



# Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Ежемесячный журнал

1'2016

## Содержание

### Редакционный совет:

**Кутузов В. М.**, д-р техн. наук,  
профессор – председатель

**Шестопалов М. Ю.**, канд. техн.  
наук, доцент – заместитель  
председателя

**Соломонов А. В.**, д-р физ.-мат.  
наук, профессор – главный  
редактор

**Законников Е. А.**, канд. техн.  
наук, доцент – ответственный  
секретарь

**Алексеев В. В.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Венчик О. Г.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Гусаров В. В.**, д-р хим. наук,  
чл.-кор. РАН

**Зубков В. И.**,  
д-р физ.-мат. наук, профессор

**Имаев Д. Х.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Куприянов М. С.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Лысенко Н. В.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Новиков В. А.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Путов В. В.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Степанов О. А.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Филатов Ю. В.**,  
д-р техн. наук, профессор

**Юлдашев З. М.**,  
д-р техн. наук, профессор

\*\*\*

Редакция  
197376, Санкт-Петербург,  
ул. Проф. Попова, 5  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
Тел.: (812) 234-02-23

### ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ, ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

*Рамазанов А. Н., Кострин Д. К., Ухов А. А., Лисенков А. А.* Тлеющий  
разряд на воздухе с жидким неметаллическим катодом..... 3

### ИНФОРМАТИКА И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Бекенева Я. А.* Анализ актуальных типов DDoS-атак  
и методов защиты от них ..... 7

*Хаберланд Р., Ивановский С. А., Кринкин К. В.* Верификация  
объектно-ориентированных программ с динамической памятью  
на основе ссылочной модели ..... 14

*Колмаков С. А., Леонов А. В.* Методика выявления ошибок  
человека-оператора с учетом его психологического типа  
на основании игровых программ, эмулирующих процесс работы на АРМ... 18

*Алкади Лайс Дж. Г., Лячек Ю. Т., Мустафа Ахмед Бадор Мохамед*  
Модификация областей штриховки при использовании сеточной  
параметрической модели чертежей ..... 22

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

*Никонов А. Н., Жеронкин К. М.* Алгоритм адаптивного  
управления нелинейным объектом с исполнительным  
механизмом ограниченной силы воздействия ..... 27

*Писарев А. С.* Метод автоматического анализа траекторий  
движения стохастических динамических систем ..... 32

*Игнатьев К. В., Путов А. В., Копычев М. М., Путов В. В., Русаев Н. А.*  
Нечеткая система автономного управления движением робота  
с компьютерным зрением и всенаправленными колесами ..... 38

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Нуриахметов Р. М., Новиков В. А.* Системы управления движением  
подъемно-транспортных машин с реализацией способов  
предотвращения раскачивания груза ..... 42

*Пронин М. В., Пименова И. А., Григорян А. С., Глушаков В. В.,  
Воронцов А. Г.* Системы самовозбуждения синхронного генератора  
с двухполлярным и однополлярным широтно-импульсным  
преобразователем ..... 46

### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Башарин С. А., Вахитов Ш. Я., Карельский В. Ю.* Повышение  
качества звука акустических систем на основе учета  
нелинейных искажений магнитного поля ..... 52

### МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Куракина Н. И., Булганин С. Ю., Гридина Е. Г. Пространственный анализ загрязнения акватории Финского залива в технологии ГИС .... 56

### БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ

Попечителев Е. П. Методики тренировки малых групп операторов на основе принципов уравновешивания и рефлексивных компьютерных игр ..... 63

Тихонов Э. П. Концептуальная модель предметной области автоматической фрагментации электрокардиосигналов на базе логической схемы алгоритмов ..... 70

### ИСТОРИЯ СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Северинова В. П. Мастер связи ..... 84

*Сведения об авторах* ..... 88

*Правила представления рукописей авторами* ..... 90

### Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Тел.: (812) 346-44-87 Факс.: (812) 346-27-58

### Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС2-8390  
от 04.12.2006 г. выдано  
Управлением Федеральной  
службы по надзору  
за соблюдением  
законодательства в сфере  
массовых коммуникаций  
и охране культурного наследия  
по Северо-Западному  
федеральному округу

\*\*\*

### Редакторы:

Э. К. Долгатов, О. Р. Крумина  
Н. В. Лукина, И. Г. Скачек  
Комп. верстка  
И. С. Беляевой

Подписано в печать 22.01.16.

Формат 60 × 84 1/8.

Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Гарнитура «Times New Roman».  
Уч.-изд. л. 11,83. Печ. л. 11,5.  
Тираж 300 экз. (1-й завод 1–120 экз.)  
Заказ 3.

### Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

197376, Санкт-Петербург,  
ул. Проф. Попова, 5  
Тел.: (812) 346-45-23  
Тел. / факс: (812) 346-28-56

### ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 45821 ПО ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ «ПРЕССА РОССИИ». ТОМ 1 «ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ»

Подписка производится в любом почтовом отделении России

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793



УДК 537.523

А. Н. Рамазанов, Д. К. Кострин, А. А. Ухов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. А. Лисенков

Институт проблем машиностроения Российской академии наук (ИПМаш РАН)

## Тлеющий разряд на воздухе с жидким неметаллическим катодом

*Рассмотрен тлеющий разряд на воздухе атмосферного давления в разрядной ячейке с жидким катодом. Приведены вольт-амперные характеристики такой системы при различных расстояниях между электродами. Продемонстрирована спектrogramма излучения плазмы тлеющего разряда.*

### Тлеющий разряд, жидкий электрод, вольт-амперная характеристика, излучение плазмы

В последние годы все больший научно-исследовательский интерес вызывает газовый разряд, существующий на воздухе, в котором в качестве одного или сразу двух электродов выступает жидкость [1], [2]. По классификации газовых разрядов данный тип относят к тлеющему разряду, т. е. самостоятельному электрическому разряду с холодным катодом, особенностью которого является наличие слоистой структуры. Изменение состава газовой смеси и давления в межэлектродном промежутке влияет как на напряжение возникновения разряда, так и на плотность тока и условия его поддержания.

Диапазон областей, где может быть использован газовый разряд с жидкими электродами, достаточно широк. Определяющее применение сильнонеравновесной плазмы подобного разряда – это воздействие на поверхность воды: очистка, достигаемая за счет ослабления связей органических соединений, и контроль состава жидкости [3], [4].

Целью работы являлось исследование газового разряда, существующего при атмосферном давлении, в воздухе при наличии одного жидкого электрода.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** В работе исследовалась электродная система «металлический анод–жидкий катод». Металлический катод погружен в жидкость, поверхность которой может рассматриваться как

жидкий катод, а анод отделен от жидкости воздушным промежутком, в котором и возникает тлеющий разряд при приложении высокого напряжения. Способность воды проводить электрический ток связана с диссоциацией молекулы воды на ионы, являющиеся проводниками электрического тока:  $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$  или  $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ . Ион гидроксония  $\text{H}_3\text{O}^+$ , в свою очередь, может объединяться с другими молекулами воды, образуя гидратированные ионы, например:  $(\text{H}_5\text{O}_2)^+$ ,  $(\text{H}_7\text{O}_3)^+$ ,  $(\text{H}_9\text{O}_4)^+$ .

Формируемый разряд в первоначальный момент времени следует характеризовать как импульсно-периодический, который через 10...20 с переходит в стационарный режим, характеризующийся наличием яркого свечения и зоны, охваченной разрядом на поверхности катода и называемой по аналогии с привязкой существования вакуумно-дугового разряда с интегрально-холодным катодом катодным пятном [5]. Катодное пятно обеспечивает интенсивное испарение воды, в связи с чем спектральные характеристики разряда определяются как воздушными компонентами, так и системой полос излучения продуктов распада молекул воды.

Конструкция разрядной системы приведена на рис. 1. Тлеющий разряд возбуждается в стеклянной кювете 1 и существует между заострен-

ным вольфрамовым электродом, размещенным над поверхностью воды и выполняющим функции анода 2, и металлическим электродом 3 (катод), находящимся на глубине до 3 см от ее поверхности и определяющим потенциал жидкости. Для зажигания разряда была разработана высоковольтная импульсная схема, позволяющая варьировать частоту следования импульсов  $f$  от 15 до 50 кГц, при напряжении  $U$  от 0 до 3.5 кВ. Расстояние от анода 2 до поверхности жидкости  $d$  изменялось в диапазоне 3...10 мм. При расстоянии между электродами  $d < 3$  мм возникала вероятность замыкания промежутка, а при  $d > 6$  мм, при указанных условиях, разряд не зажигался.

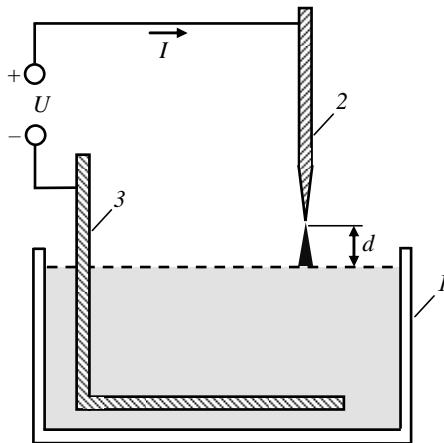


Рис. 1

Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с одним жидким электродом при различных расстояниях  $d$  между анодом и поверхностью жидкости приведены на рис. 2. Условия возникновения газового разряда зависят от давления газа и расстояния между электродами и характеризуются кривой Пашена. При  $d = 4\text{...}6$  мм разряд горел только в определенных диапазонах частот и напряжений. Например, при  $d = 5$  мм частотный диапазон горения разряда составлял 19.5...50 кГц. При  $d = 3$  мм разряд поддерживался во всем диапазоне частот и напряжений.

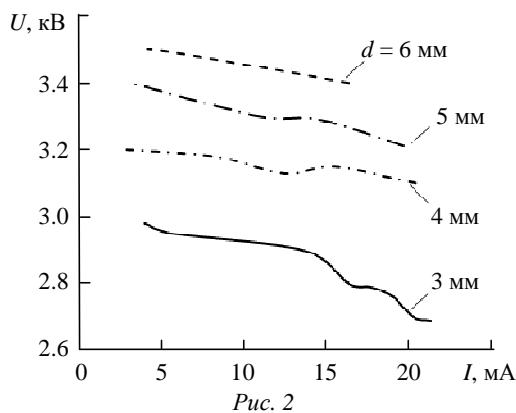


Рис. 2

В качестве примера на рис. 3 приведены осциллограммы напряжения и тока тлеющего разряда при  $d = 4$  мм и  $f = 39.5$  кГц. Высокая яркость свечения тлеющего разряда наблюдается при токах, превышающих 20 мА.

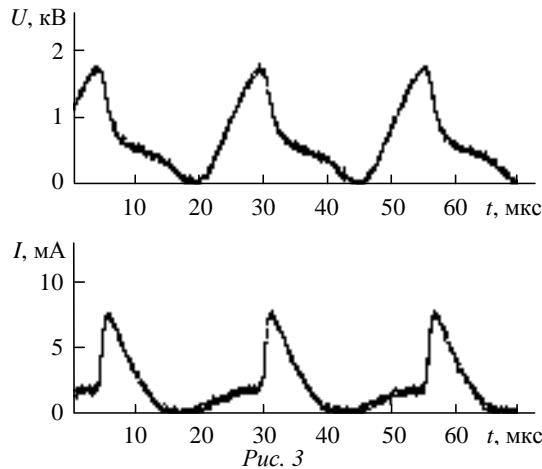


Рис. 3

По мере погружения катода относительно поверхности, за счет увеличения сопротивления электрической цепи напряжение зажигания разряда возрастает и наблюдается уменьшение яркости его свечения. Увеличение тока, протекающего в разрядном промежутке, приводит к изменению формы самого разряда — от конусообразной до эллипсообразной. Еще одной особенностью газового разряда в исследованной системе является интенсивное перемещение катодного пятна по поверхности жидкости в результате ее колебаний под воздействием потока плазмы. На рис. 4 приведена контрастная фотография разряда при  $d = 4$  мм и  $I = 20$  мА.

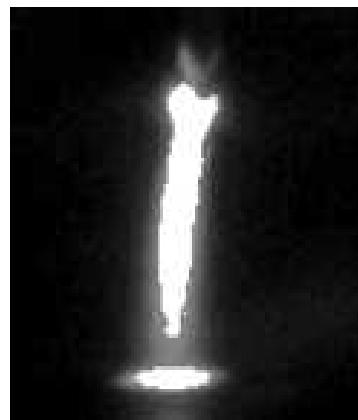


Рис. 4

Спектрограммы разряда атмосферного давления в воздухе между металлическим анодом и поверхностью жидкости снимались с помощью спектрометра ISM3600. При обработке полученных спектров излучения применялось программное обеспечение ASpect 2010 [6], [7]. В качестве исследуемой жидкости в данных экспериментах использовалась водопроводная вода.

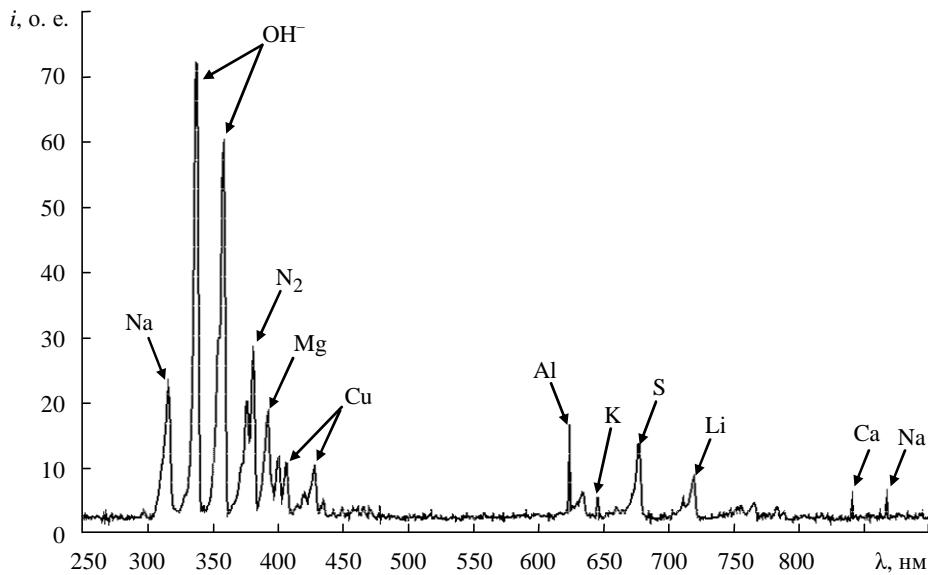


Рис. 5

На рис. 5 представлена спектрограмма ( $\lambda$  – длина волн;  $i$  – интенсивность излучения) тлеющего разряда с жидким катодом при расстоянии между анодом и поверхностью воды  $d = 4$  мм и частоте питающего напряжения 30 кГц. Чувствительность спектрометра (время накопления) – 2 с.

Наиболее интенсивные спектральные линии излучения плазмы тлеющего разряда сконцентрированы в промежутке длин волн 300..400 нм и соответствует в основном гидроксильной группе  $\text{OH}^-$ , а также однозарядным ионам азота  $\text{N}^+$  и кислорода  $\text{O}^+$ , молекулярным азоту и кислороду.

В видимом диапазоне длин волн наблюдаются спектральные линии молекул лития, меди, калия, серы и алюминия. В диапазоне 800...1000 нм присутствуют пики, соответствующие кальцию и натрию.

Эффективность возбуждения спектральных линий разных элементов различна и зависит как от электрических параметров разряда, так и от

конструктивных характеристик разрядной ячейки и даже температуры жидкости. Таким образом, для оценки количественного содержания элементов в жидкости нужна предварительная калибровка по пробам с известным составом.

Значение расстояния между металлическим анодом и жидким катодом, при котором происходит устойчивое горение тлеющего разряда, лежит в диапазоне 3...6 мм. При расстоянии между электродами 3 мм разряд не гаснет при изменении частоты и напряжения в достаточно широких пределах, при этом изменяется только интенсивность свечения плазмы разряда.

Продолжением исследований в данной области является анализ эффективности возбуждения спектральных линий элементов, растворенных в жидкости, в зависимости от электрических параметров разряда, конструкции разрядной ячейки и ряда других факторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Webb M. R., Hieftje G. M. Spectrochemical analysis by using discharge devices with solution electrodes // Analytical chemistry. 2009. Vol. 81, № 3. P. 862-867.
2. Рамазанов А. Н., Кострин Д. К. Разрядные системы для спектрохимического анализа // Современная техника и технологии. 2015. № 7. С. 42-46.
3. Mezei P., Cserfalvi T. Electrolyte cathode atmospheric glow discharges for direct solution analysis // Applied spectroscopy reviews. 2007. Vol. 42. P. 573-604.
4. Соколов М. А., Брытов И. А. Использование электрического разряда в жидкости для эмиссионного анализа // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2-3. С. 100-104.
5. Cathode Spots of Vacuum Arc Discharges: Motion Control on the Working Surface / Yu. A. Bystrov, D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov, N. Z. Vetrov // Vakuum in Forschung und Praxis. 2015. Vol. 27, № 2. P. 22-25.
6. Use of compact spectrometer for plasma emission qualitative analysis / A. A. Usov, V. A. Gerasimov, D. K. Kostrin, L. M. Selivanov // J. of Physics: Conf. Series. 2014. Vol. 567. P. 012039.
7. Особенности анализа состава плазмы с помощью малогабаритного оптического спектрометра / А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 3. С. 7-10.

A. N. Ramazanov, D. K. Kostrin, A. A. Uhov  
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

A. A. Lisenkov  
*Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (IPME RAS)*

## GLOW DISCHARGE IN AIR WITH LIQUID NONMETALLIC CATHODE

*In the article the glow discharge in air with atmospheric pressure in the discharge cell with a liquid cathode is considered. Volt-ampere characteristics of such system at different distances between the electrodes are given. Spectrogram of radiation of glow discharge plasma is shown.*

**Glow discharge, liquid electrode, current-voltage characteristic, plasma radiation**

---



УДК 004.056

Я. А. Бекенева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Анализ актуальных типов DDoS-атак и методов защиты от них

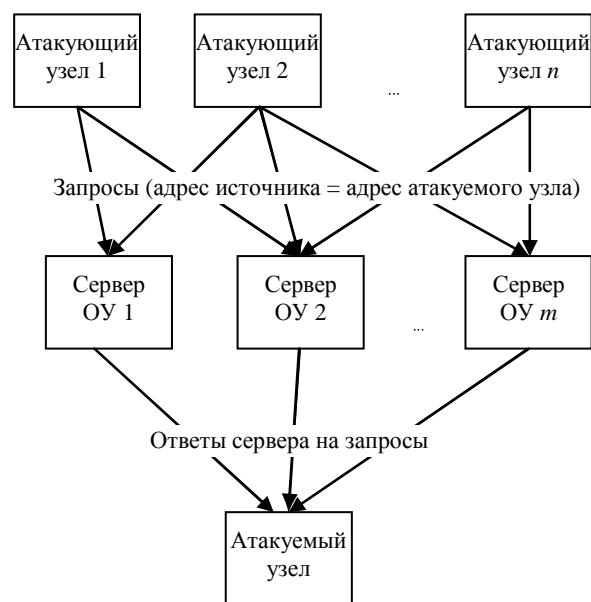
*Представлен анализ наиболее актуальных типов атак, основанных на отражении и усилении трафика. Приведены методы, рекомендуемые для предотвращения таких атак, а также существующие методы защиты от них. Выявлены преимущества и недостатки этих методов. Поставлены дальнейшие цели по разработке новых методов защиты.*

### DDoS-атака, DNS, NTP, SSDP, SNMP, методы защиты от DDoS-атак, RRL, RAD

DDoS-атака – распределенная атака типа «отказ в обслуживании» различных интернет-сервисов. При успешном совершении подобных атак на сервер он перестает отвечать на легитимные запросы от пользователей. Крупным DDoS-атакам подвергаются сайты правительства и органов власти, сайты ведущих ИТ-корпораций Amazon, Yahoo, Microsoft и т. д. Эти мощные корпорации, имеющие огромные ресурсы, не всегда могут справиться с атаками и отразить нападение.

Согласно отчету [1] количество проводимых DDoS-атак неуклонно возрастает. Мировые лидеры по информационной безопасности [2] ставят необходимость обнаружения DDoS-атак и противостояния им как первостепенную задачу в своих исследованиях и разработках. Это свидетельствует о том, что разработка и внедрение методов защиты от DDoS-атак – актуальная задача. В настоящее время одним из наиболее популярных типов DDoS-атак являются атаки, основанные на отражении и усилении вредоносного трафика. При разработке новых универсальных методов защиты от атак такого типа первоочередной задачей является анализ протоколов, которые могут быть использованы для реализации подобных атак. Помимо этого необходим анализ уже существующих методов защиты от атак, осуществляющих отражение трафика с использованием различных протоколов. В статье представлены результаты проведенного анализа и сделанные на его основе выводы.

**Атаки, основанные на отражении и усилении трафика.** На рисунке представлена общая схема реализации атак с отражением и усилением трафика.



Отражение трафика достигается отправкой на определенные серверы (на рисунке обозначены как серверы ОУ) запроса, где IP-адреса источника подменяются на IP-адрес жертвы. В качестве таких серверов, в зависимости от типа реализуемой атаки, могут использоваться как крупные серверы, такие, как DNS-серверы, NTP-серверы, так и

пользовательские устройства. Эффект усиления достигается за счет того, что генерируются такие запросы, ответы на которые по объему в разы превосходят сами запросы. Это позволяет злоумышленникам совершать массированные атаки, не имея в своем распоряжении большого количества ресурсов.

Коэффициент усиления (КУ) при этом определяется как

$$KU = \frac{\text{Размер ответа}}{\text{Размер запроса}}.$$

Очевидно, что такие атаки не могут совершаться с использованием протоколов, основанных на TCP, так как процесс трехэтапного рукопожатия исключает возможность подмены адреса. В работе [3] было выявлено 14 популярных протоколов, которые могут использоваться для реализации атак с усилением трафика. Все эти протоколы работают на базе протокола UDP.

В настоящее время для реализации атак с усилением трафика наибольшей популярностью пользуются такие протоколы, как DNS и NTP.

Постепенно набирают популярность атаки, основанные на других протоколах. Например, атаки, основанные на протоколе SSDP: в первом квартале 2014 г. таких атак было произведено всего 3, а в четвертом их число достигло 83 000. В первом квартале 2015 г. число таких атак выросло до 126 000, а во втором квартале атаки этого типа заняли второе место в общем рейтинге атак, уступив только SYN-Flooding [1], [2]. Мощность подобных атак была достаточно велика.

Рассмотрим подробнее типы атак, которые пользуются наибольшей популярностью, а также предлагаемые методы защиты от них.

**DNS-атаки.** DNS-атака представляет собой своеобразный классический тип атак, основанных на отражении трафика, а также использующих усиление трафика. Эти атаки осуществляются уже несколько лет и при этом продолжают оставаться популярными среди злоумышленников. Атака по протоколу DNS реализуется, как правило, генерацией запроса в формате #dig @SERVER\_IP NS, где SERVER\_IP – IP-адрес сервера. Размер запроса составляет 17 байт, размер же всего пакета – 60 байт. На данную команду сервер отвечает подсказкой в виде адресов корневых DNS-серверов, при этом размер ответа составляет 360 байт, а размер всего пакета – 402 байта.

Как правило, максимальная длина пакетов DNS ограничена размером 512 байт для уровня приложений. Однако существуют расширенные DNS (EDNS) [4], которые позволяют отправлять и принимать пакеты DNS большего размера, если такое расширение поддерживается и отправителем, и получателем. Таким образом, злоумышленники могут прибегать к использованию EDNS. Используя записи типа OPT, злоумышленники могут включать дополнительную запись длиной 11 байт. Если сервер не поддерживает EDNS или если ответ не превышает стандартную длину 512 байт, размер ответа остается тем же. В таком случае использование EDNS приведет к снижению коэффициента усиления. Однако если сервер поддерживает EDNS, то ответ большого размера может существенно превзойти запись OPT и увеличить коэффициент усиления.

**NTP-атаки.** Протокол NTP стал использоваться для реализации атак с отражением трафика значительно позже, чем DNS. Высокий коэффициент усиления послужил росту популярности атак этого типа. Кроме того, в 2014 г. атака максимальной мощности была реализована именно по протоколу NTP [2]. Для выполнения атаки с использованием протокола NTP на публичные NTP-серверы отправляются запросы с командой get monlist. Адрес источника при этом заменяется адресом узла-жертвы. Ответом на эту команду является список из 600 IP-адресов, обращавшихся к серверу. В результате размер ответа во много раз превышает исходный запрос (на загруженных серверах на запрос в 234 байт возвращается ответ в 48 Кбайт), что позволяет многократно усилить объем трафика, генерируемого в сторону системы-жертвы. Проблему усугубляет то, что команда get monlist выполняется без аутентификации.

**SSDP-атаки.** Протокол SSDP является основой протокола обнаружения Universal plug-and-play. Атака такого типа осуществляется в 2 этапа. Сначала злоумышленник отправляет широковещательный запрос M-SEARCH, на который откликаются доступные устройства UPnP. Далее отправляется множество запросов M-SEARCH, где адрес источника подменяется адресом компьютера-жертвы, на каждый из которых доступное устройство отправляет ответ. Размер ответа зависит от размера описания устройства, однако коэффициент усиления в среднем принято считать около 30 [3]. В отличие от атак DNS и NTP, где в качестве отражателя трафика используются круп-

ные серверы, атака SSDP предполагает использование устройств, которые принадлежат рядовым пользователям. Они, в свою очередь, могут даже не подозревать, что их мобильные телефоны, факсы или принтеры принимают участие в распределенной атаке. Большинство владельцев таких устройств не имеют информации о том, какие настройки следует применить, чтобы предотвратить использование своих устройств в атаке.

**SNMP-атаки.** SNMP представляет собой протокол, предназначенный для управления устройствами в сети. Для реализации атаки с помощью этого протокола используют запросы с командой GetBulk, которая автоматизирует получение большого объема данных, преимущественно табличных. При этом размер запроса GetBulk составляет около 87 байт, в то время как ответ содержит около 60 000 байт фрагментированных данных.

**Chargen-атаки.** Стандартная UDP-атака Chargen также может осуществляться как атака с отражением и усилением трафика. Для этого требуется отправить запрос малого размера на 19 UDP-порт узла, используемого для отражения, при этом размер ответа будет иметь максимально возможный размер. Несмотря на то, что этот тип атаки существует уже достаточно давно, он по-прежнему находится в числе наиболее часто реализуемых типов атак.

**QOTD (Quote of the day)** – атака с использованием этого протокола реализуется способом, похожим на Chargen. Для осуществления атаки требуется установить соединение с сервером, поддерживающим протокол QOTD, через UDP-порт 17. Сервер возвращает произвольное короткое сообщение. Обычно оно выбирается случайным образом из списка известных цитат. Популярность атак такого типа весьма низка.

**NetBios** – протокол для работы в локальных сетях на персональных ЭВМ также может быть использован для реализации атак посредством запроса о конфигурации сети. Коэффициент усиления такой атаки невелик (по оценкам [3] составляет около четырех), поэтому данные атаки не пользуются популярностью.

В качестве средств усиления трафика могут быть использованы peer-to-peer-сервисы для распространения файлов (уязвимыми считаются такие протоколы, как BitTorrent и Kad), peer-to-peer-сети (ZeroAccess, Sality, Gameover), а также игровые серверы, такие, как Quake 3 и Steam. Эти протоколы достаточно редко используются для

реализации атак, однако не следует забывать о присущих им уязвимостях и по возможности бороться с ними. Ежегодные отчеты показывают, что атаки того или иного типа, долгое время оставаясь в тени, быстро набирают популярность, а мощность, которая достигается за счет их реализации, может оказаться весьма высока.

В работе [5] отмечается, что в качестве средства усиления трафика могут использоваться сервисы, предназначенные для обмена голосовыми сообщениями, такие, как Skype. Авторы показывают, что протоколы SIP и VoIP имеют определенные уязвимости, что также позволяет использовать их для реализации атак.

**Механизмы защиты от DDoS-атак.** Методы защиты от DDoS-атак можно условно классифицировать по двум признакам. Первый признак – расположение механизма защиты в сети. Методы защиты могут подразделяться на применяемые у источника, на стороне жертвы, а также на промежуточных узлах сети. Методы, объединяющие различные схемы защиты и обеспечивающие их взаимодействие, обычно называют гибридными [6]. Принято считать, что гибридные методы обеспечивают лучшую защиту от атак, нежели отдельные методы защиты, работающие самостоятельно на различных участках сети.

Второй признак – время применения метода. Механизмы, применяемые до наступления атаки, относятся к методам предотвращения [7]. Методы, используемые во время атаки, относятся к группе обнаружения атаки и идентификации источника. После обнаружения атаки применяются методы реакции на атаку. Наилучшим вариантом является предотвращение атаки. Оно может быть достигнуто на всех этапах пути трафика, начиная от источника атаки и заканчивая обработкой данных на стороне атакуемого сервера. Зачастую используются комбинированные средства предотвращения (IPS) и обнаружения атак (IDS) – IPDS.

**Методы, основанные на механизмах фильтрации.** Существует множество методов предотвращения DDoS-атак. Для этого очень часто исследователи предлагают различные механизмы фильтрации, например Ingress/Egress filtering [8], SAVE [9], Hop-Count filtering [10], Route-based filtering [11] и др. Фильтрация является весьма эффективным способом выявления подмены IP-адреса, что особенно актуально в тех случаях, когда используется усиление или отражение атаки. Различные методы фильтрации, применяемые

на разных этапах продвижения трафика, представляют собой мощный инструмент для выявления фактов подмены адреса. Наибольшее распространение получил метод Ingress/Egress filtering, так как он позволяет выявить подмену IP-адреса и заблокировать вредоносный пакет еще до того, как он покинет локальную сеть. На основе методов фильтрации трафика были созданы более сложные гибридные механизмы защиты, такие, как TRACK [12], Active Internet Traffic Filtering (AITF) [13], StopIt [14] и др. Эти методы выявляют вредоносный трафик и отправляют на маршрутизаторы запросы на фильтрацию пакетов от подозрительного источника. Каждый из этих методов применяет различные схемы обнаружения вредоносного трафика и различные методы фильтрации. Однако не все методы ориентированы на случаи подмены адреса. Так, например, метод StopIt применяет фильтрацию на ближайшем к источнику трафика маршрутизаторе. При этом реальный путь трафика не отслеживается, и запрос на блокировку поступает к источнику, адрес которого указан в подозрительном пакете в качестве адреса отправителя. В том случае, если использовалась подмена адреса, будет осуществляться фильтрация от источника, который на самом деле может быть легитимным пользователем. Таким образом, следует уделять внимание проблеме подмены адреса и тем способам фильтрации и отслеживания реального пути трафика, которые позволяют ее выявить. Тем не менее, данные методы можно успешно использовать в составе комплексных решений по противодействию атакам.

**Математические методы и методы интеллектуального анализа данных.** Помимо уже описанных методов для анализа трафика могут быть реализованы механизмы защиты на основе математических методов, например определение энтропии [15].

В последние годы активно разрабатываются методы защиты, основанные на различных алгоритмах интеллектуального анализа данных. В качестве примеров можно привести механизмы на основе метода ближайших соседей (kNN) [16], обучаемых нейронных сетей [17]. Такие методы могут быть применимы и для противодействия атакам, использующим отражение трафика и его усиление. Интеллектуальные способы анализа данных позволяют выявить различные девиации трафика, а также подозрительное поведение кли-

ентов. Сложность заключается в том, что обучение нейронных сетей, например, может занять весьма продолжительное время.

В работе [18] была предложена статистическая модель обнаружения DDoS-атак, осуществляемых по протоколу TCP. Модель анализирует флаги в заголовке каждого пакета и сравнивает реальный трафик с заданным шаблоном нормального трафика. Отклонения от шаблонного трафика расцениваются как аномалия.

Метод, представленный в работе [19], основан на принципе асимметрии трафика в случае атаки. В качестве шаблона нормального трафика принята схема симметричного обмена запросами клиента и ответами сервера. В случае значительного повышения количества входящих запросов или ответов на запросы, которые не могут быть корректно обработаны, нарушается симметрия трафика, и такая ситуация расценивается как атака. Стоит отметить, что анализ симметричности трафика предлагается также в качестве метода борьбы с атаками, основанными на отражении трафика и его усилении, так как при данных атаках асимметрия трафика является значительной и такую атаку становится легко выявить.

Метод защиты одноранговых сетей от различных атак, направленных на инфраструктуру компьютерной сети, представлен в работе [20]. Предлагаемый механизм защиты устанавливается на пограничном маршрутизаторе сети, на которую направлена атака. Метод обнаружения атаки основан на статистическом анализе трафика и его сопоставлении с шаблонным трафиком. После обнаружения атаки используется схема маркировки пакетов с целью выявления источника атаки и блокировки трафика от него. Такая схема представляет собой один из эффективных методов защиты и в случае, когда используется подмена адреса, так как отслеживается реальный путь трафика, а не выполняется блокировка трафика от указанного в пакете отправителя.

**Механизмы защиты от атак, использующих отражение трафика.** Рассмотрим механизмы защиты, разработанные непосредственно для атак, основанных на отражении и усилении трафика.

Общий механизм предотвращения отражения трафика RAD (Reflector Attack Defense) предлагается в [21]. В основе метода используется message authentication code (MAC). Когда тот или иной узел отправляет запрос, он помещает MAC в отведенное поле. В ответе на это сообщение размещается тот же самый MAC, что и в запросе. Узел,

получив ответ на запрос, сверяет MAC из отправленного им запроса и MAC из полученного ответа. Если MAC совпадают, сообщение принимается. В противном случае считается, что ответ представляет собой отраженный трафик и сообщение отклоняется.

В настоящее время разработано множество методов защиты от DNS-атак.

В работе [22] в основе метода защиты DAAD (DNS Amplification Attacks Detector) лежит тот факт, что при атаке DNS атакуемый узел получает большое количество ответов на отправленные ранее запросы. Авторы предлагают вести базу адресов DNS-серверов, на которые отправлялись запросы от того или иного узла. Все получаемые ответы должны проверяться, и если входящий пакет действительно является ответом на запрос, он будет принят. Если же с узла, которому адресован ответ, не отправлялся DNS-запрос на данный сервер, такой пакет должен быть отклонен. Данный метод весьма эффективен, однако следует помнить, что ведение подобных баз требует большого объема ресурсов.

В работе [23] предлагается установка предварительного DNS-рэзольвера и создание туннеля, использующего протоколы IPSec или SSL, между предварительным рэзольвером и DNS-рэзольвером на стороне организации. Все запросы DNS проходят исключительно через туннелированный канал связи и не могут поступить напрямую из внешних источников. Отмечается, что основная фильтрация DNS-ответов должна осуществляться провайдером услуг интернет-связи после соответствующего запроса от организации. Туннелирование в данном случае играет лишь вспомогательную роль.

В работе [24] предлагается механизм RRL (Response Rate Limiting), направленный на ограничение числа уникальных ответов от DNS-сер-

вера. Этот механизм используется на стороне DNS-сервера и анализирует исключительно исходящий трафик, полностью игнорируя входящий. Суть метода заключается в том, что адреса, на которые был отправлен ответ, записываются. При этом задается ограничение числа ответов сервера на каждый адрес. Если это число превышено, ответы на данный адрес больше не высылаются. Такой метод эффективен для снижения потока вредоносного трафика от сервера, но при этом существует вероятность ошибки первого рода. Однако следует помнить, что не всегда владельцы DNS-серверов готовы прибегать к использованию таких механизмов. Ведение базы адресов требует определенных ресурсов. Кроме того, не всегда владельцы таких серверов обеспокоены тем, что их серверы используются для осуществления атак, а также не всегда замечают увеличение нагрузки на сервер в периоды их использования для реализации атак.

В работе [25] предлагается метод FB (Flow-based), основанный на выявлении девиации трафика относительно шаблонного. Анализируется количество входящих пакетов по протоколу DNS и их размер. Если количество и размер пакетов превышают заданные значения, такая ситуация расценивается как атака. При этом автор отмечает, что в ситуациях, когда осуществляется атака, но при этом анализируемые параметры не превышают пороговых значений, трафик считается легитимным. Таким образом, процент ошибок второго рода в отдельных случаях может быть весьма высок. Данный метод, тем не менее, весьма перспективен при соответствующей доработке.

В таблице приведен общий сравнительный анализ рассмотренных методов защиты.

Метод	Место внедрения	Достоинства	Недостатки
RAD	На стороне атакуемого узла	Высокая точность обнаружения вредоносного трафика	Необходимость хранения запросов и соответствующих им MAC до получения ответа. Необходимость размещения сервером MAC в ответе на запрос
DAAD	На стороне атакуемого узла	Достаточно высокая точность обнаружения вредоносного трафика	Необходимость ведения базы данных, потребление большого объема ресурсов
Туннелирование	На стороне атакуемого узла	Безопасная передача данных	Предлагаемый метод играет вспомогательную роль, так как основная фильтрация осуществляется интернет-провайдером
RRL	На стороне сервера	Снижение потока вредоносного трафика	Необходимость ведения баз данных на сервере. Вероятность ошибки первого рода
FB	На стороне атакуемого узла	Достаточно высокая точность обнаружения вредоносного трафика	В отдельных случаях процент ошибок второго рода достаточно высок

Следует отметить, что рассмотренные методы были разработаны для противодействия атакам, реализуемым с помощью протокола DNS. Что касается атак, реализуемых по другим рассмотренным протоколам, то, например, основным средством предотвращения популярных в последние несколько лет атак по протоколу NTP является отключение команды мониторинга на стороне серверов. В настоящее время данную уязвимость имеют версии ntpd до 4.2.7p25 включительно, в выпуске 4.2.7p26 и выше команда monlist отключена. Иных мер, направленных на борьбу с отраженным трафиком, поступающим по протоколу NTP, до настоящего времени не предлагалось.

В целом, в качестве основной меры борьбы с атаками, основанными на отражении, рекомендуется отключать те функции серверов, которые могут использоваться для реализации атак, а также закрывать неиспользуемые порты. Такое решение, на первый взгляд, кажется самым простым и единственным, однако не все владельцы серверов по тем или иным причинам следуют этой рекомендации. Применительно к устройствам, принадлежащим пользователям, решить эту проблему становится сложнее. Статистика проведенных атак свидетельствует о том, что популярные типы атак, основанных на отражении, по-прежнему легко реализовать. Несмотря на то, что, например, поддержка команды get\_monlist была отключена в новых версиях протокола NTP, атаки данного типа продолжают занимать одну из лидирующих позиций. Это свидетельствует, в том числе, и о том, что не все владельцы NTP-серверов обновляют версии протокола до более безопасных, а значит, не все заботятся о предотвращении атак, в которые могут быть вовлечены их серверы.

В статье были рассмотрены протоколы, которые могут использоваться для реализации отражения трафика и его усиления. Проведенный анализ показал, что достаточно большое количество протоколов, основанных на протоколе UDP, имеют те или иные уязвимости, позволяющие реализовать отражение трафика.

Рассмотренные методы защиты от атак преимущественно были разработаны для противодействия атакам, реализуемым с помощью протокола DNS. Идеи, лежащие в основе этих методов, могут быть использованы для других типов атак,

а сами методы модифицированы и применены для более широкого круга атак. Однако заметным недостатком таких методов будет высокое потребление ресурсов памяти для хранения записей, особенно при отслеживании трафика одновременно по нескольким протоколам. Тем не менее, они могут стать полезными в борьбе с новыми типами атак, против которых еще не были разработаны и внедрены методы защиты.

Растущая мощность атак, основанных на усилении трафика, а также количество таких атак свидетельствуют о том, что необходима разработка новых эффективных средств защиты компьютерных сетей. Остается нерешенной проблема фильтрации исходящего трафика на стороне сервис-провайдеров, что по-прежнему делает возможной подмену адреса источника. Многообразие протоколов, которые могут быть использованы для реализации атак, показывает необходимость поиска универсальных методов обнаружения возможных атак, использующих отражение и усиление. Не следует забывать о том, что потенциально опасные протоколы, на сегодняшний день находящиеся в тени, в ближайшем будущем могут стать инструментом для реализации массированных атак. Таким образом, следует не только уделить внимание уязвимостям, присущим популярным в настоящее время протоколам, но и разработать схемы противодействия как существующим, так и потенциально возможным атакам.

В качестве дальнейшей цели ставится задача проведения серии экспериментов по оценке эффективности существующих методов защиты для атак с различными сценариями. В том числе планируется проведение экспериментов по оценке эффективности методов защиты от DNS-атак, модифицированных для работы с другими протоколами, используемыми для реализации атак, основанных на отражении трафика. Полученные результаты будут учитываться при разработке новых методов защиты от атак, в основе которых лежат механизмы отражения и усиления вредоносного трафика.

Статья подготовлена в рамках проекта «Организация научных исследований» основной части государственного плана Министерства образования России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт DDoS AND WEB APPLICATIONS ATTACKS, 2015. URL: <https://www.stateoftheinternet.com/downloads/pdfs/resources-web-security-2015-q2-ddos-webapp-stats-infographic.pdf>.
2. Сайт ARBOR Networks Security Reports. URL: <http://www.arbornetworks.com/resources>.
3. Rossow C. Amplification hell: Revisiting network protocols for DDoS abuse // Symposium on Network and Distributed System Security (NDSS). 2014. URL: [http://www.internetsociety.org/sites/default/files/01\\_5.pdf](http://www.internetsociety.org/sites/default/files/01_5.pdf).
4. Damas J., Graff M. P. Vixie, Extension Mechanisms for DNS (EDNS (0)), 2013. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6891>.
5. Shanksi R. Model-checking DoS amplification for VoIP session initiation // European Symposium on Research in Computer Security (ESORICS 2009), Saint-Malo, France. Springer Berlin Heidelberg, 2009. P. 390–405.
6. Zargar S. T., Joshi J., Tipper D. A survey of defense mechanisms against distributed denial of service (DDoS) flooding attacks // Communications Surveys & Tutorials. IEEE. 2013. Vol. 15, № 4. P. 2046–2069.
7. Peng T., Leckie C., Ramamohanarao K. Survey of network-based defense mechanisms countering the Dos and DDoS problems // ACM Computing Surveys (CSUR). 2007. Vol. 39, № 1. P. 3.
8. Ferguson P. Network ingress filtering: Defeating denial of service attacks which employ IP source address spoofing. 2000. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc2827.html>.
9. Li J. SAVE: Source address validity enforcement protocol // INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. 2002. Vol. 3. P. 1557–1566.
10. Wang H., Jin C., Shin K. G. Defense against spoofed IP traffic using hop-count filtering // IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN). 2007. Vol. 15, № 1. P. 40–53.
11. Chan E. Y. K. Intrusion detection routers: design, implementation and evaluation using an experimental testbed // Selected Areas in Communications. IEEE J. on. 2006. Vol. 24, № 10. P. 1889–1900.
12. Chen R., Park J. M., Marchany R. TRACK: A novel approach for defending against distributed denial-of-service attacks. 2006. URL: [http://www.researchgate.net/profile/Jung-Min\\_Jerry\\_Park/publication/228471222\\_TRACK\\_A\\_Novel\\_Approach\\_for\\_Defending\\_Against\\_Distributed\\_Denial-of-Service\\_Attacks/links/0a85e53454bbb9a3d2000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Jung-Min_Jerry_Park/publication/228471222_TRACK_A_Novel_Approach_for_Defending_Against_Distributed_Denial-of-Service_Attacks/links/0a85e53454bbb9a3d2000000.pdf).
13. Argyraki K., Cheriton D. R. Scalable network-layer defense against internet bandwidth-flooding attacks // IEEE/ACM Transactions on Networking (TON). 2009. Vol. 17, № 4. P. 1284–1297.
14. Furfaro A. Modelling and simulation of a defense strategy to face indirect DDoS flooding attacks // Internet and Distributed Computing Systems Conf., Calabria, Italy. Springer International Publishing, 2014. P. 263–274.
15. Navaz A. S. S., Sangeetha V., Prabhadevi C. Entropy based anomaly detection system to prevent DDoS attacks in cloud // Intern. J. of Computer Applications. 2013. Vol. 62, № 15. P. 42–47.
16. Thwe Oo T. T., Phyus T. Analysis of DDoS Detection System based on Anomaly Detection System // Intern. Conf. on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014), Singapore, 2014. P. 315–319.
17. Kumar P. A. R., Selvakumar S. Detection of distributed denial of service attacks using an ensemble of adaptive and hybrid neuro-fuzzy systems // Computer Communications. 2013. Vol. 36, № 3. P. 303–319.
18. Tritilanunt S. et al. Entropy-based input-output traffic mode detection scheme for dos/ddos attacks // Communications and Information Technologies (ISCIT): Intern. Symp., Tokyo, 2010. P. 804–809.
19. Liu H., Sun Y., Kim M. S. Fine-grained DDoS detection scheme based on bidirectional count sketch // Computer Communications and Networks (ICCCN): Proc. of 20th Intern. Conf. on, Maui, Hawaii, 2011. P. 1–6.
20. Tariq U. Collaborative peer to peer defense mechanism for DDoS attacks // Procedia Computer Science. 2011. Vol. 5. P. 157–164.
21. Kline E. RAD: Reflector attack defense using message authentication codes // Computer Security Applications Conf. ACSAC'09, Annual, 2009. P. 269–278.
22. Kambourakis G. Detecting DNS amplification attacks // Critical Information Infrastructures Security. Springer Berlin Heidelberg, 2008. P. 185–196.
23. MacFarland D. C., Shue C. A., Kalafut A. J. Characterizing Optimal DNS Amplification Attacks and Effective Mitigation // Passive and Active Measurement Conf. New York: Springer International Publishing, 2015. P. 15–27.
24. Rozekrans T., Mekking M., de Koning J. Defending against DNS reflection amplification attacks // University of Amsterdam, Tech. Rep., Feb. 2013. URL: <https://nlnetlabs.nl/downloads/publications/report-rrl-dekoning-rozekrans.pdf>.
25. Huistra D. Detecting Reflection Attacks in DNS Flows // 19th Twente Student Conference on IT. 2013. URL: <http://referaat.cs.utwente.nl/conference/19/paper/7409/detecting-reflection-attacks-in-dns-flows.pdf>.

Ya. A. Bekeneva

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## ANALYSIS OF DDoS-ATTACKS TOPICAL TYPES AND PROTECTION METHODS AGAINST THEM

*In the paper an analysis of popular types of DDoS-attacks based on traffic reflection and traffic amplification is introduced. Existing methods for prevention and protection against such attacks are considered. Advantages and disadvantages of these methods are described. Necessity of new protection methods development is shown.*

DDoS-attack, DNS, NTP, SSDP, SNMP, DDoS-attack protection, RRL, RAD

---

УДК 004.052.2

Р. Хаберланд, С. А. Ивановский, К. В. Кринкин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Верификация объектно-ориентированных программ с динамической памятью на основе ссылочной модели

Предложен метод аксиоматической верификации динамической памяти на основе логического языка программирования "Пролог" для объектно-ориентированных программ, использующих ссылочную модель памяти. Формально определены термины: куча, интерпретация кучи и рассмотрены формальные операции над кучами. Обобщенная реализация на Прологе разрешает преодолевать недостатки в выразимости. Сделаны предположения, что представленным подходом можно решить совокупность других актуальных проблем в той же области. Предполагаемая модель была проверена с помощью системы верификации [1], которая, в том числе, способна преобразовывать программы императивных языков с экземплярами классов в промежуточное представление.

Указатели, кучи, анализ псевдонимов, верификация динамической памяти

**Разделяемые кучи.** Реализация спецификации куч на Прологе может быть представлена различными моделями памяти, например глобальными графовыми моделями, моделями с функциями переходов или моделями с делением на кучи [2], [3]. В модели с делением на кучи используются «распределенные кучи» (модель согласной «Логики распределенной памяти» (ЛРП) [1]) с указанием связи вида «*a* указывает на *b*» или как «*a*→*b*», где «*a*» – идентификатор простого или объектного типа. Значением «*b*» может быть любое из предполагаемого (в том числе, объектного) домена Т (см. далее). Это соответствие может быть представлено различными способами. В Прологе соответствие «*a*→*b*» представлено кортежами (*a*, *b*), например [(*h*2, 1), (*h*2, *h*3), (*h*3, 3)]. По определению, в модели ЛРП все кучи не пересекаются и не связаны между собой, кроме случая, когда такая связь задается дополнительными связями.

тельным условием. Считается, что кучи могут иметь взаимосвязи. В этом случае необходимо определить связи между указателями явным образом в спецификации, как это сделано для указателей *h*1, *h*2 и *h*3 в приведенном ранее примере. Без ограничения общности можно считать, что определения куч с помощью ссылок достаточно, и ссылки на ссылки ради простоты далее не рассматриваются.

**Определение кучи.** Кучей является обобщенная и связанная графовая структура данных, которая располагается и меняется в динамической части памяти при запуске программы. Граф описывается типизированными ячейками памяти и связями между ними. Куча может иметь любое количество указателей (в том числе ни одного). Без ограничения общности, можно считать, что указатели определены либо стеком, либо кучей. Подкучей называем любой связный подграф.

**Определение формулы для куч.** Формула  $H$  для утверждения о динамической памяти (кучи) определяется рекурсивно:

$$H ::= \text{true} \mid \text{false} \mid \exists x.H \mid x \rightarrow \text{Expr} \mid H * H \mid H \vee H \mid H \wedge H \mid \text{emp} \mid \text{pred}(\text{params}).$$

Здесь **true** и **false** являются константными формулами. Переменный символ  $x$  может квалифицироваться как экзистенциальный, если  $x$  не встречается как связанный символ в принадлежащей подформуле либо как всеобщный в противном случае. Оператор ' $\rightarrow$ ' связывает типизированный указатель ' $x$ ' с неким выражением. Кроме того, утверждения могут быть связаны между собой с помощью конъюнкции, дизъюнкции и бинарного оператора ' $*$ '; **emp** является встроенным предикатом без аргументов. Вызов предиката осуществляется с помощью  $\text{pred}(\text{params})$ , где  $\text{params}$  содержит список термов в качестве аргументов.  $\text{Expr}$  является неким значением по адресу  $x$ . Значением может являться любой экземпляр класса, целое число либо пустой указатель «nil». Формула  $H$  преобразуется явным и интуитивным образом в прологовские термы.

**Определение интерпретации куч.** Интерпретация формулы  $H^J[h]$  для данной кучи  $h$  и некоторого утверждения  $H$  является отображением на булевское множество.

Если  $H$  является формулой **true**, то  $\text{true}^J[h]$  равно «истина» для любой кучи  $h$  (аналогично для формулы **false**). Предикат **emp** верен для пустой кучи  $h$  и ложен во всех остальных случаях. Формула « $x \rightarrow \text{Expr}$ » истинна, если  $h$  содержит ровно одну подходящую кучу, чье содержимое имеет значение  $\text{Expr}$ . Заранее определенный предикат  $\text{pred}$  выполним для данного списка аргументов  $\text{params}$  либо не выполним.

Бинарный оператор распределения куч ' $*$ ' можно определить как деление на левостороннюю и правостороннюю кучи (см. следующее определение). Оператор ' $*$ ' является коммутативным. Все разделяемые между ' $*$ ' кучи всегда содержат только разовые идентификаторы на левых сторонах всех выражений « $a \rightarrow b$ », т. е. если имеются некие идентификаторы  $a_0, a_1$  для  $a_0 \rightarrow b_0$  и  $a_1 \rightarrow b_0$ , то из этого может лишь следовать при  $a_0 \neq a_1$ , что  $\text{sAddr}(a_0) \neq \text{sAddr}(a_1)$ ,  $\text{sContent}(a_0) = \text{sContent}(a_1)$  и  $\text{hAddr}(b_0) = \text{hAddr}(b_1)$ , где  $\text{sAddr}$  выявляет адрес в статической части памяти;  $\text{sContent}$  выявляет содержание определенного идентификатора, а  $\text{hAddr}$  выявляет адрес в динамической памяти, а

следовательно, псевдонимное отношение между  $a_0$  и  $a_1$  должно быть добавлено к ' $*$ ' (см. далее).

**Определение оператора ' $*$ '.** Две кучи  $H1, H2$  существуют независимо друг от друга в динамической памяти тогда и только тогда, когда указатели на них существуют в стеке или в кучах и все подкучи из  $H1$  не зависят от всех подкуч  $H2$ , и наоборот. В этом случае обозначим обе кучи с бинарным оператором ' $*$ ' как  $H1 * H2$ . Если  $H1$  и  $H2$  связаны между собой, то (1) существует некое связывающее утверждение  $H3$ , (2) существует подкуча  $H2'$  так, что  $H2' * H1$  соблюдается и (3) аналогично существует  $H1'$  для  $H1 * H2$ . Таким образом, утверждение  $H1' * H2' * H3$  верное. По определению, кучи могут быть иерархическими, т. е. оператор ' $*$ ' неассоциативен. Любая программная команда может модифицировать любое количество куч.

**Фреймовая теорема.** Для куч  $F = F_0 * F_1 * \dots * F_n$ , где  $F_j = f_j \rightarrow f_j$ , с  $n \geq 0$ , предусловие  $P$  и постусловие  $Q$  при условии, что вызов некой процедуры  $S$  не изменяет кучи фрейма  $F$ , «фреймовое правило» [3] гласит, что в антецеденте правила  $\{P\}S\{Q\} \dashv \{F*P\}S\{F*Q\}$  достаточно доказать тройку Хора  $\{P\}S\{Q\}$  без фрейма  $F$ .

Практически это означает, что если имеется вызов процедуры  $S$ , то нет необходимости определять все кучи полностью. Указываются лишь те кучи, которые меняются, – это  $P$  и  $Q$ . Теорема, на первый взгляд, выглядит простой, однако если имеется сеть объектов, то передача одного объекта потенциально изменяет всю сеть объектов, а следовательно, может и нарушить установленное свойство при верификации.

**Определение псевдонима.** Если на один элемент динамической памяти указывают 2 любых указателя, то один из них становится *псевдонимом* второго указателя. Если, например, предположить спецификацию:  $\{h2 \rightarrow 1 * h3 \rightarrow 3\}$ , то  $\{(h2 \rightarrow 1 * h3 \rightarrow 3) \wedge h2 \rightarrow X123\}$  не имеет утечки, а  $\{h2 \rightarrow 1 * h1 \rightarrow 1 * h3 \rightarrow 3\}$  имеет утечку, так как  $h1$  не допускается согласно спецификации. Но если  $h1$  является псевдонимом  $h2$  (т. е.  $h1 = h2$  вместо  $h1 \rightarrow 1$ ), тогда спецификация выполнима.

В [4] вводится определение «*абстрактного предиката*», под абстракцией подразумевается модульность предикатов для описания куч. Если расширить определение абстрактного предиката, то, например, с помощью сопоставления образцов можно решить ряд нынешних ограничений, например: предикатные символы, литералы си-

мулируют переменные, имеющие полностью вычисленное значение, как в императивных языках программирования, а вызов предикатов представляет собой лишь вызов процедур. Далее, переменные символы могут быть использованы, в отличие, например, от Пролога, в предикатах только в некоторых местах (см. далее). Возможность соописывать (любые термовые) объекты не предусмотрена. Утверждения объектов замкнуты и не расширяются, имеются ограничения в связи с наименованием, с местом определения и со способом их использования.

Синтаксис и семантика Пролога поддерживают символы и хорошо приспособлены к выводу SLD-унификации над термами, поэтому есть основание предполагать, что символы и переменные в Прологе ближе к логическим формулам, чем представленные действующие подходы.

#### **Промежуточное представление объектов.**

Абади и Лейно [5] обходятся без классов, и используемые объекты не рассматриваются как классы в [6], а как экземпляры записи. В [5] объектные поля не содержат указателей и поэтому могут содержать внутренние объекты. Однако если не вводить дополнительные ограничения, например типизацию, то нетипизированное вычисление с объектами может оказаться неверным или неполным. По этой причине далее рассматриваются только экземпляры объектов, генерируемые классами. В [6] используются классы и вводятся типовые системы для объектов, но не рассматриваются рекурсивные определения классов, указателей или объекты с псевдонимами. Объекты не делят между собой общую часть памяти. В [7] Борна предлагает моделировать объекты как массивы фиксированного размера, однако методы преобразуются к функциям как в процедурной парадигме.

**Определение типов.** Типы Т определяются как целочисленный тип Z либо как построенный из уже существующих типов с указанием имени:

$$T ::= Z \mid \text{class } id [ f_i : T, m_j : \underline{T} ],$$

где  $i, j \geq 0$ ,  $\underline{T} ::= T_0 \rightarrow \dots \rightarrow T_k$ ,  $k \geq 0$ .

Класс состоит из произвольного числа различных полей  $f_i$  и методов  $m_j$ . Объект имеет локальное наименование id вместе с экземпляром типа Z или class, в случае чего id является указателем. Проверка принадлежности объекта к определенному классу или подклассу осуществляется с помощью транзитивного отношения наследования из соответствующего предиката в Прологе.

При размещении объектов в динамической памяти представление и реализация методов не предполагают их размещение в динамической памяти. При порождении экземпляра типа Т всем полям объекта в случайном порядке присваиваются соответствующие типы значения. Без ограничения общности считается, что все поля должны иметь начальное определенное значение.

**Определение прологовских категорий.** Классовые типы добавляются как прологовские факты. Методы связываются с соответствующим классом. В случае, когда поле из подкласса совпадает с полем из родительского класса, унаследованные поля переименовываются соответственно. Любой класс или метод получает глобальное и однородное наименование. Самоизменяемый код в методах запрещается.

К примеру, классовое определение прямоугольника объекта С класса cRectangle содержит поле a и метод area, который присваивается полу, и площадь исходя из данной длины h и ширины w:

```
C = class(cRectangle, [variable(a,int),
function(area,int,[variable(w,int),variable(h,int)],
[assign(a,mul(w,h)), return(a)])].
```

Примером экземпляра объекта С класса cRectangle может послужить:

```
((c,object(cRectangle, [(x,int,5), (y,int,3),
(a,int,0)])),_,_),
```

где обе "\_" определяют еще две любые посторонние кучи. Заметим, что Пролог интерпретирует термы по необходимости и что прологовская спецификация может содержать переменные, например N123, которые могут являться ссылками на любые объекты или любые другие термовые представления.

**Утверждение.** Выбранная выше классовая модель объектов для Пролога является полной, т. е. объекты полностью могут быть представлены как прологовские термы.

Это следует из тотального отображения модели. Если имеется рекурсивное определение класса, то преобразуется лишь его имя, которое будет найдено в классовой среде. Если такого имени нет, считается, что правильное имя класса неизвестно. Возможные конфликты в связи с наследованием не нужно рассматривать по отдельности из-за универсального преобразования указанного ранее. Если объект содержит псевдонимы, прологовский терм будет содержать переменную, которая используется также в иных частях прологовских термов. Однако любые содержания принципиально

не допускаются, например  $A = \text{object}(A, A)$  – что, кстати, не унифицируемо из-за рекурсивного содержания переменного символа  $A$  самого себя, но может быть опущено при дальнейшем рассмотрении без ограничения общности. Будем считать, что объектные поля, по определению, никогда не пересекаются, но указанное содержимое полей, конечно, может содержать псевдонимы. Далее '\*' распространяется на объекты без ограничения.

### Правила доказательств.

**Определение абстрактного предиката.** Аксиоматические правила верификации  $a_0, \dots, a_n /- b$  можно преобразовать в прологовские правила с некоторыми прологовскими подцелями  $a_0, \dots, a_n$  и головой  $b$ . Порядок вычисления  $0 \leq i < n$  для всех последовательных  $a_{i+1}$  должен соблюдаться слева направо.

Более того, для  $a_i$  и  $a_{i+k}$ ,  $\forall i. \exists k: 0 \leq i \leq n-k, 0 \leq k \leq (n-i)$  аргументы параметров подцелей содержат переменные, которые должны передаваться для всех последующих  $a_0, \dots, a_n$ . Во избежание возможности неопределенности переменных при вычислении подцелей условимся для простоты, но без ограничения общности, что после достижения каждой подцели все переменные, ее содержащие, определены полностью. Будем считать, что прологовские правила приводятся сначала в соответствующую форму. Предположим, что такое преобразование невозможно и имеются две неупорядочивающиеся подцели. Отсюда следует, что существует двусторонняя зависимость между двумя подцелями, т. е. этот случай содержит неразрешаемый цикл. Следовательно, соответствующее доказательство недостижимо. Обратим внимание на то, что предикаты подцелей  $a_j$  коммутируют над '\*' и предикаты могут вызывать предикаты далее.

**Определение суждения.** Верификация над динамической памятью имеет следующий тип:  $\text{Env} \times \text{Stm} \rightarrow \text{Env}$ , где  $\text{Stm}$  является программным оператором, а  $\text{Env} = (\text{Stack}, \text{Heap})$ . Здесь  $\text{Stack}$  – состояние стека, а  $\text{Heap}$  – состояние кучи.

В начале верификации  $\text{Env} = (\emptyset, \emptyset)$ . Среда обновляется при выполнении программы, например при выполнении нового блока, которое добавляет к актуальному стеку все переменные блока, а оператор выделения новой памяти добавляет новый элемент в кучу. Доказательство в Прологе задается поиском: если доказательство как вызов некой интерпретации предикатов, т. е. подцелей, завершается как `fail`, тогда доказана противоречивость некой подцели, доказательство продолжается поиском альтернативы – если такая осталась.

При доказательстве локальные переменные хранятся в стеке и существуют лишь в определенном блоке управления. Примеры команды условного перехода выглядят так:

```
01 proof(ite(COND, IFBLOCK, ELSEBLOCK),
Env, Env2):-  
02 Env = (Stack, Heap),  
03 tolist(IFBLOCK, IFBLOCK2),  
04 proofs(IFBLOCK2, ([COND | Stack], Heap),  
        (_ , Heap1)),  
05 tolist(ELSEBLOCK, ELSEBLOCK2),  
06 proofs(ELSEBLOCK2,  
        ([ne(COND)|Stack], Heap), (_ , Heap2)) ...
```

Ради простоты в верхнем примере `proof` предполагается, что `COND` содержит выражения, которые ссылаются только на символы из статической памяти, иначе необходимо прежде всего применить фильтр, который отделит динамические ячейки памяти от статических и продолжит верификацию. В строке 06 не определяется функция неравенства. В строке 01 определяется заголовок предиката, далее следуют цели, которые необходимо соблюдать, прежде чем `proof` становится выполнимым. Строки 04 и 06 анализируют случаи условной команды, когда `COND` верно и неверно. `Env2` содержит стек и кучу, как они должны выглядеть, если `proof` выполнимо. Вспомогательный предикат `proofs/3` совершает левостороннюю свертку, при этом первый параметр является списком команды, второй параметр описывает начальный стек и кучу, а последний параметр описывает окончательный стек и кучу; `proofs` является экземпляром инициальной алгебры с `proof/3` в качестве эндофункции. Предикат `tolist/2` преобразует любой прологовский терм в список, кроме списков, которые остаются без изменений. Проверка согласно тройке Хора проводится анализом `Env` и `Env2` с утверждениями, встроенными в программу, т. е. искусственным программным оператором `assert`.

В начале статьи были введены основные положения о верификации динамической памяти на основе ссылочной логики. Были определены понятия об интерпретации формулы куч и фреймовое правило как основные подходы для решения выявленных проблем в динамической памяти с классовым типом вычисления в Прологе. Объектно-ориентированные программы преобразовались на примерах в прологовские термы и рассматривались ограничения. В дальнейшем планируется представить программную систему верификации и изучить вопросы, связанные с абстрактными предикатами, кото-

рые дают преимущество расширимости предикатов – добавление новых встроенных и пользовательских определений в модульном виде.

Авторы статьи выражают свое глубокое уважение Сергею Алексеевичу Ивановскому, кото-

рый внес большой вклад в подготовку и написание данной статьи, но, к огромному сожалению и печали своих коллег и учеников, не дожил до сегодняшнего дня.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haberland R., Ivanovskiy S. Dynamically Allocated Memory Verification in Object-Oriented Programs using Prolog. Spring // Summer Young Research Colloquium on Software Engineering, Saint Petersburg, 2014. P. 46–50.
2. Burstall R. M. Some Techniques for Proving Correctness of Programs which Alter Data // Machine Intelligence. 1972. № 7. P. 23–50.
3. Reynolds J. C. Separation Logic: A Logic for Shared Mutable Data Structures // Proc. of the 17th Annual IEEE Symp. on Logic in Computer Science (LICS'02), Washington, 2002. P. 55–74.
4. Parkinson M. Local Reasoning for Java. PhD thesis. Cambridge University, 2005.
5. Abadi M., Leino K. R. M. A Logic of Object-Oriented Programs // Lecture Notes in Computer Science. 1997. Vol. 1214. P. 682–696.
6. Abadi M., Cardelli L. A Theory of Objects. New York: Springer, 1996.
7. Bornat R. Proving Pointer Programs in Hoare Logic // Lecture Notes in Computer Science. 2000. Vol. 1837. P. 102–126.

---

R. Haberland, S. A. Ivanovskiy, K. V. Krinkin  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## HEAP VERIFICATION OF OBJECT-ORIENTED PROGRAMS IN A POINTS-TO LOGIC

*In this paper a verification technique is presented based on the logical programming language "PROLOG" for object-oriented programs based on the points-to heap model. The terms "heap", "heap interpretation" and a heap theory are introduced, and a generalised approach in PROLOG allows to bridge expressibility gaps as well as other research problems in this field as discussed in the paper. The chosen model was validated against [1], which also provides facilities to transform imperative programming languages with objects into an intermediate representation in PROLOG.*

**Pointers, heaps, alias analysis, dynamic memory verification**

---

УДК 159.9 (303.732)

С. А. Колмаков, А. В. Леонов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Методика выявления ошибок человека-оператора с учетом его психологического типа на основании игровых программ, эмулирующих процесс работы на АРМ

*Представлено описание методики выявления ошибок человека-оператора с учетом его психологического типа на основании игровых программ, эмулирующих процесс работы на АРМ. Приведенная методика поможет усовершенствовать методы профориентации за счет того, что ошибки перестанут носить случайный характер, а станут прогнозируемыми и устранимыми.*

**Человек-оператор, психологический тип, ошибки человека-оператора, MBTI,  
игровые программы, профессиональный отбор**

В настоящее время количество и сложность человекомашинных систем (СЧМ) увеличиваются

ся, при этом ответственность человека-оператора (Ч-О) растет пропорционально сложности СЧМ.

Если раньше человеческая ошибка могла привести всего лишь к порче отдельной детали, то сейчас ошибка оператора приводит к потере целой партии продукции. Более того, в настоящий момент ошибка Ч-О может привести к огромнейшим человеческим жертвам.

Особенно остро данный вопрос стоит в сфере атомной энергетики, оборонной промышленности, управления сложными техническими объектами (самолеты, поезда, корабли и т. д.). В связи с этим весьма важна проблема профессионального отбора. Профессиональный отбор – процесс выделения из имеющихся кандидатов тех, которые способны обеспечивать наиболее эффективное выполнение возложенных на них задач [1].

Одним из основных инструментов профотбора является тестирование. Большая группа тестов посвящена оценке психологических особенностей личности, среди которых можно выделить наиболее популярные: MMPI (Миннесотский многопрофильный личностный опросник), цветовой тест Люшера, 16-факторный личностный опросник Кеттела, MBTI (типология Майерс-Бриггс). Последняя типологическая система обладает следующими преимуществами:

- определяет индивидуальные различия в восприятии информации и способах принятия решений;
- выявляет поведенческие стереотипы;
- не выделяет «хорошие» и «плохие» типы, выявляя преимущества и недостатки каждого из типов;
- шкалы MBTI относятся к базовым психическим функциям – восприятию и оценке информации, которые реализуются в любом поведении [2].

Типология MBTI разработана в 50-х гг. XX в. И. Майерсом и К. Бриггсом, которые модифицировали типологию Юнга [3]. Данная типология представляет собой систему, содержащую 16 психологических типов, каждый из которых характеризуется четырьмя парами оппозиций (интровер-

сия-экстраверсия, восприятие-оценка, сенсорика-интуиция, мышление-эмоции).

Тип строится из четырех параметров. Для их определения используется специальный стандартизированный опросник MBTI. Он основан на выявлении двух способов восполнения энергии (шкала экстраверсия-интроверсия), двух противоположных способов сбора информации (шкала сенсорность-интуиция), двух различных способах принятия решений (шкала мышление-чувствование) и двух различных способах организации взаимодействия с внешним миром (решение-восприятие). Таким образом, существуют 4 шкалы предрасположенностей. Каждый человек в силу своей индивидуальности занимает определенное место на этих шкалах, выбирает тот или иной полюс в каждой паре оппозиций. Комбинация предпочтений по каждой паре оппозиций дает один из 16 типов поведения, составляя индивидуальный профиль человека.

Профиль описывается формулой, состоящей из четырех букв, обозначающих преобладающий полюс по каждой шкале: первая буква E или I (экстраверсия или интроверсия); вторая буква S или N (сенсорика или интуиция), третья буква T или F (мышление или чувство), четвертая буква J или P (решение или восприятие). Следовательно, получается система из 16 типов со своим индивидуальным поведением и способом восприятия информации (табл. 1). Поскольку каждый из психологических типов классификации MBTI обладает своим способом восприятия и переработки информации, то можно предположить, что каждому психологическому типу будут свойственные собственные ошибки и устойчивые модели поведения. Поиск взаимосвязей между психотипом, видами ошибок Ч-О и устойчивыми моделями поведения является целью исследования, для достижения которой была разработана описанная далее методика.

Таблица 1

Направленность	Функция	Сенсорные		Интуитивные	
		Мысли-тельные	Чувству-ющие	Чувству-ющие	Мысли-тельные
Интроверты	Решающие	ISTJ	ISFJ	INFJ	INTJ
	Воспри-нимающие	ISTP	ISFP	INFP	INTP
Экстраверты	Воспри-нимающие	ESTP	ESFP	ENFP	ENTP
	Решающие	ESTJ	ESFJ	ENFJ	ENTJ

Стоит отметить, что, несмотря на индивидуальность каждого из 16 типов, возможно, наиболее ярко разница в совершаемых ошибках и действиях проявится при использовании не всех 16 типов, а при подсчете результатов по четырем темпераментам, образуемым этими 16 типами (табл. 2).

Таблица 2

SP	SJ	NF	NT
ESFP	ESFJ	ENFJ	ENTJ
ISFP	ISFJ	INFJ	INTJ
ESTP	ESTJ	ENFP	ENTP
ISTP	ISTJ	INFP	INTP

Первая составляющая темперамента – это либо S, либо N – функция сбора информации. Вторая составляющая зависит от первой. Если это Интуитивист (N), то в сборе информации преобладает понятийное и отвлеченное. Вторым, важным для темперамента, согласно Кирси и Бейтс, следует считать предрасположение, отвечающее за то, как человек оценивает полученную им информацию: объективно (Мыслительный) или субъективно (Чувствующий). Таким образом, для Интуитивиста характерны 2 основных темперамента – NF и NT.

Если это Сенсорный (S) тип, то в сборе информации доминирует конкретное и осязаемое. Второе важное предрасположение – то, что человек будет делать с этой информацией: постараётся придать ей определенную систему (Решающий) или будет стараться узнать что-то еще (Воспринимающий). Таким образом, Сенсорным типам свойственны 2 основных темперамента – SJ и SP.

Все будущие испытуемые после заполнения стандартизированного опросника MBTI будут поделены на 4 группы. При этом стоит учесть требования, предъявляемые к выборке испытуемых:

– возраст испытуемых должен находиться в одном диапазоне (от 21 до 27 лет);

– все испытуемые должны иметь одинаковый или близкий по значению коэффициент интеллекта (IQ), считающийся нормой для данной возрастной группы;

– все испытуемые должны иметь высшее или неоконченное высшее образование;

– все испытуемые не должны иметь психических расстройств.

Соблюдение данных требований обеспечит равные условия при прохождении задания. Это гарантирует чистоту эксперимента и позволяет судить о количестве и видах ошибок испытуемых, опираясь на психотип.

В целом, по внешним признакам можно выделить следующие виды ошибок (табл. 3) [4]. Каждая из отображенных ошибок будет возникать у Ч-О вследствие различного устройства и функционирования психических процессов (памяти, внимания, мышления, восприятия, воображения и т. д.), а также из-за различной скорости реакции, способности к переключению между задачами, концентрации и предрасположенности к монотонному труду. Поиск ошибок и их подсчет будут осуществляться во время прохождения испытуемыми специально разработанного задания.

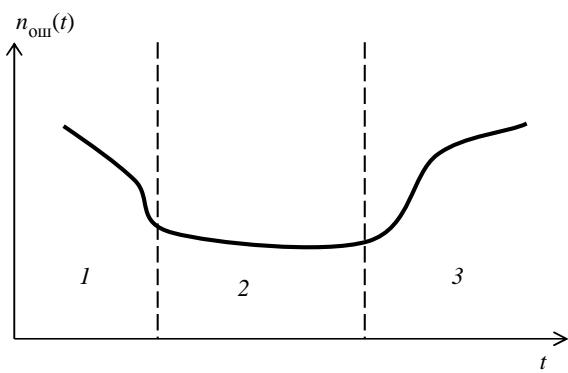
Данные задания представляют собой набор игровых программ, которые имитируют типичные трудовые операции Ч-О при работе за автоматизированным рабочим местом (АРМ). Такие программы направлены на проверку возможностей какого-либо отдельного или же сразу нескольких когнитивных процессов и свойств психики индивида, перечисленных ранее. За основу для предъявляемых игровых программ взяты бесплатные версии следующих приложений: «NeuroNation», «Lumosity», «Uplift», «Cognitivo» и т. д.

Каждое задание выполняется за лимитированный промежуток времени. При этом наблюда-

Таблица 3

Характер ошибок	Виды ошибок
Выпадение (пропуск) элементов рабочего процесса	Выпадение перцептивных действий. Выпадение логического действия или условия. Выпадение моторного действия. Выпадение комплекса (участка алгоритма). Прекращение рабочего процесса
Качественные ошибки	Искажение сигнала. Нарушение последовательности выполнения действий. Логические ошибки (в действиях с понятиями или суждениями, в умозаключениях или доказательствах)
Количественные ошибки	Отклонение при выполнении действий параметра от заданного значения. Неверный математический расчет. Несвоевременное выполнение действия

тель фиксирует количество ошибок испытуемого и их вид в соответствии с табл. 3. Помимо этого человек проходит одно и то же задание несколько раз, что позволяет учитывать динамику изменения надежности и определять порог врабатываемости Ч-О (рисунок) [5].



На рисунке:  $n_{\text{ош}}(t)$  – количество совершаемых ошибок;  $t$  – время; 1 – фаза врабатываемости; 2 – фаза устойчивой работоспособности; 3 – фаза утомления.

Оценки интенсивности ошибок и вероятности безошибочной работы оператора рассчитываются в фазе устойчивой работоспособности. Данная фаза наступает в тот момент эксперимента, когда интенсивность ошибок становится стабильной. Для определения стабильности на основе многократного повторения задания определяется 10 %-й коридор для количества допущенных ошибок.

Поскольку в исследовании учитывается тип ошибки, то рассчитывается вероятность возникновения определенного вида ошибки при выполнении конкретного задания. При этом делается допущение, что несколько видов ошибок соответствуют некоторому процессу (между процессами типы ошибок не пересекаются). Для расчета вероятности возникновения ошибки в  $j$ -м задании для  $k$ -й характеристики  $P_{ijk}$  используется следующая формула:

$$P_{ijk} = \frac{n_{ijk}}{N_{jk}}, i = \overline{1, L}, j = \overline{1, M}, k = \overline{1, S},$$

где  $n_{ijk}$  – количество ошибок  $i$ -го типа в  $j$ -м задании для  $k$ -й характеристики;  $N_{jk}$  – общее число выполняемых действий в  $j$ -м задании для  $k$ -й характеристики;  $S$  – количество оцениваемых характеристик;  $M$  – количество предъявляемых за-

даний для оценки конкретной характеристики;  $L$  – количество типов ошибок для одного задания при оценке отдельной характеристики.

При расчете времени, требуемого для фазы врабатываемости, используется интенсивность ошибок  $i$ -го типа в  $j$ -м задании для  $k$ -й характеристики  $\lambda_{ijk}$ :

$$\lambda_{ijk} = \frac{P_{ijk}}{T}, i = \overline{1, L}, j = \overline{1, M}, k = \overline{1, S},$$

где  $T$  – время выполнения задания.

Поскольку для оценки отдельного когнитивного процесса существует несколько видов предъявляемых заданий, рассчитывается среднее значение для каждого типа ошибки  $\overline{P_i^k}$ :

$$\overline{P_i^k} = \left( \sum_{j=1}^M P_{ijk} \right) / M.$$

Результаты измерений для каждого типа ошибки всех приведенных характеристик каждого психотипа будут обработаны с помощью методов математической статистики. В результате будут получены средние значения вероятности появления ошибок каждого вида, встречающихся в каждом психологическом типе. Это позволит сделать выводы о типах ошибок, свойственных определенному психотипу.

После прохождения задания проводится интервью с испытуемым, чтобы выявить, какие задания показались ему наиболее сложными, простыми, почему те или иные задания ему казались проще, почему он допускал ошибки при выполнении того или иного задания. Подобный подход позволяет выявить не только сами ошибки, но и причину данной ошибки.

Приведенная методика позволит выявить ошибки, свойственные тем или иным психотипам. Учет данных ошибок поможет усовершенствовать методы профотбора за счет того, что ошибки перестанут носить случайный характер, а станут прогнозируемыми и устранимыми, а также усовершенствовать методики профессиональной подготовки и обучения персонала. В дальнейшем для снижения вероятности появления различных типов ошибок возможно конфигурирование интерфейсов с учетом особенностей психологического типа человека.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толочек В. А. Современная психология труда: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2005.
  2. Каммероу Дж. М., Баргер Н. Д., Кирби Л. К. Ваш психологический тип и стиль работы / пер. с англ. А. Багрянцевой. М.: Изд-во ин-та психотерапии, 2001.
  3. Юнг К. Г. Психологические типы. М.: Алфавит, 1992.
  4. Цибулевский И. Е. Ошибочные реакции человека-оператора. М.: Сов. радио, 1979.
  5. Смирнов Б. А., Гулый Ю. И. Инженерно-психологическое и эргономическое проектирование. Харьков: Гуманитарный центр, 2010.
- 

S. A. Kolmakov, A. V. Leonov  
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

### THE METHOD OF DETECTING ERRORS OF THE HUMAN-OPERATORS, BASED ON THEIR PSYCHOLOGICAL TYPES USING GAME PROGRAMS SIMULATED THE WORKING PROCESS ON WORKSTATION

*This article describes a method of detecting errors of the human-operators, based on their psychological types using game programs simulated the working process on workstation. Given technique will help one to improve methods of professional selection due to the fact that errors will no longer be random and will be predictable and avoidable.*

**Human-operator, psychological type, human-operator mistakes, MBTI, game programs, occupational selection**

---

УДК 681.3

Дж. Г. Алкади Лайс, Ю. Т. Лячек, Мустафа Ахмед Бадор Мохамед  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

### Модификация областей штриховки при использовании сеточной параметрической модели чертежей

*Рассмотрены особенности описания штриховки в файлах обмена информацией чертежей и предлагается алгоритм формирования областей штриховки при модификации конструкторских чертежей деталей в соответствии с заданными конструктором новыми значениями размерных обозначений. Показано, что на основе созданной сеточной параметрической модели исходного электронного файла описания чертежа детали преобразование описания чертежа с областями штриховки может быть выполнено автоматически.*

**Чертеж, сеточная параметрическая модель, dxf-файл, штриховка, алгоритм, автоматическая модификация**

Двухмерные системы конструкторского проектирования не являются параметрическими. В связи с этим при разработке новых вариантов изделий приходится заново практически полностью подготавливать комплекты чертежной документации, так как редактирование старых описаний с новыми значениями размерных обозначений оказывается нецелесообразным из-за больших интеллектуальных и временных затрат конструкторов. В то же время на основании авто-

матически создаваемой сеточной параметрической модели старого чертежа [1] можно без дополнительных усилий конструктора по редактированию графического описания сформировать новый образ чертежа детали. Этот образ будет полностью соответствовать вновь задаваемым значениям для части или даже для всех размерных обозначений, установленных на исходном чертеже. Однако автоматически формируемая сеточная параметрическая модель чертежа не

обеспечивала параметризацию элементов оформления чертежей, тогда как в соответствии с требованиями ЕСКД рабочие чертежи деталей должны содержать все сведения для изготовления и контроля этих изделий. К таким данным, в частности, относятся и многовидовые графические изображения с разрезами, сечениями и областями выреза, позволяющие наиболее полно отобразить форму изделия. На представленных видах должны быть нанесены необходимые для изготовления детали размерные обозначения с предельными отклонениями, указания шероховатости поверхностей, определяющие качество их обработки, а также технические требования, содержащие различные данные, которые невозможно представить графически. Вся эта информация о чертеже отображается в электронных файлах обмена информацией, чтобы чертеж можно было бы качественно изобразить в любой современной системе автоматизированного проектирования. В настоящее время общепринятыми файлами обмена графической информацией между различными 2D-системами САПР (например, «Компас», «AutoCAD», «nano-CAD», «Адем» и др.), содержащими исчерпывающую информацию о конструкторских чертежах, являются текстовые файлы с расширением dxf. Используя это описание можно расширить возможности сеточной параметрической модели и обеспечить автоматическую обработку не только описания самой детали, представленной на чертеже, но и элементов его оформления.

В частности, модель непосредственно не позволяет при модификации обеспечить перестроение областей штриховки [2]. Это обусловлено тем, что параметрическая сеточная модель устанавливает адаптивную связь с изменяющимися размерными обозначениями только для основных графических примитивов, определяющих форму детали. Связь же с описаниями контуров штриховки неявная. Это приводит к смещению изображения штриховки относительно перестраиваемых контуров детали при их автоматической перерисовке в процессе модификации. Контуры перерисовываются в соответствии с новыми значениями размеров, а области штриховки остаются на старом месте. В связи с этим штриховка при модификации чертежа не наносится, а просто стирается, и конструктору приходится добавлять ее в ручном режиме. Это существенно снижает эффект от автоматической модификации чертежей.

Для разработки алгоритмов корректной перерисовки областей штриховки в процессе автоматической модификации чертежей были проанализированы различные варианты исходного формирования таких зон (графических примитивов «Штриховка» – «HATCH») в различных САПР и способы их представления в dxf-файлах. В результате выявлено:

1. В части файла описании примитива HATCH записываются все определяющие его параметры. В него занесены общие данные (внутреннее имя, стиль, вид, масштаб, количество образующих контуров и т. д.). Также представлены подробная информация по каждому контуру (об образующих его примитивах с параметрами их характерных точек, а также их внутренние имена с указанием параметров каждого), количество внутренних точек, использованных для указания границ контуров, координаты этих точек и т. д.

2. Описание контуров штриховки может представляться в двух вариантах в зависимости от способа задания их конструктором.

*При первом варианте* конструктор указывает конкретные примитивы (отрезки, полилинии, дуги, окружности, эллиптические дуги и сплайны), образующие в совокупности контур (контуры). При этом все вершины, описывающие область штриховки, являются базовыми точками графических примитивов, составляющих образ детали (точками начала, излома, конца отрезков, ломаных линий или дуг и центров окружностей и других примитивов). Эти точки-вершины автоматически полностью охватываются создаваемой параметрической сеточной моделью исходного чертежа. В связи с этим параметры такого контура могут быть относительно просто откорректированы в соответствии с данными модели. Сама модифицированная область штрихуется в соответствии со стилем штриховых линий и другими общими параметрами, указанными в начале исходного описания графического примитива HATCH, которые не должны меняться.

*При втором варианте* описания некоторые или даже все вершины контура штриховки являются точками пересечения базовых графических примитивов, т. е. производными от примитивов, определяющих форму детали, и конструктор не может выбрать все элементы контура. В таких случаях область штриховки задается указанием любой внутренней точки (точки «затравки») для каждой области. Иногда при большом количестве базовых примитивов, образующих контур, конструктор также не выбирает их, а для ускорения работы просто указывают точку затравки.

В таких случаях соответствующая программа 2D-системы автоматизированного проектирования сама определяет участки базовых графических примитивов, образующих замкнутый контур, и характерные для него точки-вершины. Эта же программа на основе выявленных параметров элементов контура осуществляет его штриховку. Однако такие вычисленные координаты точек-вершин в общем случае отсутствуют в описании сеточной параметрической модели чертежа и не могут быть откорректированы при его модификации в соответствии с новым набором размерных значений. Измененная область будет отличаться от первоначальной, а исходная точка затравки в общем случае может оказаться не только за пределами требуемой зоны штриховки, но и выйти за границы изображаемого вида детали. Соответственно штриховка будет выполнена некорректно.

3. При любом способе задания контуров для модификации областей штриховки необходима коррекция данных примитивов, определяющих контуры НАТСН, в соответствии с измененными параметрами в dxf-файле преобразованного чертежа.

4. Описание и чертежа в целом, и любого используемого в нем графического примитива (в том числе и области штриховки НАТСН) в dxf-формате представляется вложенными текстовыми списками, состоящими из отдельных структурных единиц – групп, выделяемых круглыми скобками. В каждой группе вначале указывается код группы (групповой код), представляющий целое число, а затем описывается соответствующая этому коду информация. Такое описание позволяет достаточно просто найти нужные данные и, при необходимости, изменить их. Для наглядности приведем фрагмент (начало) описания примитива «Штриховка» в dxf-формате:

```
((-1 . <Имя объекта: 7ef03cd8>) (0 . "НАТСН")
 (330 . <Имя объекта: 7ef03b38>) (5 . "2CB")
 (100 . "AcDbEntity") (67 . 0) (410 . "Model")
 (8 . "0") (440 . 33554636) (370 . 50)
 (100 . "AcDbHatch") (10 0.0 0.0 0.0)
 (210 0.0 0.0 1.0) (2 . "ANSI31") (70 . 0) (71 . 1)
 (91 . 3) (92 . 16) (93 . 1) (72 . 2) (10 2500.0 1740.0
 0.0) (40 . 150.0) (50 . 0.0) (51 . 6.28319) (73 . 1)
 (97 . 1) (330 . <Имя объекта: 7ef03cb8>)
 (92 . 16) (93 . 1) (72 . 2) (10 2250.0 1250.0 0.0)
 (40 . 300.0) (50 . 0.0) (51 . 6.28319) (73 . 1) (97 . 1)
 (330 . <Имя объекта: 7ef04388>) (92 . 1) (93 . 8)
 (72 . 2) (10 2250.0 1250.0 0.0) (40 . 760.0)
```

```
(50 . 0.132552) (51 . 3.00904)
(73 . 1) (72 . 1) (10 1496.67 1350.44 0.0)
(11 1650.0 1350.44 0.0)
```

На основании известного или выявленного заранее значения кода группы можно найти соответствующую ему группу в общем файле описания чертежа и определить тип и значения данных, записанные в этой группе. Далее можно изменить их (переписать в соответствии с требованиями модификации изображения), сформировав соответствующую команду.

5. Структуры раздела НАТСН для разных вариантов задания штриховки существенно разнятся.

При первом варианте в разделе описания штриховки последовательно для каждого образующего ее контура вначале описываются параметры каждого графического элемента, составляющего контур. Далее, после описания всех групп параметров текущего контура, последовательно перечисляются имена базовых графических примитивов, которые соответствуют ранее перечисленным группам параметров. В связи с таким способом описания можно, имея параметрическую модель, относительно просто автоматически модифицировать примитивы контура штриховки, подобно тому как модифицируются базовые графические примитивы, определяющие образ объекта на чертеже. Как описано в [1], параметрическая модель чертежа представляет собой списки пар (или двухмерных массивов) вещественных чисел по координате X или Y. Первое число – значение координаты каждой базовой точки на исходном чертеже, а второе – значение координаты этой же точки в модифицированном изображении. Иными словами, в модели содержится информация о старом и новом значениях координат для каждой характерной точки всех базовых примитивов чертежа.

Таким образом, модификация первого типа штриховки сводится к выявлению всех параметров для каждого графического примитива контуров и замене старых значений параметров на новые (измененные). Однако прежде чем это делать, в описании элемента НАТСН на основании кода группы точки затравки необходимо выявить, является ли рассматриваемый элемент штриховкой именно первого типа.

В случаях, когда для штриховки области или одновременно нескольких областей задается одна или несколько точек затравки и программа определяет параметры для каждой замкнутой области, модифицировать такие области существенно сложнее. В этих случаях в разделе примитива

НАТСН контур описывается ломаной линией, для каждой точки которой последовательно указываются ее координаты и кривизна кривой в ней. За значениями параметров всех точек ломаной (контура) в описании перечисляются примитивы, пересечения которых образуют ранее описанные точки. Для модификации таких областей необходимо предварительно определить базовые примитивы, порождающие точки пересечения, и координаты точек их пересечения после модификации. Далее в описании примитива НАТСН во всех контурах следует заменить старые координаты точек пересечения и значения кривизны на новые, соответствующие модифицированному изображению. Дополнительно следует заменить старые координаты точек затравки на новые, алгоритм вычисления которых должен учитывать смещение контуров в поле чертежа. Только после этого модифицируют контур штриховки.

Успешное решение задачи модификации штриховки этого типа предполагает разработку алгоритмов нахождения точек пересечения для всех вариантов сочетания пар графических примитивов, образующих ломаную линию контура (отрезков, окружностей, дуг, эллиптических дуг и сплайнов).

В соответствии с выявленными особенностями обобщенный алгоритм модификации штриховки включает в себя следующие этапы:

1. В цикле выбирается первая запись из выявленных в описании чертежа списка примитивов НАТСН и анализируется ее структура.

2. В группе с кодом 91 определяется количество контуров, образующих анализируемую область штриховки.

3. По записи группового кода 98 и значению координат каждой точки (код 10) определяется количество точек затравки, указанных при формировании текущего примитива НАТСН, и их координаты.

4. Если ни одна точка затравки не использовалась, то значение кода 98 равно 1, а значения координат такой точки (код группы координат равен 10), записанных в dxf-файле для этой группы, будут тождественно равны нулю. Такое нулевое значение координат соответствует непосредственному заданию примитивов контуров.

Если же задавались точки затравки, то значение для группы с кодом 98 определяет количество введенных пользователем точек, и затем для всех этих точек (по коду 10) находятся значения их координат. При выявлении такого варианта задания (при использовании точек затравки) осуществляется переход к п. 6 алгоритма.

*(Начало обработки контуров, состоящих из базовых графических примитивов).*

5. В цикле обработки контуров, в соответствии с ранее выявленным их количеством (см. п. 2), для каждого контура, входящего в описание (код группы – 91), последовательно выполняются следующие действия:

- 5.1. Определяется количество базовых графических примитивов, образующих текущий контур (код этой группы – 93).

- 5.2. В цикле по базовым примитивам текущего контура для каждого графического примитива (код примитива – 72) выявляются его исходные (до модификации) параметры, а затем внутреннее, присвоенное системой, имя этого примитива (код имени – 330). В частности, по коду примитива (72) определяются следующие параметры:

- для отрезка (значение кода отрезка равно 1) – координаты точки начала (код группы – 10) и конца (код группы – 11);

- для полилинии (код примитива – 0) – координаты каждой точки (код группы – 10) и кривизна в ней для последующего сегмента (код группы – 42);

- для дуги и окружности (код примитива – 2) – координаты центра (код 10), значения радиуса (код 40), начального (код группы – 50) и конечного (код группы – 51) углов в радианах и направление обхода (код группы – код 73). При этом значение 1 соответствует обходу против часовой, а 0 – по часовой стрелке;

- для эллиптической дуги (код 3) – координаты центра (код 10), координаты точки большой полуоси (код 11), длина малой полуоси волях от большой (код 40), значения начального (50) и конечного (51) углов в радианах, направление обхода (код 73) со значением 1 – против часовой и 0 – по часовой стрелке;

- для сплайна (код примитива 4) – порядок сплайна (код 94), признак рациональности (код 73), признак периодичности (код 74), количество узлов (код 95), количество управляющих точек (код 96), а также данные узла (код 40) и координаты управляющих точек (код 10), которые повторяются в соответствии с количеством узлов.

- 5.3. Используя сеточную параметрическую модель, выявленные старые параметры графических примитивов в описании контура заменяются на новые.

- 5.4. Модифицируется (перерисовывается) область текущего контура в соответствии со скорректированными, новыми, значениями параметров графических примитивов.

- 5.5. Переход на начало цикла (п. 5) для обработки следующего контура, если обработанный контур не последний в списке.

(Начало обработки контуров с точками затравки).

6. В цикле для каждого контура по коду группы 93 определяется количество образующих сегментов ломаной.

7. Последовательно выявляются и сохраняются в отдельном списке или массиве исходные координаты (код группы – 10) всех точек ломаной контура и кривизна линии в каждой точке (код группы – 42).

8. Последовательно выявляются внутренние имена базовых примитивов (код группы – 330), пересечение которых определяет ранее выявленные координаты для каждой такой точки.

9. В цикле по сегментам ломаной последовательно вычисляются новые (модифицированные) координаты точек пересечения и значение кривизны кривой в этой точке. Для этого:

9.1. Вызывается процедура нахождения точки пересечения двух графических примитивов, для которой входными параметрами выступают внутренние имена этих примитивов, а выходными – координаты точки пересечения и кривизна кривой в ней.

9.2. Процедура расчета точки пересечения на основе переданных ей имен в структуре чертежа выявляет по каждому примитиву его тип и его новые (модифицированные) геометрические параметры.

9.3. Согласно выявленным типам осуществляется обращение к соответствующей функции поиска координат точки пересечения графических примитивов (двух отрезков, двух дуг, отрезка и дуги, отрезка и окружности и т. д.) с уже известными для них параметрами. Эта же программа определяет значение кривизны в рассчитанной

точке, если оно не равно нулю (если последующий сегмент не отрезок).

9.4. В структуре описания HATCH старые значения координат и значение кривизны (если оно отлично от нуля) заменяются на новые.

9.5. Если сегмент – последний, осуществляется модификация обработанного контура и переход к обработке следующего, т. е. на начало цикла (на п. 6).

10. После завершения цикла обработки контуров определяются координаты внутренней точки для каждого модифицируемого контура.

11. В конце работы алгоритма старые координаты внутренних точек (точек затравки) заменяются на вновь вычисленные и модифицируется область штриховки (графический примитив HATCH).

Следует отметить, что наиболее эффективно модифицировать чертежи с областями штриховки можно на базе системы AutoCAD. Это обусловлено тем, что данная САПР корректно отображает на экране компьютера исходные dxf-файлы чертежей, относительно просто обеспечивает задание конструктором новых размерных обозначений, имеет широкий спектр программных средств разработки пользовательских приложений [3] и после модификации сохраняет новую версию чертежа в dxf-файле.

Обобщенный алгоритм штриховки расширяет возможности сеточной параметрической модели чертежа, так как вместе с автоматической перерисовкой образа детали обеспечивает автоматическое преобразование областей сечений и разрезов. Это исключает ручной труд и повышает производительность труда конструкторов при модификации конструкторских документов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алкади Лайс Дж. Г., Лячек Ю. Т. Параметрическая адаптивная сеточная модель чертежа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 6. С. 44–50.

2. ГОСТ 2.305-2008. Государственный стандарт. ЕСКД. Изображения – виды, разрезы, сечения. GostExpert.ru>gost/gost-2.305-2008.

3. Open Design Alliance, Open Design Specification for .dwg files Version 5.3 2013. 262 с. URL: [http://www.opendesign.com/files/guestdownloads/OpenDesign\\_Specification\\_for\\_.dwg\\_files.pdf](http://www.opendesign.com/files/guestdownloads/OpenDesign_Specification_for_.dwg_files.pdf).

---

J. Gh. Alkadhi Layth, Yu. T. Lyachek, Mustafa Ahmed Bador Makhamed  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## MODIFICATION OF AREAS HATCHING USING A PARAMETRIC MODEL OF THE GRID DRAWINGS

*The features of the description of the hatch in the files of information exchange drawings and algorithms of forming areas of hatching in the modification of design drawings of parts in accordance with the specified constructions-dimensional torus new values designations. It is shown that on the basis of the parametric model grid created source electronic file describing the details of the drawing, with the drawing describing the conversion hatching areas can be done automatically.*

**The drawing, grid the parametric model, the dxf-file, hatch, algorithm, automatic modification**

---



УДК 004.032.2.6

А. Н. Никонов, К. М. Жеронкин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Алгоритм адаптивного управления нелинейным объектом с исполнительным механизмом ограниченной силы воздействия

Описывается проблема неопределенности в канале управления и возможный путь решения с использованием методов адаптивного управления. В качестве примера рассматривается задача управления флаттером, для которого необходимо подавить колебания на высоких скоростях. Алгоритм реализован на основе нейронной сети.

### Нейросетевая система управления, флаттер, особенности в канале управления, ограничение в канале управления

Синтез аналитических законов для систем с особенностями приводит к возникновению неопределенности в функции управления в этих областях пространства состояний. Реализация нелинейных законов заключается в разрешении неопределенностей закона. Ее решение основывается на учете физических ограничений, ослаблении требований к качеству переходных процессов, выполнении дополнительных условий, связанных со способом реализации. Например, естественным физическим требованием является ограниченность управляющих воздействий, а использование нейросетевой реализации допускает воспроизведение только непрерывных функций управления. Рассмотрим способы реализации нелинейных законов для различных типов особенностей канала управления.

**Нейросетевая система с особенностью *и*-типа.** Неопределенность особенности *и*-типа связана с проблемами неединственности и необходимости «зависания» формируемого сигнала управления на максимуме (минимуме) функции внутреннего управления ( $g$ ). В общем случае неединственность может быть раскрыта с помощью введения дополнительных критериев качества, а при их отсутствии выбор одного из вариантов становится произвольным. В жестко заданных законах

управления эффект «зависания» может достигаться «в克莱иванием» постоянных значений на заданном интервале. При реализации закона на базе перестраиваемой структуры, например, нейросетевой выбор варианта в случае неединственности определяется начальными условиями, а для получения эффекта зависания необходима модификация алгоритмов настройки, обеспечивающая приближение формируемого сигнала к постоянному во времени значению при переменных входах (рис. 1). На рис. 1 обозначены:  $u$  – функция управления;  $t$  – время;  $\Omega_0$  – область экстремума, в которой увеличение (уменьшение) уровня управления не приводит к увеличению (уменьшению) внутреннего управления.

Для реализации нелинейных законов с особенностями на базе нейронных сетей необходима модификация алгоритмов обучения. Рассмотрим одну из возможных модификаций, обеспечивающую корректное функционирование нейросетевой системы в области *и*-особенностей.

Неопределенность особенности *и*-типа связана с проблемами реализации нелинейных законов с особенностью *и*-типа и предполагает устранение неединственности и создание эффекта «зависания» значений управляющего сигнала на экстремуме. Первый эффект реализуется выбором

начальных условий алгоритма обучения нейронной сети – весовых коэффициентов. Во втором случае необходима разработка модификации алгоритмов настройки весов.

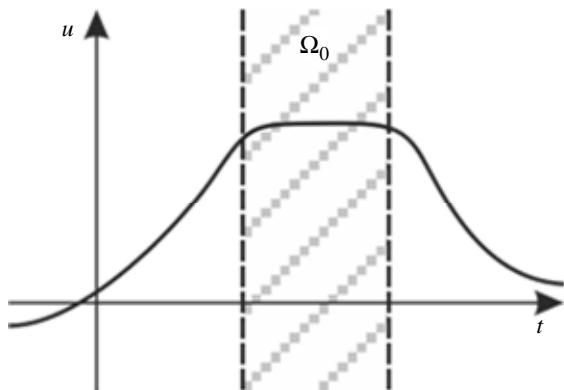


Рис. 1

Рассмотрим необходимое условие разрешимости задачи настройки нейросетевого регулятора, формулируемое как возможность влияния на ошибку за счет изменения весов нейросети [1]:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial u} \neq 0, \quad \sigma = G(\psi, \dot{\psi}),$$

где  $\sigma = G(\cdot)$  – обобщенная ошибка обучения нейронной сети;  $\psi$  – функция макропараметров. Выполнение условия необходимо в связи с использованием в схеме стандартной версии алгоритма обратного распространения ошибки. Если условие не выполняется, процесс настройки весов становится непредсказуемым и значения настраиваемых коэффициентов могут неограниченно возрастать, что приведет к необходимости перенастройки сети при выходе за пределы области с  $u$ -особенностью канала управления.

Проблема неограниченного роста значений весов может быть решена отключением алгоритма настройки в области экстремума функции  $g$ . Подобное решение допустимо только для известной заранее функции управления, при неизвестной момент обратного включения становится неопределенным. В нейросетевой системе с формированием закона в реальном времени несвоевременное включение алгоритма настройки может привести к задержке реакции на изменения в модели поведения объекта.

Для учета особенностей  $u$ -типа необходимо модифицировать алгоритм обучения нейронной сети в схеме. Известно решение подобной проблемы для адаптивных систем с ограничением в канале управления, заключающееся в построении виртуальной

подсистемы, компенсирующей «зависание» алгоритмов настройки в районе экстремума [2].

Предлагаемый алгоритм состоит из двух частей: одна из них, базовая, реализует алгоритм обратного распространения ошибки с функциями макропараметров в качестве аргумента функционала обучения, другая предназначена для удержания выхода нейросети на уровне экстремума в области особенности. Благодаря способности нейронной сети к реализации практически любой гладкой функции работа двух алгоритмов позволяет аппроксимировать в реальном времени функцию управления с зависанием в области «экстремума».

Анализ устойчивости может проводиться на основе системы с аналитическим прототипом, синтезированным по тому же инвариантну, что и нейросетевой регулятор. В этом случае становится возможным использование существующих методов исследования динамики нелинейных систем.

Структуру предлагаемого алгоритма обучения составим из двух частей, каждая из которых функционирует в своей области пространства состояний. Первая часть алгоритма предназначена для формирования сигнала согласно прототипу, вторая – для удержания выхода сети на уровне экстремальных значений. Области имеют пересечение, на котором одновременно действуют оба алгоритма по принципу противовеса, благодаря чему формируемый нейронной сетью сигнал не покидает пределы допустимой области. При этом не теряется способность сети к перенастройке, так как возвращение в неособую область остается беспрепятственным.

Для иллюстрации работы предложенного алгоритма рассмотрим пример нейросетевой системы с  $u$ -особенностью канала управления.

**Нейроуправление флаттером: нелинейная задача.** Проблема флаттера известна с середины XX в. и до сих пор актуальна, а разработка эффективных способов противодействия флаттеру относится к одному из перспективных направлений развития аэрокосмических технологий [3], [4]. Флаттер как колебания конструкции в потоке воздуха возникает на критических скоростях движения. Предотвращение флаттера позволяет улучшить скоростные характеристики летательных аппаратов, уменьшить массу конструкции, увеличить полезную нагрузку. Различают пассивные и активные способы подавления флаттера. В первом случае речь идет об оптимизации конструкции летательного аппарата, во втором – о разработке систем управления, стабилизирующих колебания. Активные системы делают возможным создание новых типов «интеллектуальных»

летательных аппаратов с изменяющейся (адаптивной) конструкцией [4]–[6].

Рассмотрим физическую систему, моделирующую флаттер крыла самолета и способ активного противодействия. Она состоит из секции крыла подвешенного на пружине в потоке воздуха и исполнительного механизма (рис. 2). Динамика модели описывается системой [7]:

$$\begin{aligned} M \ddot{y} + D(v) \dot{y} + K(y, v)y &= C(v)\text{sat}(u), \\ y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, u = \beta \frac{180}{\pi}, M = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 \end{bmatrix}, \\ C(v) = \frac{\pi}{180} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} v^2, \\ D(V) = \begin{bmatrix} d_{10} + d_1 v & d_2 v \\ d_3 v & d_{40} + d_4 v \end{bmatrix}, \\ K(y, v) = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 v^2 \\ 0 & k(y_2) + k_3 v^2 \end{bmatrix}, \\ \text{sat}(u) = \begin{cases} u, & |u| \leq u_{\max}, \\ \text{sign}(u)u_{\max}, & |u| > u_{\max}, \end{cases} \\ k(y_2) = a_0 + a_1 y_2 + a_2 y_2^2. \end{aligned}$$

где  $m_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ ,  $k_i$ ,  $a_i$  – обобщенные коэффициенты физической модели (в частности, зависящие от коэффициентов упругости пружин  $k_\alpha$  и  $k_h$ );  $v$  – скорость потока воздуха;  $y_1 = h$  – вертикальное отклонение крыла от начала координат;  $y_2 = \alpha$  – угол поворота крыла относительно точки крепления;  $\beta$  – угол поворота регулируемой плоскости крыла;  $u$  – управляющее воздействие;  $u_{\max}$  – максимальная амплитуда управления.

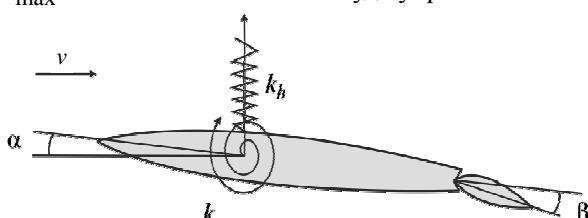


Рис. 2

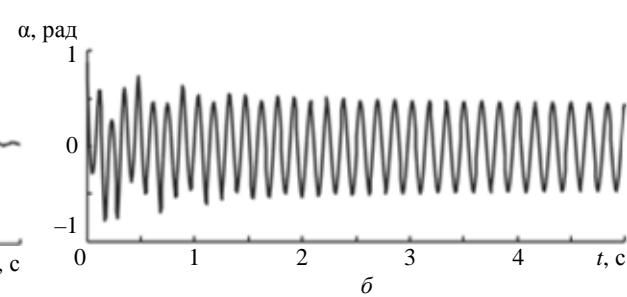
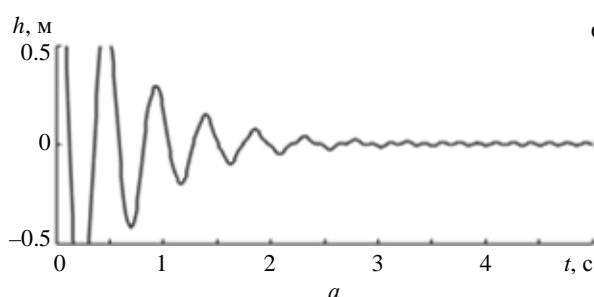


Рис. 3

Осуществим синтез нейросетевой системы управления для модели, обеспечивающей подавление незатухающих колебаний переменных  $y_1$  и  $y_2$  (флаттер) при различных скоростях потока  $v$  и заданных свойствах канала управления  $u_{\max}$ . Решение задачи осложнено нелинейностью и многомерностью модели, значительной вариацией параметра  $v$ , ограничением управляющего воздействия по амплитуде. Последнее обстоятельство говорит о наличии в модели особенностей канала управления  $u$ -типа, так как характеристику  $\text{sat}(u)$  приближенно можно рассматривать как функцию с двумя экстремумами при  $u \rightarrow \pm\infty$ .

В отсутствии управления модель обладает положением равновесия в начале координат, устойчивым при скоростях потока  $v < v_c$ . Превышение критической скорости  $v_c$  приводит к потере устойчивости с возникновением автоколебательного режима (рис. 3 *a*, *б*). Для стабилизации используем физическую особенность системы. С одной стороны, при нулевом угле  $\alpha$  между направлением потока и осью симметрии крыла воздействие на систему оказывает только пружина. С другой, колебания пружины затухают, если отсутствуют прочие воздействия. Это означает, что для стабилизации системы достаточно выполнения соотношения  $\alpha \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow 0$ , или в обозначениях системы при  $y_2 \rightarrow 0$ .

Для синтеза нейросетевой системы выберем структуру согласно схеме [8], затем внесем модификацию в алгоритм обучения, описанную далее. В качестве инварианта  $\psi$  и ошибки  $\sigma$  выберем

$$\psi = \alpha, \quad \sigma = \ddot{\psi} + b_1 \dot{\psi} + b_2 \psi,$$

где  $b_i$  – числовые коэффициенты.

Обозначим пограничные области  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , соответствующие двум  $u$ -особенностям системы, а также их объединение – область  $\Omega$ :

$$\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 = (-u_{\max} - \Delta u; -u_{\max} + \Delta u) \cup (u_{\max} - \Delta u; u_{\max} + \Delta u),$$

где  $\Delta u$  – параметр, определяющий ширину пограничной области. Введем специальную ошибку обучения  $\sigma_\Omega$  для области  $\Omega$ , противодействующую росту значений модуля сигнала управления, формируемого нейронной сетью:

$$\sigma_\Omega = u.$$

Функции  $\sigma$  и  $\sigma_\Omega$  в явном виде зависят от коэффициентов нейронной сети  $w$  – это означает, что для обучения можно использовать градиентные алгоритмы. Обозначим алгоритмы, соответствующие ошибкам  $\sigma$  и  $\sigma_\Omega$ , как  $\mathcal{A}(x, w, \sigma)$  и  $\mathcal{A}_\Omega(x, w, \sigma_\Omega)$ . Алгоритм обучения нейронной сети сформируем с помощью специальных функций  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ , аргументы которых – сигнал управления  $\Delta$  и смещение весов и  $\Delta_\Omega$ , формируемые алгоритмами  $\mathcal{A}$  и  $\mathcal{A}_\Omega$ :

$$\dot{w} = \tilde{\mathcal{A}} = \kappa_1(\Delta, u) + \kappa_2(\Delta_\Omega, u),$$

$$\kappa_1(\Delta, u) = \begin{cases} \Delta, & |u| \leq u_{\max} - \Delta u; \\ 0, & |u| \geq u_{\max} + \Delta u; \\ \Delta \operatorname{sign}(u) [\operatorname{sign}(u)(u_{\max} + \Delta u) - u], & u_{\max} - \Delta u < |u| < u_{\max} + \Delta u; \end{cases}$$

$$\kappa_2(\Delta_\Omega, u) = \begin{cases} 0, & |u| \leq u_{\max} - \Delta u; \\ \Delta_\Omega, & |u| \geq u_{\max} + \Delta u; \\ \Delta_\Omega [2\Delta u + \operatorname{sign}(u) \times \\ \times (u - \operatorname{sign}(u)(u_{\max} + \Delta u))], & u_{\max} - \Delta u < |u| < u_{\max} + \Delta u. \end{cases}$$

Схема работы алгоритма основана на идее встречного противодействия (рис. 4), оба алгоритма одновременно работают только в области  $\Omega$ . В каждой из областей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  функции  $\kappa_1(\Delta, u)$  и  $\kappa_2(\Delta_\Omega, u)$  монотонны по аргументу  $u$ . При этом имеется единственная точка  $u_0$ , в которой их модули равны (точка равновесия). Смещение  $\Delta_\Omega$  всегда направлено в сторону уменьшения модуля  $|u|$ . Если при этом вектор  $\Delta$  направлен в сторону увеличения модуля  $|u|$ , то в точке равновесия  $u_0$  векторы  $\Delta$  и  $\Delta_\Omega$  компенсируют друг друга и выход нейронной сети установится на фиксированном значении. Если же вектор  $\Delta$  направлен в сторону уменьшения модуля  $|u|$ , значение формируемого сигнала изменится в сторону выхода из области  $\Omega$ . Таким образом, предложенный алгоритм препятствует прохождению процесса сквозь пограничную область  $\Omega$  (область  $u$ -особенности канала управления) без остановки процесса обучения и неограниченного роста коэффициентов сети.

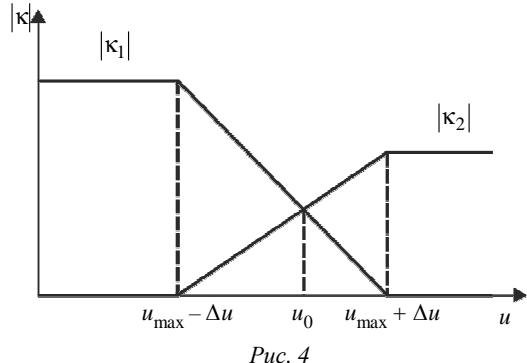


Рис. 4

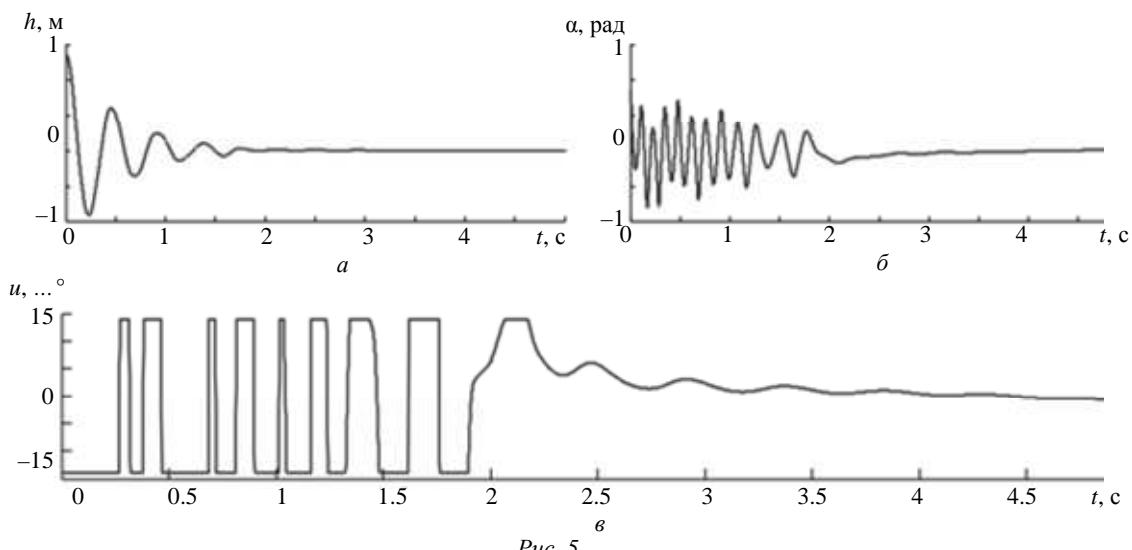


Рис. 5

Промоделируем нейросетевую систему с новым алгоритмом обучения, для чего воспользуемся значениями параметров модели, приведенных в публикации [7]. Для управления выберем сеть с десятью нейронами в скрытом слое, начальные значения весов зададим случайным образом. Первоначальное обучение сети проведем методом моделирования в составе замкнутой системы. Приемлемое качество нейросетевой системы (подавление флаттера) наблюдается уже после 3–5 запусков с одинаковыми начальными условиями (рис. 5). Процесс подавления флаттера нейросетевой системой управления: *a* – вертикальное отклонение секции крыла от точки крепления; *б* – угловое отклонение относительно горизонтали; *в* – угол поворота регулируемой плоскости крыла.

В процедуре синтеза нейросетевой системы использована информация только качественного характера (физическое описание). Синтез осуществлен в условиях неизвестных нелинейных характеристик модели и значений параметров (механических и аэродинамических). Таким образом, систему управления можно рассматривать как типовую для класса объектов, задаваемого физической моделью секции крыла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю. Нейросетевые системы управления. Кн. 8 / под общ. ред. А. И. Галушкин / ИПРЖР. М., 2002. 480 с.
2. Monopoli R. V. Adaptive control for systems with hard saturation // Proc. IEEE Conf. Decis. Contr. Houston, 1975. P. 841–843.
3. Chambers J. R. Innovation in flight: research of the NASA Langley research center on revolutionary advanced concepts for aeronautics. National Aeronautics and Space Administration. URL: [http://history.nasa.gov/monograph39/mon39\\_a.pdf](http://history.nasa.gov/monograph39/mon39_a.pdf) (дата обращения: 14.03.2012).
4. Livne E. Future of Airplane Aeroelasticity // J. of Aircraft. 2003. Vol. 40, № 6. P. 1066–1092.
5. Crawley E. F. Intelligent structures for aerospace: a technology overview and assessment // AIAA J. 1994. Vol. 32, № 8. P. 1689–1699.
6. Static Shape Control for Adaptive Wings / F. Austin, M. J. Rossi, T. W. Van Nostrand and G. Knowles // AIAA J. 1994. Vol. 32, № 9. P. 1895–1901.
7. Demenkov M. N., Goman M. G. Bifurcation control of aeroelastic limit cycle oscillations // Proc. of second IFAC meeting related to analysis and control of chaotic systems (CHAOS'09). London, 2009.
8. Никонов А. Н., Терехов В. А. О проблеме начальных условий в управляемых системах с нелинейной динамикой и особенностями канала управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 2. С. 2–10.

A. N. Nikonov, K. M. Zheronkin

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM FOR A NON-LINEAR OBJECT WITH A FORCE LIMITED ACTUATING DEVICE

*A problem of uncertainties in the control channel and a possible way of its solution using the adaptive control methods are described. As an example, a control problem of the flutter is considered, for which it is essential to suppress vibrations at a high speed. The algorithm is based on a neural network.*

**Neural network control system, flutter, uncertainties in control channel, limitations in the control channel**

УДК 681.5.015.42

А. С. Писарев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Метод автоматического анализа траекторий движения стохастических динамических систем

Разработан метод автоматического анализа траекторий движения стохастических динамических систем, в котором тип движения определяется с помощью модифицированного информационного критерия Akaike. Параметры моделей идентифицируются методом взвешенных наименьших квадратов с модифицированной весовой функцией на основе решения обратной задачи с ограничениями на значения параметров. Разработанный метод реализован в сетевой инфраструктуре с веб-интерфейсом и предоставляет возможность студентам и исследователям выполнять анализ экспериментальных данных в автоматическом режиме.

### Идентификация, метод средних квадратов смещений, анализ траекторий

Целью работы является разработка метода автоматического анализа траекторий движения стохастических динамических наносистем.

Исследования в области стохастической динамики широко освещены в литературе, включая фундаментальные труды – А. Н. Колмогорова, В. С. Пугачева, Я. Г. Синая, Р. Л. Стратоновича, Н. Винера, К. Ито, Р. Калмана, П. Леви, Б. Мандельброта, которые, в свою очередь, опирались на работы А. Эйнштейна, М. Смолуховского и П. Ланжевена в исследованиях броуновского движения и диффузионных процессов.

Проблема количественной оценки типов и параметров движения сложных стохастических динамических систем, например дробного броуновского движения (ДБД, fractional Brownian motion – fBm), рассматривается во многих областях применения: телекоммуникации, физике, химии, биологии и других.

Эта проблема осложняется тем, что точность количественных оценок зависит от многих неучтенных факторов неопределенности.

В работе представлен разработанный метод компьютерного анализа параметров движения частиц вдоль траекторий на основе применения предложенного А. А. Вавиловым понятия ранга неопределенности и принципа последовательного раскрытия структурной, параметрической и сигнальной неопределенности [1], [2].

В настоящее время особый интерес представляют программы автоматизированного SPT-(single particle tracking) анализа большого объема

экспериментальных данных, получаемых в лабораториях [9]. Применяются различные подходы и методы на этапе SPT-анализа траекторий – идентификации типов и параметров моделей движения частиц [3]–[10].

В данной работе разработан метод взвешенных средних квадратов смещения (weighted mean squared displacement – WMSD) с модифицированными весовой функцией и критерием Akaike для анализа траекторий частиц [11] на основе единого подхода к идентификации четырех типов моделей движения: броуновская диффузия (D), ограниченная диффузия (DR), аномальная субдиффузия (DA), направленное движение с диффузией (DV) [8]. Ошибки локализации позиций частиц в траекториях учитываются добавлением к перечисленным моделям слагаемого  $k\sigma^2$ , где  $k$  – размерность (1D, 2D, 3D),  $\sigma$  – стандартное отклонение, что условно обозначено символом «E» (DE, DVE, DAE, DRE) [8], [9].

Идентификация параметров моделей движения осуществляется на основе решения обратной задачи с ограничениями на допустимые значения параметров (положительные значения коэффициентов диффузии, квадратов ошибок локализации, показателя субдиффузии, радиуса ограниченного движения) и метода взвешенных наименьших квадратов (weighted least squares method – WLS-метод) [12], [13].

Для корректного выбора структуры модели движения используется модифицированный информационный критерий Akaike [14], [15], в ко-

тором при сравнительной оценке качества моделей учитывается их сложность и точность описания экспериментальных данных.

Разработанный метод реализован в сетевом программном комплексе, доступ к которому осуществляется с использованием веб-интерфейсов.

**Модели движений.** Приблизительная оценка значений коэффициентов диффузии и скоростей движения может производиться в соответствии с техникой идентификации параметров моделей по экспериментальным данным [3]. Среднеквадратические ошибки локализации частиц могут быть учтены в правой части уравнений [8]. Аппроксимация MSD-моделями показывает хорошие результаты для траекторий движения частиц с большими значениями коэффициентов диффузии при малых значениях ошибки локализации, в других случаях рекомендуется применение моделей, учитывающих ошибки локализации [8], [9].

Модели  $M = \{M_1, \dots, M_m\}$  содержат в левой части уравнений средний квадрат смещения (mean square displacement – MSD), а в правой части – зависимость от временного лага  $l \Delta t$  MSD и параметров: коэффициента диффузии (D), скорости (V) и др. [5], [8], [11].

Модель свободной диффузии (D) описывает случайное движение частицы (Free 2-D diffusion):

$$\langle r^2 \rangle = kD l \Delta t, \quad (1)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{мкм}^2/\text{с}$ ;  $l \Delta t$  – временной лаг;  $k = 2 \dim$ ,  $\dim = 1, 2, 3$  – размерность пространства (1 – одномерное, 2 – двухмерное, 3 – трехмерное).

Модель направленного движения (V) описывает направленное движение частиц (Directed motion):

$$\langle r^2 \rangle = (v l \Delta t)^2, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость перемещения,  $\text{мкм}/\text{с}$ .

Модель направленного движения с диффузией (DV – Continuous directed motion with free 2-D diffusion) характеризует сложное движение, в котором присутствуют как случайные блуждания частицы в соответствии с моделью D (1), так и направленные движения с моделью V (2):

$$\langle r^2 \rangle = kD l \Delta t + (v l \Delta t)^2. \quad (3)$$

Модель аномальной диффузии (DA – Anomalous diffusion) описывает движение частицы под воздействием разнообразных биофизических процессов, в

том числе препятствий на пути движения и других связывающих событий, которые могут иметь сложное механистическое объяснение:

$$\langle r^2 \rangle = kD (l \Delta t)^\alpha, \quad 0 < \alpha < 1. \quad (3)$$

Модель ограниченной диффузии (DR – Confined 2-D diffusion) характеризует движение частицы, ограниченное в пространстве:

$$\langle r^2 \rangle = R_C^2 \left( 1 - e^{-kD l \Delta t / R_C^2} \right),$$

где  $R_C$  – радиус ограниченного движения частицы,  $\text{мкм}$ .

Модель свободной диффузии с ошибкой (DE-Free 2-D diffusion plus error) характеризует диффузионное движение при наличии ошибок локализации позиции частицы со стандартным отклонением  $\sigma$ :

$$\langle r^2 \rangle = kD l \Delta t + k\sigma^2.$$

Модель направленного движения (VE) характеризует направленное движение при наличии ошибок локализации позиции частицы со стандартным отклонением  $\sigma$ :

$$\langle r^2 \rangle = (v l \Delta t)^2 + k\sigma^2.$$

Модель направленного движения с диффузией и ошибкой (DVE – Continuous directed motion with free 2-D diffusion plus error) характеризует направленное движение с диффузией при наличии ошибок локализации позиции частицы со стандартным отклонением  $\sigma$ :

$$\langle r^2 \rangle = kD l \Delta t + (v l \Delta t)^2 + k\sigma^2.$$

Модель аномальной диффузии (DAE – Anomalous diffusion plus error) характеризует движение с аномальной диффузией при наличии ошибок локализации позиции частицы со стандартным отклонением  $\sigma$ :

$$\langle r^2 \rangle = kD (l \Delta t)^\alpha + k\sigma^2, \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Модель ограниченной диффузии (DRE – Confined 2-D diffusion plus error, Corraled motion) характеризует движение частицы, ограниченное в пространстве при наличии ошибок локализации позиции частицы со стандартным отклонением  $\sigma$ :

$$\langle r^2 \rangle = R_C^2 \left( 1 - e^{-kD l \Delta t / R_C^2} \right) + k\sigma^2.$$

В формулах используется обозначение коэффициента  $k = 4$  для случая 2-мерной (2D) диффузии.

Качественный предварительный анализ позволяет по виду зависимости MSD от временного лага оценить тип движения частицы.

Зависимость линейного вида может свидетельствовать о наличии свободной диффузии, в то время как параболическая зависимость – о направленном движении.

Уравнение аномальной диффузии (3) при  $0 < \alpha < 1$  характеризует субдиффузию.

**Метод средних квадратов смещений (MSD).** Средний квадрат смещения (mean square displacement – MSD) для временного лага  $l \Delta t$  MSD в микрометрах в квадрате определяется по формуле

$$\langle r^2 \rangle_{l \Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^{N-l+1} r_{i,l \Delta t}^2}{N-l+1}, \quad l=1, 2, \dots, N.$$

Дисперсия  $\sigma_{l \Delta t}^2$  (также в микрометрах в квадрате):

$$\sigma_{l \Delta t}^2 = \sum_{i=1}^{N-l+1} \left( r_{i,l \Delta t}^2 - \langle r^2 \rangle_{l \Delta t} \right) / (N-l).$$

Весовой коэффициент среднего квадрата смещения MSD для  $l$ -го временного лага

$$w_l = \frac{1}{\sigma_{l \Delta t}^2}.$$

Нормализованный весовой коэффициент среднего квадрата смещения MSD

$$w'_l = w_l / \sum_{l=1}^{N-1} w_l.$$

Нормализованные весовые коэффициенты применяются в методе взвешенных наименьших квадратов при идентификации модели движения по экспериментальным траекториям.

К особенностям зависимости средних квадратов смещения от временного лага относятся не-постоянство среднеквадратических ошибок и снижение достоверности при больших значениях лага. В связи с этим была применена модификация весовой функции, в которой  $\sigma_{l \Delta t}^2$  скорректирована с учетом значения доверительного интервала, зависящего от числа усредненных точек.

**Метод средних по ансамблю квадратов смещений (ETA-MSD).** Средний по ансамблю траекторий квадрат смещения (ensemble time

averaged mean square displacement – ETA-MSD) определяется усреднением MSD индивидуальных траекторий ансамбля по следующей формуле [8]:

$$\bar{\rho}_n^{(ens)} = \frac{1}{N_T(N-n)} \sum_{j=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N-n} \left( \mathbf{r}_{i+n}^{(j)} - \mathbf{r}_i^{(j)} \right)^2 = \\ = \frac{1}{N_T} \sum_{j=1}^{N_T} \bar{\rho}_n^{(j)}, \quad n=1, \dots, N-1,$$

где  $n$  – номер позиции в траектории;  $N$  – длина наибольшей траектории ансамбля, равная числу позиций в траектории;  $\mathbf{r}_i^{(j)}$  –  $i$ -я позиция в  $j$ -й траектории;  $\bar{\rho}_n^{(j)}$  – значение MSD в позиции  $n$ , вычисленное для  $j$ -й индивидуальной траектории.

Дисперсия  $\sigma_n^2$  определяется по формуле

$$\sigma_n^2 = \sum_{j=1}^{N_n} \left( \bar{\rho}_n^{(j)} - \bar{\rho}_n^{(ens)} \right)^2 / (N_n - 1),$$

где  $N_n$  – число траекторий, длина которых более или равна  $(n+1)$ .

При идентификации модели движения по ETA-MSD с использованием метода взвешенных наименьших квадратов применяются нормализованные весовые коэффициенты:

$$w'_n = w_n / \sum_{n=1}^{N_{\max}} w_n,$$

где  $w_n = \frac{1}{\sigma_n^2}$  – весовой коэффициент.

При идентификации параметров модели движения частиц с использованием функции ETA-MSD (ensemble time averaged mean square displacement) используется модификация критерия взвешенных сумм квадратов остатков (WRSS), учитывающая дополнительно вариабельность средних квадратов смещений всех индивидуальных траекторий с номером  $n$  позиции в траектории:

$$WRSS = \sum_{i=1}^M \frac{\bar{w}_n^{(ens)}}{\sum_{n=1}^{N_T} \bar{w}_n^{(ens)}} \bar{w}'_i \left( y_i^{\text{model}} - y_i^{\text{data}} \right)^2,$$

где  $\bar{w}'_i$  – нормализованный коэффициент веса  $i$ -го измерения:

$$\bar{w}'_i = \bar{w}_i / \sum_{j=1}^M \bar{w}_j, \quad \bar{w}_i = 1 / \sum_{n=1}^{N_T} \sigma_n^2.$$

**Метод структурной идентификации.** Для корректного выбора модели типа движения частицы используется модифицированный информационный критерий Akaike (AICc) [14], [15]. В этом критерии при сравнительной оценке качества моделей учитывается их сложность и точность описания экспериментальных данных.

Для структурной и параметрической идентификации моделей с ошибками локализации применен метод обратных задач в условиях неопределенности [12], [13] с модифицированными информационными критериями BIC, AICc, R2adj [14], [15].

В модифицированном информационном критерии Akaike (AIC<sub>cw</sub>) при оценке качества моделей учитывается сложность (число параметров) и точность описания экспериментальных данных:

$$AIC_{cw} = 2k + n \ln \frac{WRSS}{n} + \frac{2k(k+1)}{n-k-1},$$

где  $k$  – число параметров модели;  $n$  – размер выборки [8].

Критерий взвешенной суммы квадратов остатков (WRSS):

$$WRSS = \sum_{i=1}^M w'_i \left( y_i^{\text{model}} - y_i^{\text{data}} \right)^2,$$

где  $w'_i$  – нормализованная весовая функция;  $y_i^{\text{model}}$ ;  $y_i^{\text{data}}$  – модельные и экспериментальные данные в моменты времени  $t_i$ .

**Результаты.** Метод прошел апробацию на синтетических траекториях, соответствующих вышеуказанным моделям. Результаты эксперимента показали, что метод позволяет правильно определить структуру и значения параметров модели движения частиц в условиях неопределенности.

Метод взвешенных наименьших квадратов с модифицированными весовыми функциями позволил произвести более чем в 10 раз точные оценки значений параметров моделей по сравнению с обычным методом взвешенных наименьших квадратов.

На рис. 1 показан пример траектории с ограниченной диффузией. Погрешность оценки коэффициента диффузии и радиуса ограничивающей сферы составляет менее 1 %.

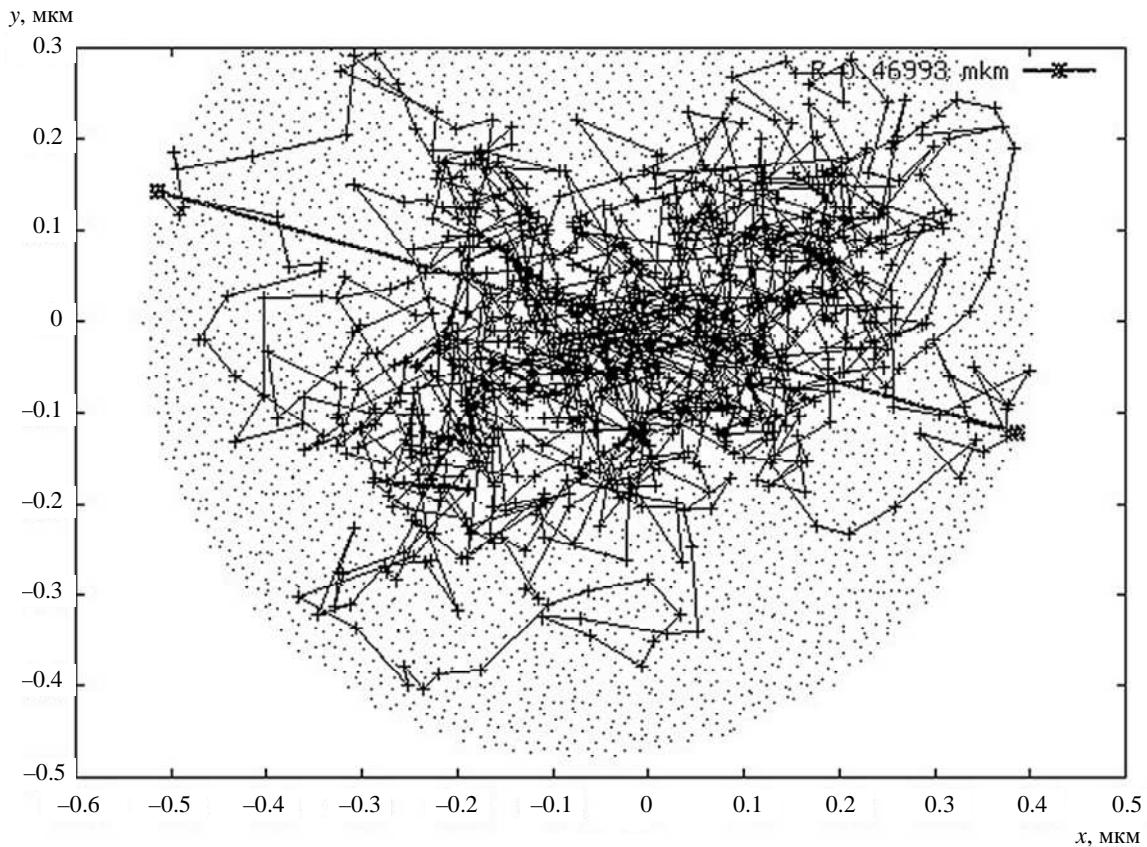


Рис. 1

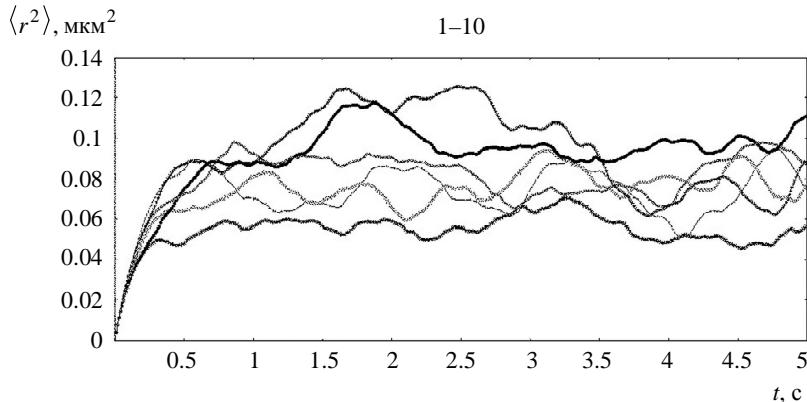


Рис. 2

При определении параметров модели и типа аномальной субдиффузии (рис. 2 – MSD ансамбля траекторий с аномальной диффузией (DA) с заданным параметром  $\alpha = 0.7$ ) были получены результаты с относительной погрешностью менее 1 %. Более точные оценки параметров моделей были получены с использованием ETA-MSD.

**Сетевой программный комплекс.** Метод автоматического анализа траекторий движения реализован в сетевом программном комплексе с веб-интерфейсом и включает следующие компоненты:

- интерфейс для взаимодействия с пользователями с использованием стандартных веб-браузеров;
- веб-сервер (Apache);
- база данных (MySQL) ;
- сервер приложений (Tomcat);
- программные агенты, выполняющие задачи анализа данных (Java).

Пользователь с использованием веб-браузера загружает траектории частиц на сервер. Программные агенты выполняют анализ данных и сохраняют результаты в базе данных.

Незарегистрированный пользователь (гость) может либо ожидать результаты анализа в периодически обновляемой странице веб-браузера, либо получить уведомление по электронной почте. Если пользователь указывает адрес электронной почты, то ему отправляется сообщение со ссылкой на результаты анализа в виде pdf-файла.

Входные данные для WMSD содержатся в загружаемом на сервер файле ансамбля траекторий, представленном в zip- или xml-форматах. Индивидуальные траектории 1D, 2D и 3D могут быть представлены в виде текстового файла (plain text) со значениями отметок времени и координат частицы ( $t, x, y, z$ ) или в формате представления результатов трекинга (ISBI Challenge format).

WMSD выполняет автоматический анализ траекторий и формирует отчет анализа в виде html-страницы и файла в формате pdf, которые содержат:

- результаты анализа усредненных по времени MSD индивидуальных траекторий (time averaged mean square displacement – TA-MSD);
- результаты анализа усредненного по ансамблю траекторий MSD (ETA-MSD);
- средние, минимальные и максимальные значения скоростей частиц в индивидуальных траекториях;
- изображение траекторий частиц.

Результаты ETA-MSD анализа включают:

- тип модели движения;
- значения критериев структурной идентификации AICcw, BICw, R2adjw;
- параметры модели движения (DC – коэффициент диффузии,  $v$  – скорость,  $\alpha$  – показатель экспоненты аномальной субдиффузии,  $Rc$  – размер области ограниченного движения,  $\sigma$  – стандартное отклонение среднеквадратической ошибки локализации частиц);
- график реконструированной зависимости ETA-MSD от временного лага.

Результаты TA-MSD анализа включают:

- для каждой индивидуальной траектории: идентифицированный тип модели движения; параметры модели; значения критериев структурной идентификации AICcw, BICw, R2adjw;
- для ансамбля траекторий: доминирующий тип движения в соответствии с моделями движения; процентный состав траекторий по каждому идентифицированному типу движения и статистические характеристики значений параметров моделей.

Разработан метод взвешенных средних квадратов смещений для анализа стохастических динамических систем по траекториям движения.

Метод реализован в сетевом программном комплексе и прошел апробацию на синтетических траекториях, полученных при моделировании различных типов движений, соответствующих моделям броуновской диффузии, аномальной

диффузии и др. Результаты эксперимента показали, что WMSD позволяет на основе единого подхода корректно определять структуру и параметры стохастических моделей по траекториям движения в условиях неопределенности [11].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов А. А. Структурный и параметрический синтез сложных систем управления / ЛЭТИ. Л., 1979. 94 с.
2. Вавилов А. А., Имаев Д. Х., Фомин Б. Ф. Системное моделирование, анализ и эволюционный синтез сложных систем управления // Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. чл.-кор. АН СССР А. А. Вавилова. М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. С. 5–100.
3. Qian H., Sheetz M. P., Elson E. L. Single particle tracking. Analysis of diffusion and flow in two-dimensional systems // Biophys. j. 1991. Vol. 60, № 4. P. 910.
4. Saxton M. J. Single-particle tracking: the distribution of diffusion coefficients // Biophys. j. 1997. Vol. 72, № 4. P. 1744.
5. Saxton M. J., Jacobson K. Single-particle tracking: applications to membrane dynamics // An. rev. of biophys. and biomolecular structure. 1997. Vol. 26, № 1. P. 373–399.
6. Saxton M. J. A particle tracking meet // Nature methods. 2014. Vol. 11, № 3. P. 247–248.
7. Fractional Brownian motion in crowded fluids / D. Ernst, M. Hellmann, J. Köhler, M. Weiss // Soft Matter. 2012. Vol. 8, № 18. P. 4886–4889.
8. Michalet X. Mean square displacement analysis of single-particle trajectories with localization error: Brownian motion in an isotropic medium // Phys. rev. E. 2010. Vol. 82, № 4. P. 1–26.
9. Bayesian approach to MSD-based analysis of particle motion in live cells / N. Monnier, S. M. Guo, M. Mori, J. He, P. Lénárt, M. Bathe // Biophys. j. 2012. Vol. 103, № 3. P. 616–626.
10. Tuerkcan S., Alexandrou A., Masson J. B. A Bayesian inference scheme to extract diffusivity and potential fields from confined single-molecule trajectories // Biophys. j. 2012. Vol. 102, № 10. P. 2288–2298.
11. Писарев А. С. Метод оценки параметров движения микрочастиц по траекториям в условиях неопределенности // Тр. XV Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015). Санкт-Петербург. 2015. СПб., 2015. С. 29–33.
12. Писарев А. С. Применение многоагентных технологий и эвристических методов в задачах нечеткой многокритериальной оптимизации // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 5. С. 72–79.
13. Писарев А. С., Самсонова М. Г. Метод решения многокритериальных обратных задач в условиях неопределенности // Биофизика. 2013. Т. 58, № 2. С. 157–166.
14. Akaike H. A new look at the statistical model identification // Selected Papers of Hirotugu Akaike. New York: Springer, 1998. P. 215–222.
15. Burnham K. P., Anderson D. R. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Springer Science & Business Media, 2002. 515 p.

A. S. Pisarev

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## AUTOMATIC ANALYSIS METHOD OF STOCHASTIC DYNAMICAL SYSTEMS MOTION TRAJECTORIES

*A method for automatic analysis of the trajectories of stochastic dynamical systems, in which the type of movement is determined by the modified information criteria Akaike, and the identification of the model parameters is carried out by the method of weighted least squares with modified weight function on the basis of the inverse problem solution with constraints on the parameter values. The developed method is implemented in the network infrastructure with Web-based interface and provides an opportunity for students and researchers to carry out the analysis of experimental data in the automatic mode.*

**Identification, the method of the mean square displacement, the analysis of the trajectories**

К. В. Игнатьев, А. В. Путов, М. М. Копычев, В. В. Путов, Н. А. Русяев  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Нечеткая система автономного управления движением робота с компьютерным зрением и всенаправленными колесами

*Рассматривается построение двухуровневой компьютерной автономной нечеткой системы управления движением трехколесного робота с техническим зрением. Разработан действующий экспериментальный образец робота, продемонстрированный на выставке «ВУЗПРОМЭКСПО-2015».*

### Нечеткая логика, система автономного управления, техническое зрение, мобильный робот

В статье представлен автономный робот с компьютерным зрением и системой управления, основанной на нечеткой логике. Робот может передвигаться по заранее не определенной траектории, избегая столкновений с препятствиями.

Робот имеет классическую трехколесную конструкцию, содержащую два передних независимых ведущих мотор-колеса с бесщеточными двигателями постоянного тока и одно пассивное заднее колесо, закрепленное в подшипниковой опоре с возможностью самопроизвольного поворота в соответствии с направлением движения платформы. Данная конструкция, приведенная на рис. 1, позволяет удобно управлять движением робота, с сохранением достаточного запаса его траекторной устойчивости.

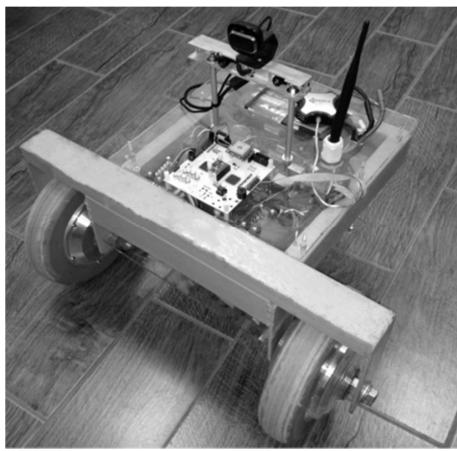


Рис. 1

Роботы, имеющие подобную конструкцию и оснащенные системой автономного управления их перемещениями в условиях сложной обстановки при помощи датчиков распознавания пре-

пятствий (технического зрения), могут применяться в сфере обслуживания, например на складских участках производства [1].

Программирование движения робота осуществляется поэтапно согласно иерархической структуре системы управления, приведенной на рис. 2 и включающей следующие компоненты:

- верхний уровень управления, представленный одноплатным компьютером;
- нижний уровень, представленный системой управления движением робота;
- датчики для получения информации об окружающем пространстве.

На вершине иерархии располагается одноплатный компьютер (блок 1 на рис. 2), выполненный на базе процессора Intel Celeron с установленной операционной системой Linux Mint. Информацию об окружающем пространстве робот получает с помощью системы стереозрения (блок 2) [2].

Управляющее воздействие передается с одноплатного компьютера на буферную плату управления (блок 3) по последовательному протоколу RS-232. Платы управления (блок 5) мотор-колесами (блок 6) получают задание с буферной платы управления, на которой установлено AVR микроконтроллер «Atmel Atmega 128 A» (блоки 4, 7), объединенных по протоколу I<sup>2</sup>C, а также датчики (блок 8). Первый микроконтроллер обрабатывает данные с датчиков и передает их на второй микроконтроллер, который формирует сигнал управления для мотор-колес, исходя из показаний датчиков и сигнала управления, поступающего с одноплатного компьютера верхнего уровня. Управление мотор-колесами осуществляется с помощью сигнала с широтно-импульсной модуляцией [3].

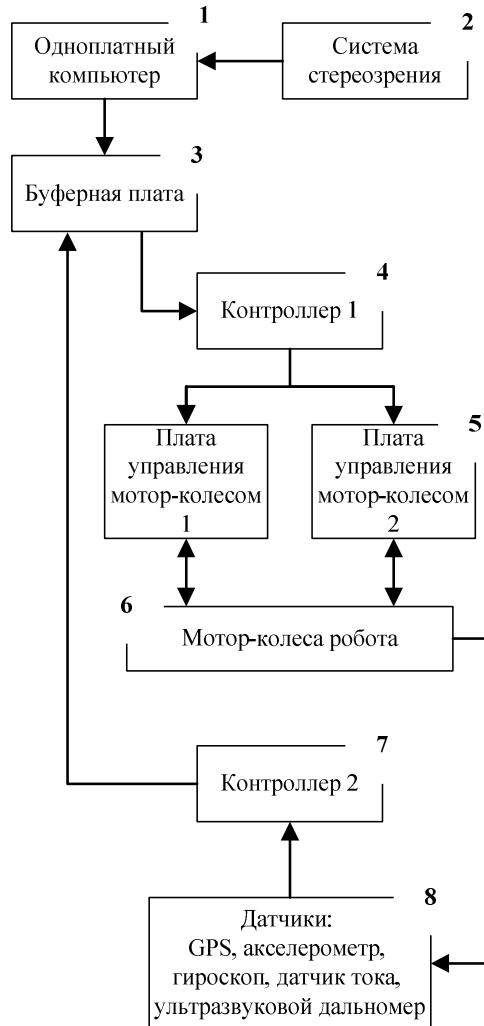


Рис. 2

Для ориентации в пространстве применяется стереокамера. Она заменяет использование отдельной камеры глубины для ориентации в пространстве и RGB-камеры для распознавания образов, совмещая их функционал в одном устройстве. Для работы с исходными изображениями, полученными с двух камер, применены алгоритмы Block Matching и Semi-Global Block Matching, которые показывают удовлетворительные результаты по критериям скорости и точности вычислений. Принцип их работы основан на поиске блоков пикселей с левого изображения на эпиполярной линии на правом изображении, и вычисления расстояния на основе разности координат блоков на двух изображениях [4]. Таким образом, можно создавать 3D-реконструкции окружающего пространства.

Рассмотрим модель движения робота на плоскости, приведенную на рис. 3, где приняты следующие обозначения:  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы между вектором скорости  $v$  робота и линиями направления

расположения препятствия и точки назначения соответственно;  $P$  и  $L$  – расстояния до препятствия и цели соответственно;  $C$  – центр масс робота;  $\omega_r$  и  $\omega_l$  – угловые скорости вращения правого и левого колес соответственно.

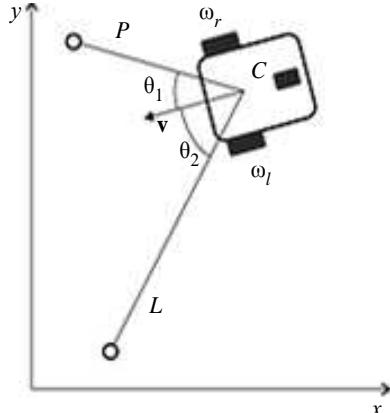


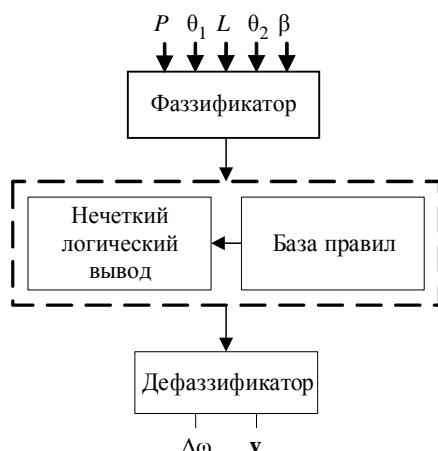
Рис. 3

При движении по незнакомой местности стереокамера помогает определять положение препятствий и расстояние до них. Проблема определения расстояния может быть решена также с помощью ультразвуковых дальномеров, расположенных по периметру корпуса робота и обеспечивающих вычисление расстояния до препятствий, расположенных во всех направлениях. Для достижения точки назначения робот должен динамически изменять свою траекторию, избегая столкновения с препятствиями и изменения при этом свое пространственное положение и скорости ведущих колес. В целях проектирования системы управления предлагается использовать законы нечеткой логики для управления движением робота, исходя из его положения в пространстве, скоростей ведущих колес, а также угла наклона плоскости.

При появлении препятствия в зоне видимости робота система управления должна вырабатывать управляющее воздействие на изменение траектории движения робота с учетом направления движения, удаленности текущего положения робота от препятствия и расстояния до точки назначения. Если препятствие оказывается слишком близко, робот замедляет скорость движения и меняет пространственную ориентацию. Целью управления служит обезд преграды по минимальному радиусу, позволяющему предотвратить столкновение с ним, минимизируя одновременно общую длину траектории движения до точки назначения [5].

Таким образом, поведение робота формулируется набором нечетких правил. Нечеткая система управления получает на вход информацию о расстоянии до препятствия  $P$ , угол между вектором скорости  $v$  робота и направлением расположения препятствия  $\theta_1$ , расстояние до препятствия  $L$ , угол между вектором скорости  $v$  робота и направлением точки назначения  $\theta_2$ . Выходными параметрами нечеткого регулятора должны быть разность угловых скоростей правого и левого колес  $\Delta\omega = \omega_r - \omega_l$  и линейная скорость перемещения робота  $v$ . Углы приняты положительными, когда препятствие или точка назначения находятся по правому борту робота, и отрицательными в случае их наклонения по левому борту.

Обобщенная схема нечеткого регулятора приведена на рис. 4, где дополнительно введено обозначение угла наклона плоскости  $\beta$ .



Входные переменные нечеткого регулятора  $P$  и  $L$  (удаленность препятствия и точки назначения, соответственно) выражаются с использованием двух лингвистических переменных «близко» и «да-

леко». Углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  определяются лингвистическими переменными «слева» и «справа». Угол наклона  $\beta$  выражается тремя лингвистическими переменными: «положительный», «отрицательный» и «нулевой». Разность угловых скоростей левого и правого колес  $\Delta\omega$  выражается переменными «поворот по часовой стрелке», «поворот против часовой стрелки» и «движение прямо». Линейная скорость  $v$  выражается переменными «малая» и «большая». Далее составляются нечеткие правила.

Пример траектории движения (на плоскости) робота представлен на рис. 5, где черным кружком обозначена точка назначения робота, белым – препятствие на пути его движения.

Действующий экспериментальный образец робота разработан и продемонстрирован на выставке «ВУЗПРОМЭКСПО-2015».

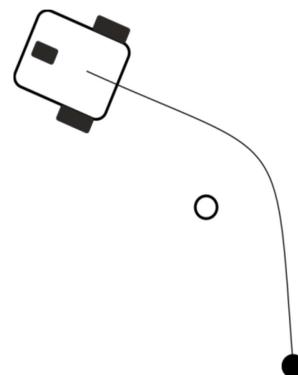


Рис. 5

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России – задания № 2014/187 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wurman P., D'Andrea R., Mountz M. Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses // Proc. of the 19<sup>th</sup> nat. conf. on Innovative applications of artificial intelligence. 2007. Vol. 2 (IAAI'07) / Ed. by William Cheetham. AAAI Press. Vancouver, British Columbia Description. P. 1752–1759.
- Kopichev M., Ignatiev K., Putov A. Control and stabilization system for unmanned aerial vehicles // Proc. of the 2<sup>nd</sup> IFAC Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). Nov. 20–23, 2013. Compiègne, France. IFAC, Elsevier, 2013. P. 240–243.
- Mobile manipulation platform control / V. Putov, A. Putov, K. Ignatiev, M. Kopichev, J. Asiedu-Baah // Intern. rev. of Automatic Control (IREACO). 2014. Vol. 7, № 4. P. 412–419.
- Stereo vision using the OpenCV library / S. Droppeleman, M. Huetting, S. Latour, M. Van der Veen // URL: <https://tjpstereovision.googlecode.com/hg-history/551f-9b6e2e9549337e7c26b4bac6a9a69a6c509c/doc/verslag.pdf>.
- Путов В. В., Лебедев В. В., Козлов Ю. К. Адаптивно-нейронный подход в задачах повышения эф-

фективности двухкоординатных систем стабилизации и наведения / Вторая междунар. электрон. науч.-техн. конф. «Автоматизация и информатизация в

машиностроении» (АИМ 2001): сб. тр. Тула: Изд-во ТулГТУ, 2001. С. 240–242.

---

K. V. Ignatiev, A. V. Putov, M. M. Kopichev, V. V. Putov, N. A. Rusyaev  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

*Deals with the construction of a two-level stand-alone computer fuzzy traffic control system three-wheeled robot with a technical vision. Designed valid experimental model of the robot demonstrated at the exhibition "VUZPROMEKSPO-2015".*

**Fuzzy logic, autonomous control system, machine vision, mobile robot**

---



УДК 62-581

Р. М. Нуриахметов  
ООО «НПФ „Ракурс“» (Санкт-Петербург)

В. А. Новиков  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Системы управления движением подъемно-транспортных машин с реализацией способов предотвращения раскачивания груза

Представлен обзор способов предотвращения колебаний груза при передвижении подъемно-транспортных машин. Данна классификация систем управления такими машинами по методам предотвращения раскачивания груза. Рассмотрены примеры реализации различными электротехническими компаниями указанных систем управления.

### Подъемно-транспортные машины, системы управления, демпфирование колебаний груза

При эксплуатации подъемно-транспортных машин (кранов), работающих в повторно-кратковременном режиме, возникают явления раскачивания груза на стальных канатах, уменьшающие производительность погрузочно-разгрузочных работ. За последние десятилетия было предложено множество способов решения задачи успокоения колебаний груза. Эти способы можно разделить на три группы. *Первая группа* предусматривает использование конструктивных механических устройств подвеса груза, например применение:

- дополнительного оттяжного каната с противовесом, который создает противодействие поперечному раскачиванию груза и меняет длину при ручном или автоматическом регулировании;
- демпферов, устанавливаемых на подвесе;
- пространственной запасовки захвата, когда груз подвешен за четыре угла, применяемой для перемещения контейнеров;
- полужесткого или жесткого подвеса.

К недостаткам первой группы способов можно отнести возникновение дополнительных динамических нагрузок на конструкцию грузоподъемного механизма при эксплуатации, а также уменьшение грузоподъемности крана из-за увеличения массы подвеса.

Ко *второй группе* относятся электромеханические способы, основанные на ручных действиях оператора в соответствии с инструкциями при управлении процессом перемещения груза. Эти действия заключаются в создании дополнительных движений механизмов крана с целью быстрого гашения колебаний груза, например приложением противомомента к механизму на интервалах времени разгона и торможения груза. Однако такие способы приводят к чрезмерному износу механических узлов приводов и частым поломкам муфт и двигателей. К недостаткам способов можно также отнести утомляемость оператора и, как следствие, снижение качества управления.

В последнее время получила распространение *третья группа* способов – электромеханического предотвращения колебаний с помощью систем автоматического управления движением электроприводов крановых механизмов. Данную группу можно разделить на две подгруппы – с разомкнутыми и с замкнутыми системами управления соответственно.

К разомкнутым системам можно отнести способы, основанные на использовании оптимального управления, в частности принципа максимума Понтрягина, для определения управляющего воздействия. Выполняют оптимизацию системы

управления по быстродействию, при которой механизм разгоняется и тормозится до заданной скорости за минимальное время, и к концу переходного процесса угол отклонения груза от вертикали и его производная становятся равными нулю. Расчет функции управления силой (моментом), основанный на принципе максимума Понтрягина, представлен в [1].

Другие способы основаны на недопущении возбуждения колебаний установкой в цепь разомкнутого управления формирующих фильтров (шейпинг-фильтров), настроенных на частоту колебаний груза [2], [3]. Алгоритм работы шейпинг-фильтров основан на временном перераспределении силового воздействия на механизм крана, например на тележку на этапах разгона и торможения, при сохранении неизменного суммарного воздействия. За счет удлинения времени перехода тележки с одной скорости на другую обеспечивается сдвиг управляющего воздействия на период и/или полпериода вычисленных колебаний груза и при наложении этого сдвига на колебания груза, в идеальном случае, – полное их подавление. К наиболее распространенным шейпинг-алгоритмам относятся: ZV-shaper (Zero-Vibration shaper), ZVD-shaper (Zero-Vibration and Derivative shaper), ZVDD-shaper (Zero-Vibration and Derivative-Derivative shaper). В [3] приводится сравнение этих методов посредством моделирования воздействия силы, сформированной по указанным алгоритмам, на тележку с подвешенным на канате грузом. На рис. 1 показаны графики изменений положения тележки (рис. 1, а) и угла отклонения груза (рис. 1, б) с шейпинг-фильтрами ZV, ZVD и ZVDD.

Еще одной разновидностью разомкнутых систем демпфирования колебаний груза являются системы управления, основанные на формировании специализированных диаграмм ускорения. Принцип работы таких систем описан в [4].

К достоинствам разомкнутых систем управления можно отнести меньшую сложность технической реализации и, как следствие, меньшую стоимость по сравнению с замкнутыми системами. Недостатком разомкнутых систем является ограничение на область применения, поскольку при эксплуатации объектов в среде со значительным влиянием случайных факторов, таких как ветровая нагрузка или частая смена длины подвеса груза на канате и, как следствие этого, изменение частоты колебаний, применение систем без обратной связи может оказаться неэффективным или даже послужить причиной возникновения аварийных ситуаций.

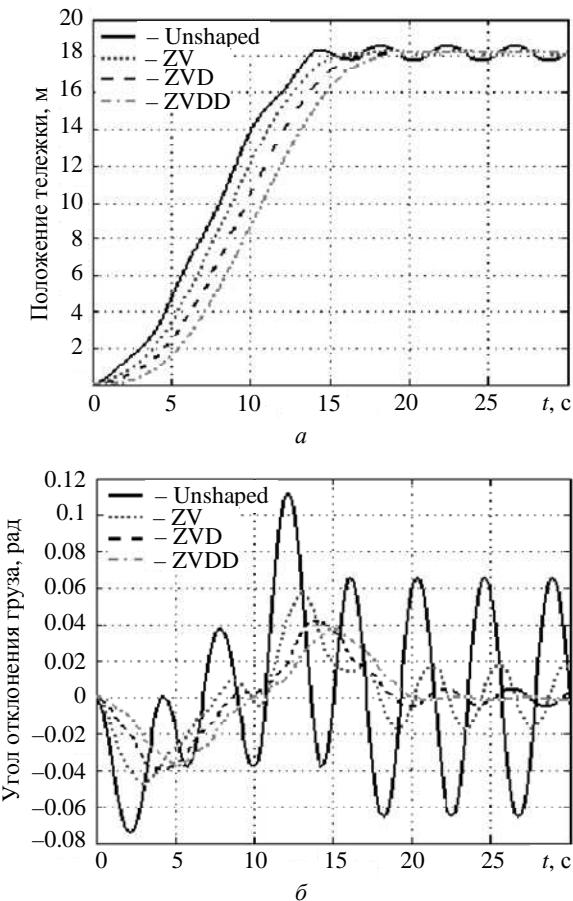


Рис. 1

Замкнутые системы управления демпфированием колебаний груза основаны на регулировании угла отклонения груза с использованием разных алгоритмов управления [5]–[8]. Данные способы можно разделить на два вида:

- 1) с заданным алгоритмом и программой управления, не изменяющимися в процессе движения груза;

- 2) гибким алгоритмом и программой управления, при которых программа управления краном может корректироваться в зависимости от внешних условий в процессе движения груза.

Наиболее перспективен второй вид способов, основанный на использовании адаптивного управления или нечеткой логики, реализуемой на фаззимодулях программируемых контроллеров, либо на специализированных фаззи-контроллерах. Применение адаптивных систем управления дает возможность использовать функцию демпфирования колебаний груза для кранов, эксплуатируемых в условиях с большой неопределенностью внешних воздействий, например на открытом воздухе. Структура системы управления краном с фаззи-контроллером представлена на рис. 2 [6]. В системе измеряются или оцениваются следующие параметры и переменные: длина подвеса груза, его

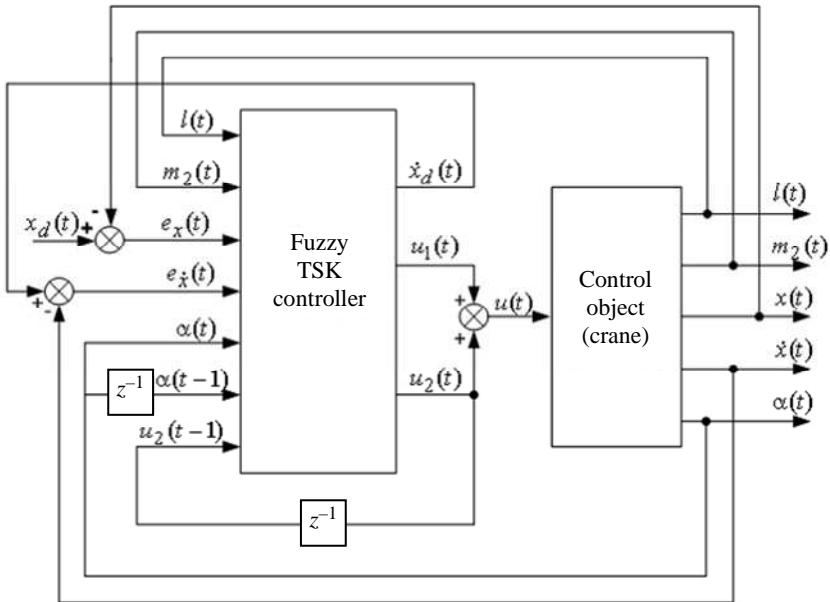


Рис. 2

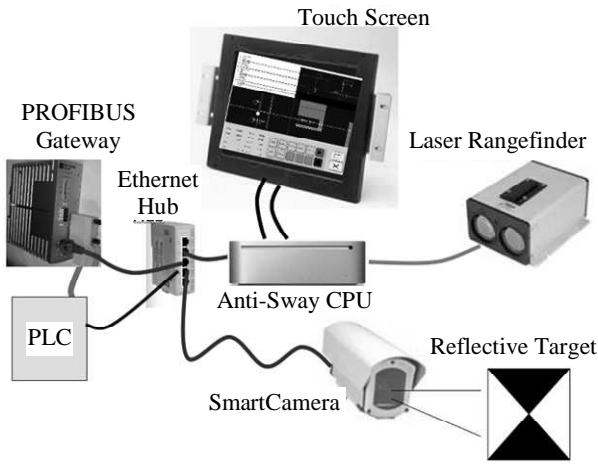


Рис. 3

масса и угловое положение, линейные положение и скорость тележки.

В настоящее время некоторыми электротехническими компаниями разработаны в качестве товарных продуктов собственные системы демпфирования колебаний груза. К их числу относится система «Anti-Sway Crane Control» производства компании «Smart Crane» [8]. Она представляет собой комплексный продукт, включающий в себя: специальное программное обеспечение, ПЛК, компьютер, промышленный терминал оператора, лазерные и видеодатчики, концентраторы и маршрутизаторы сетей. Структура технических средств системы представлена на рис. 3.

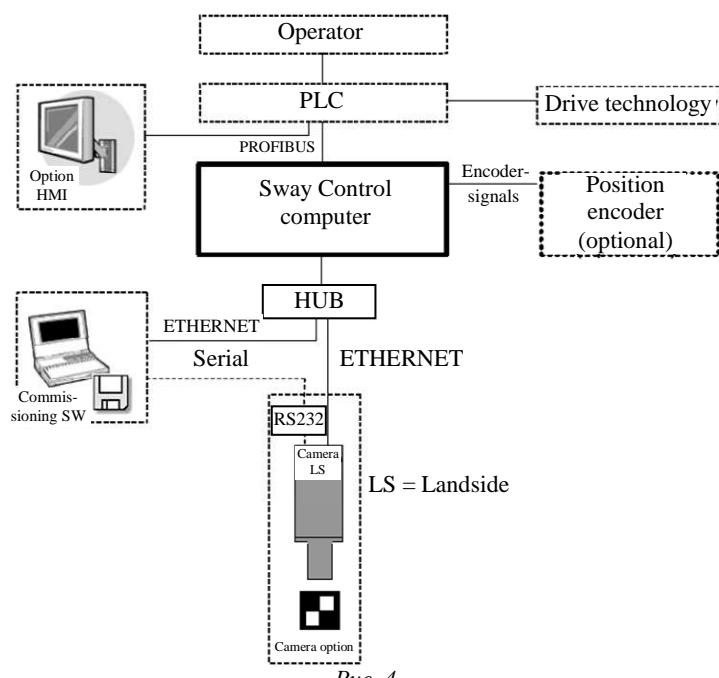


Рис. 4



Рис. 5

Аналогичное решение имеет фирма «Siemens» [7]. Система управления краном «SIMOCRANE» реализована на базе быстродействующей микропроцессорной системы. В качестве входных величин используются данные: положения моста и тележки, длина каната, масса груза, определяемый инфракрасным датчиком угол отклонения груза.

К достоинствам данной системы можно отнести: возможность управления в ручном и в автоматическом режиме, а также возможность измерения угла отклонения груза сразу по двум осям. Структура системы управления «SIMOCRANE» представлена на рис. 4.

К недостаткам последних двух решений относятся высокая сложность, дороговизна и необходимость в высококвалифицированном обслуживающем персонале, который должен обеспечивать перепрограммирование контроллеров системы управления.

На базе оборудования компании «Schneider Electric» проблема раскачивания груза решается с помощью крановой карты VW3A3510 [9], [10]. Частотно-регулируемые приводы «Altivar 71», используемые для подъема груза, перемещений

грузовой тележки и крана, соединены между собой и с крановой картой посредством промышленной сети «CANopen».

Демпфирование колебаний груза осуществляется специальной встроенной системой, не требующей применения датчиков угла и массы груза и действующей одновременно по двум осям. Достоинства системы – сравнительно невысокая стоимость, а также простота в монтаже и эксплуатации. К недостаткам можно отнести ограничение области применения – только для кранового оборудования, установленного в закрытом помещении.

Для замыкания системы управления по углу отклонения груза от вертикали могут быть использованы датчики, альтернативные средствам лазерного и видеозондирования – акселерометры (датчики ускорения) с интеграторами. Их применение рассматривается в статье [5].

Анализ разнообразных систем управления движением груза в подъемно-транспортных машинах дает возможность классифицировать системы по способам реализации функции предотвращения раскачивания груза. Такая классификация в виде структурной схемы приведена на рис. 5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимяк Р. П., Лещев В. А. Анализ и синтез крановых ЭМС. Одесса: СМИЛ, 2008. 192 с.
  2. Интеллектуальные алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами / А. П. Кузнеццов, А. В. Марков, М. К. Хаджинов, А. С. Шмарловский, Т. В. Гаврилик // Тр. конф. «Open Semantic Technologies for Intelligent Systems». Минск, 2011. С. 493–504.
  3. Raubar E., Vrančić D. Anti-Sway System for Ship-to-Shore Cranes // Strojniški vestnik. 2012. № 5. С. 338–344.
  4. Масандилов Л. Б. Электропривод подъемных кранов. М.: Изд-во МЭИ, 1998. 100 с.
  5. Didik S. P., Endah S. N., M. Nasir. Anti-Sway Control for Haptic Crane for Application of Material Handling by using Active Force Control (AFC) / Department of Mechatronics Engineering, Electronic Engineering Polytechnic Institute of Surabaya (EEPIS), Institute Technology Surabaya (ITS). URL: <https://www.pens.ac.id/downloadmk>.
  6. Smoczek J., Szpytko J. The fuzzy robust anti-sway crane control system // J. of KONBiN. 2009. № 2. P. 87–98.
  7. SIMOCRANE SC Integrated Operating Instructions. // Siemens AG Automation and Drives. Germany, 2011.
  8. SmartCrane™ Anti-Sway Crane Control: Product Descriptions // SmartCrane, LLC. USA, 2010.
  9. Piriou J. Optimizing the productivity of lifting appliance. Anti-sway: controlling the swaying of the load. Schneider Electric SA, 2010.
  10. Altivar 71. Крановая карта VW3A3510: рук. по эксплуатации. Schneider Electric, 2008.
- 

R. M. Nuriakhmetov

Department of electric drive «RPF „RAKURS“» (Saint Petersburg)

V. A. Novikov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## LIFTING MACHINES ANTI-SWAY CONTROL SYSTEMS

*The review of anti-sway control methods is represented. The classification of anti-sway lifting machines control systems is given. Examples of realization of the anti-sway control systems by electrical companies are considered.*

**Lifting machines, control systems, anti-sway control**

---

УДК 621.314.263

М. В. Пронин, И. А. Пименова, А. С. Григорян, В. В. Глушаков  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. Г. Воронцов  
ОАО «Силовые машины»

## Системы самовозбуждения синхронного генератора с двухполярным и однополярным широтно-импульсным преобразователем

*Разработаны модели синхронных генераторов с самовозбуждением с ШИП. При двухполярном ШИП для защиты от коротких замыканий использована особенность процесса – рекуперация энергии в цепь возбуждения. При однополярном ШИП для защиты использованы взрывной предохранитель и разрядное сопротивление. Выполнен анализ режимов работы источника.*

**Синхронный генератор, система самовозбуждения, широтно-импульсный преобразователь, моделирование, система управления**

В электроэнергетических системах (ЭЭС) в качестве источников переменного напряжения используются преимущественно синхронные ге-

нераторы СГ [1]–[14]. СГ выполняются с возбуждением от независимых источников энергии через контактные кольца, а также без контактных колец

с вращающимися возбудителями. В автономных ЭЭС для возбуждения СГ используются системы компаундирования. Во многих случаях СГ выполняются с самовозбуждением.

Самовозбуждение СГ наиболее востребовано в автономных установках, в которых отсутствуют другие источники электроэнергии (передвижные бурильные установки, автономные ветроэлектростанции и др.). При создании СГ с самовозбуждением в числе прочих задач должна быть обеспечена работоспособность защиты при авариях, например при коротких замыканиях (КЗ) обмотки статора (при отсутствии напряжения питания возбудителя).

Наиболее часто в системах возбуждения СГ, а также асинхронизированных машин используются тиристорные полупроводниковые преобразователи [1]–[4], [6]–[10]. Транзисторные системы возбуждения широкого применения пока не нашли, но они имеют сравнительно малые габариты, позволяют существенно повысить быстродействие установок и потому весьма перспективны [1], [5], [12], [14].

В данной статье рассматриваются СГ с различными транзисторными системами самовозбуждения. Нормальные и аварийные режимы работы исследуются на базе математического моделирования.

**Транзисторные системы самовозбуждения СГ с однополярным и двухполярным ШИП.** Рассматриваются транзисторные системы самовозбуждения СГ с широтно-импульсными преобразователями с двухполярным и однополярным ШИП.

Схема установки с трехфазным СГ и транзисторной системой самовозбуждения (СВ) с двухполярным ШИП представлена на рис. 1, где обозначены: напряжение СГ 690 В, частота 50 Гц (при дизельном двигателе) или переменная при вращении от ветроколеса. Возбуждение СГ осуществляется через контактные кольца при питании СВ от обмотки статора. В состав СВ входят: трансформатор Тр, выпрямитель В, фильтр выпрямленного напряжения со сглаживающим дросселем и конденсаторной батареей, двухполярный ШИП на модулях IGBT. Нагрузка СГ представлена трехфазным активно-индуктивным сопротивлением  $Z_L$ .

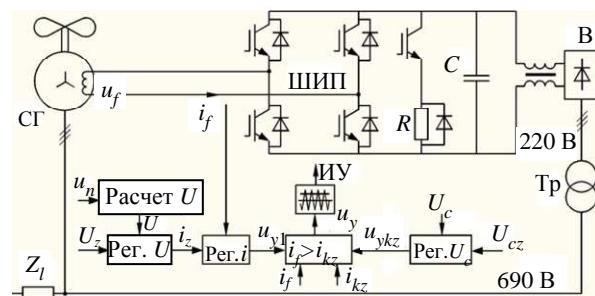


Рис. 1

В системе управления (СУ) имеется контур регулирования напряжения обмотки  $U_{\text{об}}$  статора СГ и подчиненный контур регулирования тока возбуждения  $i_f$ . В СУ входят блок расчета действующего напряжения статора, ПИ-регулятор напряжения СГ (формирует заданный ток возбуждения  $i_z$ ), ПИ-регулятор тока возбуждения (формирует напряжение управления ШИП  $u_y1$ ). При возникновении КЗ обмотки статора включается ПИ-регулятор напряжения конденсатора, который формирует напряжение управления транзисторами ШИП  $u_{ykz}$  (режим рекуперации энергии). Из напряжений управления  $u_y1$  и  $u_{ykz}$  формируется напряжение  $u_y$  в зависимости от наличия или отсутствия КЗ. Напряжение возбуждения  $u_f$  пропорционально напряжению управления. Начальное возбуждение СГ осуществляется от его остаточного напряжения. В нормальных режимах работы установки основная часть энергии СГ передается в нагрузку  $Z_L$ . Энергия возбуждения передается от обмотки статора в обмотку возбуждения через элементы Тр, В и ШИП.

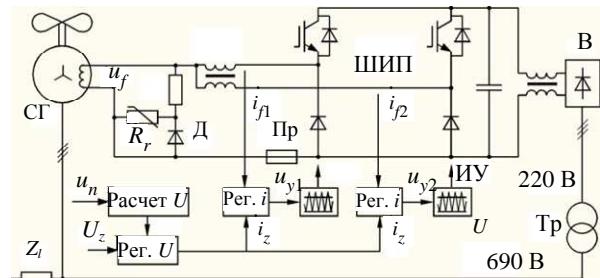


Рис. 2

Схема установки с трехфазным СГ и СВ с однополярным ШИП представлена на рис. 2. ШИП содержит ветви с модулями IGBT, включенные параллельно через уравнительный дроссель Др. Однополярный ШИП не обеспечивает интенсивного гашения токов КЗ, поэтому оно осуществляется замыканием обмотки возбуждения на разрядное сопротивление  $R_r$ . Переход в режим интенсивного гашения токов осуществляется при срабатывании взрывного предохранителя Пр (задержка 2 мс). Диод  $D$  использован для уменьшения потерь в разрядном резисторе, варистор  $R_0$  – для ограничения возможных перенапряжений в цепи возбуждения в аварийных режимах.

**Преобразования схем установок при их моделировании.** При моделировании установки с СГ, СВ и нагрузкой выполняется ее математиче-

ское описание по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам [12]–[14]. На начальном этапе описания установки она представляется схемами замещения. Далее установка разделяется на энергетическую и информационную подсистемы. Энергетическая подсистема разделяется на более простые подсистемы, взаимосвязанные зависимыми источниками напряжения и тока. Следующий этап построения модели заключается в математическом описании подсистем, источников энергии, нагрузок, устройств управления, а также их взаимных связей. Полученные системы уравнений решаются в едином цикле вычислений.

При моделировании установки рис. 1 разделение силовой части схемы на подсистемы осуществляется при замене фаз обмотки статора СГ зависимыми источниками напряжения  $u_n$  ( $n = 1, 2, 3$ ). На следующем этапе преобразования схемы источники  $u_n$  переносятся в фазы нагрузки и в фазы первичной обмотки трансформатора. Пофазные суммы токов нагрузки  $i_{1n}$  и обмотки трансформатора  $i_{t1n}$  ( $n = 1, 2, 3$ ) образуют токи фаз СГ  $i_n$ , которые используются в подсхеме СГ в качестве зависимых источников:

$$\left. \begin{aligned} i_n &= i_{l_n} + i_{t1n}, \\ \frac{di_n}{dt} &= \frac{di_{l_n}}{dt} + \frac{di_{t1n}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Указанная операция позволяет отделить друг от друга СГ, нагрузку и трансформатор (рис. 3).

Другое преобразование схемы на рис. 1 основано на замене конденсатора с током  $i_C$  зависимым источником напряжения  $u_C$ :

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt. \quad (2)$$

Далее источник  $u_C$  переносится в ветвь выпрямленного тока диодного моста, во входную ветвь ШИП и в чоппер. При этом выпрямленный ток диодного моста  $i_d$ , входной ток ШИП  $i_h$  и ток чоппера  $i_R$  образуют ток конденсатора  $i_C$ :

$$i_C = i_d - i_h - i_R. \quad (3)$$

Описанная операция позволяет отделить друг от друга ШИП, конденсаторную батарею, выпрямитель и цепь чоппера, что отображено на рис. 3.

Еще одно преобразование силовой схемы заключается в ее разделении на подсистемы по цепи возбуждения. В частности, в подсхеме СГ воз-

будитель представляется в виде зависимого источника напряжения  $u_f$ , а в подсхеме с ШИП генератор представляется в виде зависимого источника тока  $i_f$ . Результат этого преобразования схемы также отражен на рис. 3.

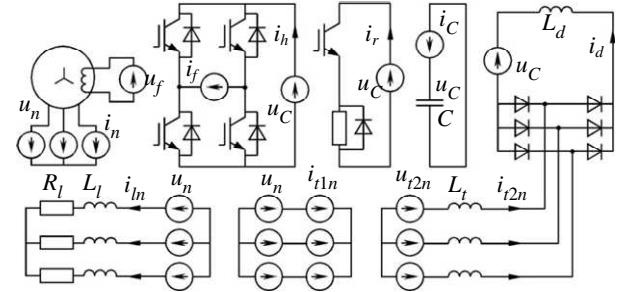


Рис. 3

На рис. 3 отражено также преобразование элементов трансформатора. В частности, воздействие первичной обмотки на вторичную определяется с помощью зависимых источников напряжения  $u_{t2n}$  ( $n = 1, 2, 3$ ) с учетом коэффициента трансформации  $K_{tr}$

$$u_{t2n} = u_n / K_{tr}, \quad (4)$$

а воздействие вторичной обмотки на первичную учитывается зависимыми источниками тока  $i_{t1n}$ , которые определяются токами вторичной обмотки  $i_{t2n}$ :

$$\left. \begin{aligned} i_{t1n} &= i_{t2n} / K_{tr}, \\ \frac{di_{t1n}}{dt} &= \frac{1}{K_{tr}} \frac{di_{t2n}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

При математическом описании системы рис. 2 осуществляются аналогичные преобразования схемы. Математическое описание СГ выполнено при разделении его на части по магнитному потоку в воздушном зазоре (рис. 4) [12]–[14].

**Моделирование установок в целом.** Математическое описание системы с СГ и возбудителем содержит уравнения связей (1)–(5) подсхем рис. 3, описание СГ (6)–(20), описание трехфазного моста, ШИП, описание двухконтурной системы регулирования напряжения СГ (внешний контур регулирования напряжения и внутренний контур регулирования тока). Система регулирования аналогична системе управления, представленной в [12]. В моделях указанные математические описания элементов и их взаимных связей сведены в единую систему уравнений. Алгоритм решения этой системы опубликован в [12]. Он содержит внутренний цикл решения алгебраических уравнений и внешний контур интегрирования переменных. Во внутреннем цикле определяются па-

раметры зависимых источников напряжения и тока, через которые подсхемы взаимосвязаны. Во внешнем цикле переменные интегрируются, т. е. определяется их изменение во времени.

При использовании указанного математического описания установки с СГ, СВ с двухполлярным ШИП и нагрузкой (см. рис. 1) разработана ее компьютерная модель. Аналогичная модель разработана для установки с СВ с однополлярным ШИП (см. рис. 2).

**Расчет переходных и установившихся режимов работы источника.** На разработанных моделях источника напряжения с СГ и СВ выполнен ряд расчетов электромагнитных процессов для установок, представленных на рис. 1 и 2.

Для установки на рис. 1 приняты следующие параметры: мощность СГ 4 МВт;  $\cos \varphi = 0.95$ ,  $U = 690$  В;  $f = 50$  Гц, на холостом ходу ток 144.5 А, мощность 7.54 кВт; коэффициент насыщения по основному магнитному потоку 1,1;  $L_s = 0.165$  о. е.,  $L_{ad} = 1.251$  о. е.,  $L_{kd} = 0.057$  о. е.,  $L_{kq} = 0.138$  о. е.,  $L_f = 0.104$  о. е.,  $R_1 = 0.00316$  о. е.,  $R_{kd} = 0.0182$  о. е.,  $R_{kq} = 0.0213$  о. е. По трансформатору: мощность 45 кВ · А,  $K_{tr} = 3.1$ , напряжение КЗ 6 %; в фильтре выпрямленного напряжения: индуктивность 240 мГн, емкость конденсатора 4200 мкФ;  $R_r = 3.1$  Ом; частота опорных напряжений ШИП – 1000 Гц.

Один из расчетов выполнен для случая наброска 100 %-й нагрузки на СГ при работе его на холостом ходу. Результат представлен на рис. 4.



Рис. 4

Из данного расчета и рис. 5 следует, что на холостом ходу номинальное напряжение обмотки статора составляет 690 В, ток возбуждения 144 А, что близко к расчетным данным СГ. При наброске 100 %-й нагрузки на обмотку статора напряжение кратковременно снижается до 93 % и восстанавливается до 100 % за 6 периодов при частоте 50 Гц. Соответственно изменяется выпрямленное напряжение диодного моста. Ток возбуждения в переходном режиме увеличивается до 336 А, затем спадает (в установившемся режиме работы СГ при

номинальной нагрузке ток равен 288 А), что соответствует проектным данным по СГ.

На рис. 5 представлены результаты расчета процессов в установке при сбросе 100 %-й нагрузки.



Рис. 5

Из расчета и рис. 6 следует, что при сбросе 100 % нагрузки СГ напряжение обмотки статора увеличивается до 113 % и затем восстанавливается до 100 % за 6 периодов при частоте 50 Гц.

Сравнительно небольшие отклонения напряжения СГ при набросе и сбросе нагрузки обусловлены высоким быстродействием транзисторной системы возбуждения (задержка реакции на возмущение 1...3 мс).

#### Расчет аварийных режимов работы СГ.

Важной частью оценки работоспособности системы является анализ аварийных режимов работы. С этой целью выполнены расчеты трехфазных КЗ обмотки статора СГ из режима номинальной нагрузки. Замыкание имитировано скачкообразным уменьшением индуктивностей и активных сопротивлений в фазах нагрузки до пренебрежимо малых величин. При КЗ обмотки статора и рекуперации энергии из магнитного поля СГ в конденсатор СВ система управления поддерживает напряжение на конденсаторе на уровне порядка 900 В. При превышении указанного уровня напряжения включается чоппер и энергия конденсатора сбрасывается в защитный резистор. Результат расчета КЗ в установке с СВ с двухполлярным ШИП (см. рис. 1) представлен на рис. 6.

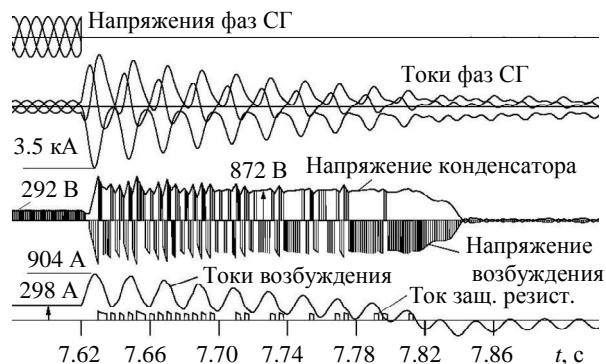
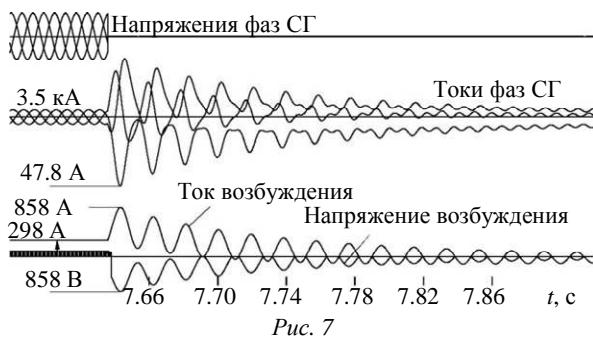


Рис. 6

Из расчета процесса КЗ и рис. 7 следует, что до КЗ напряжение обмотки статора СГ 690 В, амплитуда тока фазы 3.5 кА, ток возбуждения 298 А. При возникновении КЗ переход возбудителя в режим рекуперации энергии и гашения токов СГ происходит при увеличении тока возбуждения до 500 А. Амплитуда тока фазы СГ при КЗ достигает 47.8 кА, ток возбуждения увеличивается до 904 А. В процессе КЗ система управления, воздействуя на ШИП, поддерживает выпрямленное напряжение конденсатора на уровне 850...900 В. Диодный мост запирается. За счет рекуперации энергии магнитного поля СГ в возбудитель работоспособность ШИП сохраняется (при нулевом напряжении обмотки статора).

Необходимо отметить, что при двухполлярном ШИП при гашении токов КЗ ток возбуждения становится отрицательным. После выключения СГ с отрицательным током возбуждения остаточный магнитный поток может оказаться малым. Это осложняет последующий ввод СГ в работу в режиме самовозбуждения.

Аналогичные расчеты выполнены для системы с однополярным ШИП (см. рис. 2). При расчетах использованы в основном те же исходные данные. Кроме того, индуктивность рассеяния полуобмоток уравнительного дросселя составляет 40 мГн, взаимная индуктивность полуобмоток – 125 мГн, а разрядное сопротивление в цепи возбуждения – 1 Ом. Результаты расчета КЗ обмотки статора СГ представлены на рис. 7.



В соответствии с рис. 7 при КЗ обмотки статора СГ и увеличении тока возбуждения до 500 А

осуществляется поджиг предохранителя и в цепь обмотки возбуждения включается резистор  $R_f$  (см. рис. 2). С его помощью интенсивно гасятся ток возбуждения и токи фаз. Ударный ток обмотки статора 47.8 кА. Максимальный ток возбуждения 858 А. Напряжение возбуждения достигает уровня 858 В, что допустимо для изоляции обмотки.

В процессе гашения токов КЗ средний ток возбуждения затухает до нуля, практически не переходя в область отрицательных значений. После выключения СГ с нулевым током возбуждения в машине должен сохраниться остаточный магнитный поток, что упростит последующий ввод СГ в работу в режиме самовозбуждения.

Однако после возникновения КЗ и поджига предохранителя требуется его замена. Это вносит неудобства в обслуживание установки.

Выводы:

1. Разработаны структуры и алгоритмы работы систем самовозбуждения синхронного генератора, содержащих выпрямитель и ШИП. В одном варианте ШИП двухполлярный, в другом – однополярный. Построены модели указанных установок.

2. При использовании в системе самовозбуждения генератора двухполлярного ШИП работа возбудителя в режиме короткого замыкания статора обеспечивается за счет рекуперации в ШИП энергии из магнитного поля машины.

3. При двухполлярном ШИП возможно возникновение отрицательного тока возбуждения, что осложняет ввод генератора в работу в режиме самовозбуждения после его выключения.

4. При использовании в системе самовозбуждения генератора однополярного ШИП эффективное гашение токов короткого замыкания можно обеспечить, замыкая обмотки возбуждения на разрядное сопротивление при разрыве соответствующих цепей предохранителем. При последующем вводе генератора в работу требуется замена предохранителя, что вносит неудобства в обслуживание.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boldea I. Synchronous Generators. Boca Raton: CRC Press, 2005. 448 p.
2. Glebov I. A. Excitation Systems of Synchronous Generators with Controlled Converters // Iss. of Academy of Sciences of the USSR, 1960.
3. Schaefer R. C. Application of static excitation systems for rotating exciter replacement / Proc. IEEE Pulp and Paper Industry Tech. Conf. Austin, TX, USA, 1997. P. 199–208.
4. Zimmer H., M. W. Asmah, Hanson J. Influences of Excitation Systems on the Dynamic Voltage Behavior of Power Systems // IPST Intern. conf. on Power System Transients 2015. Paper 15IPST222. URL: [http://www.ipstconf.org/Proc\\_IPST2015.php](http://www.ipstconf.org/Proc_IPST2015.php).
5. SIPOL Transistorized Excitation Systems for Synchronous Generators // Siemens AG Power Generation,

2004. URL: [http://siemens.com.tr/i/content/3882\\_1\\_Sipol\\_Catalogue.pdf](http://siemens.com.tr/i/content/3882_1_Sipol_Catalogue.pdf).
6. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D. Analysis of electric machinery and drive systems. USA: IEEE PRESS, 2002.
7. Burmistrov A., Popov E., Urganov A. Estimation of efficiency of modern excitation controllers of synchronous machines in the conditions of physical model of a complex power system and suggestion of estimation technique and criteria as an addition to the IEC standard // 44<sup>th</sup> Intern. conf. on Large High Voltage Electric Systems 2012. Proc. CIGRE Session 2012, Paris. C. 2-103.
8. Burmistrov A. A. Fadeev A. V. Control and Regulation Means of Asynchronized Turbogenerator Excitation. // Rus. El. Engin. 2010. Vol. 81, № 2. P. 86-93.
9. Loginov A. G., Burmistrov A. A. Excitation Systems of Asynchronized Turbogenerators // Rus. El. Engin. 2010. Vol. 81, № 2. P. 79-85.
10. Shakaryan Y. G., Labunets I. A., Sokur P. V. Experience in development in and operation of new types of turbogenerators with vector type excitation system for wide-range reactive power control // 43<sup>rd</sup> Int. conf. on large high voltage electric systems 2010. Proc. CIGRE Session 2010, Paris.
11. Российские и зарубежные системы возбуждения синхронных генераторов / Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько, А. А. Каракев, А. Г. Логинов, А. А. Бурмистров, В. А. Хлямков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2004. № 1. С. 26-37.
12. Моделирование и исследование транзисторной системы самовозбуждения синхронного генератора / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, В. Ю. Шелюх, И. А. Пименова, А. С. Григорян // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 10. С. 50-56.
13. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов / ОАО «Силовые машины» «Электросила». СПб., 2004. 252 с.
14. Electric and hydraulic process connection in hydraulic and pumped storage hydroelectric power stations / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, G. A. Gogolev, M. E. Kuzin // IECON 2013, Vienna, Austria. Vienna, 2013. P. 2031-2036.

M. V. Pronin, I. A. Pimenova, A. S. Grigorian, V. V. Glushakov  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

A. G. Vorontcov  
OAO «Power Machines»

## SELF-EXCITATION SYSTEMS OF A SYNCHRONOUS GENERATOR WITH A BIPOLAR AND UNIPOLAR PWC DC-DC CONVERTERS

*Models of synchronous generators with self-excitation systems containing PWM DC-DC converters have been designed. With a bipolar PWM converter the recuperation of power into an excitation system has been used for short circuit protection. With a unipolar PWM converter an explosive fuse and dumping resistance have been used for short circuit protection. Operating conditions of the source have been analyzed.*

**Synchronous generator, self-excitation, pulse-width converter, modeling, control system**



УДК: 534.23

С. А. Башарин, Ш. Я. Вахитов, В. Ю. Карельский

Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения

## Повышение качества звука акустических систем на основе учета нелинейных искажений магнитного поля

Предлагаются результаты исследования возможностей улучшения качества звукового сопровождения в кинотеатрах и концертных залах, проведенного на основе моделирования процессов электромагнитного взаимодействия переменного поля звуковой катушки и постоянного поля магнитного зазора при формировании силы, управляющей подвижной системой громкоговорителя. Предлагается методика компьютерного моделирования звуковоспроизводящих систем и результаты исследования магнитного поля в зазоре магнитной системы громкоговорителя.

**Повышение качества звука, моделирование магнитного поля, пространственные звуковые образы, показатели нелинейных искажений, акустический фронт импульса**

Современные кинотеатры и концертные залы предъявляют высокие требования к качеству воспроизведения звукового сопровождения видеоизображения. Звукоряд несет половину, если не больше, художественной и эстетической нагрузки всего кинопроизведения. К художественной стороне относятся тонкие нюансы голосов актеров, а к эстетической – не только проработанность вокальных фрагментов, но и реалистичность динамической и пространственной структур звуковых образов. Во многом это достигается путем совершенствования конструкции динамических громкоговорителей и акустических систем, основой правильной работы которых является взаимодействие постоянного магнитного поля зазора магнитной цепи и переменного поля, наведенного током звуковых частот посредством звуковой катушки. Формирование силы, которая воздействует на подвижную систему и обеспечивает создание соответствующего фонограмме звукового сигнала в упругой воздушной среде, является прямым следствием этого процесса. Исследованию подобных явлений посвящают свои теоретические и экспериментальные исследования многие зарубежные и отечественные фирмы [1], [2].

Кроме зарубежных производителей акустических систем, которые являются ведущими в этом направлении, таких как *MeyerSound*, *Electrovoice*, *JBL*, *MartinAudio* и др., аналогичными исследованиями занимается российская компания «Референс Тест» в тесном сотрудничестве с учеными и препо-

давателями института кино и телевидения. На основе результатов этих исследований компания занимается научно-исследовательской и конструкторской работой с последующим производством на заказ мониторов и измерительного оборудования для звуковой и промышленной индустрии.

«Референс Тест» много лет создает акустические системы с уникальными электроакустическими характеристиками, о чем свидетельствуют многочисленные дипломы и кубки победителей международных тендров, соревнований и выставок. Многие отечественные концертные залы и кинотеатры оборудованы акустическими комплексами, созданными специалистами этой фирмы. На рис. 1 показан зал Театра комедии в Санкт-Петербурге с установленным оборудованием фирмы «Референс Тест».



Рис. 1

Проводимые в рамках прикладных проектов исследования физических процессов преобразования электрических сигналов в звуковые колебания позволяют создавать воспроизведение пространственных звуковых образов в качественно новом звучании.

В настоящей статье предлагаются новые результаты исследований, полученные путем моделирования процессов электромагнитного взаимодействия переменного поля звуковой катушки и постоянного магнитного поля зазора при формировании силы, управляющей подвижной системой громкоговорителя.

Как известно [3], [4], в динамике происходит взаимодействие магнитного потока, созданного постоянным магнитом, с потоком, создаваемым в результате протекания тока в катушке.

Согласно закону Ампера на элемент проводника с током, помещенным в магнитное поле, действует сила, определяемая выражением

$$F = IB\Delta l \sin \phi,$$

где  $I$  – ток, вызванный звуковым сигналом;  $B$  – индукция магнитного поля в зазоре сердечника;  $\Delta l$  – элемент проводника с током;  $\phi$  – угол между вектором магнитной индукции и направлением тока в проводнике.

Эта сила стремится изменить геометрическую координату проводника с током относительно силовых линий магнитного зазора и скорость смещения проводника с током, которая определяется массой подвижной системы, присоединенной к звуковой катушке. В свою очередь, силовые линии поля в зазоре под действием магнитного поля, наведенного звуковой катушкой, изменяют свое положение. В постоянном магнитном поле полная сила, действующая на проводник с током, представляет собой векторную сумму элементарных сил, действующих на единицу длины проводника [1].

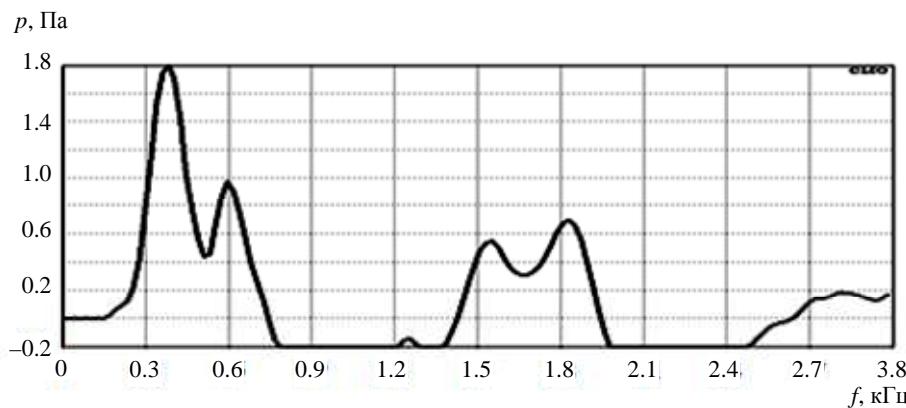
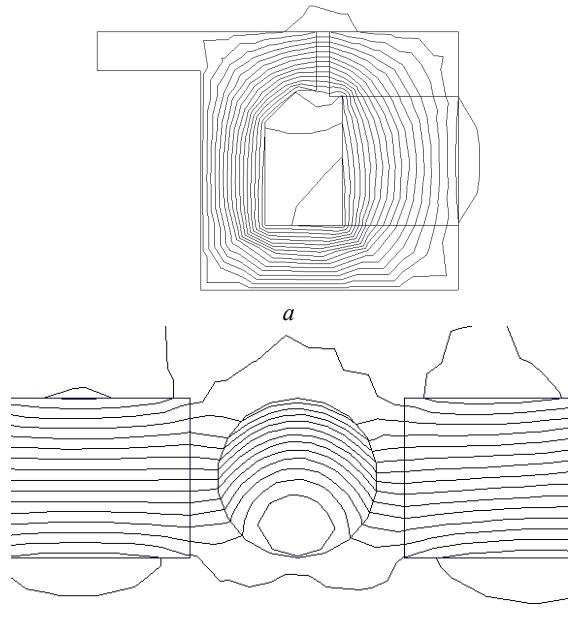


Рис. 3

Изменение координаты проводника влечет за собой изменение конфигурации линий магнитного поля, которое определяется результатом суперпозиции полей, создаваемых постоянным магнитом динамика и протеканием тока в движущемся проводнике.

На рис. 2, *a* представлен результат компьютерного расчета магнитного поля в зазоре магнитной цепи динамического громкоговорителя без внесения проводника в зазор магнитной цепи. Расчет выполнен с помощью компьютерной программы расчета магнитных полей *Elcut*.

При внесении проводника с током в постоянное магнитное поле в зазоре магнитной цепи результаты расчета будут отражать деформацию силовых линий магнитного поля относительно случая отсутствия проводника с током (рис. 2, *б*).

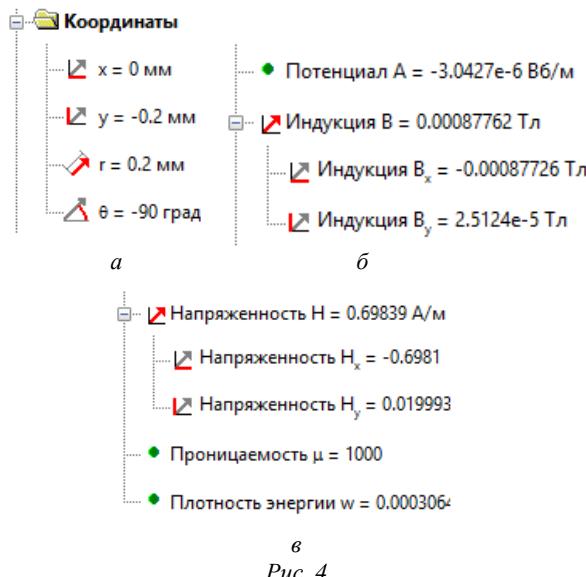
б  
Рис. 2

Как показывают результаты экспериментов, вследствие инерции покоя подвижной системы громкоговорителя в начальный момент времени

проводник неподвижен, а его магнитное поле вытесняет постоянное поле из зазора. Это приводит к плавному нарастанию скорости подвижной системы, причем ускорение при этом будет зависеть от массы подвижной системы и напряженности магнитного поля в зазоре. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению крутизны акустического фронта по сравнению с крутизной фронта соответствующего электрического сигнала, что можно наблюдать на начальном участке импульсного отклика по давлению  $p$  в среде (см. рис. 3).

Для получения акустического фронта импульса, соответствующего исходному электрическому сигналу, при расчетах динамических процессов в генераторе в схеме замещения акустического динамика необходимо учесть результаты наложения полей.

Для уточненного расчета снимаются количественные показатели нелинейных искажений по общей картине поля (рис. 4).



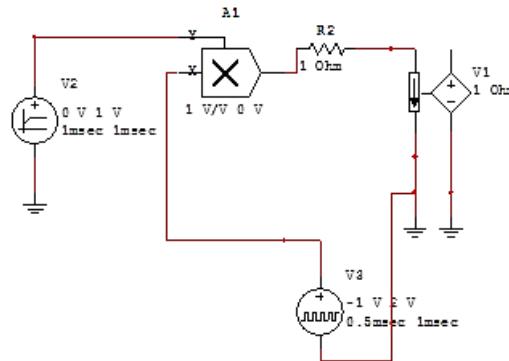
Они включают массив мгновенных значений положений координат точек измерения, выраженных в декартовых и полярных координатах (рис. 4, *a*), массивы значений потенциала точек измерения и массивы значений индукции в дискретных точках, включая проекции вектора индукции на оси абсцисс и ординат (рис. 4, *б*), и массивы напряженности магнитного поля магнитной проницаемости и плотности энергии (рис. 4, *в*).

Сила Ампера определяет электродвижущую силу источника переменного сигнала, имитирующую входной звуковой сигнал в схеме замещения электродинамического громкоговорителя. Сила, действующая со стороны магнитного поля на про-

водник с током, изменяется произвольно по мере изменения входного звукового сигнала и представляется нелинейной функцией, зависящей от индукции магнитного поля в зазоре, силы тока, протекающего в проводнике, и от их взаимодействия.

Для получения уточненной картины изменения действующей на проводник силы необходимо массив полученных значений тока и индукции представить в виде нестационарного массива рассчитанных значений электродвижущей силы источника входного сигнала. Очевидно, результатирующий массив значений электродвижущей силы будет определять нелинейную функцию, интерполяция которой позволит подробно в численном виде описать входной звуковой сигнал и соответствующий ему силовой фактор.

Поскольку массивы значений входных индукций и тока могут иметь большую размерность, вычисление результатирующего массива значений электродвижущей силы можно выполнить с помощью компьютерной программы визуального программирования Multisim. Программа позволяет с помощью источника напряжения управляемого током (ИНУТ) и простейшей схемы с мультиплексором в автоматизированном режиме формировать необходимый выходной массив (рис. 5).



*Рис. 5*

В представленной схеме на входе ИНУТ в результате мультиплексирования формируется сигнал, имитирующий нелинейное изменение силы Ампера, вызванное переменным входным звуковым сигналом. Источник  $V_2$  отражает массив мгновенных значений тока в проводнике катушки подвижной системы. Он характеризует массив значений магнитной индукции, а источник  $V_1$  определяет нелинейные изменения силы Ампера.

В результате предложенная методика уточненного расчета изменений нелинейного характера воздействий в схеме замещения электродинамического громкоговорителя позволяет получить

полную картину изменений электрических сигналов в схеме замещения электродинамического громкоговорителя и, как следствие, получить в ней подробную картину распределения звуковых давлений в упругой среде. Кроме того, проведенные расчеты позволяют определить параметры схемы

замещения, эквивалентные скоростям колебаний элементов подвижной системы. Учет полученных результатов при проектировании и изготовлении акустических систем в конечном итоге повышает качество воспроизводимого звука.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башарин С. А., Федоров В. В. Теоретические основы электротехники. М.: Академия, 2013.
2. Панкин А. М. Введение в теорию диагностирования электротехнических систем. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012.

S. A. Basharin, Sh. Ya. Vakhitov, V. Yu. Kareljan  
*Saint Petersburg State Institute of Film and Television*

## IMPROVING THE SOUND QUALITY OF ACOUSTIC SYSTEMS ON THE BASIS OF NONLINEAR DISTORTION OF THE MAGNETIC FIELD

*The results of the research of improving the quality of sound in movie theaters, concert halls, performed on the basis of modeling of processes of electromagnetic interaction of the alternating field of the voice coil and the permanent magnetic field of the gap in the formation of the force, of the management of the movable loudspeaker system. The technique of computer simulation of sound systems and the results of the study of the magnetic field in the gap of the magnetic system of the loudspeaker.*

**The increase in sound quality, modeling of the magnetic field, spatial sound images, indicators of harmonic distortion, acoustic pulse front**



УДК 504.4.054, 504.064.3

Н. И. Куракина, С. Ю. Булганин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Е. Г. Гридина

Московский энергетический институт

## Пространственный анализ загрязнения акватории Финского залива в технологиях ГИС

Рассматриваются вопросы использования геостатистических методов интерполяции, позволяющих выполнять пространственный анализ распространения загрязняющих веществ в акватории Финского залива для выявления наиболее критических участков и организации эффективных мероприятий по охране окружающей среды и предотвращению чрезвычайных ситуаций. Созданная на базе ГИС ArcGIS ArcInfo обобщенная геоинформационная модель акватории, объединяющая данные, систему оценок и модели объектов, позволяет определить качество воды, исследовать динамику изменения концентраций загрязняющих веществ, наглядно представить результаты анализа на карте.

### Мониторинг, пространственное моделирование, интерполяция, экологическая оценка, геоинформационные технологии, водные акватории, Финский залив

Невская губа и прилегающая к ней восточная часть Финского залива представляют собой уникальную эстуарийно-прибрежную экосистему, имеющую большое экономическое и geopolитическое значение не только для города Санкт-Петербурга, но и для всего северо-запада России. Вместе с тем, уровень антропогенного воздействия на эти водные экосистемы заметно возрос за последние несколько лет.

Освоение прибрежных акваторий без научно обоснованного, системного подхода так, как оно происходит в настоящее время, угрожает невосполнимым ущербом биоресурсам и функционированию экосистемы в целом. Важнейшую роль в получении научно-обоснованных оценок влияния природных факторов, различных видов антропогенных воздействий и их комплекса на водные экосистемы в целях сохранения их функциональной целостности играет мониторинг. Мониторинговые исследования позволяют оценить состояние экосистемы в условиях антропогенных воздействий, сделать выводы о трендах изучаемых

параметров, рассчитать баланс этих веществ для экосистемы в целом или для отдельных ее частей.

Контроль загрязнения вод, биоты, донных отложений Финского залива имеет международное значение в связи с ключевой ролью Финского залива в экологическом состоянии восточной части бассейна Балтийского моря [1]. Недостатком совместных исследований в рамках международного сотрудничества стран Балтийского региона является разрозненность работ по мониторингу, отсутствие единой базы данных, а значит и сопоставимости полученных результатов и общего подхода к оценке состояния акватории.

Таким образом, особую актуальность приобретает задача создания современной системы комплексного мониторинга, обеспечивающей межуровневое информационное взаимодействие различных источников данных, систем обработки и представления эколого-аналитической информации, что возможно с использованием геоинформационных технологий.

Разработка на базе ГИС ArcGIS ArcInfo информационной системы экологической оценки и пространственного анализа загрязнения акватории Финского залива позволяет объединить пространственную и описательную информацию, систематизировать данные наблюдений, объединить базы моделей и систему оценок для наглядного представления экологической ситуации на карте, исследования динамики ее развития и предотвращения чрезвычайных ситуаций.

Оценка загрязнения выполнена на основе материалов натурных наблюдений ФГУ «Балтийская дирекция по техническому обеспечению надзора на море» за гидрохимическим и геолого-экологическим режимом в Невской губе (восточной части Финского залива).

Геоинформационная система экологической оценки и пространственного анализа базируется: 1) на топографической основе, имеющей единую систему координат, 2) базах данных как хранилищ всей информации об анализируемых объектах, имеющих единую организацию и структуру, 3) наборе программных модулей для получения оценок по ранее разработанным алгоритмам [2].

**Обобщенная геоинформационная модель акватории.** Обобщенная геоинформационная модель акватории [3], [4] служит основой анализа и включает модели природных и техногенных объектов, базу результатов контроля, нормативную базу, систему оценок.

К техногенным объектам относятся предприятия различного профиля, осуществляющие выбросы и сбросы загрязняющих веществ, а также различные гидротехнические сооружения, близлежащие транспортные магистрали и проч., т. е. объекты, оказывающие воздействие на акваторию. Геоинформационные модели природных объектов (залив, реки, озера, прибрежная зона, заповедники и т. д.) представляются в виде полигональных слоев. Например, водные объекты строятся на основе схем водосборов. Основной задачей при создании модели является выделение основных характеристик, описывающих состояние объекта и задание принципов деления пространственно-распределенных объектов на участки, в пределах которых их характеристики являются условно постоянными [5].

В основе системы оценки акватории Финского залива лежит база экологического контроля сети станций за весенний, летний и осенний периоды 2006–2010 гг., включающая наблюдения за такими характеристиками как:

- гидрометеорологические – температура и соленость (электропроводность) воды, прозрачность по диску Секки, температура воздуха, влажность, давление, скорость и направление ветра;

- геологические – наилок, его гранулометрический состав, редокс-потенциал;

- гидробиологические – зообентос, зоопланктон, фитопланктон, хлорофилл «а»;

- гидрохимические – содержание загрязняющих веществ – суммарных нефтепродуктов, тяжелых металлов, радионуклеидов, ртути, мышьяка, хлороганических пестицидов.

Каждый замер сопровождается кодом поста наблюдения и датой.

Нормативная база представляет собой справочник основных загрязнителей со значениями ПДК для двух категорий водопользования: рыбохозяйственной и хозяйственно-питьевой, а также значениями классов опасности веществ и лимитирующих признаков вредности.

**Оценка экологического состояния акватории Финского залива.** Связь результатов контроля с географическими данными (постами наблюдения) позволяет выполнять пространственный анализ. Временная составляющая в результатах контроля дает возможность определять динамику и получать усредненные (среднесезонные, среднегодовые) характеристики, а нормативная база предоставляет нормированные показатели качества воды. Таким образом, в среде ГИС реализована система запросов для получения оценок по заданному перечню параметров в соответствии с функционалом нормирования величин и в зависимости от их нормативной функции [6], [7]:

$$O_i^* = \text{Fun}\{C_i^*, \text{Date}, \text{Stream}, PDK_i\}, i \in N,$$

где  $C_i$  – значение концентрации;  $\text{Date}$  – дата измерения;  $\text{Stream}$  – участок акватории ФЗ;  $PDK_i$  – значение ПДК;  $N$  – количество измеряемых параметров.

В результате анализа формируются слои оценок в составе геоинформационной модели.

Простые оценки не отражают комплексного состояния сложного объекта [5], [8]. С учетом того, что различные экологические факторы обладают эффектом «суммации», осуществляется расчет сложных оценок (удельного комбинаторного индекса загрязнения воды) по существующей стандартной методике:

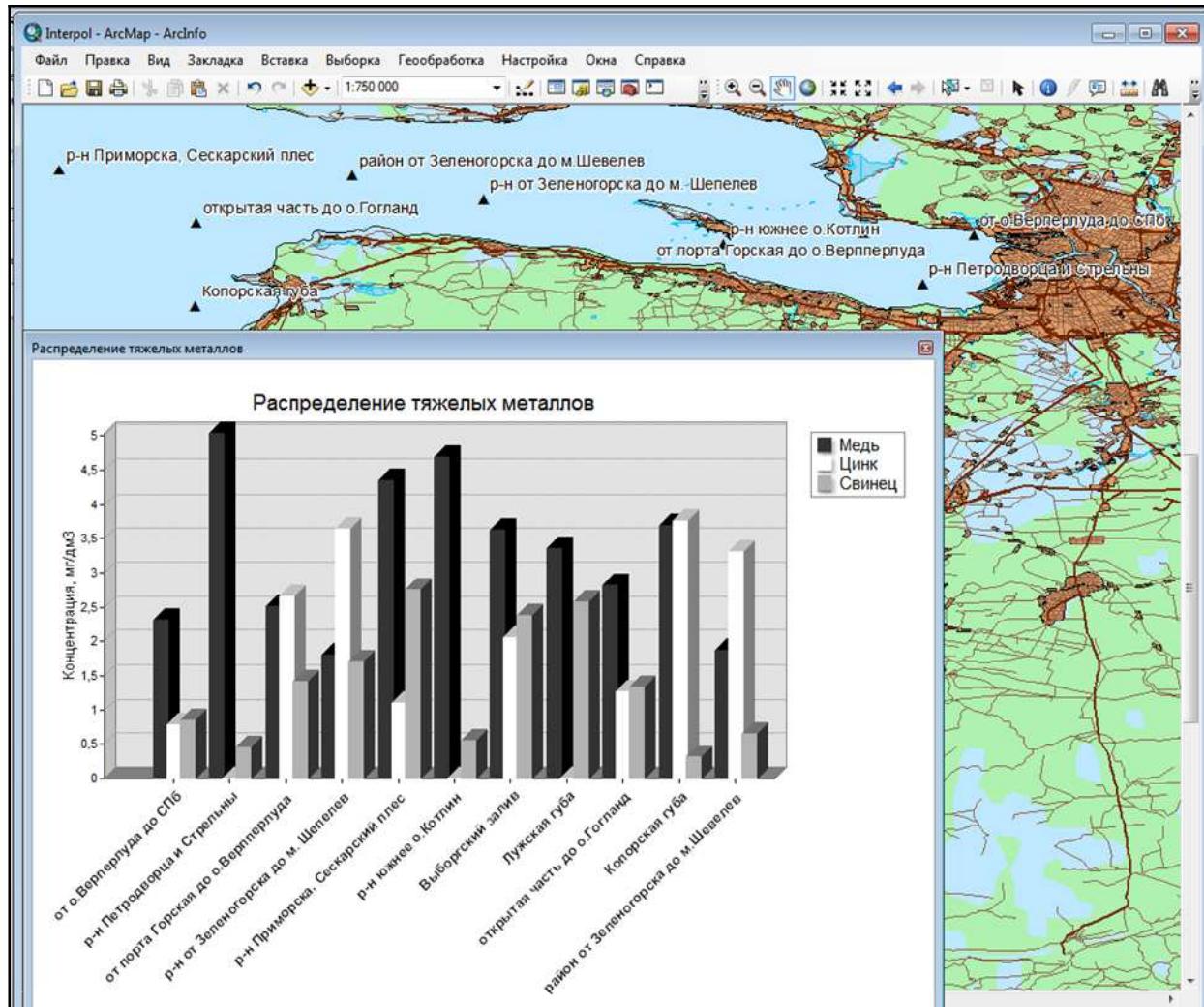


Рис. 1

$$S^* = \sum_i [O_i^*, Date, Stream, PDK_i], i \in I_s,$$

где  $O_i^*$  – простая оценка, входящая в множество важных характеристик  $I_s$ .

Как следует из полученных данных [9], акватория восточной части Финского залива в наибольшей степени загрязнена медью, кадмием, цинком и свинцом.

Содержание в природных водах тяжелых металлов обусловлено их поступлением в поверхностные воды в составе сточных вод предприятий текстильной, химической и металлообрабатывающей промышленности. Для открытой части Финского залива наиболее характерно загрязнение нефтепродуктами, а также увеличение концентраций алюминия и взвешенных веществ [9].

Распределение гидрохимических характеристик по глубине водного объекта показывает повышенное содержание в придонном горизонте тяжелых металлов (медь, цинк, железо) по сравнению с поверхностными водами. Это объясняет-

ся вторичным загрязнением природных вод в результате взаимодействия в системе вода–донные отложения (особенно в зонах размещения подводных отвалов грунта) [9].

По удельному комбинаторному индексу загрязнения класс качества воды в большинстве точек контроля характеризуется как загрязненный (3 класс, разряд «а»).

На рис. 1 представлены результаты оценки загрязнения Финского залива медью по данным за июль–август 2009 г. Наибольшее загрязнение наблюдается в районе Невской, Лужской губы, Петродворца, Стрельны и Приморска.

Однако одиночные результаты контроля в местах отбора проб не дают наглядной картины распространения загрязнения, не позволяют выявить тенденции развития ситуации и найти причины возможных превышений. В связи с этим при помощи модуля Geostatistical Analyst была разработана система пространственного моделирования загрязнения акватории [10].

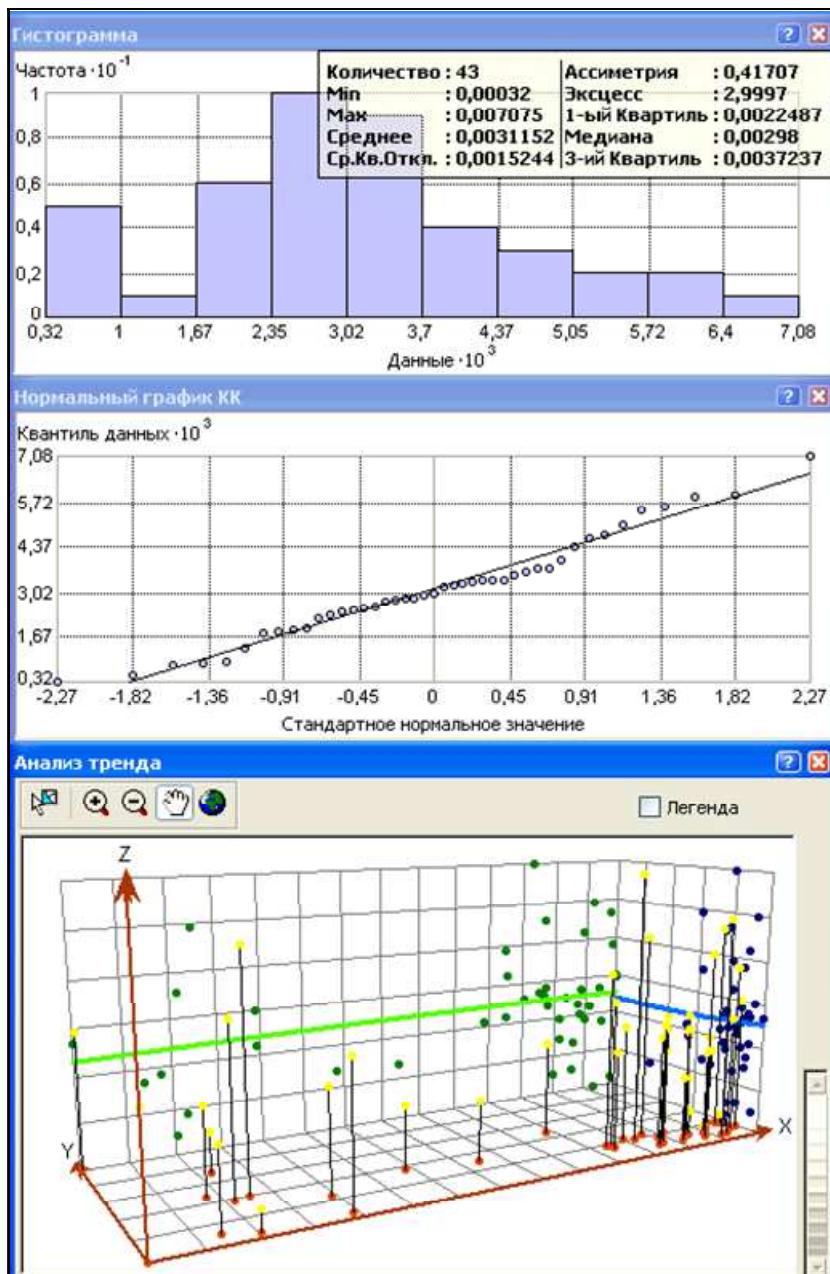


Рис. 2

**Пространственный анализ загрязнения акватории.** Данные гидрохимических наблюдений дискретны и, как правило, пространственно неоднородно распределены. Анализ данных и его результаты в значительной мере зависят как от качества и количества исходных данных, так и от методов и моделей обработки (интерполяции) данных. Существует 2 группы методов интерполяции: детерминистические и геостатистические. Геостатистические опираются как на статистические, так и на математические методы, которые могут быть использованы для построения поверхности и для оценки ошибки интерполяции. Данные без указания погрешностей мало пригодны

для принятия управлеченческих решений, поэтому геостатистические методы предпочтительнее.

Рассмотрим основные этапы пространственного моделирования загрязнения акватории Финского залива с использованием геостатистических методов.

При применении любой модели интерполяции встает вопрос о подборе оптимальных модельно-зависимых параметров. Выбор параметров опирается на пошаговое исследование характера и структуры данных.

*Исследование пространственной структуры данных.* При работе с пространственными данными важно прежде всего понять насколько эф-

фективна имеющаяся сеть мониторинга. Для оценки этого используются различные характеристики, описывающие топологию сети. Первым и весьма важным этапом исследования является статистический анализ данных, позволяющий определить наличие ошибок и выбросов в данных, оценить базовые статистические закономерности и т. п. [10].

В качестве примера рассмотрим загрязнение Финского залива медью. По данным результатов контроля за 2009 г. была построена гистограмма (рис. 2), показывающая плотность распределения, а также определена статистика (среднее, медиана, стандартное отклонение, эксцесс).

При нормальном распределении среднее и медиана имеют близкие значения, асимметрия стремится к нулю, а эксцесс равен примерно 3. На основе полученной информации была выдвинута гипотеза об отличии закона распределения от нормального. Затем был построен график, который подтвердил уже появившуюся гипотезу об отличии распределения от нормального (рис. 2). Это означает, что при интерполяции данные необходимо дополнительно обработать. Для этого был использован метод степенного преобразования (Box-Cox), в результате которого график распределения данных стал близок к нормальному.

Далее был выполнен структурный анализ данных для выявления тренда и пространственной автокорреляции между результатами контроля в постах наблюдений.

На трехмерной диаграмме исследуемой территории (рис. 2) точки проецируются на север и восток. Так как кривые, проходящие через спроектированные точки, на обеих плоскостях близки к прямой линии, сделано предположение, что тренд отсутствует.

Пространственная автокорреляция была исследована с помощью опции «облако вариограммы/ковариации» [4]. Эта функция количественно характеризует предположение, что чем ближе посты расположены друг к другу, тем результаты измерений в них более похожи. При определенном расстоянии облако вариограммы выравнивается, что указывает на то, что между парами постов за пределами этого расстояния нет корреляции.

*Выбор метода интерполяции.* Построение поверхностей распределения концентрации Cu осуществлялось с использованием всех геостатистических методов интерполяции (ординарный, простой, универсальный, вероятностный, дизъюнктивный и индикаторный кrigинг) [10].

*Оценка результирующей поверхности.* Оценка, насколько хорошо подобранная модель интерполирует значения в искомых точках, осуществляется в результате перекрестной проверки. Перекрестная проверка исключает из набора данных одну или несколько опорных точек с целью сравнения приведенного и измеренного значения. В результате выполняется расчет ошибок интерполяции, по которому осуществляется оценка результирующей поверхности.

*Сравнение моделей.* Сравнение моделей позволяет определить, насколько модель, которая использовалась для создания геостатистического слоя, лучше, чем какая-либо другая. При сравнении моделей нужно искать ту, нормированная средняя ошибка которой ближе к нулю, а также имеющую наименьшую среднеквадратичную ошибку интерполяции, среднюю стандартную ошибку вычислений, ближайшую к среднеквадратичной ошибке интерполяции, и нормированную среднеквадратичную ошибку, значение которой ближе всего к единице.

Метод интерполяции	Ошибки				
	Средняя	Среднеквадратичная	Средняя стандартная	Средняя нормированная	Среднеквадратичная нормированная
Одинарный кrigинг	-0.012	0.103	0.114	-0.0956	0.894
Простой кrigинг	0.0001	0.127	0.129	-0.0001	0.981
Универсальный кrigинг	-0.065	0.464	0.882	-0.0287	0.847
Вероятностный кrigинг	-0.001	0.208	0.225	-0.0045	0.933
Индикаторный кrigинг	-0.001	0.213	0.225	0.0030	0.954
Дизъюнктивный кrigинг	0.0002	0.127	0.129	0.0005	0.978

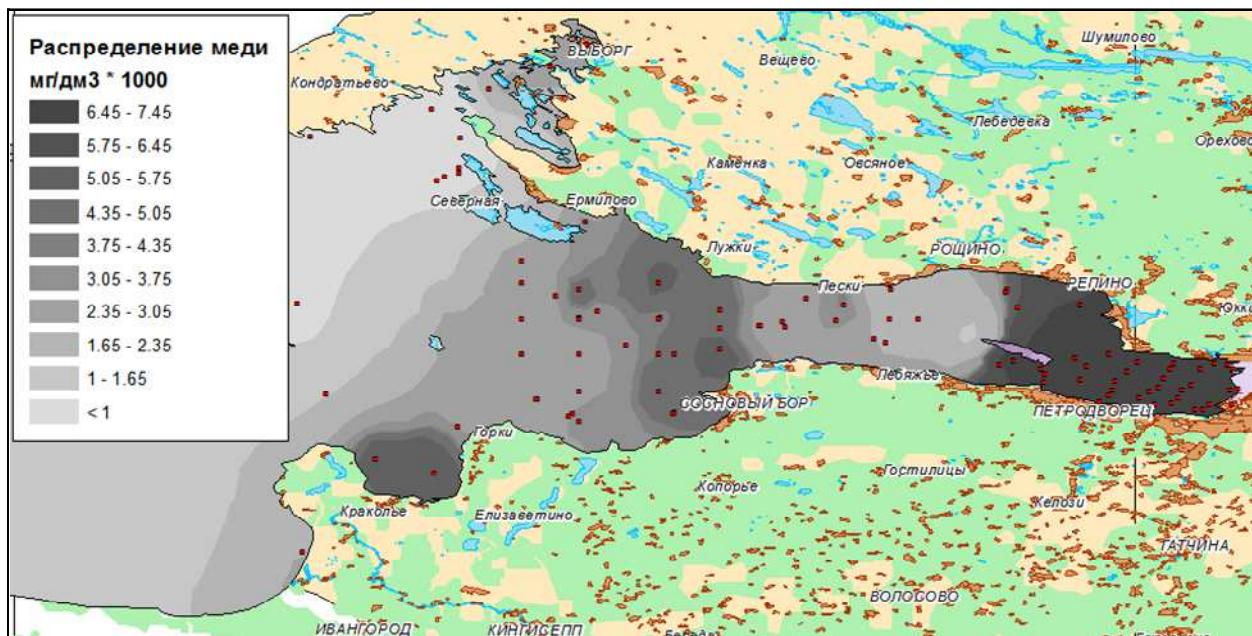


Рис. 3

По результатам анализа (таблица) оптимальным методом интерполяции значений загрязнения медью признан метод простого кrigинга.

Поверхность пространственного распределения загрязнения Cu показана на рис. 3. Полученные результаты наглядно подтверждают, что наибольшему загрязнению подвергается район Невской, Лужской губы, район Приморска и район подводного отвала вблизи маяка Толбухин, что в сочетании с данными об увеличении мутности и гидробиологическими показателями качества воды [10] позволяет сделать выводы о негативном влиянии дноуглубительных и берегонамывных работ, а также складирования грунта в подводные отвалы, практикуемые в указанных районах акватории Финского залива.

Одним из путей минимизации негативных последствий является организация системы автоматизированного контроля за перемещением донных грунтов и состоянием природной среды, создание

карт интегральной экологической чувствительности гидросистемы, объединяющей данные о гидрологических и геологических условиях, гидрохимические характеристики загрязненности воды и грунта, состояние биоты и прибрежной растительности.

Созданная геоинформационная модель экологической оценки и пространственного анализа загрязнения акватории Финского залива инвариантна к объекту исследования и может быть применена и к другим водным объектам. Предложенные геостатистические методы интерполяции позволяют выявить и наглядно представить на карте наиболее загрязненные участки акватории, исследовать динамику изменения ситуации с целью определения наиболее опасных источников загрязнения, а также выработать рекомендации по организации действенного контроля и надзора за безопасностью недропользования и охраной окружающей среды на исследуемой акватории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник рекомендаций Хельсинской комиссии: справ.-метод. пособие. СПб.: Диалог, 2008.
2. Бескид П. П., Куракина Н. И., Орлова Н. В. Геоинформационные системы и технологии. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2010.
3. Алексеев В. В., Куракина Н. И. Измерительные системы и ГИС-технологии. СПб.: Элмор, 2007.
4. Габидинова А. Р., Куракина Н. И. Информационная среда мониторинга и пространственного моделирования загрязнения водных акваторий на базе ГИС-технологий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 5. С. 92–98.
5. Система расчета нормативов допустимого воздействия на водные объекты в среде ГИС / В. В. Алексеев, Н. И. Куракина, Е. В. Желтов, А. И. Шишкян, Е. В. Епифанов, И. В. Антонов // ArcReview. 2009. № 4(51). С. 9–11.
6. Куракина Н. И., Микушина В. Н. Методика ведения мониторинга водных объектов на базе геоинформационных технологий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 9. С. 85–88.
7. Kurakina N. I. River Pollutants Monitored with GIS. Analyzing the Environmental Impact of Water Bodies in

## Метрология и метрологическое обеспечение

---

Russia // GIS and Science: GIS Best Practices series. Redlands. Esri. 2008. P. 39–42.

8. Куракина Н. И., Куракин А. М., Лукин А. А. Мониторинг и комплексное оценивание береговой зоны Финского залива с использованием ГИС // Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности: сб. тр. XIII Междунар. конф. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2010. С. 225–227.

9. Куракина Н. И. Геоинформационная система мониторинга, оперативного контроля и простран-

ственного моделирования загрязнения Финского залива // День Балтийского моря: сб. материалов XVI Междунар. эколог. форума. СПб., 18–20 марта 2015 г. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2015. С. 157–159.

10. Пространственное моделирование загрязнения водных объектов / Н. И. Куракина, В. Н. Емельянова, С. А. Коробейников, Е. С. Никанорова // ArcReview. 2006. № 1 (36). С. 16–17.

---

N. I. Kurakina, S. Yu. Bulganin

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

E. G. Gridina

Moscow Power Engineering Institute

## SPATIAL ANALYSIS POLLUTION OF GULF OF FINLAND BASED ON GIS TECHNOLOGY

*There are considered questions of use geostatistical interpolation methods, that enable to realize spatial analysis pollution of Gulf of Finland based on geostatistic interpolation methods to identify the most critical areas and organization of measures to protect the environment and prevent emergencies. Generalized geoinformation model of water areas created based on GIS ArcGIS ArcInfo. This model combines the data, evaluation system, objects models and allows defining the water quality, exploring the dynamics of changes water pollutants, visualizing the environmental situation on the map.*

**Monitoring, spatial simulation, interpolation, environmental assessment, geoinformation technologies, water areas, Gulf of Finland**

---



УДК 62.316.454.5

Е. П. Попечителев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Методики тренировки малых групп операторов на основе принципов уравновешивания и рефлексивных компьютерных игр

Рассмотрены методические возможности гомеостатических методик, предназначенных для оценки и тренировки навыков совместной деятельности у малых групп специалистов – операторов информационных систем различного назначения. Методики основаны на использовании простых тестовых изображений, представляемых на экране монитора компьютера, и организации рефлексивной групповой компьютерной игры, при выполнении которой создается эффект совместной деятельности.

### Малая группа операторов, гомеостатические методики, принцип уравновешивания, тестовые изображения, рефлексия, компьютерные игры

Методы организации и обучения малых групп операторов (МГО) к совместной работе представляют большой практический интерес при решении широкого круга прикладных задач. При их решении каждый член такой группы решает какую-то свою частную задачу, а результат выполнения главной задачи зависит от согласованности работы всех членов МГО. Для обучения навыкам совместной работы требуются специальные тестовые методики и технические средства, относящиеся к классу биотехнических измерительно-вычислительных систем.

Задачи, на которых обучается МГО, принято определять как групповые тесты в отличие от тестовых заданий индивидуальной подготовки, а наиболее сложную проблему для них представляет такое их построение, при котором обеспечивается эффект совместной работы. Этот эффект может быть достигнут только тогда, когда на выходной результат выполнения теста будет влиять деятельность всех участников эксперимента. Для создания таких условий необходимо выбрать задания, в которых каждый член группы имеет возможность изменить совместный результат, управляя им с помощью индивидуального органа управления, но при этом он должен учитывать, что такие же возможности есть у всех остальных участников. Следовательно, индивидуальные действия каждого

члена группы должны быть согласованы с действиями других участников.

Тестовые методики, в которых группа поддерживает постоянный результат совместной работы, определяют как гомеостатические (ГСМ), а принцип, на котором они основаны, – принципом уравновешивания [1]–[3]. В классических вариантах ГСМ в качестве выходного результата часто выбирают: установку совместными усилиями заданной температуры воды или выходного напряжения, перемещение стрелочного указателя до его совмещения с заданным положением или по заданной траектории и другие. Во всех подобных методиках у каждого члена группы имеется возможность самостоятельно изменять результат совместной работы.

В статье рассмотрены новые методические возможности гомеостатических методик, построенных на использовании компьютерных технологий и тестовых заданий в виде визуальных изображений. Такие методики предназначены для углубленного обучения навыкам коллективной работы и оценки готовности МГО к совместной деятельности.

**Варианты гомеостатических методик, построенных на принципе уравновешивания.** Использование компьютерных информационных технологий позволяет значительно упростить из-

вестные гомеостатические методики и расширить их методические возможности. Это достигается за счет использования специально сформированных сюжетных тестовых изображений. Кроме того, заранее оговариваются правила осознанного принятия решения по управлению сюжетом (так называемые «руководящие принципы») и выбора способа движения результата управления («тестовые реакции») [3], [4]. Тестовые изображения разделяются на две независимые части – эталонную и рабочую, при этом сюжеты в каждой части совпадают. Сюжеты содержат ряд (по числу членов группы) фрагментов; отличия сюжетов касаются размеров или пространственного положения фрагментов. Параметры каждого фрагмента в эталонной части задает экспериментатор, тем самым определяя групповое задание. Параметрами фрагментов в рабочей части управляют члены группы; конечным результатом считается полное совпадение параметров фрагментов в обеих частях. При таком построении тестового задания имеется возможность постоянного контроля текущего сюжета в рабочей части и вычисления его отклонения от сюжета, заданного в зоне эталона. Такая регистрация позволяет контролировать процесс выполнения задания и оценить вклад каждого участника в конечный результат.

Организация подобного эксперимента должна удовлетворять ряду особых требований:

- обеспечение взаимозависимости деятельности всех членов группы, при которой любое действие любого участника должно влиять на выбор действий остальных;

- выбор максимально простых тестовых заданий, обеспечивающих однотипность конкретных действий каждого члена группы и исключающих необходимость предварительного освоения специальных навыков по управлению сюжетами;

- одновременное восприятие конечного (эталонного) и текущего результата совместной деятельности всеми членами группы;

- наличие опосредованной оценки текущего результата, характеризующего деятельность группы в целом при статистической обработке результатов выполнения тестового задания.

Учет этих требований к организации групповых экспериментов возможен при организации компьютерных рефлексивных игр [5], [6], в которых управление размером собственной полосы осуществляется на основе приобретаемого опыта и воображения, без непосредственных информационных подсказок со стороны других участни-

ков экспериментов. В таких играх изображение группового теста исполняет функцию источника воздействия на физические, интеллектуальные и духовные качества каждого члена МГО.

Наиболее простым тестовым изображением считается так называемый полосковый сюжет, представляющий собой сюжет  $J_T$  из множества связанных прямоугольников разной ширины по числу членов группы. Любое изображение из этого множества должно удовлетворять только одному обязательному требованию: ширина полос – величина положительная, т. е.  $\tau_n \geq 0$  для любых  $n$ . Пример такого изображения для малой группы из пяти членов приведен на рис. 1. В качестве примера рассмотрим организацию групповых исследований по гомеостатической методике, используя этот тест.

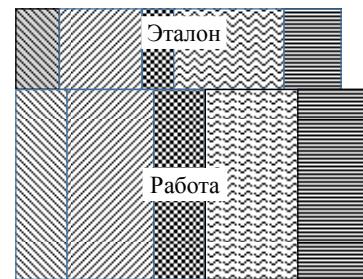


Рис. 1

В верхней части тестового изображения  $J_T$  представлен «Эталон» – набор пяти прямоугольников разной ширины. Их разная штриховка позволяет отличить прямоугольники друг от друга; вместо штриховки удобнее использовать цветовую окраску полос. Прямоугольники внизу изображения определяют рабочую часть – «Работа»; их ширина зависит от управляющих действий членов группы. Конечной целью работы всей группы служит выравнивание суммарного размера и размера каждой полосы в сюжете рабочей части, подстраивая их под размеры эталона. Для изменения ширины своей полосы каждый участник имеет индивидуальный пульт управления. Принцип уравновешивания для такого типа тестового задания сводится к визуальному контролю размера полос в рабочей и эталонной частях теста и регулированию их размеров до обеспечения полного соответствия. Несмотря на кажущуюся простоту тестового сюжета с его помощью можно провести глубокие исследования по оценке готовности МГО к совместной работе.

Представим выбранное тестовое изображение  $J_T$  в виде двух частей – эталона  $J_\vartheta$  и работы  $J_p$  (рис. 1), каждая из которых включает пять полос различной ширины:

$$\begin{aligned} J_T &\rightarrow \sum_{n=1}^5 \tau_{\vartheta n} = T_\vartheta; \\ J_p &\rightarrow \sum_{n=1}^5 \tau_{pn} = T_p; \quad J_T = J_\vartheta + J_p, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau_{\vartheta n}$ ,  $\tau_{pn}$  – размер  $n$ -й полосы эталонной и рабочей частей;  $T_\vartheta$ ,  $T_p$  – общий размер эталонной и рабочей частей в тестовом изображении; в начале эксперимента  $T_\vartheta \neq T_p$ .

Для установки размеров полос в рабочей и эталонной частях теста определим множество воздействий – управляющих сигналов от членов группы. Такие воздействия отражаются в форме векторов воздействия для каждого момента времени  $t$ :

$$\mathbf{A}_{pt} = \begin{vmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_5 \end{vmatrix}_{pt} = \left\{ \alpha_{pj} \right\}_{51}; \quad \mathbf{A}_{\vartheta t} = \begin{vmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_5 \end{vmatrix}_{\vartheta t} = \left\{ \alpha_{\vartheta j} \right\}_{51},$$

где  $\alpha_{pj}(t)$  –  $j$ -е нормированное управляющее воздействие при формировании полос в рабочей части тестового изображения, отражающие его решение по изменению содержания  $J_p$ ;  $\alpha_{\vartheta j}$  – воздействие при установке размера  $j$ -й полосы в эталонной части  $J_\vartheta$ ;  $j = 1..5$ .

Векторы воздействий  $\mathbf{A}_{pt}$  и  $\mathbf{A}_{\vartheta t}$  связаны с размерами полос системой уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \tau_1 = k_{11}\alpha_1 + k_{12}\alpha_2 + \dots + k_{15}\alpha_5, \\ \tau_2 = k_{21}\alpha_1 + k_{22}\alpha_2 + \dots + k_{25}\alpha_5, \\ \dots \\ \tau_5 = k_{51}\alpha_1 + k_{52}\alpha_2 + \dots + k_{55}\alpha_5, \end{cases} \quad (2)$$

где  $k_{nj}$  – коэффициенты влияния действий  $n$ -го оператора на  $j$ -ю полосу; управляющие воздействия  $\alpha_n$  являются функциями от времени и изменяются в процессе выполнения задания по инициативе члена группы.

В матричной форме система уравнений (2) принимает вид

$$T_p = K_p \mathbf{A}_{pt}, \quad T_\vartheta = K_\vartheta \mathbf{A}_{\vartheta t}, \quad (3)$$

где  $K$  – матрица коэффициентов влияния:

$$K = \begin{vmatrix} k_{11}, k_{12}, \dots, k_{15} \\ k_{21}, k_{22}, \dots, k_{25} \\ \dots, \dots, \dots, \dots \\ k_{51}, k_{52}, \dots, k_{55} \end{vmatrix} = \left\{ k_{nj} \right\}_{j=1; n=1}^{5, 5}.$$

Индивидуальные коэффициенты влияния  $k_{nj}$  могут изменяться в пределах от нуля до единицы; их сумма для каждого  $n$ -го оператора равна единице. Коэффициенты влияния  $k_{nj}$  при  $n = j$  (т. е. диагональные элементы матрицы  $K$ ) также могут принимать разные значения в этом же диапазоне, характеризуя разную степень влияния конкретного оператора на общий результат; общая сумма  $M$  всех коэффициентов влияния равна количеству

участников, т. е.  $M = N \sum_{j=1}^N k_{nj}$ , так как  $\sum_{j=1}^5 k_j = 1$ ,

то при  $N = 5 \rightarrow M = 5$ .

Изменяя коэффициенты влияния, можно переопределять роль каждого воздействия на общий результат, регулируя тем самым степень «связности» (организованности) системы группового управления. Если все  $k_{nj}$  при  $n = j$  равны единице, то группа считается неорганизованной, поскольку все члены группы, выполняя свое частное задание, работают независимо друг от друга. Возможность независимого изменения всех коэффициентов влияния (в том числе и диагональных коэффициентов) в матрице  $K$  позволяет предложить большое число методик для изучения групповой работы за счет перераспределения управляющих функций между членами группы, по существу изменяя степень организованности системы группового управления. Главное при этом – диагональные коэффициенты, которые задают коэффициент передачи воздействия от  $n$ -го оператора при управлении размером  $j$ -й полосы.

В соответствии с (1) размер любой  $j$ -й полосы определяется как

$$\tau_j = \sum_{j=1}^5 \alpha_j k_{nj}, \quad (4)$$

а сумма полос в каждой части тестового изображения определяется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} T_p &= \sum_{n=1}^5 \tau_{p,j} \sum_{n=1}^5 \sum_{j=1}^5 \alpha_{p,j} k_{n,j}; \\ T_\vartheta &= \sum_{n=1}^5 \tau_{\vartheta,j} \sum_{n=1}^5 \sum_{j=1}^5 \alpha_{\vartheta,j} k_{n,j}. \end{aligned} \quad (5)$$

При этом  $T_p$  и  $T_\vartheta$  не могут превышать размер трафарета представления – размера экрана монитора  $T_0$ , на котором представлено все тестовое изображение.

Для эталонной части  $T_\vartheta$  экспериментатор устанавливает размеры полос по своему усмотрению, поэтому распределение полос может соответствовать жестко организованной системе, а размеры полос могут оставаться неизменными в течение всего эксперимента. Для рабочей части  $T_p$  значения  $k_{n,j}$  могут изменяться за счет действий экспериментатора, который, манипулируя этими коэффициентами, создает конкретное тестовое задание. Например, если все коэффициенты влияния одинаковы, то систему управления можно считать неорганизованной, так как действия каждого оператора в одинаковой степени влияют на размеры всех полос. Но если все коэффициенты, кроме диагональных, равны 0, а диагональные в общем случае имеют разные значения – это жестко организованная система управления с разным влиянием членов группы на общий размер  $T_p$ .

Общая ширина полос в каждой части тестового изображения в общем случае может изменяться в момент установки новых значений  $\alpha_j$ . Такой вариант задания соответствует классической методике Ф. Д. Горбова, когда вся группа обеспечивает только выравнивание общей ширины полос в рабочей части по эталону до момента, когда  $T_p = T_\vartheta$ . В какие-то рабочие моменты времени  $T_p$  может превышать размер  $T_\vartheta$  или быть меньше  $T_\vartheta$ , что служит побудительным сигналом для работы всех участников.

Определим методики гомеостатического типа, при выполнении которых МГО должна обеспечить установку значения общего размера рабочей части  $T_p$  за счет выполнения частных заданий, из которых складывается общий результат, как *методики линейного уравновешивания*. По регистрации изменений  $\alpha_{p,j}$  (эти значения связаны с управляющими сигналами от каждого члена группы) легко установить, кто и как работал в процессе решения теста, выяснить взаимопонимание в группе и даже выявить отношение к работе каждого члена группы.

Однако в отличие от классического варианта перед членами группы может быть поставлена еще одна дополнительная задача – выполнить уравновешивание не только общего размера тестового изображения, но и размера собственных полос, т. е. добиваться равенства  $\tau_{p,n} = \tau_{\vartheta,n}$  для всех полос, хотя вначале они могут отличаться друг от друга. Это существенно усложняет тестовое задание, но при выборе правильной тактики подобный тест решается легко – достаточно последовательно установить размеры полос друг за другом, чтобы их общий размер в каждой части теста совпадал. В этом состоят особенность и ограничения метода линейного уравновешивания.

Для гомеостатических методик интересным представляется случай, когда общий размер полос  $T_0^* \leq T_0$  установлен один раз перед началом эксперимента и остается постоянным в течение всего эксперимента, т. е.  $T_\vartheta = T_p = T_0^*$ . При таком тестовом изображении любое активное действие любого члена группы приводит одновременно к изменениям размеров всех полос в изображении, что и создает необходимые условия для совместной работы. Изменяется и целевая функция работы МГО – совместными усилиями добиться совпадения размеров полос в эталонной и рабочей частях тестового изображения.

Уравнение (5) справедливо для разных частей изображения, но матрица  $K_\vartheta$  для эталонной части  $J_\vartheta$  может быть выбрана произвольно, например так, чтобы  $k_{n,j} = k_\vartheta = \text{const}$  при любых  $n = j$  и  $k_{n,j} = 0$  при  $n \neq j$  (вариант «жесткой» системы регулирования). Размеры полос могут быть любыми, но их сумма должна соответствовать условию (6).

Тогда для эталонной части выражение (5) с учетом (3) принимает следующий вид:

$$T_0^* = \sum_{n=1}^5 \tau_{n,j} = k_\vartheta \sum_{j=1}^5 \alpha_{\vartheta,j}, \quad (6)$$

откуда следует, что для размера полос в эталонной части можно воспользоваться относительной величиной

$$\begin{aligned} \tau_{n,j}^* &= \tau_{\vartheta,n,j} / T_0^* = \\ &= k_\vartheta \alpha_{\vartheta,n} / \left( k_\vartheta \sum_{j=1}^5 \alpha_{\vartheta,j} \right) = \alpha_{\vartheta,n} / \sum_{j=1}^5 \alpha_{\vartheta,j}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует, что для обеспечения постоянства общего размера полос сумма управляющих воздействий должна быть ограниченной, т. е.

$$\sum_{j=1}^5 \tau_{\exists n j} / T_0^* = \sum_{j=1}^5 \alpha_{\exists j} = \alpha_{\max},$$

откуда следует, что

$$\sum_{j=1}^5 \tau_{\exists n j} = T_0^* \alpha_{\max}. \quad (8)$$

Разделив обе части (8) на  $\sum_{j=1}^5 \alpha_{\exists j}$  при усло-

вии  $\sum_{j=1}^5 \alpha_{\exists j} = \sum_{j=1}^5 \alpha_p j = \alpha_{\max}$ , получаем

$$T_0^* = \sum_{j=1}^5 k_n j \alpha_j = \sum_{j=1}^5 \tau_{\exists n j} / \alpha_{\max}.$$

Для рабочей части  $J_p$  выражение (5) с учетом (4) и (6) примет другой вид:

$$T_p = T_0^* = \sum_{j=1}^5 \tau_p j = \sum_{j=1}^5 \alpha_p j k_n j = \alpha_{\max},$$

откуда следует, что регулировка размера любой  $n$ -й полосы на рабочем участке тестового изображения  $T_0^*$  изменения соответствует соотношению

$$\tau_{n j} = \frac{\alpha_p j k_n j}{\alpha_{\max}} = k_n j \frac{\alpha_p j}{\alpha_{\max}}, \quad (9)$$

что соответствует нелинейному преобразованию управляющих воздействий  $\alpha_p j$  в ширину полос  $\tau_{n j}$ . Такие методики определяются, как *методики нелинейного уравновешивания*.

**Методики обучения группы на принципе нелинейного уравновешивания.** Все гомеостатические методики основаны на выборе коэффициентов матрицы влияния, изменения которые удается предложить варианты различных способов обучения и контроля уровня подготовки МГО [7], [8]. Среди методик, основанных на принципе линейного и нелинейного уравновешивания, практический интерес представляют варианты, построенные на принципе нелинейного уравновешивания, так как для них не существует такой особой тактики решения теста, как для методик линейного уравновешивания. Тип взаимодействия между членами группы можно регулировать изменением коэффициентов матрицы  $K$ . Далее приведены некоторые конкретные методики,

позволяющие проводить обучение и получать сведения о возможностях группы.

1. *Изменение взаимосвязей между членами группы.* Возможны два варианта выполнения тестового задания, изменяя либо только диагональные, либо все остальные коэффициенты влияния.

А. Изменяя значения диагональных коэффициентов, можно управлять степенью влияния каждого участника на общий результат. Этот вариант соответствует случаю влияния действий каждого члена группы только на «собственную» полосу в изображении  $J_T$ , но при этом изменяться будут все полосы (!); в этом и состоит особенность нелинейного уравновешивания.

Пусть, например, коэффициенты влияния  $k_{n j} = k^*$  при  $n = j$  и  $k_{n j} = 0$  при  $n \neq j$ . Тогда относительный размер  $j$ -й рабочей полосы по аналогии с выражением (9) определяется как

$$\tau_{n j}^* = \tau_{n j} / T_0^* = \frac{k_{n j}}{T_0^*} \frac{\alpha_{n j}}{\alpha_{\max}},$$

т. е. размер полосы пропорционален относительной величине управляющего воздействия  $n$ -го оператора; при этом абсолютные значения  $\alpha$  определяются техническими условиями реализации методики.

Выполнение задания возможно для любых  $j$  (если и  $k_p = k_{\exists}$ ), поэтому величина  $\Delta \tau_j = \tau_{\exists j} - \tau_p j$  отражает рассогласование размеров  $j$ -й полосы в рабочей и эталонной частях тестового изображения в некоторый момент времени  $t$ .

Учитывая, что таких разностей – пять, по числу полос, можно ввести параметр рассогласования  $\Delta \tau_j$ , определяемый выражением

$$\Delta \alpha(t) = \sum_{j=1}^5 \Delta \tau_j.$$

Рассогласование будет изменяться в процессе выполнения теста, поэтому можно ввести функцию времени  $\Delta \alpha(t)$ , которая будет содержать информацию об особенностях исследуемой группы. Можно предложить и другие способы извлечения информации о работе группы при регистрации значений рассогласования [9].

Б. Если изменять недиагональные коэффициенты, то можно создавать разные условия взаимодействия между членами группы, определяя, какие

из них информационно связаны между собой, существует ли односторонняя связь между ними или предусмотрена двусторонняя связь. В этом варианте регистрация функции  $\Delta\alpha(t)$  также предоставляет экспериментатору информацию о качестве выполнения теста.

Таким образом, для контроля работы исследуемой МГО при манипуляциях с коэффициентами влияния достаточно фиксировать рассогласование управляющих воздействий операторов.

**2. Выделение лидера из группы операторов.** Назначение лидера и степень его «лидерства» можно регулировать установкой соответствующих коэффициентов матрицы  $K$ . Такой вариант ГСМ связан с переопределением ролей членов группы наделением одного из них функциями «лидера» за счет изменения его коэффициентов влияния. Управляя этими коэффициентами, можно определять не только вероятностное наличие способности к руководству, но и стиль управления лидера. Для выбранного оператора устанавливается большое значение его коэффициента по сравнению с другими. Изменяя номер оператора, можно передавать функцию «лидера» любому члену группы, а осуществляя такое переключение в разные моменты времени, – оценить способность группы определять, кому переданы лидирующие функции. Передавая функции регулирования коэффициентов влияния какому-либо члену группы, можно дополнительно выявить его лидерские способности, определяя момент времени, когда он начинает понимать свою роль.

**3. Тренировка группы на выполнение сложных заданий.** Наличие эталонной части в тестовом изображении позволяет усложнить работу группы, создать эффект напряженности, например выполняя тест в условиях «помех», которые можно ввести разными способами. Один из них может быть связан с управлением шириной одной из полос в эталонной части тестового изображения в соответствии с некоторой функциональной зависимостью или по случайному закону. Так как размеры полос взаимосвязаны, то все полосы в эталонной части также будут изменяться. Например, к одному из символов эталонной части необходимо подключить генератор синусоидальных колебаний низкой частоты, при этом все полосы на эталонной части начнут изменяться по ширине. Целью группы становится найти условия синхронного управления полосами на рабочей его

части и отслеживать изменения сюжета эталонной части за счет совместных действий в рабочей части. Для характеристики качества работы группы в этом случае можно использовать тот же параметр рассогласования. Если вместо гармонического сигнала на управление эталонной части поступит случайный сигнал, время поступления которого зависит от действий экспериментатора, то можно оценить устойчивость работы группы к этим влияниям.

Возможности выбора закона управления на эталонной части неограничены, а следовательно, и методические возможности тренировки группы также расширяются. Необходимость такой тренировки объясняется тем, что в экстремальных условиях возможны искажения информации, на основании которой принимаются важные решения. Особое значение это приобретает при работе в условиях чрезвычайных ситуаций, так как от правильности решений может зависеть успех всей спасательной операции.

**4. Преодоление мешающих воздействий.** Еще одна интересная методическая возможность связана с изучением способности группы тренировать навыки совместной деятельности при наличии мешающих воздействий, в качестве которых могут использоваться громкие внешние звуки или вспышки света, усиленный шум, вмешательство других воздействий. Эти причины могут привести к психофизиологическим изменениям состояния человека и вызвать искажения воспринимаемой информации или принимаемых решений. Методические способы выполнения таких исследований и получения объективных данных совпадают с рассмотренными выше приемами

Перечисленные возможности не исчерпываются методическими приемами изучения деятельности МГО с помощью ГСМ.

Таким образом, рассмотренные варианты ГСМ различаются:

- расширением видов тестовых заданий, в частности, за счет автоматического поддержания постоянства общего параметра при управлении частными параметрами, из которых слагается общий результат;
- возможностью определения индивидуального задания для каждого члена группы;
- обеспечением объективного контроля работы каждого члена группы с помощью записи изменений размера «собственной» полосы в течение всего времени эксперимента;

- возможностью наглядного отображения динамики работы группы за счет контроля функции рассогласования  $\Delta\alpha(t)$ ;
- простотой введения в эксперимент мешающих факторов.

Очевидно, что тестовое изображение в виде полос разного размера не единственно возможное для организации исследований групповой деятельности по методикам гомеостатического типа. Однако этот вид тестового изображения наилучшим образом соответствует тем требованиям, которые были сформулированы ранее для тестовых заданий ГСМ.

Процесс решения группового теста представляет собой рефлексивную компьютерную игру, в которой совместными усилиями всех членов группы необходимо сформировать заданный эталонный сюжет на рабочей части тестового изображения. Рассмотренные методики значительно расширяют методические возможности систем тренировки и обучения малых групп специалистов. Они приобретают особое значение при реализации ГСМ для организации групповой деятельности программным способом с помощью ПЭВМ, так как в этом случае возможно только дискретное изменение управляющего воздействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин А. А. Надежность профессиональной деятельности операторов сложных эргатических систем. СПб.: Изд-во ЛГУ им. А. С. Пушкина, 2006. 140 с.
2. Автоматизированные системы обучения. Методы и средства оценки эффективности / С. А. Багрецов, Н. М. Опарина, В. М. Львов, Б. Я. Шлаен. Тверь: Изд-во ООО «Триада», 2005. 104 с.
3. Попечителев Е. П. Модели гомеостатических методик для исследования групповой деятельности операторов // Медицинская техника. 1996. № 4. С. 13-19.
4. Ахлаков М. К., Болсунов К. Н., Попечителев Е. П. Тестовые системы в медико-биологических исследованиях: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 80 с.
5. Попечителев Е. П., Болсунов К. Н. Компьютерные рефлексивные игры в подготовке малых групп специалистов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 6. С. 110-116.
6. Попечителев Е. П. Компьютерные технологии изучения работы малых групп специалистов // Изв. ЮФУ. Тематич. вып. «Медицинские информационные системы». 2008. № 5. С. 9-12.
7. Попечителев Е. П. Технологии обучения и оценки уровня готовности к совместной работе малых групп операторов // Вестн. Костромского гос. ун-та им. Н. А. Некрасова. 2009. Т. 15. С. 3-8.
8. Попечителев Е. П., Болсунов К. Н. Рефлексивные методики профессионального отбора малых групп операторов для биотехнических систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 5. С. 58-64.
9. Попечителев Е. П., Болсунов К. Н. Биотехнические системы оценки уровня готовности к совместной работе малых групп операторов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 6. С. 83-92.

E. P. Popechitelev

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## TECHNIQUE TRAINING SMALL GROUP OF OPERATORS BASED ON PRINCIPLES OF BALANCE AND REFLEXIVE GAMES

*Methodical possibilities homeostatic methods, designed to evaluate the training and skills of joint activity in small groups of specialists – the operators of information systems for different purposes. Methods based on the use of simple test images represented on the computer screen, and the organization of the reflexive group of computer games, which is created when the effect of the joint venture.*

**A small group of operators homeostatic method, the principle of balancing test image, reflection, computer games**

УДК: 615.47:621.37.39+519.711.3

Э. П. Тихонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Концептуальная модель предметной области автоматической фрагментации электрокардиосигналов на базе логической схемы алгоритмов\*

На основе анализа информации, представленной за последние десятилетия, выполнен обзор и сравнительный анализ алгоритмов автоматической фрагментации электрокардиосигналов (ЭКС). Осуществлена систематизация на базе логических схем алгоритмов (ЛСА) в соответствии с предметной областью, рассмотренной в [16]. Разработанный подход ориентирован на повышение эффективности использования накопленного информационного ресурса (знания) в области автоматической диагностики по ЭКГ с целью дальнейшего совершенствования и применения методов, алгоритмов и средств автоматизации медицинской диагностики.

### Электрокардиосигнал (ЭКГ), обзор, сравнительный анализ, автоматическая фрагментация, логические схемы алгоритмов

Известно [1], что профилактика и лечение сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) влечут за собой наибольшие прямые и косвенные медицинские расходы, поэтому исследования, направленные на совершенствование методов и средств в области кардиологии, имеют существенное значение для обеспечения здравоохранения населения страны. Уже в восьмидесятые годы прошлого века появились достаточно серьезные обзоры по разработке алгоритмов, ориентированных на автоматическую обработку ЭКС на базе микропроцессорной техники [2]. Особенno эффективна в качестве средства профилактики ССЗ постановка диагнозов на ранних стадиях заболевания на основе оперативного анализа ЭКС. Достижения в области информационных технологий при сборе, обработке, хранении и диагностике нозологических состояний пациентов по ЭКС [3]–[15], в том числе ориентированные на широкую сеть мобильных телефонов, в перспективе могут полностью вытеснить холтеровские устройства [2], [3]. Действительно существенный недостаток холтеровских аппаратов – отсутствие надежных алгоритмов автоматического обнаружения аритмий в реальном масштабе времени и своевременной передачи информации о критическом состоянии сердца. Более поздние обзоры, например [13], демонстрируют значительное расширение ис-

пользуемых подходов для автоматической фрагментации ЭКГ. Как отмечено в [16], ввиду важности решения данной проблемы и большого объема накопленной информации в виде априорных знаний целесообразно анализировать методы, способы и, как следствие, технические средства автоматической фрагментации ЭКС в виде отдельной предметной области (ПрО), выделив ее из общей ПрО по автоматизации диагностики на основе электрофизиологических показателей. Концептуальная (понятийная) модель данной ПрО (КМПрО) рассмотрена в [16]. Возникает вопрос о необходимости анализа алгоритмов как некоторых альтернатив автоматической фрагментации ЭКС на базе КМПрО. Содержание ответа на этот вопрос включает:

- разработку компактного описания алгоритмов (альтернатив) на языке ЛСА;
- создание базы знаний по множеству алгоритмов и реализующих их операторов;
- сравнительный анализ алгоритмов в зависимости от цели их использования, например в мобильных или стационарных средствах автоматической диагностики и на основе критериев и правил, определяющих качество возможных альтернатив;
- использование базы знаний для решения задачи синтеза новых, более совершенных в том или ином смысле алгоритмов, определяющих основу соответствующих технических средств;

---

\* Окончание. Начало в № 8, 2015.

- оптимизацию алгоритмов автоматической фрагментации в зависимости от поставленных условий, в том числе условий съема информации, и цели фрагментации ЭКС;
- разработку универсальной диагностической среды искусственного интеллекта.

Анализ разнообразных источников (см., например, [1]–[15]), в том числе обширные обзоры по рассматриваемой тематике, показал большое количество алгоритмов, способов и устройств автоматической фрагментации, ориентированных преимущественно на обнаружение QRS-комплексов, R-зубцов и RR-интервалов, в которых часто используются одни и те же операторы преобразования, отличающиеся друг от друга незначительными изменениями параметров, комбинацией и последовательностью выполнения. Такое разнообразие алгоритмов, направленных по существу на достижение единой цели – автоматической фрагментации ЭКС, возникло не только по причине различных требований к алгоритмам в зависимости от технических средств, их реализующих, и от сложности по своей природе сигналов ЭКС, различных условий их получения, разнообразием наработанных алгоритмов обработки информации и технических средств измерения ЭКС и диагностики. Отсутствие общей математической модели ЭКС и, как следствие, выполненного анализа, проведенного зачастую только на естественном языке, для обоснования того или иного изменения алгоритма или коррекции его элементов – операторов (см., например [1], [2], а также информацию по патентам, приведенную в табл. 1), приводит только к констатации самого факта изменения алгоритма с обоснованием, часто отсутствующим, некоторыми числовыми сведениями по результатам его апробирования на ограниченном множестве ЭКС. Перечисленное значительно затрудняет выбор и предпочтительность той или иной альтернативы. Авторы новых алгоритмов оставляют этот не менее трудный этап между разработкой алгоритма и его реализацией (применением) на усмотрение разработчиков и пользователей соответствующих алгоритмов, которые в этом случае оказываются поставлены перед необходимостью решения задачи выбора из множества альтернатив.

Для того чтобы иметь общее представление об особенностях ЭКС множества пациентов, включая их индивидуальную изменчивость, патологии и условия измерения, и тем самым обосновать ос-

новную причину разнообразия алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС в рамках общей концептуальной модели, обратимся к следующим формальным моделям, описывающим ЭКС. Прежде всего, для описания идеальной ЭКС общей математической моделью без учета артефактов, порожденных внешними воздействиями, но с охватом всевозможных индивидуальных особенностей пациентов, воспользуемся неявной функцией вида

$$Y(t) = F(\mathbf{X}_n(t)), \quad (1)$$

где  $Y(t)$  – идеальный ЭКС множества пациентов  $\Omega$  без патологий и без учета всех воздействующих артефактов при гипотетическом съеме ЭКС посредством соответствующего технического средства – электрокардиографа;  $\mathbf{X}_n(t)$  – вектор параметров включая параметры сердца, оказывающих влияние на форму ЭКС на выходе датчиков здорового пациента, причем зависит от составляющих, представленных в виде координат  $n$ -го пространства параметров:  $(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ , т. е. в виде  $\mathbf{X}_n(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$ . Каждая составляющая вектора  $\mathbf{X}_n(t)$  гипотетического множества  $\Omega$  пациентов без патологий с учетом индивидуальных особенностей каждого пациента изменяется в допустимых пределах:  $x_{01}(t) \leq x_1(t) \leq x_{11}(t)$ ;  $x_{02}(t) \leq x_2(t) \leq x_{12}(t)$ ; ...,  $x_{0n}(t) \leq x_n(t) \leq x_{1n}(t)$ . В сокращенной записи вариацию вектора параметров можно еще представить в виде

$$[\mathbf{X}_{0n}(t) \leq \mathbf{X}_n(t) \leq \mathbf{X}_{1n}(t)]$$

или

$$\mathbf{X}_n(t) \in [\mathbf{X}_{0n}(t), \mathbf{X}_{1n}(t)]. \quad (2)$$

Таким образом, область изменения параметров  $[\mathbf{X}_{0n}(t), \mathbf{X}_{1n}(t)]$  аппроксимируется некоторым  $n$ -мерным параллелепипедом  $\mathbf{P}_n$ , поэтому  $\mathbf{X}_n(t) \in \mathbf{P}_n$ . Необходимо отметить еще одну важную сторону, связанную с особенностями составляющих вектора параметров  $\mathbf{X}_n(t)$ . Дело в том, что даже для конкретного пациента значения параметров, определяющих точку в  $n$ -мерном параллелепипеде  $\mathbf{P}_n$ , изменяются во времени квазислучайно, хотя и в ограниченном объеме, и в общем случае не стационарно, например в зависимости от возраста. В дальнейшем в статье ис-

пользуется последняя запись:  $\mathbf{X}_n^*(t) \in \mathbf{P}_n^*$ , с квантором принадлежности  $\in$ . С учетом (1) и (2) для множества пациентов  $\Omega^*$  с различными патологиями можно записать

$$Y^*(t) = F(\mathbf{X}_n^*(t)), \quad (3)$$

где  $\mathbf{X}_n^*(t) \in \mathbf{P}_n^*$ .

Сложность диагностики заключается в том, что даже если пересечение множеств  $\Omega$  и  $\Omega^*$  пусто, т. е.  $\Omega \cap \Omega^* = \emptyset$ , то для пересечения  $n$ -мерных параллелепипедов  $\mathbf{P}_n$  и  $\mathbf{P}_n^*$  это условие не выполняется, т. е.  $\mathbf{P}_n \cap \mathbf{P}_n^* \neq \emptyset$ . Следовательно, создаются предпосылки того, чтобы в области пересечения параллелепипедов  $\mathbf{P}_n$  и  $\mathbf{P}_n^*$  функции  $Y(t)$  и  $Y^*(t)$  стали трудноразличимыми или, в некоторых случаях, вообще неразличимыми. Ситуация на практике ухудшается еще больше, так как приходится иметь дело не с гипотетическим, т. е. идеальным ЭКС, а с тем сигналом, который получают с помощью технических или инструментальных средств, тем более, когда это осуществляется при длительном наблюдении, т. е. при мониторинге. В этом случае формулы (1) и (3) представляются в виде

$$\begin{aligned} Y_{\Xi}(t) &= F_{\Xi}(\mathbf{X}_n(t), \Xi(t)); \\ Y_{\Xi}^*(t) &= F_{\Xi}(\mathbf{X}_n^*(t), \Xi(t)), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Xi(t)$  – вектор помех, действующих на ЭКС, причем  $\Xi(t) = (\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_m(t))$  и  $\Xi(t) \in \Lambda_m$ .

Обычно в математической модели воздействие помех на ЭКС учитывают в виде аддитивных составляющих, причем число составляющих  $m$  определяется разнообразием помех по их виду: высокочастотный широкополосный шум электронных средств, сетевая помеха, триммер мышц и некоторых других, например помех, вызванных движением пациента, поляризацией электродов и т. д. В этом случае (4) представляется в виде

$$\begin{aligned} Y_{\Xi}(t) &= F_{\Xi}(\mathbf{X}(t)) + \xi_1(t) + \xi_2(t) + \dots + \xi_m(t), \\ Y_{\Xi}^*(t) &= F_{\Xi}(\mathbf{X}_n^*(t)) + \xi_1(t) + \xi_2(t) + \dots + \xi_m(t). \end{aligned}$$

Предположим, что для идеального случая и с учетом помех для областей задания функции, описывающей ЭКС, имеем

$$\mathbf{P}_n \cap \mathbf{P}_n^* = \Delta \mathbf{P}_n \text{ и } \mathbf{P}_m^{\xi} \cap \mathbf{P}_m^{\xi*} = \Delta \mathbf{P}_m^{\xi}, \quad (5)$$

где  $\Delta \mathbf{P}_n$  и  $\Delta \mathbf{P}_m^{\xi}$  – области неопределенности при автоматической фрагментации ЭКС без учета помех и с учетом помех соответственно. С очевидностью следует, что  $\Delta \mathbf{P}_m^{\xi} \supset \Delta \mathbf{P}_n$ , поэтому положение с разделением областей в виде многомерных параллелепипедов  $\mathbf{P}_n$  и  $\mathbf{P}_n^*$  по заданным на них функциям  $Y_{\Xi}(t)$  и  $Y_{\Xi}^*(t)$  только усложняется, а область неопределенности  $\Delta \mathbf{P}_m^{\xi}$  возрастает. Причем само увеличение этой области нестабильно от эксперимента к эксперименту и не определенно, так как связано со множеством факторов, зависящих как от вида и совершенства технических средств съема ЭКС, так и от аккуратности проводимой стандартной процедуры измерения ЭКС медицинским персоналом. В связи с этим появились работы (например [17]), посвященные методам и средствам контроля качества технических средств и моделирования ЭКС. Причем в этих работах особо отмечается, что из-за анализа сигналов неудовлетворительного качества формируются ложные заключения о состоянии пациента, а применение аналоговых и цифровых фильтров в технических средствах для борьбы с помехами приводит не только к удалению шумовых составляющих, а еще и искаивает информативные составляющие (фрагменты) ЭКС. Эти искажения расширяют области неопределенности (5) при автоматической фрагментации и существенно повышают вероятность имитации патологических изменений в результатах измерения ЭКС здорового пациента. Обратим внимание также на тот факт, что один и тот же алгоритм автоматической фрагментации должен максимально сохранять свои свойства для сигналов  $Y_{\Xi}(t)$  и  $Y_{\Xi}^*(t)$ , т. е. для  $Z_{\Xi}(t) = Y_{\Xi}(t) \cup Y_{\Xi}^*(t)$  ( $\cup$  – операция объединения), в этом смысле он должен обладать свойством грубости. Без учета помех, т. е. в идеальном случае, соответственно получаем  $Z(t) = Y(t) \cup Y^*(t)$ .

Проведенный анализ в общем случае выявляет причину тех трудностей, с которыми столкнулись при разработке алгоритмов автоматической фрагментации, и объясняет то множество разнообразных алгоритмов, которое появилось за последние десятилетия с целью автоматической фрагментации ЭКС. Как показал анализ различ-

ных алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС (например [1]–[15]), в этих алгоритмах используется почти весь разработанный к настоящему времени в информационных технологиях арсенал методов обработки сигналов:

- разнообразные методы и способы фильтрации, включая адаптивную, аналоговую и цифровую [1], [8], [15];
- модификации вычисления конечных разностей (обычно 1-го и реже 2-го порядков) [1]–[3], [8], [14];
- суммирование: прямое или скользящее в установленных пределах [1], [2], [8];
- процедуры определения экстремумов [18];
- различные виды аппроксимации и преобразований (Фурье, Вейвлета, Гильберта) [1], [2], [5], [6], [11], [15];
- некоторые «экзотические» преобразования, относящиеся, например, к математической морфологии, эмпирической модовой декомпозиции, фрактальным размерностям [11], [12], [15], [18]–[21];
- реализация решающего правила на основе фиксированных, устанавливаемых априорно, плавающих и адаптивных порогов [8], [13];
- использование методов нейронных сетей [1], [8], [15];
- корреляционные алгоритмы [2], [8], [9], [14];
- метод главных компонент [15];
- использование статистики пересечению нулевого уровня [14], [22];
- подходы на основе энтропии [15];
- комбинированные алгоритмы [7].

Рассмотрим эволюцию алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС, преимущественно на запатентованных в России способах, предназначенных для реализации в аналого-цифровых электрокардиографах для решения задачи автоматической фрагментации ЭКС, в течение последних трех-четырех десятилетий на базе ЛСА. Представление об эволюции способов автоматической фрагментации за последнее десятилетие отражено в нескольких перспективных, по мнению автора, алгоритмах, приведенных в табл. 1. Пожалуй одним из первых алгоритмов по автоматической фрагментации был предложен в 1977 г. и описан в [8]. В дальнейшем этот алгоритм при анализе для сокращения текста статьи назван алгоритмом Balda. Описание данного алгоритма на языке ЛСА представлено в первой позиции табл. 1, в которой приведены для сравнения между собой все ЛСА рассмотренных в данной статье алгоритмов из различных источников с

соответствующими ссылками. В табл. 2 выполнена расшифровка транскрипций операторов из ЛСА, приведенных в табл. 1. В качестве примера блок-схема алгоритма Balda приведена на рис. 1, в соответствии с которой и представлен алгоритм на языке ЛСА в табл. 1. Последующий анализ показал, и это непосредственно следует из назначения первых трех операторов (см. рис. 1), что практически во всех разновидностях предложенных алгоритмов автоматической фрагментации микропроцессорными средствами эти три оператора используются в указанном порядке, несмотря на возможные варианты алгоритмов, реализующие эти операторы. Поэтому в дальнейшем эти три оператора объединяются в один оператор **{ПФАЦП}**, транскрипция которого соответствует действиям, указанным на рис. 1. Для многоканального варианта данный оператор по существу сохраняет свои функции, однако добавляется функция коммутации  $m$  каналов, причем порядок выполнения данной функции в сочетании с основными функциями оператора **{ПФАЦП}** не играет какой-либо существенной роли, поэтому транскрипция данного оператора имеет вид **{ПФАЦП <sub>$m$</sub> }**. На рис. 1 оператор **{ПФАЦП}** выделен штриховой линией, во всех остальных случаях представлен в виде отдельного оператора. В опубликованном несколько позднее (1979) алгоритме Murthy и Rangaraj была сделана попытка устраниТЬ те недостатки, которые присущи алгоритму Balda. Основным недостатком алгоритма Balda является низкая помехоустойчивость алгоритма, из-за формирования линейной формы вида

$$L = 1.3\{D_{i1}\} + 1.1\{D_{i2}\},$$

которая используется для обнаружения QRS-комплекса. Действительно, для того чтобы количественно оценить дисперсию абсолютной величины первой разности с временным интервалом дискретизации, превышающим интервал корреляции помехи, рассмотрим равенство

$$M_\xi\{D_{i1}^2\} = M_\xi\{[\Delta Z(t) + \xi(t) - \xi(t + \Delta T)]^2\},$$

где  $M_\xi\{\dots\}$  – оператор определения математического ожидания по случайной величине  $\xi$  в указанные фиксированные моменты времени;  $\Delta T$  – интервал дискретизации, через который берутся отсчеты  $\xi(t)$  и  $\xi(t + \Delta T)$ ;  $\Delta Z(t)$  – приращение неискаженного помехой сигнала ЭКС на интервале  $\Delta T$ . Считая на рассматриваемом интервале помеху стационарной и некоррелированной в указан-

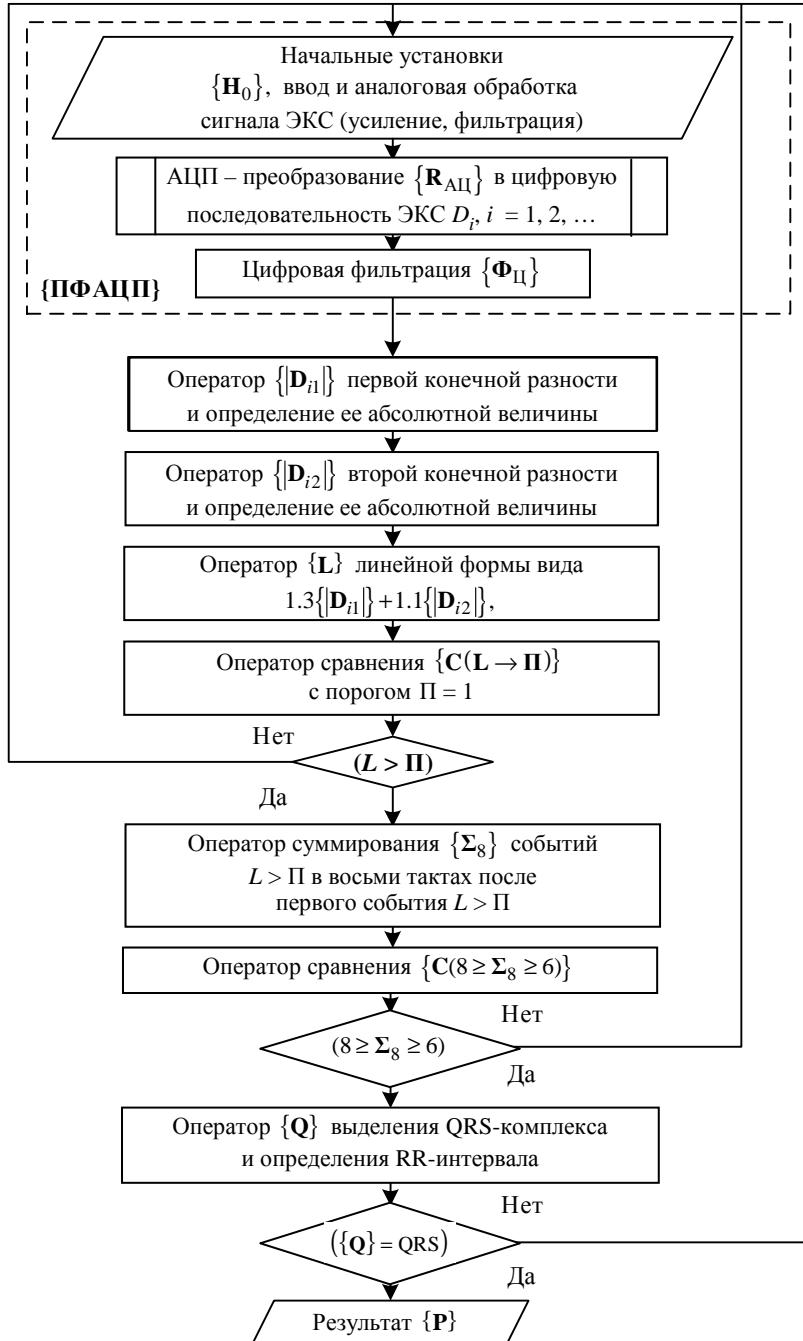


Рис. 1

ных моментах времени с математическим ожиданием, равным нулю, получаем

$$M_\xi \{D_{i1}^2\} = M_\xi \{[\Delta Z(t)]^2\} + 2\sigma_\xi^2,$$

где  $\sigma_\xi^2$  – дисперсия исходной помехи.

Для второй конечной разности уже имеем  $M_\xi \{D_{i2}^2\} = 6\sigma_\xi^2$  в точке отсчета ЭКС, в которой  $\Delta x(t) = 0$ , например для экстремума соответствующего зубца ЭКС. В результате нетрудно установить, во сколько раз увеличится дисперсия линейной

формы  $L$ , по которой при фиксированном уровне порога обнаруживается искомый QRS-комплекс и, тем самым область неопределенности  $\Delta P_m^\xi$ .

В алгоритме I. S. Murthy и M. R. Rangaraj [8] обработка ЭКС после оператора **{ПФАЦП}** осуществляется в соответствии с оператором  $\{\Sigma_{cb}\}$ , названного в источнике оператором скользящего усреднения с линейно убывающим окном ( $N-i+1$ ). По существу этот оператор выполняет математическую функцию суммирования с убывающим весом, большем единицы, так как имеет вид [8]

$$\begin{aligned} M_\xi \{\Sigma_{\text{св}}\} &= \\ &= \sum_{i=1}^N |Z(n-i)|^2 (N-i-1) + \sigma_\xi^2 N (N+1). \quad (6) \end{aligned}$$

Учет в (6) аддитивной помехи  $\xi(n)$ , воздействующей на ЭКС  $x(t)$ , в предположении, что интервал дискретизации  $\Delta T$  (в (6) принято для упрощения записи, что  $\Delta T = 1$ ) превышает интервал корреляции помехи  $\tau_{\xi_k}$ , после выполнения операции усреднения получаем

$$\begin{aligned} M_\xi \{\Sigma_{\text{св}}\} &= \sum_{i=1}^N |Z(n-i)|^2 (N-i-1) + \\ &+ 2\sigma_\xi^2 \sum_{i=1}^N (N-i-1) \end{aligned}$$

или

$$M_\xi \{\Sigma_{\text{св}}\} = N(N+1)(0.5 b^2 + \sigma_\xi^2). \quad (7)$$

Так как форму ЭКС на различных временных интервалах можно аппроксимировать разными функциями, включая линейные функции вида  $Z(n) = a + bn$  ( $a$  и  $b = \text{const}$ ), то для интервалов с линейным изменением ЭКС получаем

$$M_\xi \{\Sigma_{\text{св}}\} = N(N+1)(0.5 b^2 + \sigma_\xi^2).$$

Таким образом, существуют на определенных интервалах фрагменты ЭКС, для которых применение оператора  $\{\Sigma_{\text{св}}\}$  не только не улучшает ситуацию, связанную с воздействий помех, а наоборот – существенно ухудшает. Последующее применение оператора скользящего усреднения (суммирования)  $\{\Sigma_{\text{св}}\}$  в окне  $M$  (суммирование по  $M$ -значениям с делением на  $M$ ) компенсирует ухудшение соотношения между сигналом и помехой и для  $M = 8$  снижает в целом уровень воздействия помехи примерно в 1.41 раза. В связи с проведенным анализом возникают сомнения в существенном улучшении решения задачи автоматической фрагментации ЭКС в результате применения данного алгоритма по сравнению с алгоритмом Balda, даже с учетом элемента адаптации, реализуемого оператором  $\{Q\}$  при выделении QRS-комплекса ЭКС, путем анализа результатов сравнения выхода оператора  $\{\Sigma_{\text{св}}\}$  (скользящего усреднения) с порогом. Адаптация осуществляется по событию, соответствующему превышение порога, поиском максимума результатов усреднен-

ния в заданном скользящем окне  $[-M, M]$ . Дальнейшим совершенствованием изложенных ранее алгоритмов является известный алгоритм Пана–Томпкинса, изложенного в [8] и описанного в виде ЛСА в [16]. Этот алгоритм получил широкую известность, судя по многочисленным ссылкам на него при рассмотрении вновь предложенных алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС. Не останавливаясь на анализе данного алгоритма, перейдем к рассмотрению и, по возможности, сравнительному анализу, алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС, рассмотренных в разных источниках. Компактное описание алгоритмов в виде ЛСА приведено в табл. 1, в последней графе которой указана дополнительно информация об источниках в виде ссылок либо на соответствующий номер в списке литературы, либо на номера патентов, в которых были предложены и рассмотрены соответствующие алгоритмы с указанием года приоритета.

Ввиду ограниченности объема статьи поясняющая информация, представленная на дополнительных рисунках в виде блок-схем алгоритмов с соответствующим раскрытием содержания используемых операторов, выполнена только для некоторых интересных или достаточно сложных случаев. Кроме того, эти примеры помогут быстрее разобраться с теми алгоритмами, которые представлены в табл. 1 в виде ЛСА. Тем не менее, при необходимости всегда можно обратиться к первоисточнику, ссылка на который указана в последней графе таблицы. Как показал анализ, в зарубежных источниках наблюдается устойчивая тенденция к усложнению алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС за счет использования преобразований Фурье, Вейвлета, Гильберта ([1], [2], [5], [6], [11], [15]), применения методов математической морфологии, эмпирической модовой декомпозиции, фрактальной размерности, нейронных сетей ([1], [8], [11], [12], [15], [18]–[21], [22]) и т. д. Решающие правила реализуются на основе, как правило, плавающих и адаптивных порогов с учетом особенностей отмеченных выше различных усложненных преобразований ЭКС. Анализ табл. 2 показывает, что во всех приведенных в табл. 1 алгоритмах, используются операторы предварительной обработки ЭКС  $\{\text{ПФАЦП}\}$ , сравнения с порогом  $\{C(\dots) \rightarrow \Pi\}$  и условным переходом  $(\dots) \geq \Pi \uparrow^i$ .

Таблица 1

№ п/п	Логические схемы алгоритмов автоматической фрагментации электрокардиосигналов	Дополнительная информация и источник
1	$\downarrow^3 \downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{ D_{i1}  \} \{ D_{i2}  \} \{L\} \{C(L \rightarrow \Pi)\} (L \geq \Pi) \uparrow^1 -$ $\{\Sigma_8\} (C(8 \geq \Sigma_8 \geq 6)) \uparrow^2 \{Q\} (\{Q\} = \text{QRS}) \uparrow^3 \{P\}$	Balda и др. (1976) [7]
2	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{D_{il}^2\} \{\Sigma_{cb}\} \{\Sigma_c\} \{\max \{\Sigma_c\} \{\text{ОП}\} \{C_p(\Sigma_c \rightarrow \Pi)\} -$ $(\Sigma_c \geq \Pi) \uparrow^1 \{Q\} (\{Q\} = \text{QRS}) \uparrow^2 \{P\}$	Murthy и др. (1979) [7]
3	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{ D_{il} \} \{\text{ОП}\} \{\text{Дет}\} \{C( D_{il}  \rightarrow \Pi)\} ( D_{il}  \geq \Pi) \uparrow^1 \{\text{RR}\} -$ $(\{\text{RR}\} = \text{RR}) \uparrow^2 \{P\}$	Измерительная техника. 1990, № 7
4	$\downarrow^3 \{\text{ПФАЦП}\} \{D_{il}^2\} \{\Sigma_m\} \{\max \Sigma_m\} \{\text{ОП}\} \{C(\Sigma_m \rightarrow \Pi_i)\} -$ $\left\{ \begin{array}{l} \downarrow^1 (\Sigma_m > \Pi_1) \uparrow^1 \\ (\Sigma_m > \Pi_1) \uparrow^2 \left\{ \begin{array}{l} \{\Phi(100 \Gamma_{\Pi})\} \\ \downarrow^2 (\Sigma_m \approx \Pi_2) \uparrow^3 \{\Phi(40 \Gamma_{\Pi})\} \end{array} \right\} \{Q\} (\{Q\} = Q) \uparrow^3 \{P\} \end{array} \right.$	Патент (1992) № 2063167. БИ 1996, № 19
5	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{ D_{il} \} \{\text{ОП}\} \{C( D_{il}  \rightarrow \Pi)\} ( D_{il}  \geq \Pi) \uparrow^1 \{\text{RR}\} (\{\text{RR}\} = \text{RR}) \uparrow^2 \{P\}$	(1993) [6]
6	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{ D_{il} \} \{\text{ОП}\} \{C( D_{il}  \rightarrow \Pi)\} ( D_{il}  \geq \Pi) \uparrow^1 \{\text{ПА}\} \{\text{RR}\} -$ $(\{\text{RR}\} = \text{RR}) \uparrow^2 \{P\}$	Патент (1994) № 2122349. БИ, 2002, № 16
7	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{D_{il}^3\} \{\Sigma_m\} \{\max \Sigma_m\} \{\text{ОП}\} \{C(\Sigma_m \rightarrow \Pi)\} -$ $(\Sigma_m \geq \Pi) \uparrow^1 \{\max D_i\} \{\text{RR}\} (\{\text{RR}\} = \text{RR}) \uparrow^2 \{P\}$	Патент (1999) № 2165732. БИ 2001, № 12
8	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{C( D_i  \rightarrow \Pi)\} \left[ \bigcap_{i=1}^k ( D_i  \leq \Pi) = 1 \right] \uparrow^1 \downarrow^1 \{\Sigma = 0\} \{\Sigma\} -$ $\{C[\Sigma \rightarrow (\text{RR})]\} (\Sigma = \text{RR}) \uparrow^2 \{Q\} \{P\}$	Патент* (2001) № 2195164. БИ 2002, № 36
9	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{ D_{i2} \} \{C( D_{i2}  \rightarrow \Pi)\} \left( \bigcap_{i=1}^k ( D_{i2}  \leq \Pi) = 1 \right) \uparrow^1 \downarrow^1 -$ $\{\Sigma = 0\} \{\Sigma\} \{C(\Sigma \rightarrow (\text{RR}))\} (\Sigma = \text{RR}) \uparrow^2 \{Q\} \{P\}$	Патент* (2003) № 2237432. БИ, 2004, № 28
10	Аналоговый вариант реализации алгоритма п. 9.	Патент* (2003) № 2219828
11	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{\{\text{Sign}(D_i) D_i^2\} \{\Gamma_\xi(n)\} \{\Sigma_{\text{sc}}\} \{\Sigma_2\} \{Z_D\} \{\Sigma_{\text{sc}}\} \{\text{ОП}\} -$ $\{C_p(\Sigma_{\text{sc}} \rightarrow \Pi)\} (\Sigma_{\text{sc}} > \Pi) \uparrow^1 \{\text{RR}\} (\{\text{RR}\} = \text{RR}) \uparrow^2 \{P\}$	Алгоритм пересечения нуля (2003) [22]
12	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦПК}_m\} \{ D_{il} \} \{\Sigma_m\} \{\max \Sigma_m\} \{\text{ОП}\} \{C(\Sigma_m \rightarrow \Pi)\} (\Sigma_m \geq \Pi) \uparrow^1 \{\text{RR}\} -$ $(\{\text{RR}\} = \text{RR}) \uparrow^2 \{\Delta_N\} \{Q\} \{P\}$	Патент* (2005) № 2294139. БИ 2005, № 3
13	$\downarrow^3 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{D_i^2\} \{\Sigma_c\} \{\min(\Sigma_c)\} \{\sigma_{\min \Sigma}\} \{\Sigma_c\} \{\text{ОП}\} -$ $\{C( D_i  \rightarrow \Pi)\} ( D_i  \leq \Pi) \uparrow^1 \left( \bigcap_{i=1}^k  D_i  \leq \Pi \right) = 1 \right) \uparrow^2 \downarrow^2 \{\Sigma = 0\} -$ $\{\Sigma\} \{C[\Sigma \rightarrow (\text{RR})]\} (\Sigma = \text{RR}) \uparrow^3 \{Q\} \{P\}$	Патент (2005) № 2302197. БИ 2007, № 19
14	$\downarrow^3 \downarrow^2 \{\text{ПФАЦП}\} \{C( D_i  \rightarrow \Pi)\} ( D_i  > \Pi) \uparrow^1 \{\Sigma_m\} \{C(\Sigma_m \rightarrow m)\} \uparrow^2 -$ $\downarrow^2 \{\Sigma_N = 0\} \downarrow^1 \{\Sigma_N\} \{C(\Sigma_N \rightarrow (\text{RR}))\} (\Sigma_N = \text{RR}) \uparrow^3 \{\text{RR}\} \{P\}$	Патент* (2006) № 2303944. БИ 2007, № 22
15	$\downarrow^4 \downarrow^3 \downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \left\{ \begin{array}{l} \{C( D_i  \rightarrow  \Pi_1 )\} \left( \left( \bigcap_{i=1}^k D_i \leq  \Pi_1  \right) = 1 \right) - \\ \{C( D_i  \rightarrow  \Pi_2 )\} \left( \left( \bigcap_{i=1}^k D_i \leq  \Pi_2  \right) = 1 \right) \uparrow^2 - \\ \uparrow^1 \downarrow^1 \{\Sigma_1 = 0\} \{\Sigma_1\} \\ \downarrow^2 \{\Sigma_2 = 0\} \{\Sigma_2\} \{C(\Sigma_2 \rightarrow N_m)\} (\Sigma_2 = N_m) \uparrow^3 \end{array} \right\} -$ $\{C(\Sigma_1 \rightarrow \beta N_m)\} (\Sigma_1 = \beta N_m) \uparrow^4 \{Q\} \{P\}$	Патент* (2006) № 2312593. БИ 2007, № 35
16	$\downarrow^3 \downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦПК}_m\} \{\Sigma_m\} \{\max \Sigma_m\} \{\text{ОП}\} \{C( D_{mi}  \rightarrow \Pi)\} -$ $( D_{mi}  \geq \Pi) \uparrow^1 \{\text{RR}\} (\{\text{RR}\} = \text{RR}) \uparrow^2 \{\Delta T\} \{W\} \{\Sigma_W\} \{\max \Sigma_W\} -$ $(\{\max \Sigma_W\} = W_{\max}) \uparrow^3 \{Q\} \{P\}$	Патент (2007) № 2359606. БИ 2009, № 18

Окончание табл. 1

№ п/п	Логические схемы алгоритмов автоматической фрагментации электрокардиосигналов	Дополнительная информация и источник
17	$\downarrow^4 \{\text{ПФАЦПК}_m\} \{ D_{mi1}\  \{\max  D_{mi1}  / \{\Sigma_m\} \{\text{ОП}_1\}\} - \{C(\max  D_{mi1}  \rightarrow \Pi_1)\} \downarrow^1 (\ D_{mi1}\  < 1.5 \Pi_1) \uparrow^1 \{\Sigma_m\} \{\text{ОП}_2\} \downarrow^2 - (\ D_{mi1}\  \geq 0.3 \Pi_2) \uparrow^2 \{\Sigma\} \{\text{ОП}_3\} \{C(\Sigma_3 \rightarrow \Pi_3)\} \downarrow^3 (\Sigma \geq 0.3 \Pi_3) \uparrow^3 - \{t_{i1}, t_{i2}\} (\{t_{i1}, t_{i2}\}) = (t_{i1}, t_{i2}) \uparrow^4 \{R_\Pi\} \{\Delta_N\} \{Q\} \{P\}$	Патент (2008) № 2366358 БИ 2009, № 25
18	$\downarrow^2 \downarrow^1 \{\text{ПФАЦП}\} \{\mathcal{E}_{ip}\} \{\Delta_{in}\} \{M_i^-\} \{M_i^+\} \{ D_{li}^d  / \{\Sigma_{cm}\} \{\max \Sigma_{cm}\} \{\text{ОП}\}\} - \{C_p(\max \Sigma_{cm} \rightarrow \Pi)\} (\max \Sigma_{cm} \geq \Pi) \uparrow^1 \{Q\} (\{Q\} = RR) \uparrow^2 \{P\}$	(2011) [10]

\* – в патенте приведена аналоговая схемотехническая реализация, а в табл. 1 – аналого-цифровой вариант того же алгоритма.

Оператор  $\{\text{ОП}\}$  определения порога по результатам действия предыдущего оператора используется в свыше 60 % анализируемых алгоритмов, а в оставшейся части алгоритмов порог назначается априорно со всеми вытекающими отсюда недостатками этих алгоритмов. Оператор определения первой конечной разности ЭКС и ее абсолютной величины используется в 50 % проанализированных алгоритмах (табл. 2), а определение абсолютной величины цифровой последовательности  $|D_i|$  на выходе АЦП еще в 17 %. В остальных алгоритмах цифровая последовательность  $D_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) подвергается дополнительному преобразованию: возведению в степень или другим преобразованиям в соответствии с табл. 2. Уникальные операторы, как следует из табл. 2, составляют больше половины от общего числа операторов, применяемых в анализируемых алгоритмах, что свидетельствует о постоянном поиске новых оригинальных алгоритмов автоматической фрагментации.

Проанализируем более подробно ЛСА, представленного в п. 3 табл. 1. Блок-схема данного алгоритма приведена на рис. 1. В соответствии с блок-схемой алгоритм на основе использования ЛСА указан в п. 3 табл. 1. Подобные алгоритмы приведены в виде ЛСА в пп. 5–8 табл. 1. В целом анализ алгоритмов ЛСА, приведенных в табл. 1, показывает, что все алгоритмы для автоматического определения того или иного фрагмента ЭКС содержат оператор сравнения некоторого преобразования дискретных отсчетов ЭКС с установленным либо априорно, либо апостериорно, т. е. по результату соответствующей обработки, уровнем порога. Последний вариант просматривается, например, на рис. 3, из которого следует, что в этих алгоритмах не только вводится элемент адаптации при определении порогов, но и ис-

пользуются два подстраиваемых порога, что приводит к распараллеливанию алгоритмов (см. также пп. 4 и 15 табл. 1). В дальнейшем при анализе того или иного алгоритма в статье из-за ограниченности объема приводятся только алгоритмы ЛСА, приведенные в табл. 1. По существу, если сравнивать алгоритм ЛСА, п. 6 табл. 1, с ранее предложенными алгоритмами и некоторыми представленными в дальнейшем, оригинальным оператором для этого алгоритма остается только один, а именно оператор параболической аппроксимации  $\{\text{ПА}\}$  для выделения QRS-комплекса. Заметим, что необходимость применения оператора  $\{\text{ПА}\}$  утрачивается, если увеличивать временное разрешение за счет повышения частоты дискретизации ЭКС при аналого-цифровом преобразовании. Вообще говоря, целесообразность введения нового преобразования отсчетов ЭКС по сравнению с уже предложенными, в отличие от предложенных, например, в [17], целесообразно оценивать на основе установленного единого для всех алгоритмов численного критерия – критерия  $K_{\text{ЭПП}}(H)$  эффективности предпорогового преобразования, ЭПП (в общем случае –  $H$ ). При этом следует иметь в виду, что для некоторых алгоритмов численный расчет по установленному единому критерию достаточно проблематичен и требует отдельного рассмотрения.

Прежде чем перейти к разработке критерия, обоснуем и сформулируем требование, которое должно быть положено в основу данного критерия. Для этого предварительно заметим, что ЭКС в чистом виде, т. е. без учета тех искажений, которые неизбежно присутствуют при экспериментальном определении (измерении) ЭКС, получить практически невозможно. Однако предварительная фильтрация существенно снижает уровень

Таблица 2

№ п/п	Мнемоника оператора	Функция, выполняемая оператором	Примечание и доля использования [%] в табл. 1
1	{ПФАЦП}	Предварительные усиление, фильтрация, начальные установки и аналого-цифровое преобразование ЭКС в цифровую последовательность $D_i$ для $i = 1, 2, \dots$ по одному каналу ( $m = 1$ )	Варианты: то же с коммутацией $K_m$ по каналам для $m > 1$ в виде $\{\text{ПФАЦПК}_m\} \cdot 100$
2	$\{ D_i \}$	Определение абсолютного значения цифровой последовательности $D_i$ ( $i = 1, 2, \dots$ ) на выходе АЦП	Возможны модификации $\{ D_{mi} \}$ , когда отсчеты цифровой последовательности идут от разных каналов; 17
3	$\{ D_{il}\ $	Определение 1-й конечной разности последовательности $D_i$ ( $i = 1, 2, \dots$ ) и ее абсолютного значения	Возможны модификации определения конечной разности, например вида $\{ D_{li}^d \}$ . 1-я конечная разность морфологических операторов (см. [12]) или по $m$ каналам вида $\{ D_{mil}\ $ ; 50
4	$\{ D_{i2}\ $	Определение 2-й конечной разности и ее абсолютного значения	Возможны различные модификации определения 2-й конечной разности; 0.11
5	$\{D_i^2\}$ или $\{D_{il}^2\}$	Возведение в квадрат последовательности $D_i$ или ее первой конечной разности для $i = 1, 2, \dots$	0.2
6	$\{D_{il}^3\}$	Возведение в куб 1-й конечной разности последовательности $D_i$ ( $i = 1, 2, \dots$ ) и определение ее абсолютного значения	0.06
7	{L}	Линейное преобразование	Пример преобразования см. на рис. 1; 0.06
8	{Дет}	Детектирование	Возможны модификации операции детектирования, как в аналоговом, так и в цифровом исполнении; 0.06
9	$\{\Sigma_m\}$	Суммирование по $m$ слагаемым результатов действия предшествующего оператора, включая, например, Вейвлет-преобразования	Имеются модификации: $\{\Sigma_{3,c}\}$ – экспоненциальное сглаживание; $\{\Sigma_c\}$ – скользящее суммирование; $\{\Sigma_{c,b}\}$ – скользящее суммирование с весом, среднеарифметическое по $m$ ; 78
10	$\max\{\dots\}$ или $\min\{\dots\}$	Определение максимума или минимума от указанного в скобках действия	Модификации в зависимости от указанного в скобках действия, например, результата суммирования $\Sigma_m$ $m$ отсчетов; 44
11	$[\text{Sign}(D_i) D_i^2]$	Восстановление знака квадрата последовательности $D_i$	0.06
12	$\{\sigma_{\min\Sigma}\}$	Вычисление СКО минимальной суммы	0.06
13	{ОП}	Определение порога по результатам действия предыдущего оператора	Имеются модификации способов и количества (обычно до 2) определения порогов, например, использования различных весов при умножении на результат действия предыдущего оператора; 61
14	$\{C(\{\dots\} \rightarrow \Pi)\}$	Сравнение с порогом $\Pi$ результатов действия установленного оператора	Имеются модификации: $\{C_p(\{\dots\} \rightarrow \Pi)\}$ – сравнение с учетом рефракторной функции (зоны нечувствительности); 100
15	$(\{\dots\} \geq \Pi) \uparrow^i$	Условный переход по $i$ -й стрелке, если не выполняется условие $\{\dots\} > \Pi$	Имеются модификации, например, по заданному числу не превышения порога: 1. $\left( \left( \bigcap_{i=1}^k  D_i  \leq \Pi \right) = 1 \right)$ , 2. $k = 1, 2, \dots, N$ ; или $\left( \max \Sigma_W = W_{\max} \right)$ при выделении максимума суммы Вейвлет-преобразования; 100

№ п/п	Мнемоника оператора	Функция, выполняемая оператором	Примечание и доля использования [%] в табл. 1
16	$\{Z_D\}$	Фиксация пересечения сигналом нуля	0.06
17	$\{\Gamma_\xi(n)\}$	Генерация высокочастотной последовательности $K_\xi(n)$	0.06
18	$\{\Delta_N\}$	Деление RR-интервала на $N$ частей	0.12
19	$\{\Delta T\}$	Выделение второй половины ТР-интервала ЭКГ	0.06
20	$\{W\}$	Вейвлет-преобразование результата действия предыдущего оператора, например $\{\Delta T\}$	Допускаются модификации; 0.06
21	$\{t_{i1}, t_{i2}\}$	Определение начала $t_{i1}$ и окончания сигнала производной $t_{i2}$ по $\Sigma$	0.06
22	$\{R_\Pi\}$	Определение момента $t_\Pi$ появления пика R-зубца $t_\Pi = \varepsilon_0 (t_{i2} - t_{i1})$ , $\varepsilon_0$ – заданная постоянная определения RR-интервала	0.06
23	$\{Q\}$	Определение QRS-комплекса и RR-интервала	Возможно определение дополнительно к QRS-комплексу и RR-интервалу дополнительных фрагментов ЭКС; 67
24	$\{RR\}$	Определение интервала между характерными точками R-зубцов	Способ представления RR-интервала не уточняется; 33
25	$\{\mathcal{E}_{fp}\}$ и $\{\Delta_{ii}\}$	Выполнение операции эрозии и дилатации	0.06
26	$\{M_i^-\}$ и $\{M_i^+\}$	Морфологическое определение 1-й конечной разности слева и справа соответственно	0.06

помех, действующих на ЭКС. Следовательно, необходимо предположить, что все последующие преобразования ЭКС должны по крайней мере не ухудшать то, что было получено после предварительной фильтрации. Поэтому в качестве критерия целесообразно брать средний квадрат от отношения в виде

$$K_{\text{ЭПП}}(H) = D_\xi \left\{ \frac{H\{Z_\Xi(t)\}}{H\{Z(t)\}} \right\}, \quad (8)$$

где  $K_{\text{ЭПП}}(H)$  – критерий эффективности предпрогового преобразования ЭКС вида  $H$  (или просто критерий эффективности);  $D_\xi\{\dots\}$  – оператор определения среднего квадрата по помехе при фиксированном значении ЭКС;  $Z_\Xi(t)$  – ЭКС с учетом тех помех, которые на него действуют после предварительной фильтрации;  $Z(t)$  – ЭКС без учета помех;  $H\{\dots\}$  – вид используемого в алгоритме преобразования с целью последующего обнаружения соответствующего фрагмента ЭКС, например R-зубца.

Учитывая тот факт, что знаменатель в (8) не зависит от помехи, в результате получаем

$$K_{\text{ЭПП}}(H) = \frac{D_\xi\{H\{Z_\Xi(t)\}\}}{H^2\{Z(t)\}}. \quad (9)$$

Количественную оценку критерия (9) в общем виде можно получить, если задаться адди-

тивной моделью воздействия обобщенной помехи  $\xi(t)$  на ЭКС  $Z(t)$ . Под обобщенной помехой в данном случае подразумевается результирующая аддитивная помеха, включающая остаточные воздействия после фильтрации сетевой помехи, широкополосной помехи аналоговых электронных схем, биологических и прочих помех [11], [17].

Из (8) видно, что нижняя граница критерия эффективности равна единице. Следовательно, чем больше единицы в зависимости от вида преобразования  $H\{\dots\}$  численное значение критерия эффективности, тем менее эффективен выбранный вид преобразования, так как при этом возрастают ошибки первого и второго рода при последующем сравнении результата преобразования  $H\{\dots\}$  с установленным порогом. Таким образом, вследствие введенного преобразования, эффективность автоматического выделения соответствующего фрагмента ЭКС только ухудшается. Попарное сравнение эффективности преобразования от использования преобразований  $H_i\{\dots\}$  и  $H_j\{\dots\}$  можно осуществить в следующем виде

$$K_{\text{ЭПП}}(H) = \frac{D_\xi\{H_i\{Z_\Xi(t)\}\} H_j^2\{Z(t)\}}{D_\xi\{H_j\{Z_\Xi(t)\}\} H_i^2\{Z(t)\}}, \quad (10)$$

где  $I$  – общее число сравниваемых алгоритмов, причем  $i = 1, 2, \dots, I$  и  $j = 1, 2, \dots, I$ .

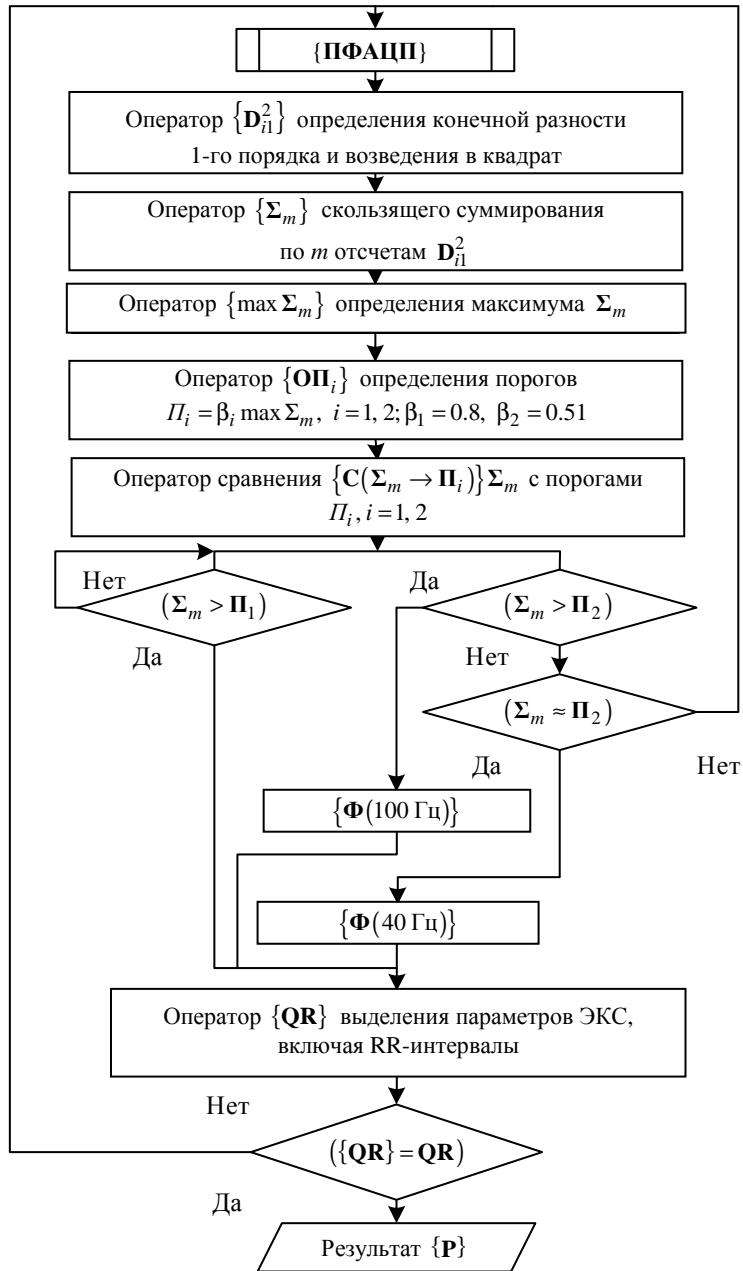


Рис. 2

В общем случае, при сравнении между собой всех альтернатив, критерий эффективности (10) для различных индексов  $i$  и  $j$  представляет собой элемент матрицы размерностью  $I \times I$ , в соответствии с которой можно выбрать наилучший в установленном смысле алгоритм, если, конечно, удастся вычислить все элементы данной матрицы. Для этого достаточно вычислить элементы матрицы, находящиеся над главной диагональю, так как главная диагональ матрицы равна единице. В противном случае данный критерий позволяет сравнить между собой попарно различные альтернативы, поддающиеся соответствующим вычислениям. Выполним в качестве примера сравнения двух видов преобразований:

$H = | \dots |$ ,  
используемых в большинстве алгоритмов, приведенных в табл. 1.

Для критерия (9) получаем

$$K_{\text{ЭПП}}(H) = \frac{Z^2(t) + 2Z(t)M_\xi\{\xi(t)\} + M_\xi\{\xi^2(t)\}}{Z^2(t)}$$

или

$$K_{\text{ЭПП}}(H) = 1 + 2 \frac{M_\xi\{\xi(t)\}}{|Z(t)|} + \frac{M_\xi\{\xi^2(t)\}}{Z^2(t)} > 1,$$

где  $M_\xi\{\dots\}$  – оператор усреднения по результатирующей помехе  $\xi(t)$ .

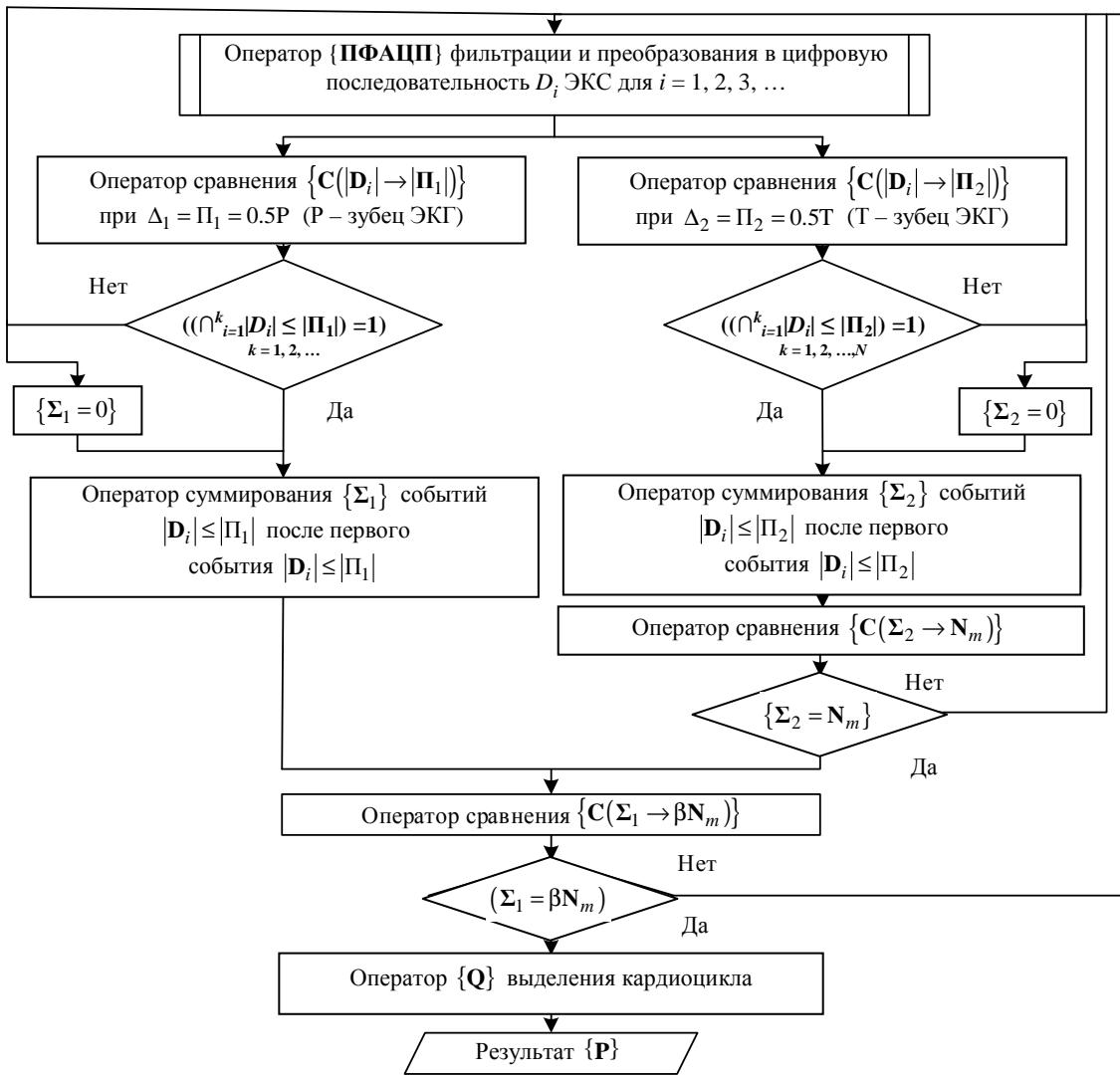


Рис. 3

В соответствии с критерием (10) при сравнении  $H = [\dots]^2$  и  $H = [\dots]^3$  получаем

$$\begin{aligned}
 K_{\text{ЭПП}}(H) = 1 + & \left( 6 \frac{M_\xi\{\xi^2(t)\}}{Z^2(t)} + \frac{M_\xi\{\xi^4(t)\}}{Z^4(t)} + \right. \\
 & + 4 \frac{M_\xi\{\xi(t)\}}{|Z(t)|} + 4 \frac{M_\xi\{\xi^3(t)\}}{|Z(t)|^3} \Bigg) / 1 + \\
 & + 2 \frac{M_\xi\{\xi(t)\}}{|Z(t)|} + \frac{M_\xi\{\xi^2(t)\}}{Z^2(t)},
 \end{aligned}$$

откуда следует, что критерий эффективности больше единицы, в силу преобладания положительных слагаемых, стоящих слева (даже в случае отрицательности третьего момента помехи). Таким образом, увеличение степени, в которую возводятся отсчеты ЭКС с целью последующего

сравнения результатов с порогом, теоретически приводит к росту ошибок первого и второго рода и, следовательно к снижению достоверности результатов автоматической фрагментации ЭКС. Заметим, что любое преобразование ЭКС с помехой, отличное от фильтрации, снижает эффективность при последующем сравнении полученного результата преобразования с порогом в смысле принятого критерия. Это утверждение относится и к применению оператора дифференцирования, а замена его при некоррелированных отсчетах помехи приводит к увеличению ее дисперсии минимум в два раза. Тем не менее, решение задачи автоматической фрагментации ЭКС обусловливает необходимость введения соответствующего преобразования  $H[\dots]$ . Однако выбор этого преобразования должен быть рационален и согласован с последующей операцией сравнения с порогом.

Отметим универсальность критерия эффективности (9) и (10), который можно использовать и при оценке результатов фильтрации, как цифровой, так и аналоговой, включая и предварительную фильтрацию  $\Phi\{\dots\}$ , предшествующую преобразованию оператором  $H\{\dots\}$ . В целом следует учитывать, что фильтрация помех вносит некоторые искажения и ЭКС. В этом случае критерий оценки эффективности фильтрации целесообразно представить в виде

$$K_{\text{ЭПП}}(\Phi) = \frac{D_\xi \{\Phi\{Z_\Xi(t)\}\}}{Z^2(t)}. \quad (11)$$

Для аддитивной помехи с нулевым средним, если принять, что  $\Phi\{Z(t)\} = Z(t)$ , то из (11) получаем

$$K_{\text{ЭПП}}(\Phi) = 1 + D_{\Phi\xi}/Z^2(t),$$

где  $D_{\Phi\xi}$  – дисперсия остаточной после фильтрации аддитивной помехи.

Несложно получить критерий эффективности в соответствии с формулой (10) и при сравнении результатов действия различных по виду операторов фильтрации.

Итоговый критерий оценки эффективности целесообразно определить через произведение частных критериев. Для рассмотренных двух операторов, например, получаем

$$K_{\text{ЭПП}}(\Phi, H) = K_{\text{ЭПП}}(\Phi) K_{\text{ЭПП}}(H).$$

Можно продолжить применение рассмотренных критериев для оценки эффективности и для

последующих операторов, используемых в соответствующем алгоритме.

В заключение отметим, что при возникающих трудностях количественного вычисления соответствующего критерия, тем не менее, представляет интерес качественный ответ на вопрос эффективности использования того или иного вновь введенного оператора. Например, как это уже упоминалось, для оператора сравнения сигнала в присутствии помех с порогом, ошибки первого и второго рода сравняются с увеличением уровня помех, действующих на полезный сигнал. При этом возникает вопрос о целесообразности разработки и, тем более, применения отмеченного различия алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС, если уже на стадии измерения и предварительной обработки в реальный ЭКС вносятся такие искажения, при которых дальнейшее повышение точности измерения параметров, направленных на выделение того или иного предварительно искаженного фрагмента ЭКС уже не дает ожидаемого положительного эффекта.

Автор выражает глубокую благодарность студенткам кафедры биомедицинских систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ» А. И. Скоробогатовой и Т. В. Моргуновой за оказанную неоценимую помощь при переводе на русский язык некоторых достаточно обширных по содержанию статей по рассматриваемой тематике с английского языка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohamed Elgendi. On QRS detection methodologies: A revisit for mobile phone applications, wireless ECG monitoring and large ECG databases analysis. URL: <http://vixra.org/pdf/1301.0058v1.pdf>.
2. Valtino X. Afonso ECG QRS Detection // Biomedical Digital Signal Processing URL: <http://read.pudn.com/downloads153/doc/669075/ECGQRSDetection.pdf>. P. 236.
3. Elgendi M., Eskofier B., Dokos S., Abbott D. (2013) Revisiting QRS detection methodologies for portable, wearable, battery-operated, and wireless ECG systems. URL: <http://vixra.org/pdf/1301.0058v3.pdf>.
4. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. «Приборостроение» и спец. «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» / А. Л. Барановский, А. Н. Калинichenko, Л. А. Манило и др.; под ред. А. Л. Барановского, А. П. Немирко. М.: Радио и связь, 1993. 247 с.
5. A New QRS Detection Algorithm Based on the Hilbert Transform / D. S. Benitez, P. A. Gaydecki, A. Zaidi, A. P. Fitzpatrick // IEEE Computers in Cardiology, 2000. P. 379–383.
- URL: <http://wpage.unina.it/paolo.melillo/tesi/2000%20A%20new%20QRS%20detection%20algorithm%20based%20on%20the%20Hilbert%20transform.pdf>.
6. Automatic QRS Complex Detection Algorithm Designed for a Novel Wearable, Wireless Electrocardiogram Recording Device / D. B. Nielsenab, K. Egstrupc, J. Branebjergb, G. B. Andersenb, H. B. D. Sorensena // 34<sup>th</sup> Annual Int. Conf. of the IEEE EMBS San Diego, California USA, 28 Aug. – 1 Sept., 2012. URL: [http://www.delta.dk/imported/images/DELTA\\_Web/documents/Innovation/EMBC2012\\_Artikel.pdf](http://www.delta.dk/imported/images/DELTA_Web/documents/Innovation/EMBC2012_Artikel.pdf).
7. Ahmad I. L., Mohamed M., Ab Ghani N. A. Development of a Concept Demonstrator for QRS Complex Detection using Combined Algorithms // EEE EMBS Int. Conf. on Biomed. Eng. and Sc. | Langkawi | 17–19 Dec. 2012. P. 689–693. URL: [http://eprints.uthm.edu.my/6123/1/Development\\_of\\_a\\_Concept\\_Demonstrator.pdf](http://eprints.uthm.edu.my/6123/1/Development_of_a_Concept_Demonstrator.pdf).
8. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / пер. с англ.; под ред. А. П. Немирко. М.: Физматлит, 2007. 440 с.

9. Жаринов О. О., Жаринов И. О. Применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения и оценивания положений опорных точек QRS // Науч.-техн. вестн. Санкт-Петербург. гос. ун-та информ. технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75). С. 85–90.
10. Варнавский А. Н. Способы и средства выявления нарушений ритма сердца на основе нелинейных преобразований электрокардиосигнала в режиме реального времени: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.17 / Варнавский А. Н. Рязань, 2008. 17 с.
11. Истомин Б. А. Систематизация методов анализа ЭКГ с учетом их помехоустойчивости // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2010. № 8. С. 86–90.
12. За За Тун, Филист С. А., Шаталова О. В. Способы и алгоритмы морфологического анализа в задачах распознавания QRS-комплексов // Науч. ведомости. Сер. История. Политология. Экономика. Информация. 2011. № 7 (102), вып. 18/1. С. 129–136.
13. Синютин С. А., Ковтун Д. Г. Анализ алгоритмов подстройки порога срабатывания для QRS-Комплексов // Инженерный вестн. Дона. 2014. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2547.
14. Рослякова А. В., Чупраков П. Г. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения R зубца электрокардиосигнала // Вятский мед. вестн. 2012. № 2. С. 29–35. URL: file: C:/Users/User/Downloads/sravnitelnyy-analiz-algoritmov-obnaruzheniya-r-zubtsa-elektrokardiosignal.pdf.
15. Oweis R. J., Al-Tabbaa B. O. QRS Detection and Heart Rate Variability Analysis: A Survey // Biomed. Sci. and Eng. 2014. Vol. 2, № 1. P. 13–34.
16. Тихонов Э. П. Концептуальная модель предметной области автоматической фрагментации электрокардиосигналов на базе логической схемы алгоритмов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 8. С. 85–95.
17. Козюра А. В. Методы и средства контроля электрокардиоаппаратуры и качества электрокардиографических сигналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05. 11. 13 / Козюра А. В. Орел, 2013. 16 с.
18. Scholkmann F., Boss J., Wolf M. An Efficient Algorithm for Automatic Peak Detection in Noisy Periodic and Quasi-Periodic Signals // Algorithms. 2012. № 5. P. 588–603.
19. Amine Naït-Ali. A New Technique for Progressive ECG Transmission using Discrete Radon Transform // World Academy of Science, Engineering and Technology Int. J. of Electrical, Comp., Energetic, Electronic and Comm. Engin. 2008. Vol. 2, № 1. P. 149–154.
20. Mehta S. S., Trivedi C. R., Lingayat N. S. Identification and delineation of QRS complexes in electrocardiogram using fuzzy c-means algorithm // J. of Theor. and Appl. Inf. Technol. P. 609–616. URL: <http://www.jatit.org/volumes/research-papers/Vol5No5/11Vol5No5.pdf>.
21. Taouli By S. A., Berekci-Reguig F. Detection of QRS Complexes in ECG Signals Based on Empirical Mode Decomposition // Global J. of Comp. Sci. and Technol. 2011. Vol. 11, Iss. 20, Version 1.0. URL: [https://globaljournals.org/GJCST\\_Volume11/2-Detection-of-QRS-Complexes-in-ECG-Signals-Base-on.pdf](https://globaljournals.org/GJCST_Volume11/2-Detection-of-QRS-Complexes-in-ECG-Signals-Base-on.pdf).
22. Kohler B. U., Hennig C., Orglmeister R. QRS Detection Using Zero Crossing Counts Biomedical Electronics Group, Department of Electrical Engineering, Berlin University of Technology, Berlin, Germany. 2003. Vol. 8, iss. 3, Sept. P. 139. URL: <http://progress.biomed.uni-erlangen.de/documents/200308030138.pdf>.

E. P. Tikhonov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## A CONCEPTUAL DOMAIN MODEL AUTOMATIC FRAGMENTATION ELECTROCARDIOGRAM BASED ON LOGICAL SCHEMES OF ALGORITHMS

*Based on the analysis of the data presented in the last decade, gave an overview and comparative analysis of algorithms for automatic fragmentation of the electrocardiogram (ECG). Classification is made based on the logical schemes of algorithms (LSA) in accordance with the subject dealt with in part 1 of article. The developed approach is focused on increase of efficiency of using the accumulated information resource (knowledge) in the field of automatic diagnosis ECG with the aim of further improving and applying methods, algorithms, automation in medical diagnostics.*

**Electrocardiogram, automatic fragmentation, review, comparative analysis, the logical schemes of algorithms**



К юбилею СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

УДК: 621

В. П. Северинова

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

### Мастер связи

Борис Георгиевич Поздеев – крупный специалист в области проводноговещания, телеуправления и автоматики связи. Он родился 3 февраля 1911 г. Его дед Григорий Борисович Поздеев – участник строительства линии беспроволочного телеграфа [1] «Гогланд–Котка» (1899) – первой в мире практической радиолинии с аппаратурой системы А. С. Попова. Его отец Георгиевич Григорьевич Поздеев – военный инженер, в Первую мировую войну перед наступлением англичан на Архангельск заведовал эвакуацией боевых грузов Морского ведомства внутрь страны и доставил их в Ярославль в полном порядке. В 1919 г. при наступлении А. А. Колчака он организовал противоминную оборону Волги и Камы, а также службу связи Волжско-Камского района и его флотилии.

Борис Поздеев, закончив курс 14-й средней школы-девятилетки, поступил в 1928 г. в Ленинградский электротехнический институт, но окончил его, получив диплом инженера, только в 1946 г.: помешали репрессии 30-х гг. и Великая Отечественная война 1941–1945 гг.

В студенческие годы Бориса Поздеева был арестован его отец. На общем собрании студенту Поздееву предложили отречься от отца как «врага народа», но студент 4-го курса Борис Поздеев в знак протеста ушел из института и уехал на работу в Лугу.

В Лужском учебном комбинате Наркомата связи он преподавал радиотехнику и телефонию. Для учебных курсов лаборатории радиотехники и телефонии он организовал телефонную станцию

на 100 номеров и учебную радиостудию. На устройство радиостудии по распоряжению райисполкома были выданы обрезки ткани разного цвета. Борис выкрасил все лоскуты в один черный цвет. Позже, в годы оккупации Луги, немецкому командованию приглянулось помещение радиостудии – в нем было размещено отделение гестапо.

Еще до начала войны, в 1932 г. за успешную работу Б. Г. Поздеев был переведен в Ленинград в аналогичный учебный комбинат, а затем в только что организованное областное бюро ДГТС НКС (двусторонняя групповая телефонная связь наркомата связи). Система ДГТС позволила руководству Ленинградского обкома и горкома ВКП(б) проводить в Смольном совещания с участием руководителей отдаленных районов по двусторонней телефонной связи. Позже Б. Г. Поздеев стал главным диспетчером системы связи Смольного.

В 1936 г. Б. Г. Поздеев был переведен в проектно-строительный сектор радиоотдела наркомата связи. Там он выполнил проект Мурманского радиовещательного центра (технический и рабочий), проекты диспетчеризации Ульяновского порохового завода, Сысъстроя, Свирской ГЭС.

В феврале 1937 г. приказом наркома связи Поздеев был переведен в ленинградский Дом радио в связи с его реконструкцией, назначен начальником лаборатории и руководил проектированием новой аппаратной. В 1940 г. он целиком переоборудовал центральную аппаратную Дома радио.



Б. Г. Поздеев. 1937 г.

1 сентября 1939 г. Германия напала на Польшу – началась Вторая мировая война. Б. Г. Поздеев включился в организацию проводной связи системы оповещения МПВО (местная противовоздушная оборона) Ленинграда и установку уличных громкоговорителей, разработал и осуществил проект дистанционного управления ими. В полдень 22 июня 1941 г. установленные громкоговорители оповестили ленинградцев о начале Великой Отечественной войны.

В июле 1941 г. Б. Г. Поздеев ушел добровольцем в армию и был определен в 376-й ОБС (отдельный батальон связи) Ленинградского фронта. Батальоны связи начали формироваться по предложению наркома связи И. Т. Пересыпкина для аварийно-восстановительных работ в военное время [2]. Военный совет Ленинградского фронта сформировал в блокадном Ленинграде три батальона связи. В 376-й ОБС были направлены сотрудники ленинградского телеграфа, междугородной станции и Ленинградской дирекции радиосвязи и радиовещания. Для военных связистов не было (не хватило) формы, поэтому их одели в форму румынских кавалеристов с неудобными плечевыми ремнями, которые они с юмором называли «сбруей». Позже связистам все-таки была выдана форма, принятая в Красной Армии.

Штаб 376-й ОБС находился в здании школы на углу пр. Майорова и канала Грибоедова. Военнослужащие батальона кроме выполнения специальной работы взяли на себя большую часть круглосуточных дежурств на вышке Дома радио. На центральном пульте радио дежурили военно-

служащие Б. Г. Поздеев, Г. Н. Куликовский и В. А. Олендский. Бомбежки Ленинграда становились все интенсивнее. Было принято решение срочно создать резервный радиовещательный узел, так как легкие бетонные перекрытия верхних этажей в случае попадания фугасной бомбы или снаряда не защищали бы радиовещательный узел, а город и фронт нельзя было оставлять без связи. Под руководством Б. Г. Поздеева и В. А. Олендского были составлены проект и схема нового резервного узла. Резервную студию с аппаратной оборудовали в подвале Дома радио [2].

В ноябре 1941 г. нарком связи присвоил группе работников Ленинградского радиотелеграфа – начальнику объектов Молеву, инженерам Поздееву, Михайлову, Палладину, Ермолаеву и др., звание «Мастер связи» за «отличное выполнение заданий по обеспечению средствами связи военного командования и проявленное при этом мужество и самоотверженность». (Приказ народного комиссара связи СССР, г. Москва, № 604, 3 ноября 1941 г.)

Весной 1942 г. Б. Г. Поздеев занимался стратегической разведкой в 1-м отдельном дивизионе войск НКВД. Затем в качестве начальника отдела особой техники решал многочисленные техническими вопросы, разработал и построил ряд приборов, в том числе сложный 150-ламповый приемник для многократного приема радиотелеграфа.

22 декабря 1942 г. была учреждена медаль «За оборону Ленинграда». В числе первых награжденных этой медалью был Б. Г. Поздеев. Всю войну он воевал на Ленинградском фронте и как все «очень хотел дожить до победного дня». В короткие минуты отдыха Б. Г. Поздеев сделал самодельную книжечку с военными стихами К. Симонова «С тобой и без тебя» – лирический дневник 1941–1942 гг. с эпиграфом «Жди меня и я вернусь». Эту книжечку он отоспал жене на Урал, куда она с трехлетней дочерью была эвакуирована из блокадного Ленинграда.

9 мая 1945 г. вся страна ликовала, празднуя долгожданную победу.

В апреле 1946 г. Борис Георгиевич был демобилизован, вернулся домой, встретился с семьей и был принят на работу в Ленинградское отделение научно-исследовательского института связи (ЛОНИИС). К этому времени он стал специалистом высокой квалификации. Еще в июне 1944 г. ему предложили

работу в Министерстве связи с предоставлением квартиры в Москве, но он отказался – хотел после войны поступить в аспирантуру и заниматься научной работой. Формальным препятствием было неоконченное высшее образование.



Б. Г. Поздеев. 1942 г.

В комнату, где семья жила до войны (Литейный пр. 9, кв. 49), попал снаряд, пробил крышу. В пробоину насыпалась земля, вырос куст, но, к счастью, зачетная книжка студента Электротехнического института Б. Г. Поздеева сохранилась. Без отрыва от работы, экстерном он окончил ЛЭТИ. В течение двух месяцев он сдал 35 экзаменов, включая вступительные экзамены в аспирантуру. В качестве дипломного проекта была представлена выполненная и уже внедренная работа «Диспетчерский коммутатор для крупного промышленного объекта». Осенью 1946 г. дипломный проект был защищен с оценкой «отлично». Борис Георгиевич получил звание инженера-электрика по специальности «Проводная связь».

В ЛОНИИС (в дальнейшем НИИТС) Поздеев занимается разработкой системы телеуправления и автоматики радиовещательных сетей крупных городов. В 1947 г. младшему научному сотруднику Б. Г. Поздееву присвоено звание «Почетный радиостроитель» «за успехи в развитии и эксплуатации средств связи, радиовещания и радиофикации и умение решать сложные технические вопросы». (Приказ № 157 Министерства связи СССР от 30 апреля 1947 г.)

Работая в ЛОНИИС, 26 апреля 1953 г. Поздеев защитил кандидатскую диссертацию. Защита состоялась в Ленинградском электротехническом институте связи (ЛЭИС) им. проф. Бонч-Бруевича. Б. Г. Поздееву была присуждена ученая степень кандидата технических наук.

Как член Технического совета Министерства связи Б. Г. Поздеев часто выезжал в Москву, где принимал участие в перспективном планировании средств связи, выступал с докладами на Всеобщих конференциях ВНОР и Э им. А. С. Попова (в настоящее время ВТОРЭС им. А. С. Попова), а в 1961 г. участвовал в работе международной конференции по вопросам связи.

В связи с укрупнением сельскохозяйственных районов и образованием колхозно-совхозных управлений стала актуальной организация проводного вещания в сельской местности. Поздеевым и сотрудниками его лаборатории были разработаны система связи и аппаратура СВР-АДУ (СВР – система передачи вещательных программ, АДУ – аппаратура дистанционного управления). Система СВР-АДУ охватывала территорию сельского района и улучшала качество звучания радиоточек. При этом были снижены затраты на связь за счет сокращения дежурного персонала. За разработку СВР-АДУ Поздеев и несколько сотрудников его лаборатории в 1962 г. получили Большую серебряную медаль ВДНХ. Эксплуатация опытного образца СВР-АДУ в Ленинградской области показала высокую работоспособность и надежность, подтвердив актуальность широкого внедрения.



Титульный лист сборника под редакцией Б. Г. Поздеева

Были изданы и нормативные государственные акты о применении аппаратуры СВР-АДУ. 21 мая 1962 г. появился приказ Министерства связи СССР № 315 «Об утверждении типовых решений и образца проекта автоматизации радиотрансляционных узлов сельского района на базе применения аппаратуры СВР-АДУ». Приказ действовал до 24 ноября 2005 г.

В 1964 г. издательство «Связь» выпустило сборник материалов под редакцией Б. Г. Поздеева «Системы аппаратуры СВР-АДУ» [3]. Сборник служил руководством при проектировании, внедрении и эксплуатации аппаратуры СВР-АДУ.

В 1963 г. Б. Г. Поздеев перешел в Северо-западный заочный политехнический институт (СЗПИ) на преподавательскую работу. По конкурсу он был избран на должность доцента кафедры радиосистем. В СЗПИ Поздеев читал лекции по курсам «Основы конструирования и надежности

радиоаппаратуры», руководил учебно-методическим циклом «Конструирование и технология производства радиоаппаратуры». Поздееву всегда было интересно общаться со «взрослыми» студентами, имеющими опыт практической работы по специальности. Его лекции были содержательны, насыщались конкретными примерами из жизни и юмором. Они пользовались интересом у слушателей. Кроме работы со студентами Б. Г. Поздеев руководил работой аспирантов и сотрудников промышленных предприятий.

В СЗПИ Поздеев работал до 1975 г., а затем вышел на пенсию. Он автор двух монографий, 36 научных трудов, им получены три авторских свидетельства. Умер Б. Г. Поздеев в 1999 г.

Автор выражает благодарность дочери Бориса Георгиевича Поздеева Зарине Борисовне Слепцовой (Поздеевой) за предоставленные материалы о жизни и деятельности отца.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Северинова В. П., Венчик О. Г. К истории создания первой линии беспроволочного телеграфа «Голланд-Котка» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 5. С. 98–102.
2. Палладин П. А., Зегер М. Г., Вьюник А. А. Ленинградское радио: от блокады до «оттепели». М.: Искусство, 1991.
3. Поздеев Б. Г. Система и аппаратура СВР-АДУ. М.: Связь, 1964.

V. P. Severinova

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Master of Communication



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### Алкади Лайс Дж. Г.

Аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (953) 164-62-05.

E-mail: laythjg@mail.ru.

### Башарин Сергей Артемьевич

Зав. кафедрой киновидеоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: +7 (960) 271-07-49.

### Бекенева Яна Андреевна

Инженер кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: (812) 234-25-03.

E-mail: yana.barc@mail.ru.

### Булганин Сергей Юрьевич

Магистрант гр. 0586 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: bulganin5@yandex.ru.

### Вахитов Шакир Яшерович

Профессор кафедры киновидеоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (960) 271-07-49.

### Воронцов Алексей Геннадьевич

Ведущий инженер отдела электропривода ОАО «Силовые машины», канд. техн. наук.

Тел.: +7 (921) 782-21-23.

E-mail: ag.voroncov@gmail.com.

### Глушаков Василий Васильевич

Магистрант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Инженер отдела электропривода ОАО «Силовые машины».

Тел.: +7 (921) 558-91-70.

E-mail: Glushvas@yandex.ru.

### Григорян Анаит Сергеевна

Студентка кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (921) 182-73-07.

E-mail: griganait@yandex.ru.

### Гридина Елена Георгиевна

Директор информационно-вычислительного центра НИУ «Московский энергетический институт», д-р техн. наук, профессор.

Тел.: +7 (495) 362-70-72.

E-mail: GridinaEG@mpei.ru.

### Жеронкин Кирилл Михайлович

Аспирант кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (921) 376-34-15.

E-mail: Kirill\_freestyle@mail.ru.

### Ивановский Сергей Алексеевич

Доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук, доцент.

### Игнатьев Константин Васильевич

Аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (911) 258-88-03.

E-mail: kosign@yandex.ru.

### Карельский Вадим Юрьевич

Соискусатель кафедры киновидеоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения.

Тел.: +7 (960) 271-07-49.

### Колмаков Сергей Александрович

Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (951) 669-44-20.

E-mail: s.kolmakov1992@gmail.com.

### Копычев Михаил Михайлович

Аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (921) 868-33-09.

E-mail: mkopichev@gmail.com.

### Кострин Дмитрий Константинович

Доцент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-13-91.

E-mail: dkkostrin@mail.ru.

### Кринкин Кирилл Владимирович

Доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (921) 305-20-83.

E-mail: kirill.krinking@gmail.com.

### Куракина Наталья Игоревна

Доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 234-35-53.

E-mail: NKurakina@gmail.com.

*Леонов Антон Викторович*

Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (911) 769-49-15.  
E-mail: anton.leonov18@gmail.com.

*Лисенков Александр Аркадьевич*

Ведущий научный сотрудник Института проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН), д-р техн. наук.  
Тел.: (812) 234-21-59.  
E-mail: lisran@yandex.ru.

*Лячек Юлий Теодосович*

Профессор кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук, доцент.  
Тел.: +7 (905) 256-30-93.  
E-mail: ytlyachek@mail.ru.

*Мустафа Ахмед Бадор Мохамед*

Аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (909) 591-71-60.  
E-mail: badr2002000@yahoo.com.

*Никонов Антон Николаевич*

Ассистент кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук.  
Тел.: +7 (911) 954-42-04.  
E-mail: Ant.nik.nik@mail.ru.

*Новиков Владислав Александрович*

Профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р техн. наук.  
E-mail: vlnov@list.ru.

*Нуриахметов Руслан Маратович*

Инженер Департамента электропривода ООО «НПФ „Ракурс“», выпускник магистратуры СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: nuriakhmetov.rm@gmail.com.

*Пименова Ирина Александровна*

Магистрант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (981) 154-76-57.

*Писарев Андрей Сергеевич*

Доцент кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (921) 951-23-99.  
E-mail: a\_pisarev@mail.ru.

*Попечителев Евгений Парфирович*

Профессор кафедры биотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ», засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 946-54-62.

E-mail: eugeny\_p@mail.ru.

*Пронин Михаил Васильевич*

Профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р техн. наук, начальник бюро отдела электропривода ОАО «Силовые машины».

Тел.: +7 (921) 305-67-83.

E-mail: mpronin1@rambler.ru.

*Путов Антон Викторович*

Ассистент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: (812) 234-68-18.

E-mail: anputov@yandex.ru.

*Путов Виктор Владимирович*

Зам. зав. кафедрой систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ», декан ФЭА, профессор, д-р техн. наук.

Тел.: (812) 234-68-18.

E-mail: vvputov@mail.ru.

*Рамазанов Александр Нажмудинович*

Студент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: (812) 234-13-91.

E-mail: ramazanow.alexander@yandex.ru.

*Русяев Никита Андреевич*

Аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: (812) 234-68-18.

E-mail: vvputov@mail.ru.

*Северинова Вера Павловна*

Зав. экспозиционным выставочным отделом Музея истории СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: (812) 346-47-79.

*Тихонов Эдуард Прокофьевич*

Профессор кафедры биотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: (812) 234-31-12.

E-mail: bme@tltegh.ru.

*Ухов Андрей Александрович*

Доцент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-13-91.

E-mail: aauhov@yandex.ru.

*Хаберланд Рене*

Аспирант кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: haberland1@mail.ru.



## ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ АВТОРАМИ

В редакционный совет журнала «Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"» необходимо представить:

- файлы на CD-диске (в отдельных случаях по предварительному согласованию с редсоветом допустима передача материалов по электронной почте):
  - рукопись статьи;
  - сведения об авторе (-ах);
- документы на листах формата А4 (1 экз.):
  - рукопись статьи (статья должна быть объемом 6 маш. с., обзорная статья – до 12 маш. с.);
  - сведения об авторе (-ах);
  - рекомендация кафедры с указанием наименования тематического раздела, в котором предполагается опубликование материала;
  - экспертное заключение о возможности опубликования материала в открытой печати;
  - сопроводительное письмо (только для авторов, не работающих (не обучающихся) в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

*Сведения об авторах должны содержать:*

1. Фамилию, имя, отчество (полностью) автора.
2. Основное место работы.
3. Должность.
4. Ученую степень, ученое звание.
5. Контактный телефон, адрес электронной почты.

Все сведения печатаются в строку (без пунктов) на русском и английском языках.

### *Правила оформления текста статьи*

Статья должна быть тщательно отредактирована, содержать признаки научной публикации:

- текстовой редактор Microsoft Word версии не ниже 97;
- формат бумаги А4;
- параметры страницы: поля – верхнее, нижнее и левое 2,5 см, правое 2 см, верхний колонтитул 2 см, нижний колонтитул 2 см;
- основной текст статьи: шрифт «Times New Roman» 10,5 pt; выравнивание по ширине; первая строка с абзацным отступом 0,6 см; межстрочный интервал «Множитель 1,1»; автоматическая расстановка переносов.

На первой странице указывается индекс УДК (в левом верхнем углу; шрифт «Times New Roman» 14 pt; межстрочный интервал одинарный); далее даются инициалы и фамилии авторов, затем основное место работы, название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на русском языке. Инициалы и фамилии авторов, основное место работы, название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на английском языке размещаются в конце публикации после библиографического списка.

*Перечень авторов* разделен запятыми, инициалы перед фамилиями (шрифт «Times New Roman» 11,5 pt, обычный; выравнивание по левому краю; абзацный отступ слева 0,6 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 20 pt, после 8 pt; межстрочный интервал одинарный).

*Основное место работы* набирается строчными буквами (шрифт «Times New Roman» 11,5 pt, курсив; выравнивание по левому краю; абзацный отступ слева 0,6 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 0 pt, после 8 pt; межстрочный интервал одинарный).

*Название статьи* набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 15 pt; полужирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 12 pt, после 12 pt; межстрочный интервал одинарный).

*Аннотация* содержит 3–7 строк, характеризующих содержание статьи (шрифт «Times New Roman» 8,5 pt, курсив; выравнивание по ширине; отступы: слева и справа 0,6 см; интервалы перед абзацем 6 pt, после 0 pt; межстрочный интервал одинарный).

*Ключевые слова* состоят из 3–10 слов и словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми, в конце их перечисления точка не ставится; шрифт «Times New Roman» 9,5 pt, полужирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 12 pt, после 12 pt; межстрочный интервал одинарный).

Далее следует текст статьи.

После основного текста следует библиографический список, который включает:

➤ заголовок «Список литературы» набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 11 pt, жирный; выравнивание по центру; интервалы перед абзацем 12 pt, после 8 pt; междустрочный интервал одинарный);

➤ библиографическое описание источника с порядковым номером ссылки на него по тексту, начиная с первого, выполненное по ГОСТ 7.3–2003. Библиографическое описание документа. Введ. 01.07.2004 / Госкомстандарт. М., 2004 (отдельным абзацем; шрифт «Times New Roman» 8,5 pt; первая строка с абзацным отступом 0,6 см; выравнивание по ширине; междустрочный интервал одинарный).

Библиографический список не должен превышать 10 (для обзорных заказных статей – 20) наименований: приводятся только источники, на которые есть ссылки в тексте (ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются).

*Сноски постраничные.* Нумерация сносок сквозная в рамках страницы (шрифт «Times New Roman» 9 pt, обычный; выравнивание по ширине; междустрочный интервал одинарный).

Для создания формул используется редактор MathType. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: «полный» 10,5 pt, «подстрочный» 9 pt, «под-подстрочный» 7 pt, «символ» 14,5 pt, «подсимвол» 12,5 pt; стили: текст, функция, число – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», полужирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив.

При наборе формул без использования редактора формул индексы ставятся размером 9 pt со смещением на 3 pt вверх или вниз (Главная → Шрифт → Дополнительно → Смещение) в зависимости от того, надстрочный или подстрочный индекс. Не использовать Шрифт → Видоизменение → надстрочный/подстрочный. Если у величины есть одновременно и надстрочные, и подстрочные символы, то формула создается только в редакторе MathType.

Формулы, помещенные на отдельной строке, набираются с интервалами: перед формулой 4 pt, после 4 pt; междустрочный интервал одинарный.

На каждый рисунок и таблицу в тексте статьи необходимо дать ссылку. Каждый рисунок и таблица должны быть пронумерованы (напр.: рис. 1, табл. 3).

Текст в таблицах печатается через одинарный интервал, шрифт «Times New Roman»; основной текст 9 pt, индексы 7 pt, подындекс 5,5 pt. Нумерационный заголовок содержит слово «Таблица» и ее номер арабскими цифрами (без знака номера перед ними и без точки на конце, интервал после 4 pt; выравнивается по правому краю таблицы и выделяется светлым курсивом). Ширина таблицы не более 7,9 см, большие таблицы – не более 16,5 см, интервал после нее 6 pt.

Рисунки в электронном виде и подписи к ним создаются средствами Word или другими программами (CorelDRAW, Visio, Adobe Illustrator, Excel (с предоставлением оригинала рисунка в электронном виде)) в черно-белом виде. Качество рисунков и фотографий (в форматах .jpeg, .tiff) должно быть не менее 300 dpi. Основные линии на рисунках (границы блоков и соединительные линии на схемах, линии графиков) имеют толщину 1 pt, вспомогательные (линии-выноски, оси, размерные линии) 0,6 pt. Не допускается вставлять рисунки в рамки или полотно.

Описание содержания рисунка, а также введенных на нем обозначений следует приводить в основном тексте статьи. Подпись под рисунком содержит только его номер (шрифт «Times New Roman», курсив, 9 pt) и располагается по центру под рисунком (например, *Рис. 1*). Все тексты и обозначения на рисунке даются шрифтом размером 9 pt, индексы 7 pt, подындексы 5,5 pt с одинарным интервалом; цифровые обозначения на линиях выносок и номер рисунка даются курсивом. Буквенные обозначения фрагментов рисунка (шрифт «Times New Roman», курсив, 9 pt) ставятся под фрагментом перед нумерационным заголовком; в тексте ссылка на фрагмент ставится после нумерационного заголовка через запятую (например, рис. 1, а); интервалы перед рисунком и после него 6 pt. Ширина рисунка не более 7,9 см, большие рисунки – не более 16,5 см.

*Перечень основных тематических направлений журнала:*

- Физические явления в твердых телах, жидкостях и газах.
- Физическая электроника и технологии микро- и наноструктур.
- Радиофизика.
- Электротехника.
- Приборостроение и информационно-измерительные технологии.
- Метрология и метрологическое обеспечение.
- Биотехнические системы в медицине и экологии.
- Информатика и компьютерные технологии.
- Автоматизация и управление.
- Химические науки.

*Рукописи аспирантов печатаются бесплатно.*

Технические вопросы можно выяснить по адресу: Izvestiya-leti@yandex.ru