$$F_0 = P_v S_c = \frac{\pi}{2} \cdot V_v^2 R_c^2 \rho_v \rho_{oc}. \quad (3)$$

Теперь с использованием формул (1) и (2) можно оценить амплитуду отклонения крон деревьев в вертикальном направлении при воздействии ветра:

$$Z(n) = 2R_c - \sqrt{(2R_c)^2 - X(n)^2}.$$

На рис. 4 приведены зависимости этого отклонения от частоты воздействующей силы при различном коэффициенте сопротивления  $c_s$ , определяющем демпфирование колебаний.

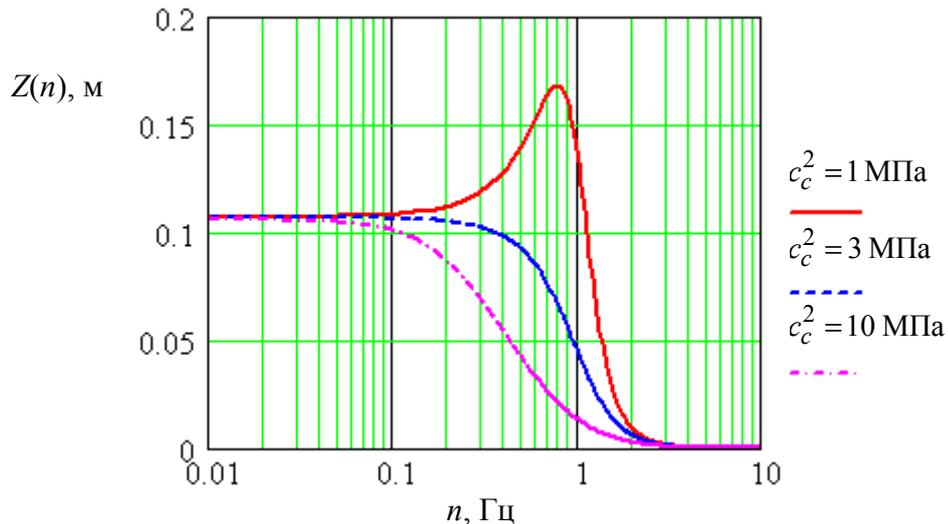


Рис. 4. Частотные характеристики смещения кроны дерева от ветра

Кривые на рисунке рассчитаны при следующих исходных данных: скорость ветра  $V_v = 25$  м/с, высота дерева  $l = 15$  м, диаметр ствола  $d = 0,3$  м, радиус кроны  $R_c = 3$  м, плотность кроны  $\rho_{oc} = 0,7$ , плотность древесины  $\rho_t = 500$  кг/м<sup>3</sup>, модуль упругости древесины  $E = 10$  ГПа. В последующих расчетах, если это не оговаривается, используются те же параметры древесины.

При этих данных частота собственных колебаний дерева  $n_t = 1$  Гц. Как видно из рис. 4, частота максимума отклонений несколько не совпадает с частотой собственных колебаний, она равна  $n_m = n_t \sqrt{1 - c_s^2 / (k_r m)}$  [9]. Частота максимума приближается к  $n_t$  при уменьшении демпфирования.

Отношение  $c_s / (2\sqrt{k_r m})$  называют относительным демпфированием системы. Коэффициент  $2\sqrt{k_r m}$  называют критическим коэффициентом демпфирования [7]. В зависимости от коэффициента сопротивления  $c_s$  колебания дерева будут резонансными при низком демпфировании либо апериодическими при высоком демпфировании.

Из опыта известно, что движение воздуха при ветре является негармоническим процессом, оно, как правило, имеет одно основное направление. При этом вершины деревьев после отклонения при порыве ветра возвращаются в исходное положение, а не отклоняются в противоположном направлении, что соответствует не резонансному, а апериодическому процессу. А для апериодического процесса, как следует из частотных характеристик, приведенных на рис. 4, максимальное отклонение кроны дерева имеет место при низких частотах воздействия. Проще говоря, при анализе помех от ветра в лесу следует использовать максимальное значение отклонения кроны при постоянном порыве ветра, соответствующем низкочастотному приближению выражения (2).

Приняв  $n = 0$  Гц, из (2) получим

$$X_0 = F_0 / k_r . \quad (4)$$

Соответственно,

$$Z_0 = 2R_c - \sqrt{(2R_c)^2 - X_0^2} . \quad (5)$$

Низкочастотное приближение при  $n = 0$  Гц соответствует случаю, когда постоянная сила ветра  $F_0$  отклоняет крону дерева на постоянную величину  $X_0$ , уравновешивая силу, обусловленную жесткостью  $k_r$ , стремящуюся вернуть крону на место.

На рис. 5 приведены зависимости смещения кроны в горизонтальном ( $X_0$ ) и вертикальном ( $Z_0$ ) направлениях от скорости ветра при высоте дерева  $l = 25$  м (а) и от высоты дерева при скорости ветра  $V = 25$  м/с (б). Горизонтальное смещение значительно превышает вертикальное. Полученные выражения для отклонения крон деревьев в лесу при воздействии ветра позволяют оценить влияние этих отклонений на РВСО.

## 2. Прямой сигнал РВСО метрового диапазона

В РВСО с диапазоном рабочих частот ниже 100 МГц обычно используются подземные или наземные горизонтальные симметричные антенны

в виде отрезков изолированного провода [10]. Такие антенны применены в РВСО, описанных в [2, 3]. Согласно [10] подземная горизонтальная антенна на глубине  $d_a$  (как передающая, так и приемная) может быть заменена фиктивной антенной, расположенной на поверхности земли, с таким же распределением тока, умноженным на коэффициент  $\exp(-ik_2d_a)$ .

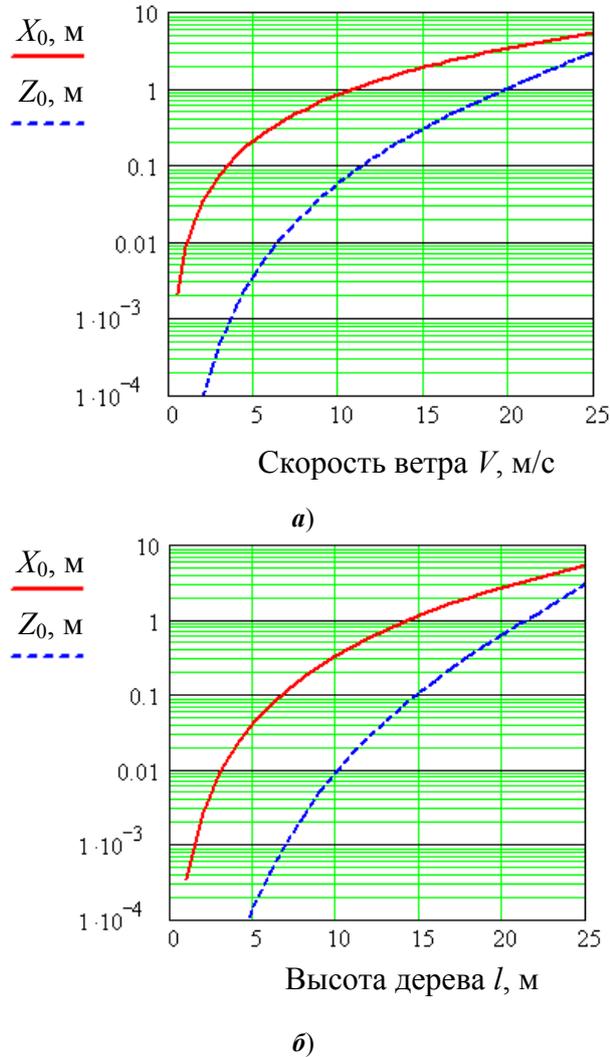


Рис. 5. Зависимости смещения кроны от скорости ветра (а) и высоты дерева (б)

У этого коэффициента:  $k_2 = k_1 \sqrt{\epsilon_2'}$  – волновое число нижней среды (земли);  $k_1 = 2\pi f/c$  – волновое число верхней среды (воздуха);  $\epsilon_2' = \epsilon_2 - \frac{i\sigma_2}{2\pi \cdot f \epsilon_0}$  – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость земли;  $\epsilon_2$  – относительная диэлектрическая проницаемость земли;  $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$  (Ф/м) – диэлектрическая постоянная;  $\sigma_2$  – удельная проводимость земли;  $f$  – частота;  $c$  – скорость света.

В работе [11] получены выражения для всех составляющих поля надземной проводной линии. К сожалению, принятые в этой работе допущения не позволяют определить горизонтальные составляющие поля при расположении и точек излучения, и точек приема на поверхности земли. Поэтому мы определим продольную по отношению к антенне составляющую поля через ее соотношение с вертикальной составляющей на границе раздела сред [10]:

$$E_{1x} = \frac{\sqrt{k_2^2 - k_1^2}}{k_1 \epsilon_2'} E_{1z} \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon_2'}} E_{1z}.$$

Такой прием использован в работе [12]. С учетом сказанного продольная составляющая поля, излученного ПРД, на поверхности земли вдоль оси антенн  $x$  определяется выражением

$$E_x(x, 0, 0) = \frac{60}{\epsilon_2'} e^{-ik_2 d_a} \cdot \int_{-L}^L [1 + ik_1(x - \xi)] \cdot \frac{e^{-ik_1 R_1}}{(x - \xi)^2} \cdot I(\xi) \cdot d\xi, \quad (6)$$

где

$$I(\xi) = \begin{cases} I_1(\xi) = I_0 \frac{\sin \gamma(L + \xi)}{\sin \gamma L} (-L \leq \xi \leq 0), \\ I_1(\xi) = I_0 \frac{\sin \gamma(L - \xi)}{\sin \gamma L} (0 \leq \xi \leq L) - \end{cases}$$

распределение тока вибратора передающей антенны по его длине;  $I_0$  – амплитуда тока;  $L$  – длина плеча вибратора антенны;  $\gamma$  – коэффициент распространения волны по антенне (с учетом [10]  $\gamma \approx k_2$ ).

Прямой сигнал в приемной антенне находится интегрированием (6) по длине антенны с учетом множителя ослабления в земле:

$$U_d = e^{-ik_2 d_a} \cdot \left[ \int_{-L}^0 \frac{\sin k_2(L + x)}{\sin k_2 L} E_x(R_0 + x) dx + \int_0^L \frac{\sin k_2(L - x)}{\sin k_2 L} E_{xr}(R_0 + x) dx \right], \quad (7)$$

где  $R_0$  – расстояние между ПРД и ПРМ.

### 3. Влияние движения крон деревьев на РВСО внутри лесного массива

При расположении фиктивных антенн на поверхности земли  $h = 0$  расстояние от линии антенн до кромки крон  $R = H$ , где  $H$  – высота крон (см. рис. 2). Для определения отраженного кронами деревьев сигнала продольную составляющую поля найдем напрямую из формулы, представленной в работе [11], с учетом нахождения фиктивной излучающей антенны на земле:

$$E_{x1}(x, y, z) = \frac{i30 \cdot k_1 z}{k_2} e^{-ik_2 d_a} \cdot \int_{-L}^L [2i + k_1 R_1] \cdot \frac{e^{-ik_1 R_1}}{R_1^3} \cdot I(\xi) \cdot d\xi, \quad (8)$$

где  $R_1 = \sqrt{(x - \xi)^2 + y^2 + z^2}$ ;  $y$  – поперечная координата;  $z$  – вертикальная координата.

Как показано на рис. 2, излученная ПРД волна падает на отражающую поверхность, образуемую нижней кромкой крон деревьев, отражается от нее и попадает в ПРМ. Падающая волна на отражающей поверхности определяется в середине расстояния между ПРД и ПРМ в точке с координатами  $(x = R_0/2, y = 0, z = H)$ :

$$E_{xf} = E_{x1}(R_0/2, 0, H).$$

Отраженная от диффузной поверхности волна определяется коэффициентом отражения и углом падения [13]. Коэффициент отражения определим объемной плотностью кроны и сомкнутостью крон [4]:

$$\rho_c = \rho_{vc} \rho_{cd}.$$

Объемная плотность кроны равна

$$\rho_{vc} = \frac{V_{mc}}{V_c},$$

где  $V_{mc}$  – объем материала кроны;  $V_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3$  – объем пространства, занимаемого кроной.

Объем материала кроны найдем из соотношений между относительными объемами составных частей дерева [14]:

$$V_{mc} = V_s \frac{v_c}{v_s},$$

где  $V_s = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{d^2}{4} l$  – объем ствола;  $v_s$  – относительный объем ствола в общем объеме дерева;  $v_c$  – относительный объем материала кроны в общем объеме дерева.

Например, для сосны относительный объем ствола  $v_s = 0,65 \dots 0,77$ , а относительный объем ветвей  $v_c = 0,08 \dots 0,1$  [14].

Сомкнутость крон (crown density) – отношение площади проекции крон ко всей площади участка леса [15], характеризует плотность всего массива крон:

$$\rho_{cd} = \frac{\pi \cdot R_c^2}{R_t^2},$$

где  $R_t$  – среднее расстояние между деревьями в лесу.

Отраженная от диффузной поверхности волна пропорциональна коэффициенту отражения и квадрату косинуса угла падения [13]. Косинус угла падения  $\theta$  относительно нормали к поверхности равен (см. рис. 2):

$$\cos \theta = \frac{H}{\sqrt{H^2 + R_0^2/4}}.$$

К ПРМ отраженная волна попадает с набегом фазы, обусловленным пройденным расстоянием от точки отражения с координатами  $(x = R_0/2, y = 0, z = H)$  до точки с координатами  $(x, 0, 0)$ :

$$R_2(x) = \sqrt{(x - R_0/2)^2 + H^2}.$$

В итоге напряженность поля на приемной антенне будет равна

$$E_{xr}(x) = E_{x1}(R_0/2, 0, H) \frac{H^2}{H^2 + R_0^2/4} \rho_c e^{-ik_1 R_2(x)}.$$

Напряжение приемной антенны определится интегрированием поля по длине антенны с учетом прохождения волной расстояния  $d_a$  в земле:

$$U_r = e^{-ik_2 d_a} \cdot \left[ \int_{-L}^0 \frac{\sin k_2(L+x)}{\sin k_2 L} E_{xr}(R_0+x) dx + \int_0^L \frac{\sin k_2(L-x)}{\sin k_2 L} E_{xr}(R_0+x) dx \right]. \quad (9)$$

Суммарный сигнал ПРМ складывается из прямого сигнала (7) и отраженного от крон деревьев сигнала (9):

$$U_g = U_d + U_r.$$

Основными параметрами при исследовании влияния колебаний крон деревьев на принимаемый сигнал РВСО будут частота поля  $f$ , высота уровня крон  $H$  и ее изменение при ветре  $Z_0$ , определенное выше (5).

Соотношение между прямым  $U_d$  и отраженным  $U_r$  сигналами в диапазоне частот при различной высоте крон  $H$  приведено на рис. 6.

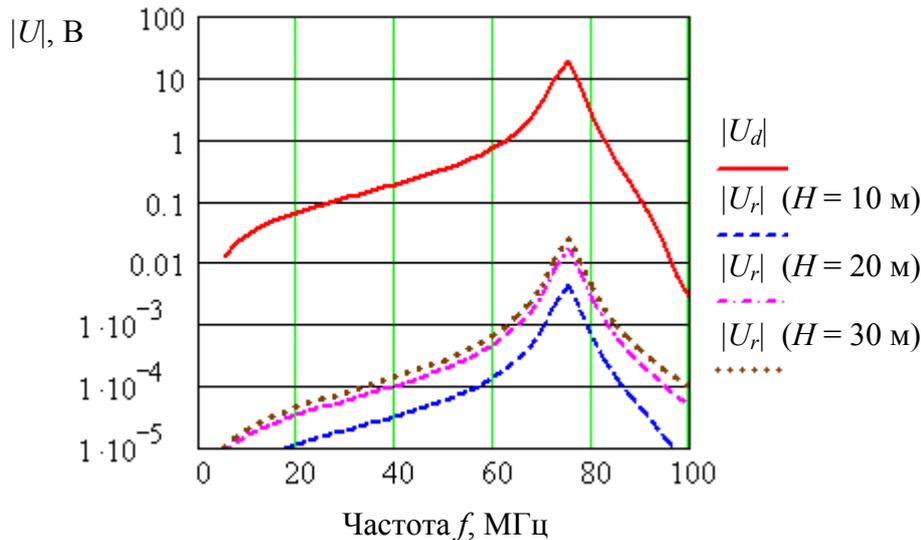


Рис. 6. Частотные зависимости сигналов РВСО

Кривые рассчитаны для случая сухой земли ( $\epsilon_2 = 4, \sigma_2 = 10^{-3}$ ), при этом расстояние между ПРД и ПРМ  $R_0 = 25$  м, длина плеча вибратора антенны

$L = 1$  м, глубина расположения антенн  $d_a = 0,15$  м, амплитуда тока в антенне  $I_0 = 0,25$  А. Отраженные сигналы во всем диапазоне частот ниже прямого сигнала на три порядка и более. Подъем всех сигналов на частоте около  $f_0 = c/(\sqrt{\epsilon_2} 2L) = 75$  МГц соответствует резонансу антенн при сухой земле,

при мокрой земле резонанс отсутствует из-за больших потерь. Все нижеследующие расчеты, если это не оговаривается, выполнялись на частоте 50 МГц.

Отраженный сигнал, накладываясь на прямой сигнал, интерферирует с ним. На рис. 7,а показан результат интерференции – зависимость суммарного сигнала от высоты крон деревьев в виде нарастающего колебательного процесса. На рисунке приведена также огибающая этого процесса, представляющая собой сумму модулей прямого и отраженного сигналов без учета фаз. Эта огибающая соответствует максимально возможному отклонению сигнала при изменениях высоты крон относительно своего постоянного значения при воздействия ветра. Целесообразно отклонения сигнала при воздействии ветра от своего значения, представляющие собой помеху от воздействия ветра, выражать в относительных величинах. На рис. 7,б приведены зависимости отношения модулей отраженного и прямого сигналов  $\Delta_1 = |U_r|/|U_d|$  от высоты крон при сухой и мокрой земле. Понятно, что это отношение характеризует только одностороннее отклонение, реальное отклонение сигнала может быть вдвое больше, поскольку отраженный сигнал может суммироваться с прямым сигналом и может вычитаться из него. Графики на рис. 7,б показывают увеличение влияния отраженного сигнала при мокрой земле более чем вдвое по сравнению с сухой землей.

Приращение сигнала РВСО максимальны, если отклонение  $Z_0(V)$  высоты крон сравнимо или превышает период интерференционных колебаний, приведенных на рис. 7,а. При этом фаза интерференционных колебаний и форма (временная зависимость) помехи от воздействия ветра определяются начальной высотой крон. Чтобы это продемонстрировать, выразим приращение сигнала непосредственно в зависимости от скорости ветра. С учетом (3), (4) и (5) отклонения крон при ветре в горизонтальном и вертикальном направлениях равны:

$$X_0(V) = \frac{16l^3 R_c^2 \rho_v \rho_{oc}}{3d^4 E} \cdot V^2, \quad Z_0(V) = 2R_c - \sqrt{(2R_c)^2 - X_0(V)^2}. \quad (10)$$

Следует заметить, что при расчетах вертикальных отклонений крон деревьев по формуле (10) при большой скорости ветра нужно следить за знаком подкоренного выражения, задавая в исходных данных радиус кроны  $R_c$ .

Относительное приращение суммарного сигнала в зависимости от скорости ветра  $V$ , представляющее собой помеху от ветра, выражается формулой

$$\Delta_2(H, V) = \frac{|U_g(H - Z_0(V))|}{|U_g(H)|} - 1.$$

На рис. 8 приведены графики этих зависимостей для сухой земли при различной, но близкой по величине высоте крон  $H$  от 20 до 22 м. В нижней части рисунка приведена кривая зависимости вертикального отклонения крон

от скорости ветра  $Z_0(V)$ , позволяющая оценить интенсивность действия ветра. Кривые представляют собой форму помехи при увеличении скорости ветра от минимальной до 25 м/с и отклонении крон от 0 до 1,5 м. Как видно по форме кривых, фаза колебаний зависит от высоты крон, даже при небольшой разнице высот амплитуда и фаза колебаний значительно различаются.

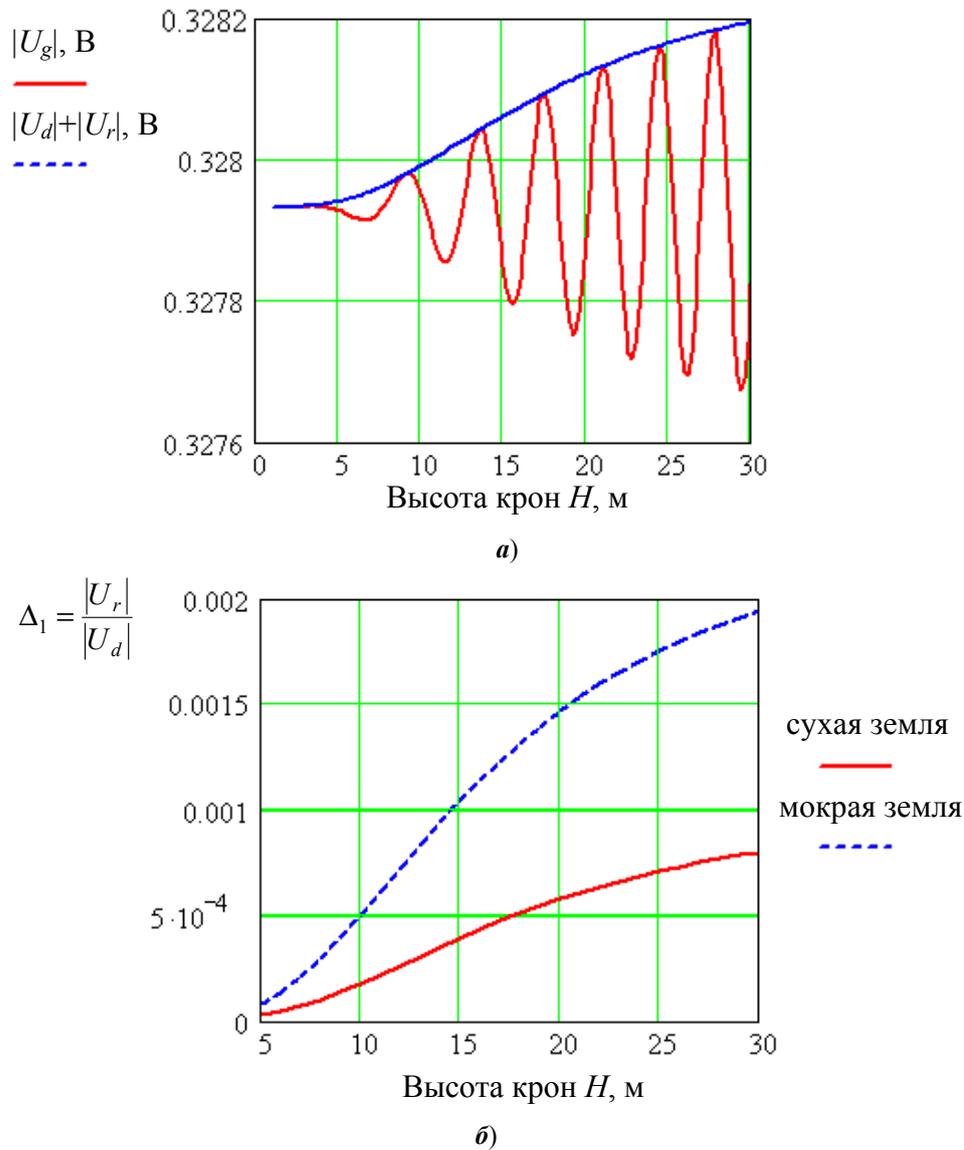


Рис. 7. Зависимости абсолютного (а) и относительного (б) приращений сигналов РВСО от высоты крон

Отклонения высоты крон могут достигать нескольких метров, как видно из рис. 5. Но изменения сигнала при этом не превышают величин, приведенных на рис. 7,б. Эти изменения определяются величиной отраженного сигнала, а значит, коэффициентом отражения электромагнитной волны от

диффузной поверхности, образуемой массой крон, а он определяется, как говорилось выше, плотностью крон и их сомкнутостью, а также углом падения волны на отражающую поверхность.

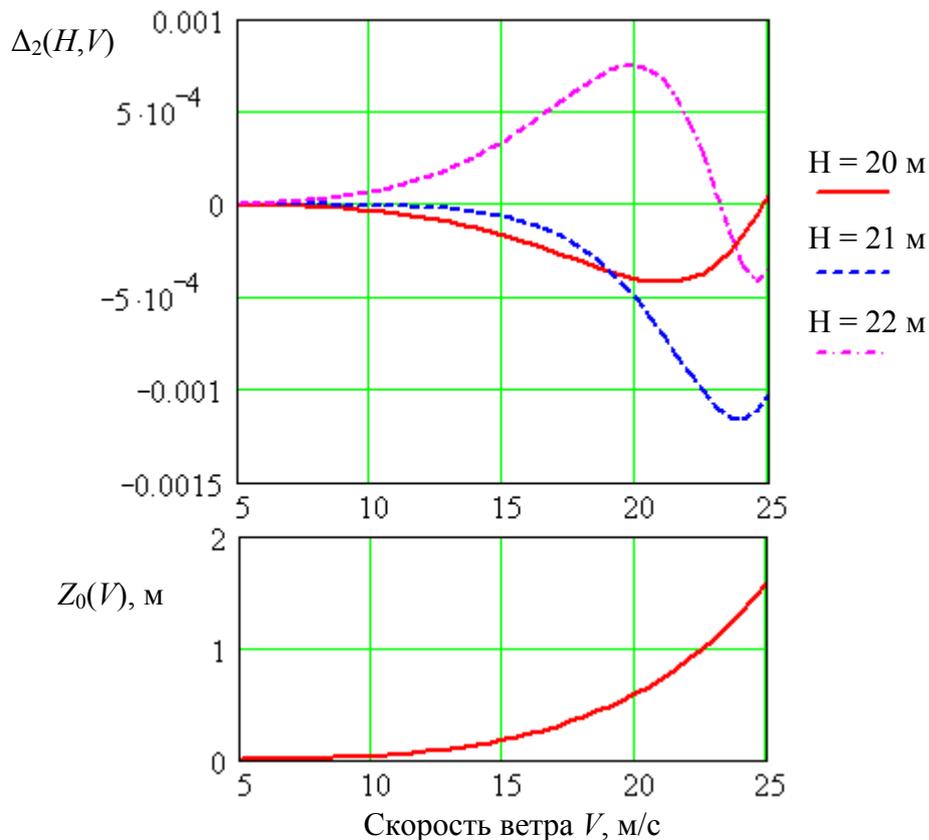


Рис. 8. Зависимости относительного приращения сигналов РВСО от скорости ветра

Чтобы иметь представление о величине помехи, нужно знать, что относительные приращения полезного сигнала при пересечении человеком-нарушителем рубежа охраны, формируемого РВСО [2, 3], при используемых выше исходных данных составляют единицы процентов. Таким образом, при реальных скоростях ветра помеха РВСО от раскачивающихся крон деревьев в метровом диапазоне рабочих частот на порядок ниже полезного сигнала человека-нарушителя. Следует также учесть, что при мокрой земле сигнал от человека также увеличивается по сравнению с сигналом при сухой земле, как и помеха от колебания деревьев.

#### 4. Влияние движения крон деревьев на РВСО у кромки леса

При расположении РВСО вне лесного массива на расстоянии  $R$  от него продольную составляющую поля на отражающей поверхности найдем из того же выражения (8), что и в случае расположения РВСО внутри лесного массива:

$$E_{xf1} = E_{x1} (R_0/2, R, H + R_c).$$

Здесь поле определяется в середине отражающей поверхности, образуемой кронами деревьев, и по средней линии расстояния между ПРД и ПРМ.

Аналогично предыдущему случаю напряженность поля на приемной антенне будет равна

$$E_{xr1}(x) = E_{x1}(R_0/2, R, H + R_c) \frac{R^2}{R_3^2(R_0)} \rho_c e^{-ik_1 R_3(x)},$$

где множитель с дробью выражает  $\cos^2 \theta$ ;

$$R_3(x) = \sqrt{(x - R_0/2)^2 + R^2 + (H + R_c)^2} -$$

расстояние от середины отражающей поверхности до точки  $x$  на фиктивной приемной антенне;

$$R_3(R_0) = R_3(x = R_0).$$

Напряжение приемной антенны находим интегрированием поля по длине антенны с учетом прохождения волной расстояния  $d_a$  в земле:

$$U_{r1} = e^{-ik_2 d_a} \left[ \int_{-L}^0 \frac{\sin k_2(L+x)}{\sin k_2 L} E_{xr1}(R_0+x) dx + \int_0^L \frac{\sin k_2(L-x)}{\sin k_2 L} E_{xr1}(R_0+x) dx \right]. \quad (11)$$

Суммарный сигнал ПРМ складывается из прямого сигнала (7) и отраженного от крон деревьев сигнала (11):

$$U_{g1} = U_d + U_{r1}.$$

Как и в предыдущем случае, суммарный сигнал в зависимости от высоты крон имеет интерференционные колебания, как показано на рис. 9, где показана также огибающая этих колебаний.

В данном случае, в отличие от предыдущего, приращения сигналов РВСО обусловлены не вертикальными, а горизонтальными отклонениями массива крон  $X_0$ . И, несмотря на то, что горизонтальные отклонения гораздо больше вертикальных, не они определяют величину приращения сигналов, как говорилось выше, а коэффициент отражения электромагнитной волны от диффузной поверхности, образуемой массивом крон.

На рис. 10 приведены графики относительных приращений сигнала от действия ветра  $\Delta_3 = |U_{r1}|/|U_d|$  при различных высотах крон  $H$  и расстояниях  $R$  в условиях мокрой земли, когда эти приращения максимальны.

Графики показывают наличие расстояний, на которых при данной высоте крон влияние максимально. При малых расстояниях влияние крон мало за счет большого угла падения, при больших расстояниях – за счет этих больших расстояний.

Все же максимальные приращения сигнала, показанные на рис. 10, меньше соответствующих приращений при расположении РВСО внутри лесного массива (см. рис. 7,б) за счет бóльших расстояний и углов падения.

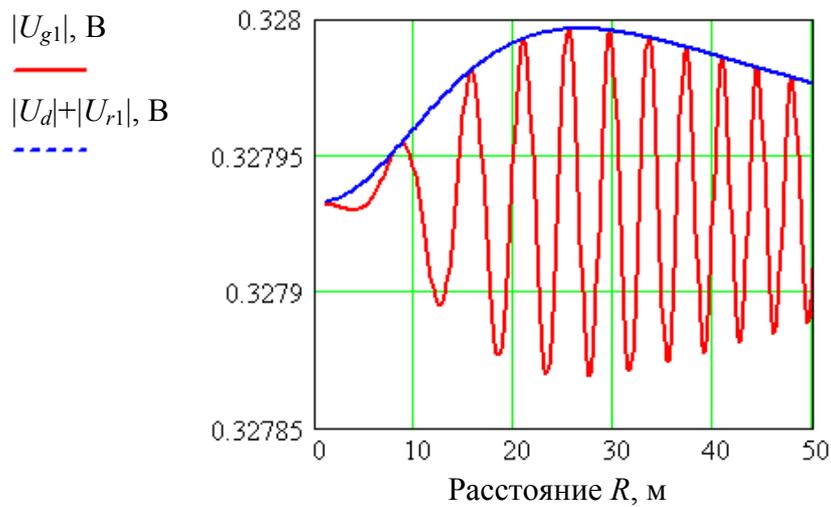


Рис. 9. Зависимости максимального абсолютного приращения сигнала РВСО от расстояния до лесного массива

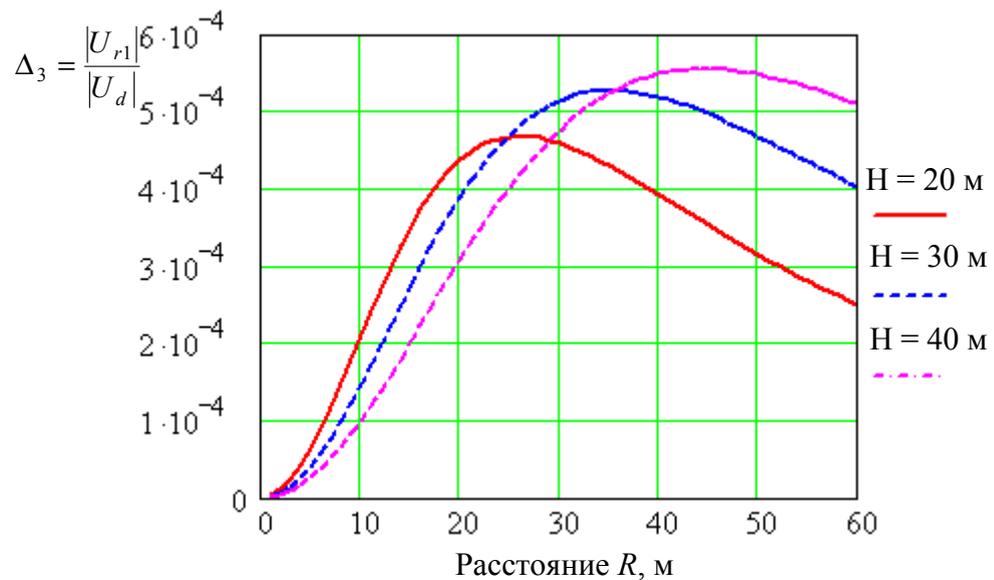


Рис. 10. Зависимости максимальных относительных приращений сигналов РВСО от расстояния до лесного массива

### Заключение

При использовании РВСО для охраны рубежей в условиях лесистой местности возможно влияние на него крон деревьев, отклоняющихся при воздействии ветра. Отклонение некоторого массива крон вызывает изменение

отраженного от него сигнала, принимаемого ПРМ РВСО, соответствующее появлению помехи. Отклонение кроны дерева при ветре определено путем моделирования ствола дерева консольной конусной балкой с фиксированным нижним концом и приложением силы действия ветра к верхнему концу.

Суммарный сигнал РВСО образуется при интерференции прямого сигнала и сигнала, отраженного от массива крон. При воздействии ветра отклонения массива крон могут достигать нескольких метров и суммарный сигнал может переходить из интерференционного максимума в минимум и обратно. А величина интерференционных экстремумов определяется отражающей способностью массива крон, зависящей от его плотности и угла падения электромагнитной волны на отражающую поверхность. Моделирование приращений сигнала на частотах ниже 100 МГц при отклонениях массива крон деревьев, представляющих собой помеху РВСО в лесу, показало, что эта помеха на порядок ниже сигнала от человека-нарушителя и практически не мешает его обнаружению.

### **Библиографический список**

1. **Токарев, Н. Н.** Радиоволновые средства обнаружения для работы в растительности / Н. Н. Токарев, И. Ю. Соломатин // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза – Заречный, 6–8 октября 2010 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – С. 197–204.
2. **Токарев, Н. Н.** Радиоволновое средство обнаружения, скрытно устанавливаемое под землей, для комплекса «БСК» / Н. Н. Токарев, И. Ю. Соломатин, В. П. Гнусарев // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза – Заречный, 18–20 сентября 2012 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – С. 132–139.
3. **Токарев, Н. Н.** Скрытное радиоволновое средство обнаружения «Рапс-М2» / Н. Н. Токарев, В. П. Гнусарев // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : сб. науч. ст. X Всерос. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза – Заречный, 7–9 октября 2014 г.) / под ред. А. Д. Гулякова, В. И. Волчихина, В. А. Первунинских. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 211–217.
4. **Молчанов, А. А.** Лес и окружающая среда / А. А. Молчанов. – Москва : Наука, 1968. – 248 с.
5. **Никитин, Н. Н.** Курс теоретической механики : учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов / Н. Н. Никитин. – Москва : Высш. шк., 1990. – 607 с.
6. **Нецветов, М. В.** Вибрации в лесу под действием ветра (теоретический аспект оценки частот) / М. В. Нецветов // Экология та ноосферология. – 2003. – Т. 13, № 1-2. – С. 87–92.
7. **Симиу, Э.** Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан ; пер. с англ. Б. Е. Маслова, А. В. Швецовоной ; под ред. Б. Е. Маслова. – Москва : Стройиздат, 1984. – 360 с.
8. **Колесников, А. И.** Декоративная дендрология / А. И. Колесников. – Москва : Лесная промышленность, 1974. – 704 с.
9. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика : учеб. пособие : в 10 т. Т. I. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., испр. – Москва : Наука, 1988. – 216 с.
10. **Лавров, Г. А.** Приземные и подземные антенны / Г. А. Лавров, А. С. Князев. – Москва : Сов. радио, 1965. – 472 с.

11. **Оленин, Ю. А.** Анализ поля в линии передачи проводно-волнового средства обнаружения / Ю. А. Оленин, Н. Н. Токарев // Новые промышленные технологии. – 1999. – Вып. 4–5 (291–292). – С. 49–61.
12. **Токарев, Н. Н.** Моделирование прямого сигнала радиоволновых средств обнаружения с подземными антеннами / Н. Н. Токарев // Радиотехника. – 2013. – № 2. – С. 98–102.
13. Радиотехнические системы : учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, Ю. Д. Ульяницкий. – Москва : Высш. шк., 1990. – 496 с.
14. **Бурмистрова, О. Н.** Строение дерева и древесины : метод. указания / О. Н. Бурмистрова. – Ухта : УГТУ, 2007. – 50 с.
15. Организация тактической маскировки войск гражданской обороны. – URL: <http://studydoc.ru/doc/491291/glava-7---organizaciya-takticheskoy-maskirovki-vojsk-grazhdanskoj-oborony.html>. (дата обращения: 03.10.2018)

### **References**

1. Tokarev N. N., Solomatin I. Yu. *Sovremennye okhrannye tekhnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti ob"ektov: materialy VIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. (Rossiya, Penza – Zarechnyy, 6–8 oktyabrya 2010 g.)* [Modern security technologies and means of complex facility security provision: proceedings of VIII All-Russian scientific and practical conference (Russia, Penza – Zarechniy, October 6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup>, 2010)]. Penza: Izd-vo PGU, 2010, pp. 197–204. [In Russian]
2. Tokarev N. N., Solomatin I. Yu., Gnusarev V. P. *Sovremennye okhrannye tekhnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti ob"ektov: materialy IX Vseros. nauch.-tekhn. konf. (Rossiya, Penza – Zarechnyy, 18–20 sentyabrya 2012 g.)* [Modern security technologies and means of complex facility security provision: proceedings of IX All-Russian scientific and practical conference (Russia, Penza – Zarechniy, September 18<sup>th</sup>-20<sup>th</sup>, 2012)]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, pp. 132–139. [In Russian]
3. Tokarev N. N., Gnusarev V. P. *Sovremennye okhrannye tekhnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti ob"ektov: sb. nauch. st. X Vseros. nauch.-tekhn. konf. (Rossiya, Penza – Zarechnyy, 7–9 oktyabrya 2014 g.)* [Modern security technologies and means of complex facility security provision: proceedings of IX All-Russian scientific and practical conference (Russia, Penza – Zarechniy, September 18<sup>th</sup>-20<sup>th</sup>, 2012)]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, pp. 211–217. [In Russian]
4. Molchanov A. A. *Les i okruzhayushchaya sreda* [The forest and the environment]. Moscow: Nauka, 1968, 248 p. [In Russian]
5. Nikitin N. N. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki: ucheb. dlya mashinostroit. i priborostroet. spets. vuzov* [A course of theoretical mechanics: textbook for machine building and instrument engineering majors at universities]. Moscow: Vyssh. shk., 1990, 607 p. [In Russian]
6. Netsvetov M. V. *Ekologiya ta noosferologiya* [Ecology and noosphere studies]. 2003, vol. 13, no. 1-2, pp. 87–92. [In Russian]
7. Simiu E., Skanlan R. *Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya* [Wind impact on buildings and constructions]; transl. from Engl. by B. E. Maslov, A. V. Shvetsova. Moscow: Stroyizdat, 1984, 360 p. [In Russian]
8. Kolesnikov A. I. *Dekorativnaya dendrologiya* [Decorative dendrology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1974, 704 p. [In Russian]
9. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika: ucheb. posobie: v 10 t. T. I. Mekhanika* [Theoretical physics: teaching aid: in 10 volumes. Vol. 1. Mechanics]. 4th ed., corr. Moscow: Nauka, 1988, 216 p. [In Russian].
10. Lavrov G. A., Knyazev A. S. *Prizemnye i podzemnye anteny* [Surface and underground antennas]. Moscow: Sov. radio, 1965, 472 p. [In Russian]

11. Olenin Yu. A., Tokarev N. N. *Novye promyshlennyye tekhnologii* [New industrial technologies]. 1999, iss. 4–5 (291–292), pp. 49–61. [In Russian]
12. Tokarev N. N. *Radiotekhnika* [Radioengineering]. 2013, no. 2, pp. 98–102. [In Russian]
13. Grishin Yu. P., Ipatov V. P., Kazarinov Yu. M., Kolomenskiy Yu. A., Ul'yanitskiy Yu. D. *Radiotekhnicheskie sistemy: ucheb. dlya vuzov po spets. «Radiotekhnika»* [Radio engineering systems: university textbook for “Radio engineering” specialty]. Moscow: Vyssh. shk., 1990, 496 p. [In Russian]
14. Burmistrova O. N. *Stroenie dereva i drevesiny: metod. ukazaniya* [Tree and wood structure: instructional guidelines]. Ukhta: UGTU, 2007, 50 p. [In Russian]
15. *Organizatsiya takticheskoy maskirovki voysk grazhdanskoy oborony* [Organization of tactical camouflage for civil defence troops]. Available at: <http://studydoc.ru/doc/491291/glava-7---organizatsiya-takticheskoy-maskirovki-voysk-grazhdanskoy-oborony.html>. (accessed Oct. 03, 2018) [In Russian]

---

**Токарев Николай Николаевич**

кандидат технических наук, главный специалист по радиотехническим средствам обнаружения, подразделение № 134, Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники – филиал АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» (Россия, г. Заречный Пензенской области, пр. Мира, 1, корп. 1)

E-mail: ntk4@nikiret.ru

**Tokarev Nikolay Nikolaevich**

Candidate of engineering sciences, chief specialist in radio-wave detectors, division №134, Research and Design Institute of Radio-Electronic Engineering – branch of JSC “FSPC “PC “Start” named after M. V. Protsenko” (building 1, 1 Mira avenue, Zarechny, Penza region, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Токарев, Н. Н. Помехи радиоволновому средству обнаружения нарушителя в лесу / Н. Н. Токарев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 69–87. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-7.

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ДАТЧИКОВ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Растущая потребность в измерении новых параметров технологических процессов требует создания новых датчиков и расширения функциональных возможностей существующих датчиков, а следовательно, и их измерительных цепей. Целью работы является разработка системы автоматизированного проектирования функциональных схем измерительных цепей датчиков, обеспечивающих измерение искомым параметров производственного цикла.

*Материалы и методы.* При разработке системы автоматизированного проектирования измерительных цепей датчиков использованы сигнальные графы, методики проектирования и объектно-ориентированное программирование.

*Результаты и выводы.* Рассмотрены методики проектирования измерительных цепей с одно-, двух- и трехэлементной схемой замещения параметрического преобразователя датчика. Разработана система, обеспечивающая автоматизированное проектирование функциональных схем измерительных цепей с заданными возможностями.

**Ключевые слова:** функциональная схема, обобщенный граф, схема замещения, информативный параметр, датчик.

V. P. Arbuzov, A. E. Arakcheev

## COMPUTER-AIDED DESIGN OF MEASURING CIRCUITS OF SENSORS

### Abstract.

*Background.* The growing need to measure new process parameters requires the creation of new sensors and the expansion of the functionality of existing sensors, and hence their measuring circuits. The purpose of the work is to develop a system of computer-aided design of functional schemes of measuring circuits of sensor that provide measurement of the desired parameters of the production cycle.

*Materials and methods.* Signal graphs, design methods and object-oriented programming were used in the development of computer-aided design measurement circuits of sensors.

*Results and conclusions.* Methods of designing of measuring circuits with one-, two - and three-element equivalent circuit of the parametric transducer are considered. The system providing the automated designing of functional schemes of measuring circuits with the set possibilities is developed.

**Keywords:** functional scheme, generalized graph, equivalent circuit, informative parameter, sensor.

## Введение

Применение новых технологий приводит не только к многократному увеличению точек контроля параметров технологических процессов, но и к измерению новых параметров или величин, и, следовательно, к стремительному развитию промышленных средств измерений. Основу средств восприятия составляют параметрические преобразователи (ПП) измеряемой величины в пассивную электрическую величину: сопротивление, емкость, индуктивность или их сочетания в различных вариантах. В зависимости от конструкции датчика, от условий его эксплуатации, от диапазона изменения измеряемой датчиком величины и от требуемой функции преобразования схемы замещения параметрических датчиков имеют один, два, три и более элементов. Вид соединения этих элементов в схеме замещения и диапазон изменения их значений определяются исходя из анализа амплитудно- и фазочастотной характеристики. Особое место в схеме замещения датчика имеет опорный для данного датчика элемент, который выступает в роли образцового элемента для процесса измерения. Все это обуславливает многообразие не только видов схем замещения и информативных параметров, но и энергетических режимов которые необходимо обеспечить в процессе преобразования информативного параметра в один из унифицированных сигналов, а следовательно, и измерительных цепей датчиков. Создание систем автоматизированного проектирования функциональных схем измерительных цепей позволит существенно ускорить процесс создания новых датчиков.

### 1. Формализация параметров объекта измерения

Рассматриваемая система автоматизированного проектирования предназначена для проектирования функциональных схем измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков с одно-, двух- и трехэлементной схемой замещения параметрического преобразователя датчика. На рис. 1 приведены виды соединений элементов в схемах замещения параметрических преобразователей емкостных и индуктивных датчиков с последовательным (рис. 1,а) и с параллельным (рис. 1,б), с последовательно-параллельным (рис. 1,в) и с параллельно-последовательным (рис. 1,г) соединением элементов.

Многообразие вариантов преобразуемых параметров обусловило создание формализованной записи иммитанса параметрического преобразователя с двухэлементной  $\dot{B}_{x,y}$  и трехэлементной  $\dot{T}_{x,y}$  схемой соединения элементов в виде [1]:

$$\dot{B}_{x,y} = P_1 + (j\omega)^{nm} P_2 \text{ и } \dot{T}_{x,y} = P_1 + (j\omega)^{nm} P_2 + (j\omega)^{-sn} P_3,$$

где  $P_1, P_2, P_3$  – обобщенные частотонезависимые параметры;  $n$  – коэффициент, отражающий последовательное ( $n = -1$ ) или параллельное ( $n = 1$ ) соединение элементов с параметрами  $P_1$  и  $P_2$ ;  $m$  – коэффициент, указывающий на емкостный ( $m = 1$ ) или индуктивный ( $m = -1$ ) характер  $P_2$ ;  $s$  – коэффициент, отражающий емкостной ( $s = 1$ ), активный ( $s = 0$ ) и индуктивный характер параметра  $P_3$ .

Идентификация параметров модели иммитанса  $\dot{B}_{x,y}$  и  $\dot{T}_{x,y}$  параметрического преобразователя датчика в соответствии с рис. 1 и табл. 1 и реально

существующих параметров  $R, L, C$  параметрического преобразователя датчика позволяет, во-первых, перейти от графического представления схемы замещения параметрического преобразователя датчика к ее математическому описанию; во-вторых, обобщить в виде математической модели все возможные комбинации двух- и трехэлементных нерезонансных двухполюсников; в-третьих, создать методику проектирования, не зависящую от вида схемы замещения конкретного параметрического преобразователя датчика; в-четвертых, осуществить переход от параметров модели к параметрам объекта по окончании процедуры синтеза [2, 3].

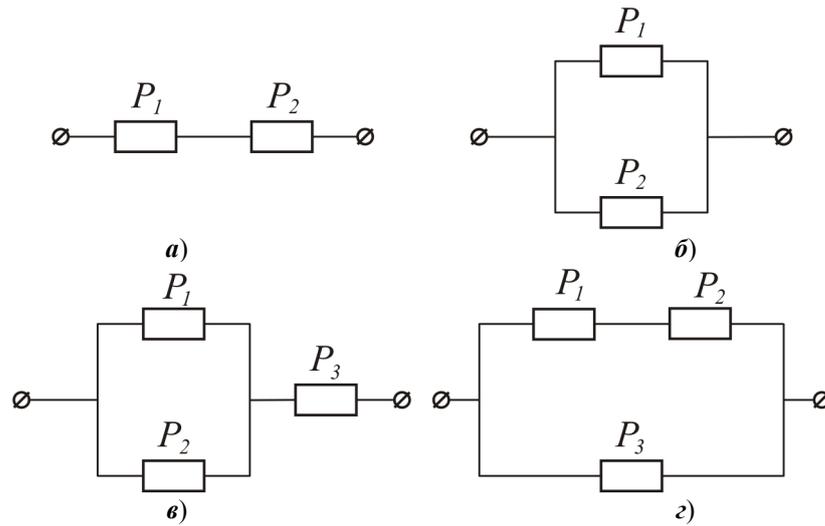


Рис. 1. Виды схем замещения параметрических преобразователей датчиков

Таблица 1

Двухэлементная схема замещения датчика				
Параметры схемы замещения	$n = 1$		$n = -1$	
	$m = 1$	$m = -1$	$m = 1$	$m = -1$
$P_1$	$R_1$	$R_1$	$1/R_1$	$1/R_1$
$P_2$	$C_2$	$1/L_2$	$1/C_2$	$L_2$
Трехэлементная последовательно-параллельная схема замещения датчика				
Параметры схемы замещения	$m = 1$		$m = -1$	
	$s = 1$	$s = 0$	$s = -1$	$s = 0$
$P_1$	$1/R_1$	$1/R_1$	$1/R_1$	$1/R_1$
$P_2$	$C_2$	$1/L_2$	$1/C_2$	$1/L_2$
$P_3$	$1/C_3$	$R_3$	$L_3$	$R_3$
Трехэлементная параллельно-последовательная схема замещения датчика				
Параметры схемы замещения	$m = 1$		$m = -1$	
	$s = 1$	$s = 0$	$s = -1$	$s = 0$
$P_1$	$1/R_1$	$1/R_1$	$1/R_1$	$1/R_1$
$P_2$	$C_2$	$1/L_2$	$1/C_2$	$1/L_2$
$P_3$	$C_3$	$1/R_3$	$1/L_3$	$R_3$

## 2. Измерительные цепи с частотно-временным выходным сигналом

В основе принципа действия измерительных цепей датчиков с комплексной схемой замещения лежит принцип преобразования параметров пассивных величин в частотно-временной выходной сигнал, т.е. в частоту или в период периодического сигнала. Суть этого принципа состоит в сравнении коэффициентов передачи двух каналов, один из которых частотно независимый ( $K_1$ ), а второй – частотно зависимый ( $\dot{K}_2(\omega)$ ). В момент равенства этих коэффициентов частота или период синусоидального напряжения, подаваемого одновременно на оба канала, пропорциональны отношению модулей коэффициентов передач каналов [1]. На рис. 2 приведен обобщенный граф измерительного преобразователя, реализующий описанный выше принцип, где  $U_0$  – выходное напряжение генератора, частота которого изменяется;  $U_1$  и  $U_2$  – выходные напряжения каналов;  $\text{Im}_{U_0} \dot{K}_2(\omega)$  – функция фазочувствительного преобразования напряжения;  $L_{\text{CC}}$  – оператор сравнения напряжений.

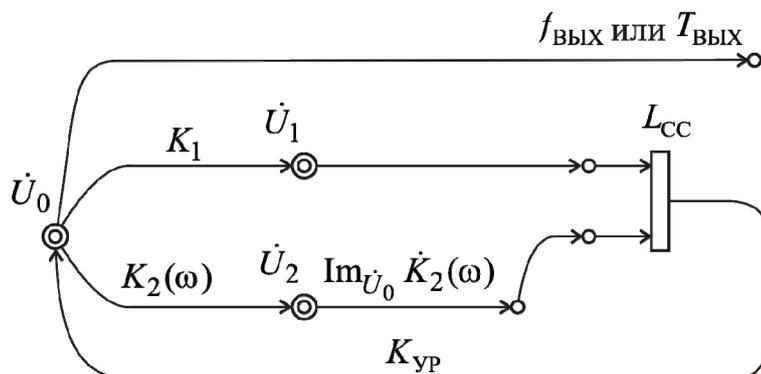


Рис. 2. Обобщенный граф измерительной цепи с частотно-временным выходным сигналом

Выходным сигналом является частота или период напряжения генератора:  $f_{\text{ВЫХ}}$  или  $T_{\text{ВЫХ}}$ . Для преобразования параметров датчика иммитанс его параметрического преобразователя  $\dot{B}_{x,y}$  или  $\dot{T}_{x,y}$  преобразуют в активную величину – напряжение  $\dot{U}_2$ , используя операционный усилитель. В этом случае ребро графа с коэффициентом передачи  $\dot{K}_2(\omega)$  представляет собой инвертирующий операционный усилитель, цепь отрицательной обратной связи которого состоит из иммитанса параметрического преобразователя и иммитанса образцового элемента, причем в зависимости от места подключения  $\dot{B}_{x,y}$  или  $\dot{T}_{x,y}$  напряжением  $\dot{U}_2$  является либо выходное напряжение операционного усилителя, либо его входное напряжение.

В дальнейшем основное внимание будет уделено преобразованию информативного параметра параметрического преобразователя с двухэлементной схемой замещения в частоту или в период синусоидального напряжения. Другие варианты преобразования параметров датчиков с одно-, двух- и

трехэлементной схемой замещения в унифицированные сигналы достаточно хорошо проработаны [1–3]. На рис. 3 приведены две детализации приведенного выше обобщенного графа, в которых процесс преобразования отношения пассивных величин, иммитанса образцового элемента  $\dot{P}_0$  и иммитанса параметрического преобразователя датчика  $\dot{B}_{x,y}$ , в напряжение  $\dot{U}_2$  реализован на основе операционного усилителя с коэффициентом передачи  $-K_y$ .

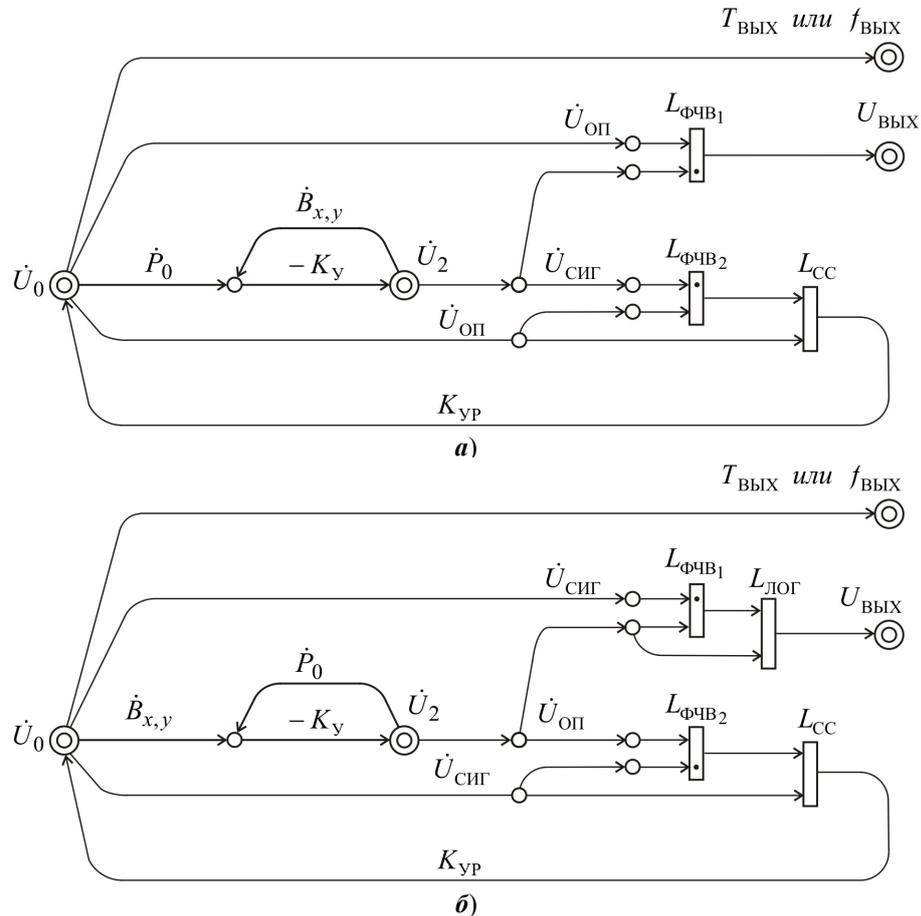


Рис. 3. Детализация обобщенного графа измерительной цепи с частотно-временным выходным сигналом

Согласно графу (рис. 3,а) напряжение  $\dot{U}_2$  прямо пропорционально иммитансу  $\dot{B}_{x,y}$ , и выделяемые фазочувствительными выпрямителями ФЧВ1 и ФЧВ2 действительная и мнимая составляющие  $\dot{U}_2$  пропорциональны активной и реактивной составляющей  $\dot{B}_{x,y}$  соответственно. В рассматриваемом случае сигнальным входом для ФЧВ  $\dot{U}_{СИГ}$  является напряжение  $\dot{U}_2$ , а опорное напряжение  $\dot{U}_{ОП}$  формируется из напряжения  $\dot{U}_0$ . Выходными сигналами являются регулируемая частота или период напряжения  $\dot{U}_0$  и выходное

напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  ФЧВ1, которое является синфазной составляющей  $\dot{U}_2$ . Частотозависимая, квадратурная составляющая этого же напряжения, выделенная ФЧВ2, сравнивается с напряжением частотонезависимого канала. По результату сравнения изменяется частота или период напряжения  $\dot{U}_0$ . На рис. 3,б приведен граф измерительных цепей, в которых осуществляется обратно пропорциональное преобразование отношения иммитансов параметрического преобразователя датчика к иммитансу образцового элемента в напряжение  $\dot{U}_2$ , для получения выходного напряжения в граф добавлен оператор  $L_{\text{ЛОГ}}$ , реализующий функцию логометра.

Функциональные возможности измерительных цепей с частотно-временным выходным сигналом приведены в табл. 2, из которой видно, что, независимо от места расположения частотозависимого канала ( $\dot{K}_1$  или  $\dot{K}_2$ ), обеспечивается преобразование любого из параметров иммитанса датчика с использованием как активной  $P_{01}$ , так и реактивной  $P_{02}$  образцовой меры.

Таблица 2

$\dot{P}_0$	$nm$	Выходной сигнал		
		Частотозависимый канал $\dot{K}_2$		
		Частота	Период	Напряжение
$P_{01}$	1	$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{P_{01}}{2\pi} \cdot \frac{1}{P_2}$	$T_{\text{ВЫХ}} = 2\pi \cdot \frac{P_2}{P_{01}}$	$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ОП}} \frac{P_1}{P_{01}}$
	-1	$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P_2}{P_{01}}$	$T_{\text{ВЫХ}} = 2\pi \cdot \frac{P_{01}}{P_2}$	$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ОП}} \frac{P_1}{P_{01}}$
$P_{02}$	1	$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P_1}{P_{02}}$	$T_{\text{ВЫХ}} = 2\pi \frac{P_{02}}{P_1}$	$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ОП}} \frac{P_2}{P_{02}}$
	-1	$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P_{02}}{P_1}$	$T_{\text{ВЫХ}} = 2\pi \frac{P_1}{P_{02}}$	$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ОП}} \frac{P_2}{P_{02}}$
$\dot{P}_0$	$\tau$	Частотозависимый канал $\dot{K}_1$		
		Частота	Период	Напряжение
		$P_{01}$	$\tau_d$	$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_d} \cdot \frac{P_1}{P_{01}}$
$\tau_i$	$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_i} \cdot \frac{P_{01}}{P_1}$		$T_{\text{ВЫХ}} = 2\pi \cdot \tau_i \frac{P_1}{P_{01}}$	$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ОП}} \frac{\omega^{-nm} P_2}{P_{01}}$
$P_{02}$	$\tau_d$	$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_d} \cdot \frac{P_2}{P_{01}}$	$T_{\text{ВЫХ}} = 2\pi \cdot \tau_d \frac{P_{01}}{P_2}$	$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ОП}} \frac{\omega^{-nm} P_1}{P_{02}}$
	$\tau_i$	$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_i} \cdot \frac{P_{02}}{P_2}$	$T_{\text{ВЫХ}} = 2\pi \cdot \tau_i \frac{P_2}{P_{02}}$	$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ОП}} \frac{\omega^{-nm} P_1}{P_{02}}$

В тех случаях, когда характер преобразуемого параметра иммитанса, например  $P_1$ , совпадает с характером образцового элемента, например  $P_{01}$ , в измерительной цепи используется частотозависимый канал  $\dot{K}_1$ , который

представляет собой дифференциатор или интегратор с постоянной времени  $\tau_d$  или  $\tau_i$  соответственно. При такой реализации фазочувствительные выпрямители меняются местами, а на вход схемы сравнения сигнал поступает либо через дифференциатор, либо через интегратор.

### 3. Преобразование информативных параметров датчиков с двухэлементной нерезонансной схемой замещения в частоту или в период синусоидального напряжения

На основе детализации графа, изображенного на рис. 3,а, разработана функциональная схема измерительной цепи, которая приведена на рис. 4, где  $\Gamma$  – управляемый по частоте генератор синусоидального напряжения; СФЧВ и КФЧВ – синфазный и квадратурный фазочувствительные выпрямители соответственно; СС – схема сравнения. Функциональная схема обеспечивает преобразование искомым параметров датчика в соответствии с табл. 2 частотозависимым каналом является канал  $\dot{K}_2$ . В зависимости от места подключения параметрического преобразователя с иммитансом  $\dot{B}_{x,y}$  в измерительной цепи осуществляется преобразование искомого параметра либо в режиме заданного тока, либо в режиме заданного напряжения, а преобразование отношения иммитанса  $\dot{B}_{x,y}$  к иммитансу  $\dot{P}_0$  будет или прямо пропорциональным или обратно пропорциональным. Последнее определяет напряжения, которые подаются на сигнальные и опорные входы обоих фазочувствительных выпрямителей.

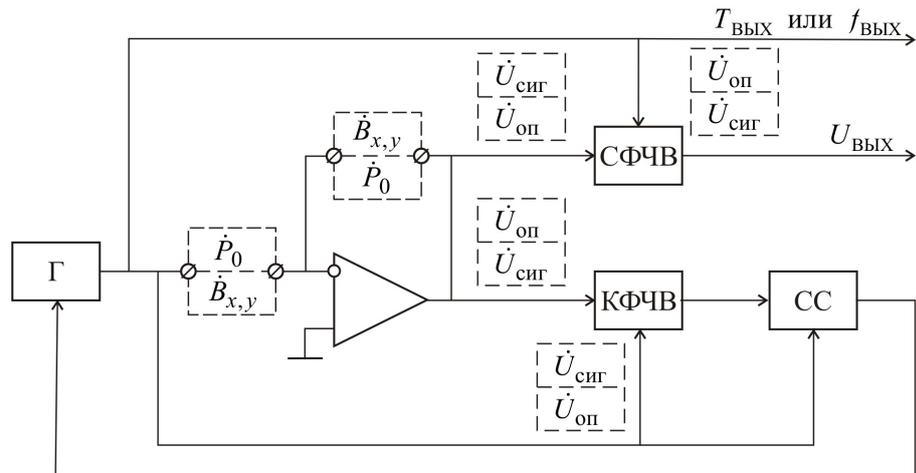


Рис. 4. Преобразование информативных параметров датчиков с двухэлементной нерезонансной схемой замещения в частоту или в период синусоидального напряжения

### 4. Система автоматизированного проектирования измерительных цепей параметрических датчиков

Рассматриваемая система обеспечивает автоматизированное проектирование функциональных схем измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков с одно-, двух- и трехэлементной схемой замещения [4], обеспечивающих преобразование информативных параметров датчиков в напряже-

ние, число, код, частоту или период [5]. Система состоит из нескольких подсистем, каждая из которых выполняет проектирование измерительных цепей датчиков с одной из указанных выше схем замещения параметрического преобразователя в выходной сигнал. Математическим обеспечением для этой системы является, во-первых, формализация параметров схем замещения параметрических преобразователей [1]; во-вторых, методики проектирования как уравновешенных, так и квазиуравновешенных измерительных цепей датчиков [3]; в-третьих, обобщенные графы рассматриваемого класса измерительных цепей параметрических датчиков [2]; в-четвертых, процедура детализации обобщенного графа [2]; в-пятых, банки данных графических изображений узлов измерительной цепи. Программа системы автоматизированного проектирования измерительных цепей параметрических датчиков состоит из подпрограмм [5]:

- подпрограммы ввода параметров технического задания на проектирование;

- подпрограммы проектирования измерительных цепей емкостных датчиков с одноэлементной схемой замещения параметрического преобразователя с потенциально-токовым и частотно-временным выходным сигналами;

- подпрограммы проектирования уравновешенных и квазиуравновешенных измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков с двухэлементной нерезонансной схемой замещения параметрического преобразователя;

- подпрограммы проектирования квазиуравновешенных измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков с трехэлементной нерезонансной схемой замещения параметрического преобразователя.

В процессе работы системы проектирования измерительных цепей пользователю предлагается ответить на появляющиеся во всплывающих окнах вопросы. По результатам ответов переменным присваиваются значения, которые система, например, использует для выбора узла измерительной цепи, места его расположения на функциональной схеме и вида соединения его с другими узлами.

Подпрограмма ввода технического задания является общей для всех проектируемых рассматриваемой системой измерительных цепей датчиков. Она является первым этапом в работе системы и осуществляет переход от словесного описания задания на проектирование к математическому описанию, присваивая значения переменным, которые, участвуя в проектировании, характеризуют параметры технического задания. В табл. 3 приведена последовательность ввода параметров технического задания. После ввода вида схемы замещения датчика (одно-, двух- или трехэлементная) система запрашивает вид датчика (емкостный или индуктивный) и переходит к вводу описания характера схемы замещения датчика в раздел уже известного системе вида датчика, попадая в описание схемы соединения элементов параметрического преобразователя. Следующим пунктом технического задания в систему вводится вид образцового элемента: конденсатор, резистор или катушка индуктивности, а затем вид информативного параметра, который проектируемая измерительная цепь должна преобразовывать. На завершающей стадии вводится энергетический режим преобразования иммитанса параметрического преобразователя датчика (режим заданного тока или режим заданного напряжения) и выходной сигнал: напряжение, частота, период, число, код.

Таблица 3

Энергетический режим измерения	Схема подключения параметрического преобразователя датчика	$l$
Режим заданного тока		+1
Режим заданного напряжения		-1

После ввода технического задания подпрограмма осуществляет проверку правильности ввода. Если обнаружена ошибка, то появляется «окно» ошибки и программа возвращается в начало. В случае правильного ввода система переходит к выполнению подпрограммы, соответствующей схеме замещения параметрического преобразователя датчика и выходного сигнала.

Третий этап посвящен формализации схемы замещения ПП датчика, т.е. осуществляется переход от конкретных параметров  $R, L, C$  схемы замещения к обобщенным параметрам  $P_1$  и  $P_2$ , и определение значения коэффициентов  $n$  и  $m$  по табл. 1.

Процедура синтеза измерительных цепей на основе обобщенного графа состоит в его последовательной и целенаправленной детализации в соответствии с техническим заданием и заложенным в структуру графа методом преобразования искомым параметров [2, 3]. На следующем этапе в зависимости от энергетического режима преобразования определяется, во-первых, место подключения параметрического преобразователя в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя; во-вторых, вид преобразования иммитанса датчика в выходное напряжение операционного усилителя: прямо пропорциональное ( $l=1$ ) или обратно пропорциональное ( $l=-1$ ) в соответствии с табл. 3.

Далее осуществляется выбор схемы подключения входов фазочувствительных выпрямителей: сигнального и опорного. На графе (рис. 3) на операторах фазочувствительных выпрямителей  $L_{ФЧВ1}$  и  $L_{ФЧВ2}$  сигнальный вход обозначен точкой. При прямо пропорциональном преобразовании  $\dot{B}_{x,y}$  в напряжение  $\dot{U}_2$  сигнальные входы  $U_{СИГ}$  обоих фазочувствительных выпрямителей (синфазный – СФЧВ и квадратурный – КФЧВ) подключены к выходу усилителя, а опорный вход  $U_{ОП}$  – к выходу генератора. При обратно пропорциональном преобразовании  $\dot{B}_{x,y}$  в напряжение  $\dot{U}_2$  сигнальные входы  $U_{СИГ}$  обоих фазочувствительных выпрямителей подключены к выходу

генератора, а опорный вход  $U_{оп}$  – к выходу усилителя (рис. 4). Оператор сравнения амплитуды напряжений  $L_{СС}$  реализуется в виде схемы сравнения напряжений постоянного тока.

По результатам работы подпрограммы система выдает изображение схемы электрической функциональной. Для создания изображения поле окна делится на участки, в которых будут изображаться узлы измерительной цепи, выбираемые из базы данных системы. Основой для разделения поля окна на участки, в которых будут располагаться узлы проектируемой измерительной цепи, является функциональная схема, приведенная на рис. 4. С целью обеспечения непрерывности в изображении проектируемой функциональной схемы задаются координаты стыковки узлов.

На рис. 5 приведены примеры работы подпрограммы системы проектирования измерительных цепей датчиков с частотно-временным выходным сигналом. Диалоговые окна демонстрируют ввод некоторых параметров технического задания: ввод вида схемы замещения параметрического преобразователя (рис. 5,а) и ввод образцового элемента (рис. 5,б и рис. 5,в).

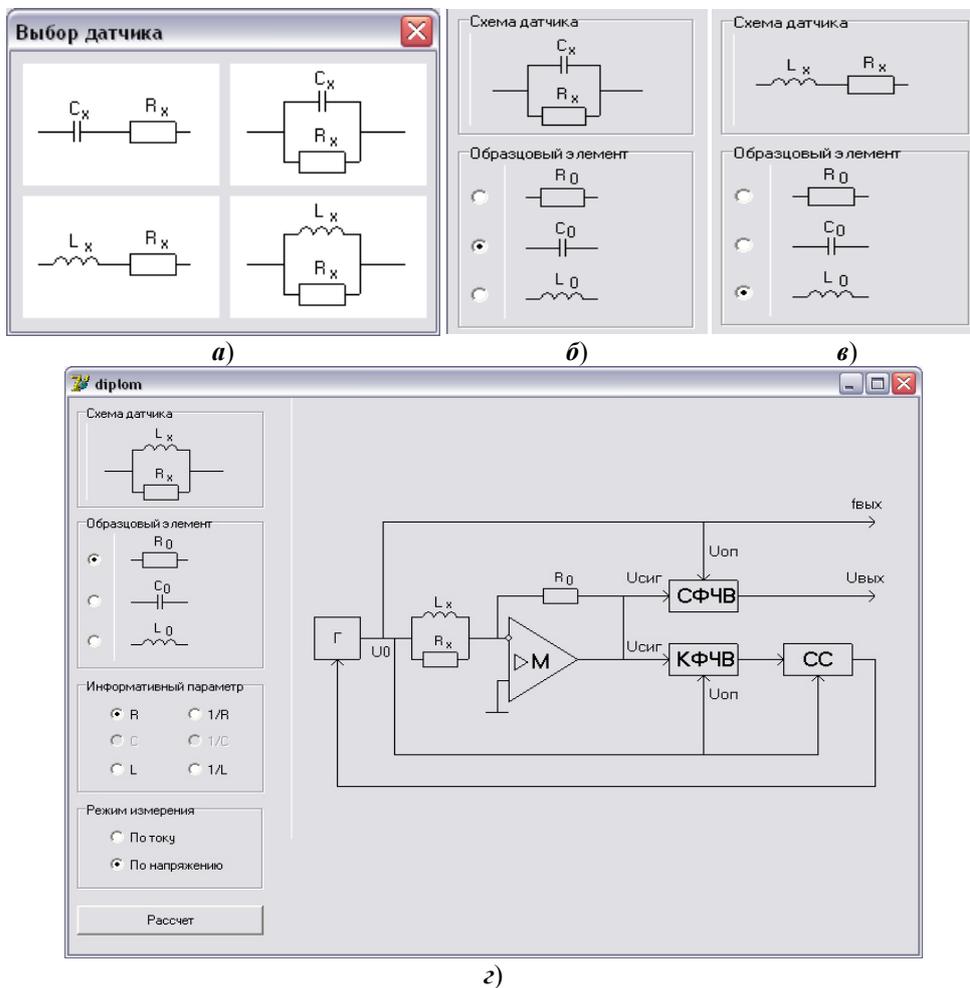
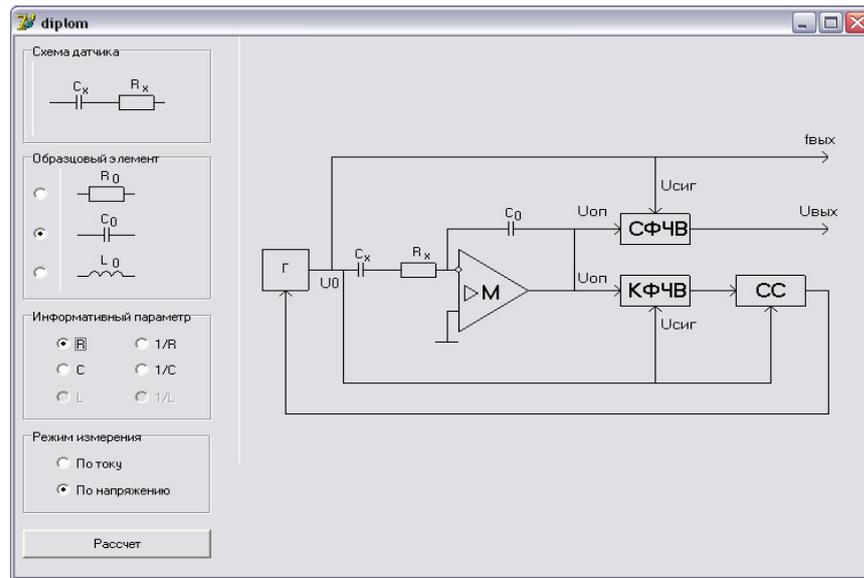


Рис. 5. Примеры ввода задания и результаты работы системы проектирования измерительных цепей датчиков



д)

Рис. 5. Окончание

Результатом работы системы проектирования являются функциональные схемы измерительных цепей датчиков, два примера которых приведены на рис. 5,з и рис. 5,д, причем в левой части рисунка отражена история ввода технического задания.

### Заключение

Формализация записи иммитанса объекта измерения и иммитанса опорного элемента в сочетании с обобщенными графами измерительных цепей датчиков с одно-, двух- и трехэлементной схемой замещения параметрического преобразователя позволила объединить известные методики проектирования в единую методику и адаптировать ее к компьютерному проектированию графического изображения функциональных схем, используя объектно ориентированное программирование. Описанная система обеспечивает автоматизированное проектирование функциональных схем измерительных цепей датчиков в соответствии с техническим заданием на проектирование и позволяет ускорить и упростить процедуру разработки датчиков.

### Библиографический список

1. **Арбузов, В. П.** Структурные методы повышения точности измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков : монография / В. П. Арбузов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2008. – 230 с.
2. **Арбузов, В. П.** Квазиуравновешенные измерительные цепи датчиков с комплексной схемой замещения параметрического преобразователя / В. П. Арбузов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 253–262.
3. **Арбузов, В. П.** Проектирование квазиуравновешенных измерительных цепей датчиков с комплексной схемой замещения / В. П. Арбузов // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 21–25.

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.
5. **Арбузов, В. П.** Система автоматизированного проектирования измерительных цепей датчиков / В. П. Арбузов, А. Е. Аракчеев, Н. Ю. Мазай // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. XXXII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 6–8 июня 2017 г.) : в 2 т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – Т. 1. – С. 274–277.

### References

1. Arbuzov V. P. *Strukturnye metody povysheniya tochnosti izmeritel'nykh tse-pek emkostnykh i induktivnykh datchikov: monografiya* [Structural methods of precision improvement for measuring circuits of capacitance and inductive sensors]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2008, 230 p. [In Russian]
2. Arbuzov V. P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2006, no. 6, pp. 253–262. [In Russian]
3. Arbuzov V. P. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2006, no. 11, pp. 21–25. [In Russian]
4. Averin I. A., Pautkin V. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 2 (30), pp. 24–32. [In Russian]
5. Arbuzov V. P., Arakcheev A. E., Mazay N. Yu. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. XXXII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 6–8 iyunya 2017 g.): v 2 t.* [Problems of automation and control in technical systems: proceedings of XXXII International scientific and technical conference (Penza, June 6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup>, 2017)]. Penza: Izd-vo PGU, 2017, vol. 1, pp. 274–277. [In Russian]

---

#### **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 automatics and  
remote control, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### **Аракчеев Андрей Евгеньевич**

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

E-mail: arakcheev\_058@mail.ru

#### **Arakcheev Andrey Evgenievich**

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

---

#### **Образец цитирования:**

Арбузов, В. П. Автоматизированное проектирование функциональных схем измерительных цепей датчиков / В. П. Арбузов, А. Е. Аракчеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 88–99. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-8.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

УДК 62-233.3/9

DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-9

*И. И. Артемов, Е. А. Чуфистов, О. Е. Чуфистов*

## СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАЛЬЦЕВ ВЫХОДНОГО ВАЛА С САТЕЛЛИТАМИ В ПЛАНЕТАРНО- ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕ. ЧАСТЬ II. АЛГОРИТМЫ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Основным отказом в механизмах  $W$  планетарно-цевочных передач является усталостное разрушение пальцев выходного вала. Поэтому силы и напряжения являются важнейшими величинами, используемыми в проектировочных расчетах этих механизмов. Выполненными исследованиями установлено, что на них влияют различные факторы, и, прежде всего, точность изготовления и сама нагруженность механизма. В силу конструктивной и геометрической нелинейности механизмы  $W$  обнаруживают чувствительность к структурным изменениям в зонах контактов при возрастании нагрузки, что определяет характер распределения нагрузки по контактным парам и возникающие в поперечных сечениях пальцев напряжения. Изучены эти явления недостаточно. Целью работы является повышение точности расчета механизма  $W$  на основе выявления его фактической нагруженности.

*Материалы и методы.* Исследования базируются на основных положениях статики и методах расчетов на прочность и жесткость механических систем. В компьютерном моделировании использован пакет MathCad.

*Результаты.* Выявлено существенное влияние точности изготовления механизма  $W$  на его крутильную жесткость. Установлен характер изменения нагрузки по контактным парам и циклы изменения напряжений, возникающих в поперечных сечениях пальцев механизма  $W$  при работе планетарно-цевочной передачи.

*Выводы.* Погрешности изготовления механизма  $W$  должны обязательно учитываться, особенно при проектировании планетарно-цевочных передач, к которым предъявляются высокие требования по жесткости. Изменение структуры зон контакта в механизме приводит к изменению зависимости сил в контакте от углового положения выходного вала механизма. Максимальные напряжения, по которым следует вести расчет на прочность пальцев механизма  $W$ , изменяются по отнулевому циклу.

**Ключевые слова:** планетарно-цевочные передачи, механизм  $W$ , зазоры, силы в контакте, напряжения в поперечных сечениях.

*I. I. Artemov, E. A. Chufistov, O. E. Chufistov*

---

© Артемов И. И., Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е., 2019. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

## POWER INTERACTION OF OUTPUT SHAFT'S PINS WITH SATELLITES IN THE PLANETARY-PIN GEAR. PART II. ALGORITHMS

### Abstract.

*Background.* Main failure in W mechanisms of planetary-pin gearing is fatigue destruction of output shaft pins. Therefore, forces and tensions are most important values used in design calculations of these mechanisms. Conducted researches have found that they are influenced by various factors, and, above all, manufacturing accuracy and itself loading of mechanism. Due to structural and geometric nonlinearity W mechanisms detect sensitivity to structural changes in contact areas with increasing load, which determines nature of load distribution in contact pairs and tensions arising in cross sections of pins. These phenomena are insufficiently studied. The purpose of the work is to increase accuracy of calculation of W mechanism on basis of revealing its actual loading.

*Materials and methods.* Studies are based on main provisions of statics and methods of calculation of strength and stiffness of mechanical systems. MathCad package was used for computer simulation.

*Results.* Significant influence of manufacturing accuracy of W mechanism on its torsional stiffness is revealed. Nature of changes in load on contact pairs and cycles of tensions changes arising in cross sections of pins of W mechanism during work of the planetary-pin gearing is established.

*Conclusions.* Manufacturing inaccuracies of W mechanism must be taken into account in design of planetary-pin gearings, which have high requirements for stiffness. A changing structure of contact zones in the mechanism leads to change in dependence of forces in contact from angular position of the mechanism's output shaft. Maximum tensions, which should be taken into account when calculating strength of W mechanism's pins, varies in zero-to-tension stress cycle.

**Keywords:** planetary-pin gearings, W mechanism, clearances, forces in contact, tensions in cross sections.

### Введение

Нагрузочная способность планетарно-цевочной передачи, в которой все контактирующие поверхности выполняются с высокими твердостями (более 59 HRC<sub>Э</sub>), лимитируется подшипниками сателлитов и пальцами механизма  $W$  [1, 2]. Для обеспечения надежной работы планетарно-цевочных передач необходимо, в том числе, повышение точности силового и прочностного расчетов механизма  $W$ .

Статика точно изготовленного механизма  $W$  исследовалась в [2]. Погрешности изготовления и сборки деталей механизма  $W$  могут приводить к образованию между втулками выходного вала и отверстиями сателлитов зазоров или натягов. Натяг вызывает сборочные напряжения в элементах механизма и усложняет либо делает невозможной сборку узла, поэтому предусматривают зазоры 0,08...0,3 мм [3].

Зазоры в механизме  $W$  уменьшают зону контакта пальцев и отверстий в сателлите, т.е. число одновременно работающих контактных пар, и изменяют характер распределения сил по контактным парам. В работе [4] получены формулы для коэффициента  $K_Q$  увеличения нагрузки на наиболее нагруженный палец в механизме  $W$  вследствие его неточного изготовления для

непрерывного распределения нагрузки (бесконечно большого числа пальцев). В связи с относительно небольшим числом работающих в любой момент пальцев в [4] получены зависимости для  $K_Q$  при дискретном распределении нагрузки. В обоих решениях в качестве расчетного принималось то положение сателлита, в котором радиус расположения наиболее нагруженного пальца перпендикулярен межосевой линии передачи. При работе передачи положение сателлита меняется, а вместе с ним меняется и распределение нагрузки по пальцам и напряжений, возникающих в них. Для расчета пальцев механизма  $W$  необходимо знать фактический закон изменения напряжений в пальцах.

До сих пор изучению этих закономерностей уделялось недостаточное внимание. Установление фактического закона изменения сил в контактах и напряжений в поперечных сечениях пальцев с учетом погрешностей изготовления позволит повысить точность расчета.

### 1. Аналитические зависимости и алгоритм решения

На рис. 1 показано положение передачи после поворота входного вала (водила) на некоторый угол  $\varphi_h$ , при этом на рис. 1,а приведено увеличенное изображение пальца с рис. 1,б.

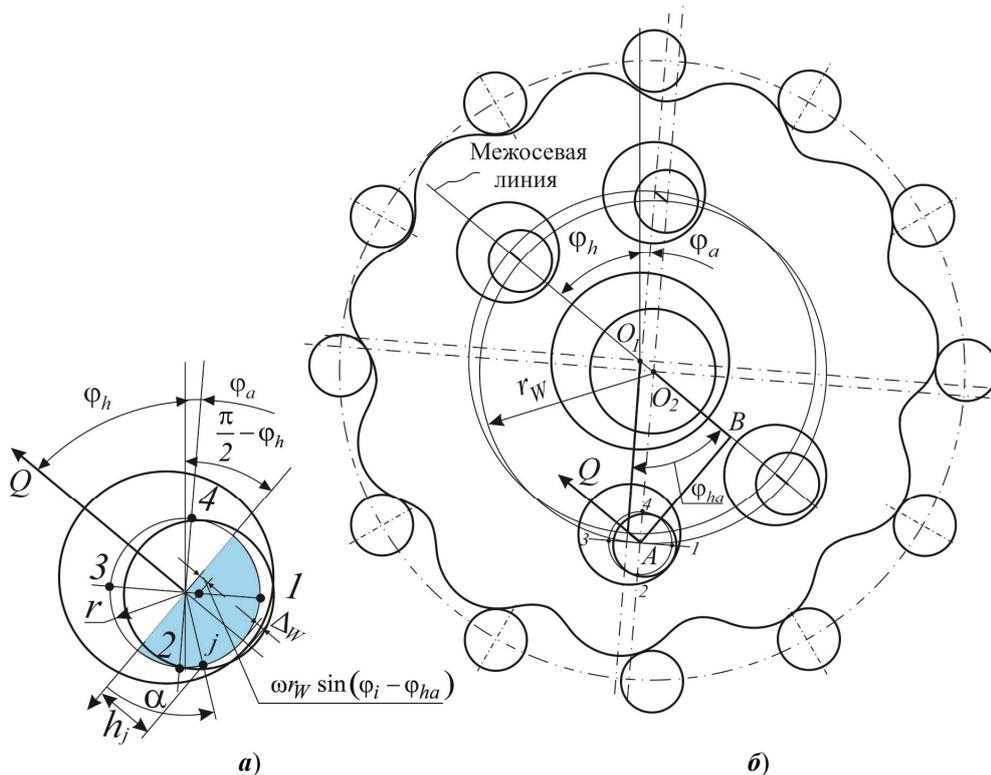


Рис. 1. Положение элементов передачи

Положительное направление отсчета углов принято против часовой стрелки, тогда угол поворота сателлита  $a$  (и выходного вала) от начального положения  $\varphi_a = -\varphi_h/z_a$ , где  $z_a$  – число зубьев сателлита. Угол поворота

води́ла относительно сателлита:  $\varphi_{ha} = \varphi_h - \varphi_a = \varphi_h (1 + 1/z_a) = \varphi_h z_b / z_a$ , где  $z_b$  – число цевок. При повороте води́ла на угол  $\varphi_h = 2\pi \frac{z_a}{z_b}$  угол поворота

води́ла относительно сателлита составит  $\varphi_{ha} = 2\pi$ , т.е. завершится цикл изменения сил и напряжений в поперечном сечении пальца.

Положение контактной пары будем задавать разностью угла  $\varphi_i$ , координаты пары в начальном положении механизма  $W$ ,  $\varphi_i = (i-1) \frac{2\pi}{n_W}$  (где  $i$  –

номер контактной пары, он отсчитывается от положения того пальца, который расположен на межосевой линии), и угла  $\varphi_{ha}$ . Изменение сил и напряжений изучается в пределах поворота выходного вала механизма относительно води́ла на один угловой шаг  $\varphi_{ha} = 2\pi/n_W$ , когда система вновь занимает первоначальное положение с той лишь разницей, что в положении 2 теперь будет находиться контактная пара 1, а в положении 3 – контактная пара 2 и т.д.

Будем полагать, что начальные зазоры в контактных парах одинаковые и равны  $\Delta_W$  (рис. 1,а). При повороте выходного вала с пальцами вокруг центра  $O_2$  против часовой стрелки при неподвижном сателлите на угол  $\omega$ , достаточный для выбора зазоров хотя бы в некоторых контактных парах, механизм  $W$  нагружается. На рис. 1,а начальное, до поворота, положение пальца показано тонкой линией. Зона пальцев, которые могут быть нагружены, располагается ниже и левее межосевой линии (рис. 1,б). Для каждой контактной пары (1, 2, ...,  $n_W/2+1$ , где  $n_W$  – число пальцев) вычисляют деформации  $\delta(i)$  (рис. 1,а):

$$\delta_i = \omega r_W \sin(\varphi_i - \varphi_{ha}) - \Delta_W. \quad (1)$$

По деформациям вычисляют силы:

$$\begin{aligned} Q_i &= c_W \delta(i) \text{ при } \delta(i) > 0, \\ Q_i &= 0 \text{ при } \delta(i) \leq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $c_W$  – коэффициент жесткости контактной пары, принято  $c_W = \text{const}$ .

В точно изготовленном механизме  $W$  отрицательные деформации (зазоры) возникают лишь в контактной паре с номером  $n_W/2+1$  при повороте механизма из начального положения.

Из (1) и (2) следует, что  $Q_{\max,3} = c_W (\omega r_W - \Delta_W)$  при  $\varphi_i - \varphi_{ha} = \pi/2$ . Такая сила действует на один из пальцев в исходном положении механизма  $W$ . Для этого положения силы, действующие на другие пальцы, равны

$$Q_i = Q_{\max,3} \frac{\omega r_W \sin(\varphi_i - \varphi_{ha}) - \Delta_W}{\omega r_W - \Delta_W}. \quad (3)$$

При повороте механизма  $W$  меняются углы расположения пальцев и, как показано в [4], угол поворота  $\omega$ . Поэтому использовать непосредственно приведенные зависимости сложно. Предлагается следующий алгоритм решения задачи.

Значения  $\delta(i)$  должны быть такими, чтобы выполнялось условие равновесия: вращающий момент  $T_c$  на спутнике:

$$T_c = \sum_i Q_i r_W \sin(\varphi_i - \varphi_{ha}) = c_W \omega r_W \sum_i [\sin(\varphi_i - \varphi_{ha}) - \Delta_W] \sin(\varphi_i - \varphi_{ha}). \quad (4)$$

В данном случае указать значение  $\omega$ , которое соответствует заданному значению момента, не удастся из-за того, что номера нагруженных контактных пар, сами зависящие от  $\omega$ , неизвестны. Поэтому в начале принимают приближенное значение  $\omega = \omega_0$ , а затем его уточняют. Предварительно угол  $\omega_0$  можно принимать по формуле [4]:

$$\omega_0 = \frac{T_c}{c_W r_W^2 \sum_{i=1}^{\frac{n_W}{2}} \sin^2(\varphi_i - \varphi_{ha})}. \quad (5)$$

Как показано в [4],

$$\sum_{i=1}^{\frac{n_W}{2}+1} \sin^2(\varphi_i - \varphi_{ha}) \approx n_W / 4, \quad (6)$$

поэтому можно принимать

$$\omega_0 = \frac{4T_c}{n_W c_W r_W^2}. \quad (7)$$

Затем для этого значения следует определить момент  $T_{c0}$ . Так как  $\omega_0$  – приближенное значение, то  $T_{c0} \neq T_c$ . Поэтому значение  $\omega$  уточняют. Формулу для уточненного значения  $\omega$  можно получить на основании соотношений, приведенных в работе [4]:

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \frac{T_c - T_{ck}}{c_W r_W^2 \sum_{i=p}^q \sin^2(\varphi_i - \varphi_{ha})},$$

где  $k, k+1$  – номера итераций;  $p, q$  – номера контактных пар, являющиеся границами диапазона, в котором  $\delta_i > 0$ , на  $k$ -й итерации.

Затем определяют новые значения  $\delta_i$ , отрицательные заменяют на ноль. Далее итерационный процесс продолжается до достижения требуемой точности. Так определяется значение  $\omega$  и формируются массивы  $\delta_i$  и  $Q_i$ .

Исследуем напряжения, возникающие в поперечном сечении пальца, расположенного в исходном положении на вертикальной оси симметрии. Очевидно, законы изменения напряжений в поперечных сечениях других пальцев такие же. На пальце указаны точки, для которых будут определены напряжения. При этом точки 2 и 4 расположены как раз на вертикальной оси

симметрии пальца, совпадающей для начального положения с осью симметрии передачи, а точки 1 и 3 на перпендикулярной оси симметрии пальца.

Перпендикуляр к линии действия силы, расположенный в нейтральной плоскости, проходящей через центр ролика, делит поперечное сечение пальца на область растяжения, закрашенную на рис. 1,  $a$ , и область сжатия. Расстояние от нейтральной линии до текущей точки  $i$ , расположенной на внешней поверхности пальца,  $h = r \sin \alpha$ , где  $r$  – радиус пальца. Для точек 1 и 3 эти расстояния  $\pm r \sin(\varphi_h - \varphi_a)$ , а для точек 2 и 4 –  $\pm r \cos(\varphi_h - \varphi_a)$ . Напряжения изгиба в точке  $j$  поперечного сечения:

$$\sigma_{и} = \frac{4Ql_p}{\pi r^3} \sin \alpha, \quad (8)$$

где  $l_p$  – длина пальца от точки приложения силы до заделки.

## 2. Интерпретация решения

Приведенные модели и алгоритмы позволяют проследить за изменением сил и напряжений в нагруженной передаче при разных положениях входного вала. Эти модели применимы для изучения работы механизма при малых скоростях, т.е. без учета инерционных нагрузок. Далее показаны результаты расчетов, выполненных в MathCad при следующих параметрах передачи: вращающий момент на сателлите  $T_c = 350 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , ресурс передачи 10000 ч, режим работы тяжелый, передаточное отношение  $u = 33$ , число сателлитов  $n_c = 2$ , число пальцев механизма  $W$   $n_W = 12$ . Размеры элементов механизма  $W$  (рис. 2) [5]: радиус окружностей центров отверстий в сателлите и пальцах во фланце выходного вала  $r_W = 70 \text{ мм}$ , межосевое расстояние  $a_w = 2,2 \text{ мм}$ , диаметр пальцев  $d_{п} = 18 \text{ мм}$ , расчетная длина пальцев –  $l_p = 40 \text{ мм}$ , расчетный коэффициент жесткости контактной пары [6]  $c_W = 4,233 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}$ .

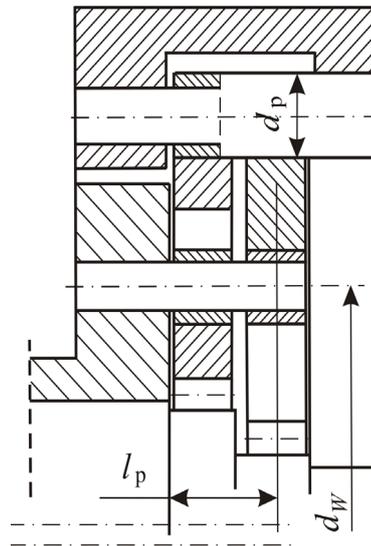


Рис. 2. Схема для расчета коэффициента жесткости

Угол упругого поворота, т.е. угол, на который поворачивается выходной вал при нагружении его вращающим моментом после выбора зазора хотя бы в одной кинематической паре, изменяется периодически (рис. 3). Форма кривой меняется с увеличением зазора в механизме  $W$ , но наименьший угол упругого поворота всегда соответствует повороту выходного вала на половину углового шага пальцев. С увеличением зазора угол упругого поворота увеличивается, а крутильная жесткость системы «сателлит – выходной вал» соответственно падает. Для приведенного примера в точно изготовленном механизме  $W$  расчетное значение угла упругого поворота  $\omega = 5,625 \cdot 10^{-4}$  рад, а крутильная жесткость  $c_\varphi = \frac{T_c}{\omega} = 6,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$ , при  $\Delta_W = 0,3$  мм среднее значение  $\omega \approx 1 \cdot 10^{-3}$  рад и  $c_\varphi = 3,5 \cdot 10^5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$ , т.е. крутильная жесткость уменьшилась в  $\approx 1,77$  раза.

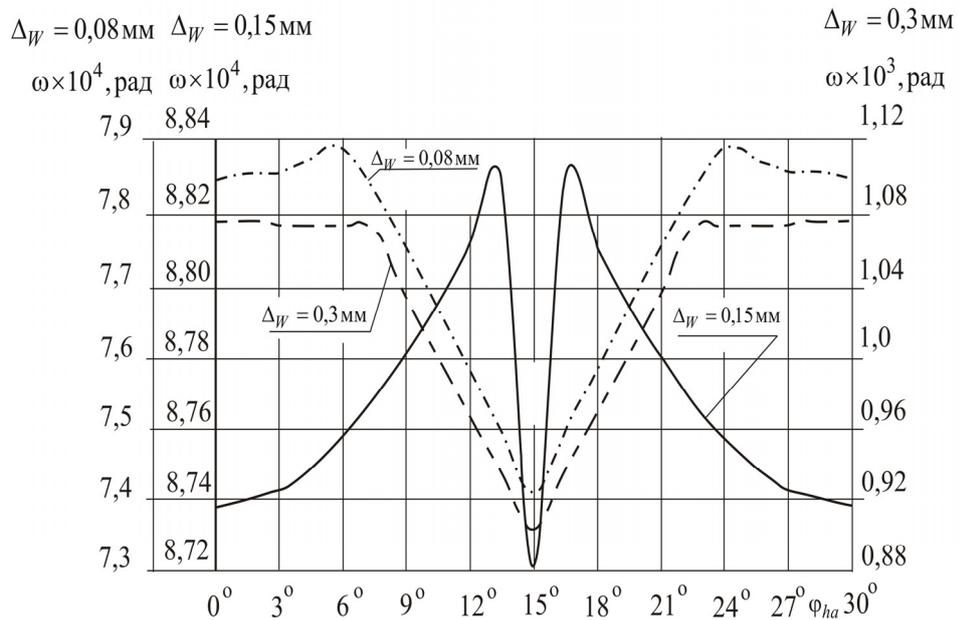


Рис. 3. График зависимости угла упругого поворота от положения (угла  $\varphi_{ha}$ )

На рис. 4 представлено изменение сил в контакте при повороте механизма. По оси, направленной вправо, отложены номера контактных пар (от 1 до 7), а по оси, направленной от наблюдателя – номера положений (от 1 до 21). Гребни на рисунках сверху показывают в масштабе значения сил в контактных парах. Из рисунка видно, как меняются силы при повороте механизма. При всех зазорах, для которых выполнены расчеты, первая, шестая и седьмая контактные пары не нагружены. При  $\Delta_W = 0,08$  мм в большинстве положений вращающий момент передается четырьмя пальцами, а при  $\Delta_W = 0,3$  мм – двумя. Из рисунков внизу видно, что графики сил состоят из трех участков, при этом углы поворота выходного вала, при которых изменяется поведение сил, соответствуют изменению числа пальцев, воспринимающих нагрузку, т.е. моментам перестройки структуры зоны контакта.

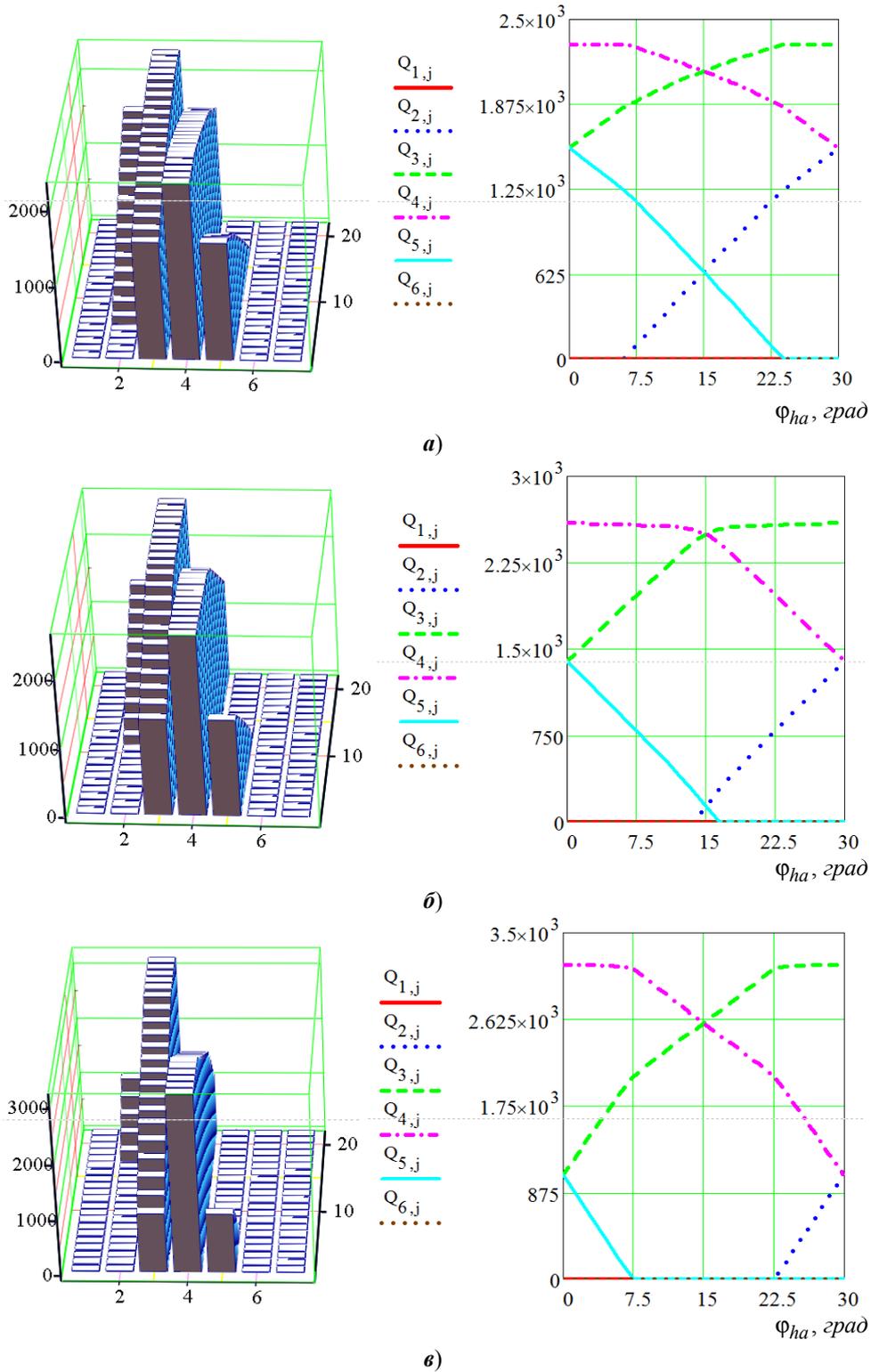


Рис. 4. Изменение сил в контакте в зависимости от положения (угла  $\varphi_{ha}$ ):

**а** –  $\Delta W = 0,08 \text{ мм}$ ; **б** –  $\Delta W = 0,15 \text{ мм}$ ; **в** –  $\Delta W = 0,3 \text{ мм}$

Для примера обратимся к расчету для  $\Delta W = 0,08$  мм и проследим, как изменяется сила, действующая на пальцы. В первом угловом шаге это сила на палец номер один, во втором угловом шаге – сила на палец два и т.д. В первом угловом шаге сила на палец не действует. Палец вступает в контакт, начиная примерно с угла  $\approx 6,4^\circ$  второго углового шага, достигая при повороте на угол  $30^\circ$  значения  $1,55 \cdot 10^3$  Н, при этом палец переходит в положение 3 и т.д. На рис. 5 приведены графики изменения сил, действующих на пальцы, для точно изготовленного механизма  $W$  и механизма с начальными зазорами.

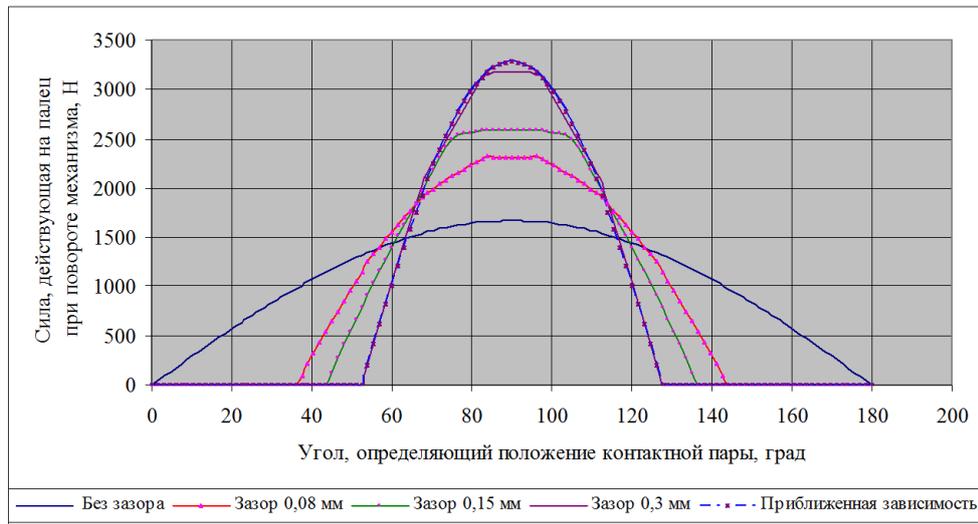


Рис. 5. Графики сил, действующих в контактных парах

Перестройка зон контакта и скачкообразное изменение жесткости системы приводит к изменению характера зависимости силы от угла поворота, появляются переломы. Однако в целом соблюдается более-менее гладкая зависимость. Для расчетов сил можно использовать формулы, полученные в [2, 6]. На рис. 5 приближенная зависимость построена по формуле [6]:

$$Q = Q_{\max} \sin \left( \frac{\pi(\varphi_{ha} - \alpha_0)}{(\pi - 2\alpha_0)} \right), \quad (9)$$

где  $\alpha_0$  и  $\pi - 2\alpha_0$  – значения угла  $\varphi_{ha}$ , ограничивающие зону контакта.

С учетом формулы (8) получим

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{4Q_{\max}l_p}{\pi r^3} \sin \left( \frac{\pi(\varphi_{ha} - \alpha_0)}{(\pi - 2\alpha_0)} \right) \sin \alpha. \quad (10)$$

На рис. 6 показаны графики изменения напряжений в зависимости от угла поворота механизма для четырех характерных точек в поперечном сечении пальца.

В точках 1 и 3 напряжения изменяются по отнулевому циклу, в точках 2 и 4 – по симметричному циклу, в других – по асимметричным циклам.

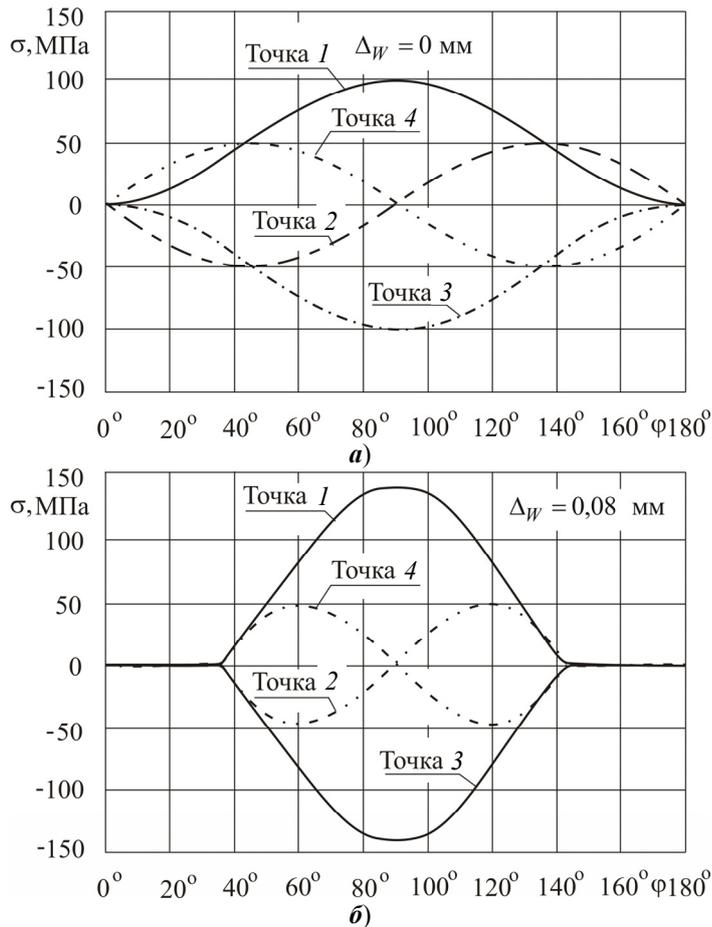


Рис. 6. Графики зависимостей напряжений в характерных точках поперечного сечения от положения (угла  $\varphi_{ha}$ ) для механизма без зазоров и с начальным зазором  $\Delta_W = 0,08$  мм

Напряжение изгиба в точке 1 для точно изготовленного механизма ( $\alpha_0 = 0$ )  $\sigma_{и1}^1 = \frac{4Q_{max}l_p}{\pi r^3} \sin^2 \varphi_{ha}$ . Максимальное напряжение  $\sigma_{иmax}^1 = \frac{4Q_{max}l_p}{\pi r^3}$  имеет место при  $\varphi_{ha} = \pi/2$ . Напряжение изгиба в точке 2:  $\sigma_{и2}^2 = \frac{4Q_{max}l_p}{\pi r^3} \sin \varphi_{ha} \cos \varphi_{ha} = \frac{2Q_{max}l_p}{\pi r^3} \sin 2\varphi_{ha}$ , а максимальное —  $\sigma_{иmax}^2 = \frac{2Q_{max}l_p}{\pi r^3}$  при  $\varphi_{ha} = \pi/4$ . Таким образом, максимальное напряжение отнулевого цикла в два раза больше амплитудного (максимального) напряжения симметричного цикла.

### Заключение

В представленной работе предложено решение задачи об установлении фактического закона изменения сил в контактах механизма  $W$  и напряжений

в поперечных сечениях пальцев с учетом погрешностей изготовления механизма. Оно может служить основой для построения методики проверочного расчета механизма *W*. Направлением дальнейших исследований является решение задачи о фактическом напряженном состоянии пальцев с учетом совместной работы всех сателлитов.

#### **Библиографический список**

1. Обеспечение качества планетарно-цевочных передач при проектировании и производстве / И. И. Артемов, Е. А. Чуфистов, А. В. Липов, О. Е. Чуфистов, Г. С. Большаков, К. А. Носков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 3 (47). – С. 124–139.
2. **Кудрявцев, В. Н.** Планетарные передачи / В. Н. Кудрявцев. – Москва ; Ленинград : Машиностроение, 1966. – 308 с.
3. **Юдин, В. А.** К теории проектирования «реальных» планетарных передач с цевочным внеполусным зацеплением / В. А. Юдин, В. К. Лобастов // Теория передач в машинах. – Москва : Наука, 1971. – С. 83–95.
4. **Артемов, И. И.** Силовое взаимодействие пальцев выходного вала с сателлитами в планетарно-цевочной передаче. Часть I. Методы / И. И. Артемов, Е. А. Чуфистов, О. Е. Чуфистов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1 (49). – С. 79–90.
5. **Чуфистов, Е. А.** Программа расчета планетарно-цевочных передач / Е. А. Чуфистов, А. В. Родиков, Е. А. Гуреев, Е. В. Гусенков // Проблемы исследования и проектирования машин : сб. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПДЗ, 2011. – С. 94–96.
6. **Чуфистов, Е. А.** Влияние точности изготовления и деформаций элементов механизма *W* планетарно-цевочной передачи на его нагруженность / Е. А. Чуфистов, А. В. Родиков, И. Р. Ганиев, П. А. Мельников // Проблемы исследования и проектирования машин : сб. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПДЗ, 2009. – С. 51–56.

#### **References**

1. Artemov I. I., Chufistov E. A., Lipov A. V., Chufistov O. E., Bol'shakov G. S., Noskov K. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2018, no. 3 (47), pp. 124–139. [In Russian]
2. Kudryavtsev V. N. *Planetarnye peredachi* [Planetary gear]. Moscow; Leningrad: Mashinostroenie, 1966, 308 p. [In Russian]
3. Yudin V. A., Lobastov V. K. *Teoriya peredach v mashinakh* [The theory of gears in machines]. Moscow: Nauka, 1971, pp. 83–95. [In Russian]
4. Artemov I. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2019, no. 1 (49), pp. 79–90. [In Russian]
5. Chufistov E. A., Rodikov A. V., Gureev E. A., Gusenkov E. V. *Problemy issledovaniya i proektirovaniya mashin: sb. st. VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Problems of research and design of machines: proceedings of VI International scientific and technical conference]. Penza: PDZ, 2011, pp. 94–96. [In Russian]
6. Chufistov E. A., Rodikov A. V., Ganiev I. R., Mel'nikov P. A. *Problemy issledovaniya i proektirovaniya mashin: sb. st. V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Problems of research and design of machines: proceedings of V International scientific and technical conference]. Penza: Izd-vo PDZ, 2009, pp. 51–56. [In Russian]

**Артемов Игорь Иосифович**

доктор технических наук, профессор,  
проректор по научной работе  
и инновационной деятельности,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: artemov@pnzgu.ru

**Artemov Igor' Iosifovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
vice-rector for research and innovative  
activities, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Чуфистов Евгений Алексеевич**

кандидат технических наук, профессор,  
кафедра транспортных машин,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: tm@pnzgu.ru

**Chufistov Evgeniy Alekseevich**

Candidate of engineering sciences,  
professor, sub-department of transport  
machines, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Чуфистов Олег Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра технологии машиностроения,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/  
ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: tchufistov@mail.ru

**Chufistov Oleg Evgen'evich**

Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department  
of machine-building technology,  
Penza State Technological University  
(1a/11 Baydukova lane/Gagarina  
street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Артемов, И. И. Силовое взаимодействие пальцев выходного вала с сателлитами в планетарно-цевочной передаче. Часть II. Алгоритмы / И. И. Артемов, Е. А. Чуфистов, О. Е. Чуфистов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 100–111. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-9.

### ***Уважаемые читатели!***

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

- ***информатика***
- ***вычислительная техника***
- ***управление***
- ***электроника***
- ***измерительная техника***
- ***радиотехника***
- ***машиностроение***
- ***машиноведение***

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. (841-2) 36-84-87. E-mail: [VolgaVuz@mail.ru](mailto:VolgaVuz@mail.ru)

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

---

### **ЗАЯВКА**

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20\_\_ г.

№ 1 – \_\_\_\_\_ шт., № 2 – \_\_\_\_\_ шт., № 3 – \_\_\_\_\_ шт., № 4 – \_\_\_\_\_ шт.

Наименование организации (полное) \_\_\_\_\_

ИНН \_\_\_\_\_ КПП \_\_\_\_\_

Почтовый индекс \_\_\_\_\_

Республика, край, область \_\_\_\_\_

Город (населенный пункт) \_\_\_\_\_

Улица \_\_\_\_\_ Дом \_\_\_\_\_

Корпус \_\_\_\_\_ Офис \_\_\_\_\_

ФИО ответственного \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел. \_\_\_\_\_ Факс \_\_\_\_\_ E-mail \_\_\_\_\_

Руководитель предприятия \_\_\_\_\_  
(подпись) (ФИО)

Дата «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.