

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА  
– ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА:**

**Будко П.А.** Ученый секретарь ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА  
(Председатель редколлегии):**

**Кулешов И.А.** Заместитель генерального директора по научной работе ПАО «Интелтех». Д.т.н., доцент

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:**

**Катанович А.А.** Главный научный сотрудник НИИ ОСИСВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Н.Г. Кузнецова». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ. Заслуженный работник связи РФ. Заслуженный изобретатель РФ

**Кузичкин А.В.** Главный научный сотрудник Научно-исследовательского института телевидения Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

**Курносов В.И.** Главный специалист ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный работник связи РФ

**Мирошников В.И.** Генеральный конструктор ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

**Половинкин В.Н.** Научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

**Присяжнюк С.П.** Генеральный директор ЗАО «Институт телекоммуникаций». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

**Чуднов А.М.** Профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Д.т.н., профессор

**Яшин А.И.** Заместитель генерального конструктора – научный руководитель работ ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

**Винограденко А.М.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

**Габриэльян Д.Д.** ФНПЦ «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» (г. Ростов-на-Дону). Д.т.н., профессор

**Густов А.А.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.в.н., профессор

**Дорогов А.Ю.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

**Куприянов А.И.** Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет). Д.т.н., профессор

**Легков К.Е.** Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). К.т.н., доцент

**Липатников В.А.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**Макаренко С.И.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

**Минаков В.Ф.** Санкт-Петербургский государственный экономический университет (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**Михайлов Р.Л.** Череповецкий военный ордена Жукова университет радиозлектроники (г. Череповец). Д.т.н.

**Одоевский С.М.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**Пашинцев В.П.** Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

**Путилин А.Н.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**Федоренко В.В.** Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

**Финько О.А.** Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (г. Краснодар). Д.т.н., профессор

**Цимбал В.А.** Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов). Д.т.н., профессор

**Семенов С.С.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**Саенко И.Б.** Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии Наук (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**Стародубцев Ю.И.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.в.н., профессор

**Титков И.В.** Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**EDITORIAL BOARD CHAIRMAN  
– JOURNAL EDITOR-IN-CHIEF:**

**Budko P.A.** Academic Secretary of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor

**JOURNAL DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF  
(Editorial Board Chairman):**

**Kuleshov I.A.** Deputy General Director for Scientific Work of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**EDITORIAL COUNCIL MEMBERS:**

**Katanovich A.A.** Chief Research Officer of the ISIS Institute of the Navy WUNCC Navy "N.G. Kuznetsov Naval Academy". Doctor of Technical Sciences, professor. Honored Inventor of the Russian Federation

**Kuzichkin A.V.** Chief Research Officer of the Television Research Institute. Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Science Worker of the Russian Federation.

**Kurnosov V.I.** Chief Specialist of PJSC "Inteltech". Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Communications of the Russian Federation.

**Miroshnikov V.I.** General Designer of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

**Polovinkin V.N.** Scientific Head of FSUE Krylovsky State Scientific Center, Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Science of the Russian Federation

**Prisyazhnik S.P.** Director General of CJSC Institute telecommunications. Doctor of Technical Sciences, professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

**Chudnov A.M.** Department Professor of the Communications Military Academy named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budennyi. Doctor of Technical Sciences, Professor

**Yashin A.I.** Deputy General Designer – Scientific Supervisor of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

**EDITORIAL BOARD MEMBERS:**

**Vinogradenko A.M.** Military Academy of Communications (St. Petersburg) Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

**Gabrielyan D.D.** FNPC "Rostov-on-Don Scientific Radio Research Institute"(Rostov-On-Don). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

**Gustov A.A.** PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Military Sciences, Professor

**Dorogov A.Y.** PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Kupriyanov A.I.** Moscow Aviation Institut (National Research Universit) Doctor of Technical Sciences, Professor

**Legkov C.E.** Military Space Academy of A.F. Mozhaiskiy (St. Petersburg). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

**Lipatnikov V.A.** Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Makarenko S.I.** PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Minakov V.F.** St. Petersburg State Economic University (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Mikhailov R.L.** Cherepovets Military Order of Zhukov University of Asche Radioelectronics (Cherepovets). Doctorate of Technical Sciences. Associate Professor.

**Odoevsky S.M.** Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Pashintsev V.P.** North Caucasus Federal University (Stavropol). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Putilin A.N.** PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Fedorenko V.V.** North Caucasus Federal University. (Stavropol). Doctor of Technical Sciences, professor

**Finko O.A.** Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Stemenko (Krasnodar). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Tsymbal V.A.** Branch of the Great Petr RVSН Military Academy (Serpukhov). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Semenov S.S.** Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Saenko I.B.** Saint Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Sciences Russian Academy (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

**Starodubtsev Y.I.** Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Military Sciences, Professor

**Titkov I.V.** Military Educational and Scientific Center of the Navy "Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

**РЕДАКЦИЯ:** Верстка принт-макета: **Мамончикова А.С.**  
Дизайн обложки: **Шаутин Д.В.**  
Поддержка сетевой версии журнала: **Тюкинеева Л.В.**  
Секретарь редакции: **Михайлова Н.В.**

**АДРЕС РЕДАКЦИИ:** 197342. Россия. г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, дом 8,  
Телефон: +7(812) 542-90-54; +7(812) 448-95-97; +7(812) 448-96-84  
Факс: +7(812) 542-18-49. E-mail: [mce-journal@inteltech.ru](mailto:mce-journal@inteltech.ru).  
Официальный сайт: [www.inteltech.ru](http://www.inteltech.ru); [www.mce-journal.ru](http://www.mce-journal.ru)



Научно-технический журнал «Техника средств связи» – это рецензируемое научное издание, в котором публикуются результаты научных исследований специалистов в области современных инфокоммуникационных технологий и автоматизированных систем управления, средств связи и информационной безопасности. Журнал является правопреемником издававшихся с 1959 года Министерством промышленности средств связи СССР всесоюзных журналов «Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника проводной связи» и «Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Техника проводной связи». С 1975 года журнал издается под названием «Техника средств связи». Учредитель и издатель журнала: Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Адрес учредителя и издателя журнала: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Решением ВАК № 222-р от 10.06.2024 научно-технический журнал «Means of communication equipment» («Техника средств связи») включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук и рекомендован ВАК для публикаций основных результатов по научным специальностям:

- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки);
- 2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии (технические науки);
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки);
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

*Периодичность выхода журнала 4 номера в год.*

*Публикация в журнале является научным печатным трудом.*

*Основное содержание издания представляют собой научные статьи и научные обзоры.*

*Информация предназначена для детей старше 12 лет.*

*Журнал зарегистрирован как сетевое и печатное издания в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).*

*Свидетельства о регистрации средств массовой информации: ПИ № ФС 77 – 80135 и ЭЛ № ФС 77 – 80136 от 31.12.2020 г.*

*ISSN (print): 2782-2141; ISSN (online): 2782-2133; РИНЦ (eLIBRARY ID: 77074)*

*Подписной индекс журнала «Техника средств связи» – 79656*

*Ссылки для оформления интернет-подписки на журнал:*

*<https://www.akc.ru/itm/means-of-communication-equipment/>; <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/e79656/>*

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

- Щукин А. Н., Кулешов И. А., Солозобов С. А.**  
Сигнал с быстрой ППРЧ в базисе вейвлет-функций 2

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Винокур М. В., Курносов В. И., Лукин К. И.**  
Актуальные вопросы комплексного обеспечения эксплуатации информационно-телекоммуникационных систем специального назначения 12

### СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Акулов В. С., Угрик Л. Н., Петров А. Н.**  
Глубина подводного радиоприема при неоптимальной ориентации приемной антенны 30
- Жебрун А. М.**  
Анализ эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» на уровне сверхдлинноволновой радиолинии 36
- Киселев А. А., Сударев А. П., Жебрун А. М.**  
Эффективность функционирования сети военной связи 48

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Маркин А. В., Иванов В. А., Овсянкин С. В., Иванов И. В.**  
Аналитическая модель цифрового потока, поступающего с выхода источника сообщений на вход акселератора трафика 58

### ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

- Будко Н. П., Груздев А. А., Шаталов А. Е.**  
Постановка задачи на разработку метода синтеза системы сетевого мониторинга нового поколения 67

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Михайлов В. А., Баринов М. А.**  
Алгоритм определения пороговых значений датчика кожно-гальванической реакции работников опасных производств 89

## CONTENTS

### TRANSMISSION, RECEPTION AND PROCESSING OF SIGNALS

- Shchukin A. N., Kuleshov I. A., Solozobov S. A.**  
A signal with a fast frequency response in the basis of wavelet functions 2

### CONTROL SYSTEMS

- Vinokur M. V., Kurnosov V. I., Lukin K. I.**  
Topical issues of integrated maintenance of special-purpose information and telecommunication systems 12

### COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS

- Akulov V. S., Ugrik L. N., Petrov F. N.**  
The depth of the underwater radio reception with a non-optimal orientation of the receiving antenna 30
- Zhebrun A. M.**  
Analysis of the effectiveness of the functioning of the communication network in the "coast-sea" the direction is at the level of an ultra-long-wave radio line 36
- Kiselev A. A., Sudarev A. P., Zhebrun A. M.**  
The effectiveness of military communications networks 48

### MODELING OF COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

- Markin A. V., Ivanov V. A., Ovsyankin S. V., Ivanov I. V.**  
An analytical model of the digital flow coming from the output of the message source to the input of the traffic accelerator 58

### INTELLECTUAL PROPERTY AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF TELECOMMUNICATIONS DEVELOPMENT

- Budko N. P., Gruzdev A. A., Shatalov A. E.**  
Setting the task of developing a method for synthesizing a new generation network monitoring system 67

### INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS

- Mikhailov V. A., Barinov M. A.**  
Algorithm for determining the threshold values of the galvanic skin response sensor of workers in hazardous industries 89

**Рубрики журнала:** Анализ новых технологий и перспектив развития техники средств связи • Системы управления • Передача, прием и обработка сигналов • Системы связи и телекоммуникации • Перспективные исследования • Вычислительные системы • Информационные процессы и технологии. Сбор, хранение и обработка информации • Моделирование сложных организационно-технических систем • Вопросы обеспечения информационной безопасности • Интеллектуальные информационные системы • Робототехнические системы • Электронные и радиотехнические системы • Объекты интеллектуальной собственности и инновационные технологии в области разработки средств телекоммуникаций

**ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

УДК 621.396.93

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-2-11

**Сигнал с быстрой ППРЧ в базисе вейвлет-функций**

Щукин А. Н., Кулешов И. А., Солозобов С. А.

**Аннотация.** *Цель работы:* показать, как в базисе вейвлет-функций осуществляется формирование и обработка шумоподобных сигналов с быстрой перестройкой рабочих частот по псевдослучайному закону. **Используемые методы:** в качестве шумоподобного сигнала формируется сигнал типа частотно-временной матрицы, полученный на основе использования теории вейвлет-преобразования, а также оценивается помехоустойчивость этих сигналов при разносе по частоте элементов частотно-временной матрицы обратно-пропорционально длительности чипа и его учетверенному значению, в каналах с белым гауссовским шумом, а также в каналах с замираниями Рэлея и Райса. **Новизна:** приведены спектральные и временные характеристики сигналов при различных разносах по частоте элементов частотно-временной матрицы, сформированных в модуляторе, реализованном на основе обратного вейвлет-преобразования. При моделировании процессов формирования и обработки сигнала с быстрой перестройкой рабочих частот по псевдослучайному закону использовалась вейвлет-функция Добеши. Представлены графики помехоустойчивости таких сигналов, реализованных в базисе вейвлет-функций с различным разносом по частоте элементов частотно-временной матрицы для каналов различной физической природы и проведен анализ их помехоустойчивости путем сравнения ее с помехоустойчивостью широкополосных сигналов с прямым расширением спектра. На графиках, характеризующих помехоустойчивость сигнала, представлены результаты теоретического расчета вероятности ошибки для фазоманипулированного псевдослучайной последовательностью сигнала, с использованием аналитического выражения для относительно фазоманипулированных сигналов в каналах с переменными параметрами и полученные путем моделирования процессов формирования и обработки сигналов с быстрой перестройкой рабочих частот по псевдослучайному закону в каналах радиосвязи различной природы при различной ширине спектра и скорости корреспондирующего объекта. **Результаты:** методика формирования и обработки сигналов с быстрой перестройкой рабочих частот по псевдослучайному закону, графики широкополосного сигнала, а также его помехоустойчивость при различных скоростях корреспондирующего объекта и ширине спектра, полученные в результате имитационного моделирования процессов формирования и обработки сигналов типа частотно-временной матрицы. Выполнен анализ полученных результатов. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть реализованы при создании помехозащищенных комплексов радиосвязи.

**Ключевые слова:** быстрая ППРЧ, вейвлет-функция, вероятность ошибки, отношение сигнал/шум, формирование и обработка сигнала быстрой ППРЧ, частотно-временная матрица.

**Введение**

Формирование широкополосного сигнала с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) – это метод передачи информации путем быстрого переключения частот среди множества частотных каналов по закону изменения псевдослучайной последовательности, известной как передающей, так и на приемной сторонах.

Последовательность переключения частот означает, какой следующий канал следует использовать для передачи (приема) информации.

Использование сигналов ППРЧ улучшает конфиденциальность передаваемой информации, повышает помехоустойчивость радиосвязи в условиях как случайных, так и преднамеренных помех, а также в условиях многолучевого распространения радиоволн между корреспондентами.

Различают сигналы ППРЧ с медленной (*slow-frequency hopping – SFH*) и быстрой (*fast-frequency hopping – FFH*) перестройкой рабочей частоты [1].

При медленной ППРЧ в одном и том же частотном канале передается один или более информационных бит, а при быстрой ППРЧ частота изменяется несколько раз в течение передачи одного бита.

Существуют два типа последовательности скачков частоты: псевдослучайная и детерминированная последовательности скачков частоты, известные корреспондентам.

Основное внимание в этой работе уделяется сигналу быстрой ППРЧ, представляющий собой частотно-временную матрицу (ЧВМ), с детерминированной последовательностью скачкообразной перестройки частоты.

### 1. Методика формирования и обработки широкополосных сигналов типа частотно-временной матрицы

Формирование и обработка широкополосных сигналов с быстрой ППРЧ типа частотно-временной матрицы (ЧВМ) осуществляется в базисе вейвлет-функций.

ЧВМ формируется в модуле *IDWT* (*Inverse Discrete Wavelet Transform*) и интерполяторе, представленных в работах [1, 2].

Сигналы типа ЧВМ являются последовательностью  $N$  гармоник, амплитуда, частота и фаза каждой из которых определяются в соответствии с выбранной вейвлет-функцией.

Ширина спектра ЧВМ, сформированного на основе теории вейвлет-преобразования, зависит от выбранного семейства и типа вейвлет-функций, и определяется скоростью передачи информации, длительностью чипа последовательности расширения, количество которых определяет базу сигнала типа ЧВМ, и интервалом частот гармоник.

Методика формирования и обработки сигналов типа ЧВМ заключается в следующем.

1) Сигнал, полученный путем умножения чипа на информационный бит, несущий сведения об информационном сигнале, поступает на вход модуля *IDWT*-ЧВМ:

$$S_{1,N}(x, C) = [x(i) * C(1, N)], \quad (1)$$

где  $x(i)$  – биполярный сигнал (информационный);  $C(1, N)$  – чип  $M$ -кода (последовательность чипов псевдослучайной последовательности). Точка перед знаком  $*$ , в выражении (1), указывает на то, что информационный бит умножается на каждый чип  $M$ -кода. Результат умножения последовательно поступает на вход модулятора, а затем передается в канал на частоте, входящую в ЧВМ.

2) Элемент сигнала типа ЧВМ, несущий информации об информационном бите, на выходе передатчика (модуля *IDWT*-ЧВМ) с квадратурным преобразователем частоты:

$$s_{1,N}(t, \omega_{1,N}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} * \sum_{k=-\infty}^{\infty} S_{1,N}(x, C) * 2^{n/2} * \psi(2^n * t - k) * \exp(j * \omega_{1,N} t), \quad (2)$$

где  $n$  – определяет масштаб вейвлет-функции;  $k$  – сдвиг вейвлет-функции вдоль оси времени с масштабом  $n$ ;  $\psi(\dots)$  – дискретная вейвлет-функция;  $\omega_{1,N}$  – частота элемента ЧВМ.

3) Элемент сигнала типа ЧВМ на входе приемника (входе модуля *DWT*-ЧВМ) с квадратурным преобразователем частоты:

$$y_{1,N}(t) = s_{1,N}(t, \omega_{1,N}) * \exp(-j * \omega_{1,N} t) + n_{ш}(t). \quad (3)$$

На приеме в квадратурном преобразователе частоты спектр принимаемого сигнала переносится на «0» частоту.

4) Чип сигнала типа ЧВМ на выходе модуля *DWT*-ЧВМ:

$$Y_{1,N}(n, k) = \sum_t y_{1,N}(t) * 2^{n/2} * \psi(2^n * t - k). \quad (4)$$

5) Определение автокорреляционной функции (АКФ) и принятие решения о переданном информационном бите:

$$R(C, Y) = E[C(1, N)Y_{1, N}(n, k)], \quad \begin{cases} R(C, Y) > 0 \rightarrow 1, \\ R(C, Y) < 0 \rightarrow 0. \end{cases} \quad (5)$$

Представленная методика позволяет провести имитационное моделирование процессов формирования и обработки широкополосных сигналов, типа ЧВМ, на основе использования вейвлет-функций.

## 2. Результаты имитационного моделирования процессов формирования и обработки сигналов с быстрой ППРЧ

### 2.1. Результаты моделирования процесса формирования сигналов с быстрой ППРЧ

Исследования процессов формирования и обработки сигналов, типа ЧВМ, проводились в среде *MatLab*.

В имитационной модели процессов формирования и обработки ЧВМ сигнал формировался и обрабатывался при условиях:

- вейвлет-функция: *db35*;
- база сигнала (количество вейвлет-поднесущих): 8;
- скорость передачи информации, сигналом быстрой ППРЧ, на вейвлет-поднесущих: 1000 бит/с;
- скорость перемещения объекта (корреспондента): 0 км/час и 1200 км/час.

При моделировании разнос ( $\Delta f_p$ ) по частоте между поднесущими ЧВМ выбирался исходя из длительности чипа:

$$1) \quad \Delta f_p = \frac{1}{\tau_{\text{чип}}} \quad \text{– обратно-пропорционально длительности чипа } \tau_{\text{чип}}, \quad (6)$$

$$2) \quad \Delta f_p = \frac{1}{4 * \tau_{\text{чип}}} \quad \text{– обратно-пропорционально учетверенному } \tau_{\text{чип}} \text{ значению.} \quad (7)$$

Формирование частот ЧВМ, на которых передаются преобразованные в модуле *IDWT* чипы, в процессе моделирования осуществляется методом их интерполяции с различной частотой дискретизации. Это приводит к расширению спектра частот передаваемого чипа, вследствие изменения частоты дискретизации, сформированного в модуле *IDWT* сигнала.

На рис. 1 представлена временная диаграмма изменения сигнала на каждой поднесущей ЧВМ на выходе интерполятора при использовании для его формирования вейвлет-функции *db35* и интерполяции каждой поднесущей с использованием метода быстрого преобразования Фурье.

Из рисунка видно, что каждый из восьми чипов, сформированных в модуляторе, передается на определенной частоте, отличающейся по своему значению и порядку следования.

На рис. 2 и 3 представлены спектральные диаграммы ЧВМ при различных разносах по частоте между ее элементами. Из рис. 2 видно, что разнос между поднесущими ЧВМ составляет 8 кГц. Такой разнос соответствует выражению (6) и теории, изложенной в [1].

Из рис. 3 видно, что разнос между поднесущими ЧВМ составляет 2 кГц.

Расширение спектра поднесущих ЧВМ с увеличением частоты обусловлено интерполяционным способом их формирования, путем увеличения частоты дискретизации, зависящей от ширины спектра сигнала на поднесущей.

ЧВМ формируется из частот с номиналом равным:

- для рис. 2 – [28000 36000 44000 52000 60000 68000 76000 84000] Гц ;
- для рис. 3 – [22000 24000 26000 28000 30000 32000 34000 36000] Гц.

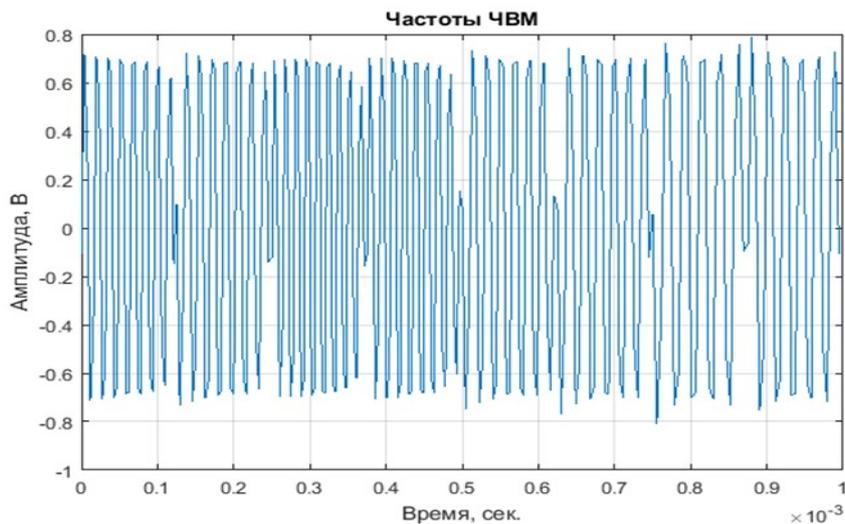


Рис. 1. Временная диаграмма частотно-временной матрицы

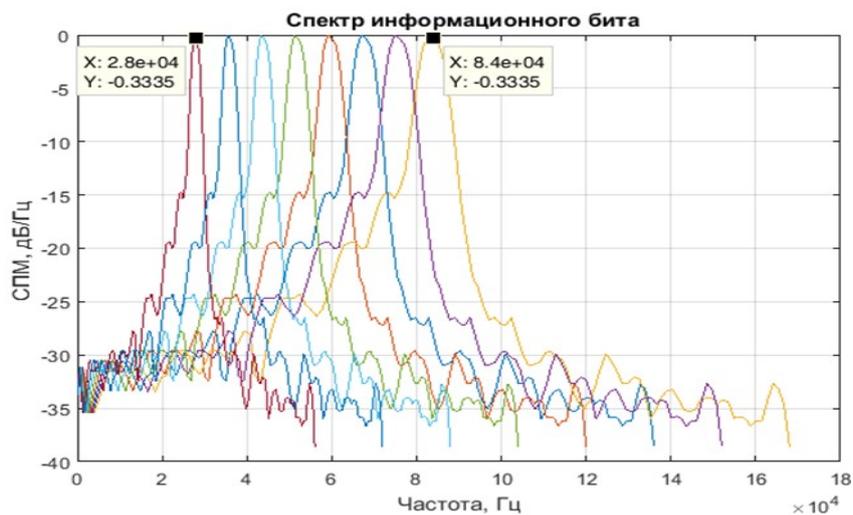


Рис. 2. Спектральная диаграмма частотно-временной матрицы (разнос частот 8 кГц)

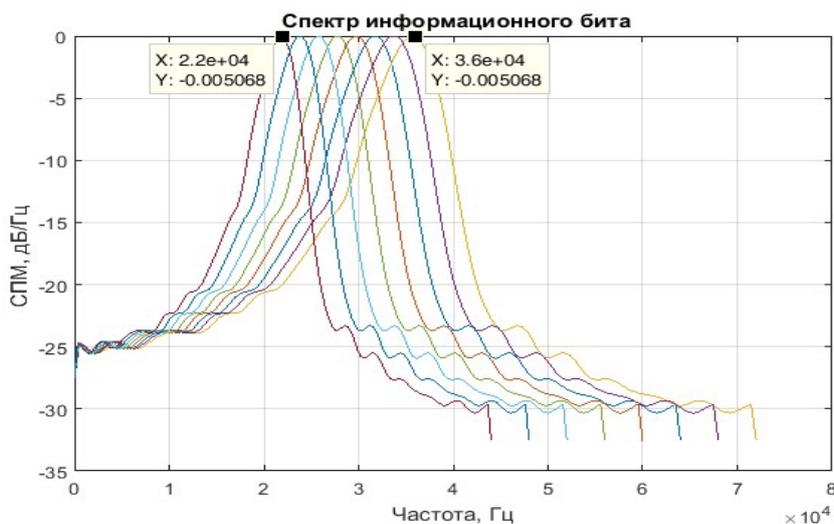


Рис. 3. Спектральная диаграмма частотно-временной матрицы (разнос частот 2 кГц)

Последовательности из этих частот [8 2 1 4 3 7 6 5] соответствует передача информационного бита «0», [6 5 8 7 4 3 1 2] – «1».

### 2.2. Помехоустойчивость сигналов быстрой ППРЧ в каналах различной физической природы

В процессе моделирования проводилось исследование влияния каналов распространения радиоволн, структуры ЧВМ и скорости перемещения объекта на помехоустойчивость приема сигнала.

В качестве канала распространения радиоволн исследовались каналы с белым гауссовским шумом (БГШ), Рэля и Райса (*AWGN, Rayleigh* и *Ricean*). В каналах с замираниями сигнал распространялся по двум путям (лучам) с уровнем в каждом из них 0 дБ и задержкой между лучами 0 и 1.0e-03 секунды.

В качестве дополнительных исходных данных использовались:

- структура частотно-временной матрицы – восемь частот различного номинала и разноса между ними;
- скорость перемещения одного из объектов составляет – 0 и 1200 км/час;
- параметры многолучевых каналов распространения радиоволн.

Подробные значения параметров многолучевых каналов распространения радиоволн представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры канала Рэля и Райса

ChannelType: 'Rayleigh'			ChannelType: 'Rician'		
Параметры	0 км/час	1200 км/час	Параметры	0 км/час	1200 км/час
InputSample Period: s	6.25e-05	6.25e-05	InputSample Period: s	6.25e-05	6.25e-05
Doppler Spectrum:	[1x1 doppler.jakes]	[1x1 doppler.jakes]	Doppler Spectrum:	[1x1 doppler.jakes]	[1x1 doppler.jakes]
MaxDoppler Shift:	0	3.1e-02	MaxDoppler Shift:	0	2.7e-02
PathDelays: s	[0 1.0e-03]	[0 1.0e-03]	PathDelays: s	[0 1.0e-03]	[0 1.0e-03]
AvgPathGaindB:	[0 0]	[0 0]	AvgPathGaindB:	[0 0]	[0 0]
Normalize PathGains:	1	1	KFactor:	3	3
StoreHistory:	1	1	DirectPath DopplerShift:	0	2.7e-02
StorePathGains:	0	0	DirectPathInit Phase:	0	0
PathGains:	[28x2 double]	[28x2 double]	Normalize PathGains:	1	1
ChannelFilter Delay:	0	0	StoreHistory:	1	1
ResetBefore Filtering:	1	1	StorePathGains:	0	0
NumSamples Processed:	28	28	PathGains:	[24x2 double]	[24x2 double]
			ChannelFilter Delay:	0	0
			ResetBefore Filtering:	1	1
			NumSamples Processed:	24	24

Проанализируем результаты имитационного моделирования процессов обработки сигналов быстрой ППРЧ, с чипом на каждой ветвь-поднесущей при теоретическом и уменьшенном разносах частот элементов ЧВМ.

Влияние параметров и структуры ЧВМ, условий распространения радиоволн и скорости перемещения объекта на помехоустойчивость приема сигнала быстрой ППРЧ представлены на рис. 4 – 7.

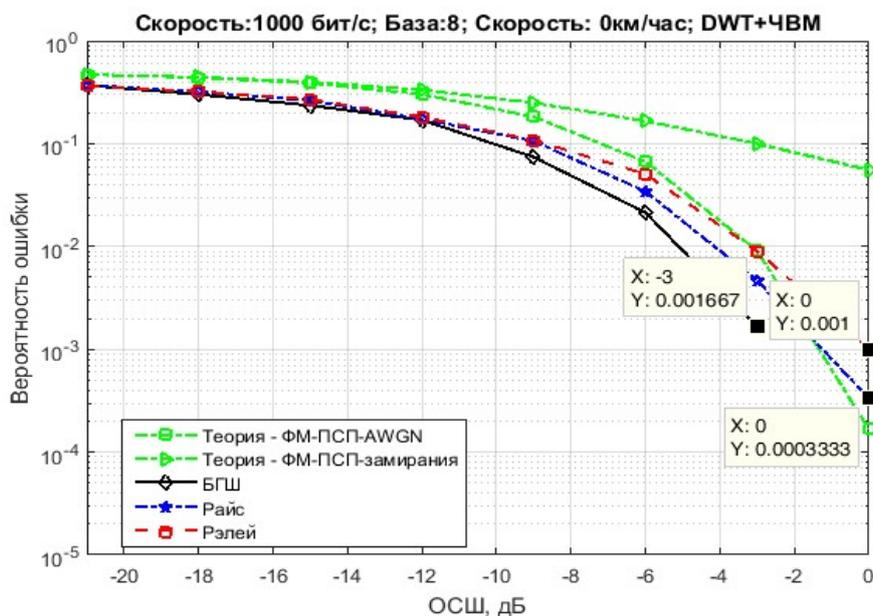


Рис. 4. График помехоустойчивости сигнала с быстрой ППРЧ (разнос частот 8 кГц)

На рис. 4 приведены графики зависимости вероятности ошибки сигнала типа ЧВМ от отношения сигнал/шум на входе демодулятора, реализованного на основе модуля *DWT* (*Discrete Wavelet Transform*), при двухлучевом распространении радиоволн с задержкой между лучами 0 и 1 мс и уровнем лучей в точке приема 0 дБ.

Графики вероятности ошибки построены путем расчета по формуле, приведенной в [4] (Теория-ФМ-ПСП) и полученные при моделировании процессов формирования и обработки сигналов типа ЧВМ, с разносом между частотами 8000 Гц, для различных типов каналов распространения радиоволн между корреспондентами на стоянке. Из графиков рис. 4 видно, что помехоустойчивость сигналов типа ЧВМ, в каналах прямой видимости (БГШ) и с переменными параметрами, выше, чем сигнала с ФМ-ПСП.

Вероятности ошибки в Рэлеевском и Райсовском каналах, при двухлучевом распространении сигнала типа ЧВМ с параметрами каналов в табл. 1, отличаются незначительно. Это обусловлено тем, что сигнал быстрой ППРЧ, передаваемый как по каналу с рэлеевскими так и райсовскими замираниями, в точке приема одинаково изменяет свою структуру и *KFactor* райсовского канала улучшает его помехоустойчивость.

На рис. 5 приведены графики зависимости вероятности ошибки сигнала типа ЧВМ от отношения сигнал/шум на входе демодулятора, при двухлучевом распространении радиоволн с задержкой между лучами 0 и 1 мс и уровнем лучей в точке приема 0 дБ.

Графики вероятности ошибки построены путем моделирования процессов формирования и обработки сигналов типа ЧВМ, с разносом между ее частотами 2000 Гц, для различных типов каналов распространения радиоволн между корреспондентами на стоянке. Из графиков рис. 5 видно, что помехоустойчивость сигналов типа ЧВМ в каналах прямой видимости совпадает, а в каналах с затуханиями качественные и количественные показатели незначительно отличаются от показателей, представленных на рис. 4.

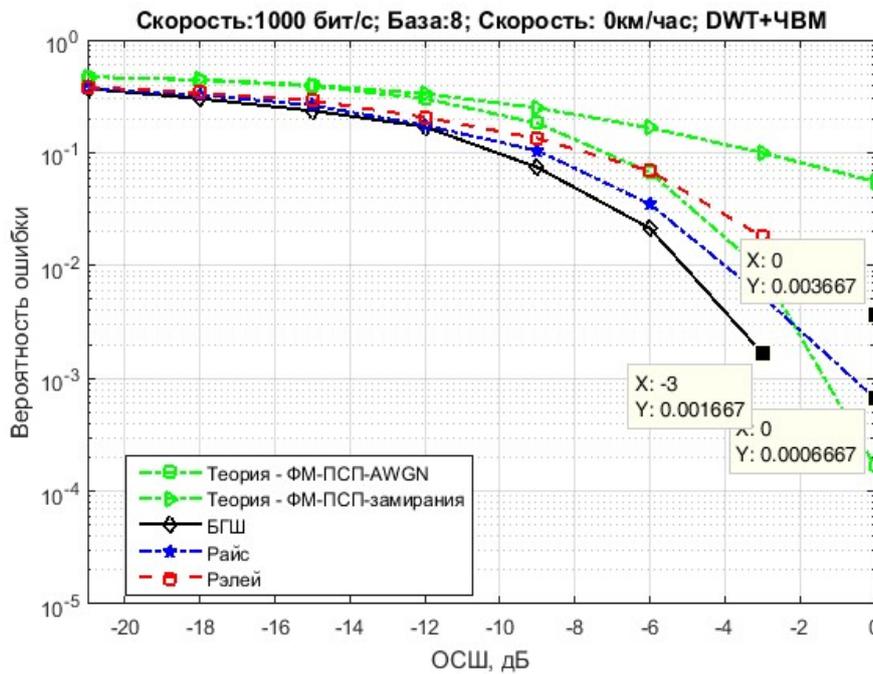


Рис. 5. График помехоустойчивости сигнала с быстрой ППРЧ (разнос частот 2 кГц)

Сравнивая графики рис. 4 и 5 можно увидеть то, что изменение разности частот между элементами ЧВМ слабо влияет на помехоустойчивость приема информации, передаваемой в радиолинии с использованием сигналов быстрой ППРЧ при одинаковом отношении сигнал/шум в точке приема, то есть графики рисунков отличаются незначительно.

На рис. 6 приведены графики зависимости вероятности ошибки сигнала типа ЧВМ от отношения сигнал/шум на входе демодулятора, при двухлучевом распространении радиоволн с задержкой между лучами 0 и 1 мс и уровнем лучей в точке приема 0 дБ при перемещении одного из корреспондентов относительно другого со скоростью 1200 км/час, что характерно для радиосвязи с летательными аппаратами.

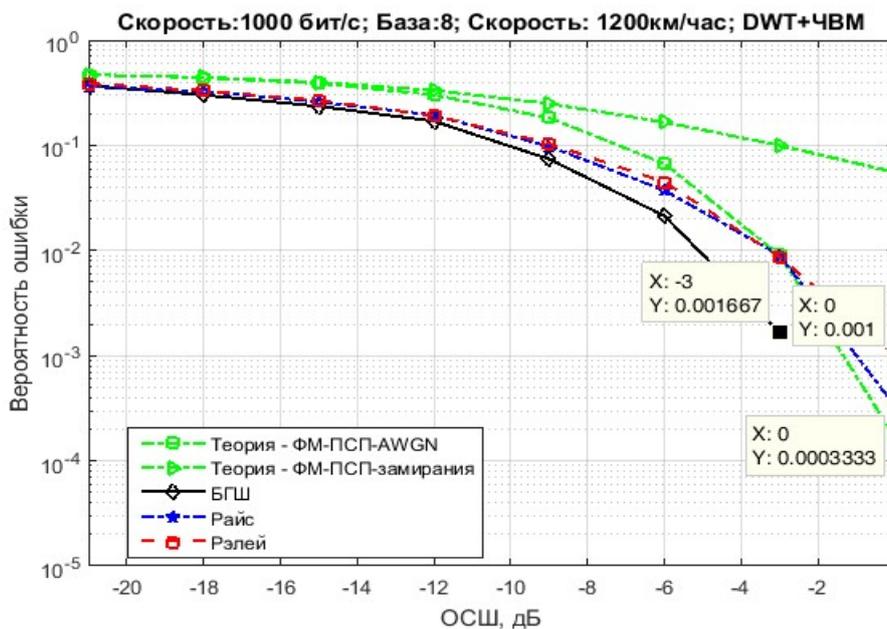


Рис. 6. График помехоустойчивости сигнала с быстрой ППРЧ (разнос частот 8 кГц)

Графики вероятности ошибки построены путем моделирования процессов формирования и обработки сигналов типа ЧВМ, с разнесом между частотами 8000 Гц, для различных типов каналов распространения радиоволн между корреспондентами.

Из графиков рис. 6 видно, что помехоустойчивость сигналов типа ЧВМ при разнесе между ее частотами 8000 Гц, имеет одинаковые качественные и количественные показатели, представленные графиками на рис. 4. Это свидетельствует о том, что эффект Доплера слабо влияет на помехоустойчивость сигнала с быстрой ППРЧ.

На рис. 7 приведены графики зависимости вероятности ошибки сигнала типа ЧВМ от отношения сигнал/шум на входе демодулятора рассчитанные при тех же условиях, что и для рис. 6, за исключением того, что разнос частот между элементами ЧВМ составляет 2000 Гц.

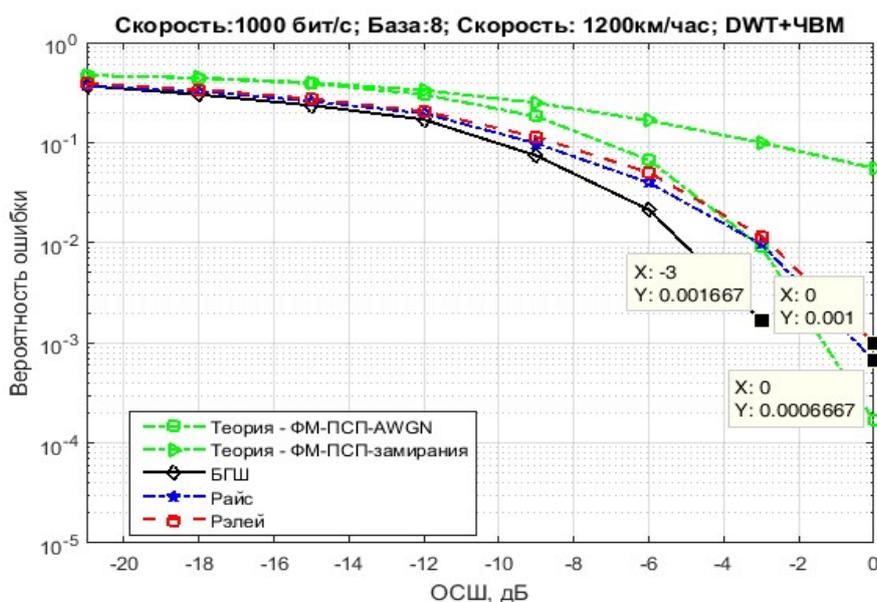


Рис. 7. График помехоустойчивости сигнала с быстрой ППРЧ (разнос частот 2 кГц)

Разнос между частотами частотно-временной матрицы, при перемещении объекта, слабо влияет на помехоустойчивость приема информации, передаваемой сигналами с быстрой ППРЧ.

Сравнивая графики рис. 4 и 5, 6 и 7 можно увидеть то, что изменение состояния объекта, то есть его перемещение в пространстве практически слабо влияет на качество приема информации, передаваемой в радиолинии с использованием сигналов быстрой ППРЧ при одинаковом отношении сигнал/шум в точке приема, то есть графики рисунков отличаются незначительно. В каналах прямой видимости ширина спектра сигнала типа ЧВМ практически не влияет на помехоустойчивость приема сигнала при одинаковом отношении сигнал/шум в точке приема. Это позволяет получить в радиолинии такую же помехоустойчивость, но при меньшей мощности передатчика.

### Выводы

- 1) Использование вейвлет-функций позволяет осуществить формирование ШПС типа ЧВМ с использованием цифровых методов обработки.
- 2) Ширина спектра сигнала типа ЧВМ пропорциональна скорости передачи информации, его базе и разнесу по частоте между его поднесущими, которая может изменяться для адаптации к условиям распространения радиоволн и помеховой обстановке.
- 3) Помехоустойчивость сигнала типа ЧВМ, в каналах различной физической природы, выше, чем помехоустойчивость сигнала ФМ-ПСП, рассчитанного по формуле [4].

Это обусловлено тем, что частоты сигнала с быстрой ППРЧ перед корреляционной обработкой восстанавливаются с помощью модуля прямого вейвлет-преобразования.

4) Высокая помехоустойчивость сигналов типа ЧВМ с различным разносом частот ее элементов, при одинаковом отношении сигнал/шум в точке приема, позволяет радиолиниям, использующим их, также адаптироваться к условиям радиоэлектронного подавления изменяя его мощность, ширину спектра и базу.

### Литература

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Шукин А. Н., Солозобов С. А. Формирование спектрально-эффективного OFDM сигнала в базисе дискретных вейвлет-функций // Техника средств связи. 2022. № 3 (159). С. 80-89. DOI: 10.24412/2782-2141-2022-3-80-89.
3. Кулешов И. А., Шукин А. Н., Солозобов С. А. Устройство формирования сигнала OFDM // Техника средств связи. 2022. № 4 (160). С. 2-7. DOI: 10.24412/2782-2141-2022-4-2-7.
4. Игнатов В. В., Бабков В. Ю. Обоснование основных технических параметров техники радиосвязи. Ленинград: ВАС, 1990. 112 с.

### References

1. Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signal]. Moscow. *Radio i svyaz'* [Radio and communications]. 1985. 384 p. (in Russian).
2. Shchukin A. N., Solozobov S. A. Formation of a spectral-efficient OFDM signal in the basis of discrete wavelet functions. *Means of Communication Equipment*. 2022. No. 3 (159). Pp. 80-89 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2022-3-80-89.
3. Kuleshov I. A., Shchukin A. N., Solozobov S. A. OFDM Signal Generation Device. *Means of Communication Equipment*. 2022. No. 3 (160). Pp. 2-7 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2022-4-2-7.
4. Ignatov V. V., Babkov V. Yu. *Obosnovanie osnovnykh tekhnicheskikh parametrov tekhniki radiosvyazi* [Substantiation of the main technical parameters of radio communication technology]. Leningrad. Military Academy of Communications Publ. 1990. 112 p. (in Russian).

Статья поступила 05 мая 2024 г.

### Информация об авторах

*Шукин Анатолий Николаевич* – главный специалист ПАО «Интелтех». Кандидат технических наук. Область научных интересов: системы радиосвязи. Тел.: +7(812)448-95-94. E-mail: ShchukinAN@inteltech.ru.

*Кулешов Игорь Александрович* – заместитель генерального директора ПАО «Интелтех» по научной работе. Доктор технических наук, доцент. Область научных интересов: системы связи, навигации и управления специального назначения. Тел.: +7(812)542-90-54. E-mail: KuleshovIA@inteltech.ru.

*Солозобов Сергей Анатольевич* – начальник научно-исследовательского отделения ПАО «Интелтех». Кандидат технических наук, доцент. Область научных интересов: системы радиосвязи. Тел.: +7(812)295-40-54. E-mail: solozobob@inteltech.ru.

Адрес: 197342, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

### A signal with a fast frequency response in the basis of wavelet functions

A. N. Shchukin, I. A. Kuleshov, S. A. Solozobov

**Annotation.** *The purpose of the work* is to show how the formation and processing of noise-like signals with rapid adjustment of operating frequencies according to a pseudorandom law is carried out in the basis of wavelet functions. **Methods used:** a time-frequency matrix type signal is formed as a noise-like signal, obtained using the theory of the wavelet transform, and the noise immunity of these signals is estimated when the frequency of the elements of the time-frequency matrix is inversely proportional to the duration of the chip and its quadrupled value, in channels with white Gaussian noise and in channels with fading Rayleigh and Rice. **Novelty:** the spectral and temporal characteristics of signals with different frequency differences of the elements of the time-frequency matrix formed in a modulator implemented on the basis of the inverse wavelet transform are presented. When modeling the processes of signal formation and processing with rapid adjustment of operating frequencies according to a pseudorandom law, the Dobshaw wavelet function was used. Graphs of the noise immunity of such signals implemented in the basis of wavelet functions with different frequency differences of the elements of the time-frequency matrix for channels of different physical nature are presented and their noise immunity is analyzed by comparing it with the noise immunity of broadband signals with direct spectrum expansion. The graphs characterizing the noise immunity of the signal present the results of a theoretical calculation of the error probability for a phase-manipulated pseudorandom sequence signal using an analytical expression for relatively phase-manipulated signals in channels with variable parameters and obtained by modeling the processes of signal formation and processing with rapid adjustment of operating frequencies according to a pseudorandom law in radio communication channels of various nature with different spectrum width and speed the corresponding object. **Results:** a technique for generating and processing signals with rapid adjustment of operating frequencies according to a pseudorandom law, graphs of a broadband signal, as well as its noise immunity at different speeds of the corresponding object and the width of the spectrum, obtained as a result of simulation modeling of signal formation and processing processes such as a time-frequency matrix. The analysis of the obtained results is performed. **Practical significance:** the results of the work can be implemented when creating noise-proof radio communication complexes.

**Keywords:** fast frequency response, wavelet function, error probability, signal-to-noise ratio, fast frequency response signal generation and processing, time-frequency matrix.

### Information about Authors

Anatoly Nikolaevich Shchukin – Chief Specialist of PJSC "Inteltech". Ph.D. of Engineering Sciences. Research interests: radio communication systems. Tel.: +7(812)448-95-94. E-mail: ShchukinAN@inteltech.ru.

Igor Aleksandrovich Kuleshov – Deputy General Director of PJSC "Inteltech" for scientific work. Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Research interests: communication, navigation and control systems for special purposes. Tel.: +7(812)542-90-54. E-mail: KuleshovIA@inteltech.ru.

Sergey Anatolyevich Solozobov – Head of the Research Department of PJSC "Inteltech". Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Research interests: radio communication systems. Tel.: +7(812)295-40-54. E-mail: solozobov@inteltech.ru.

Address: 197342, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

### Библиографическая ссылка на статью:

Щукин А. Н., Кулешов И. А., Солозобов С. А. Сигнал с быстрой ППРЧ в базисе вейвлет-функций // Техника средств связи. 2024. № 2 (166). С. 2-11. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-2-11

### Reference for citation:

Shchukin A. N., Kuleshov I. A., Solozobov S. A. A signal with a fast frequency response in the basis of wavelet functions. *Means of Communication Equipment*. 2024. No. 2 (166). Pp. 2-11 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-2-11

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

УДК 681

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-12-29

**Актуальные вопросы комплексного обеспечения эксплуатации информационно-телекоммуникационных систем специального назначения**

Винокур М. В., Курносков В. И., Лукин К. И.

**Аннотация.** *Цель работы:* детализации проблемы комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной информационно-телекоммуникационной системы специального назначения. **Методы:** однозначного подхода к последовательности и методам проведения концептуальных исследований процесса обеспечения эксплуатации мультисервисной информационно-телекоммуникационной системы специального назначения в настоящее время не существует. В то же время наиболее полным, позволяющим связать цели основных подсистем системы технической эксплуатации единой межведомственной системы управления с мероприятиями комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной сети связи по этапам ее эволюционной схемы развития является структурно-параметрический метод исследований. **Новизна:** Отличие такой модели от известных заключается в том, что в ней процессы обеспечения эксплуатации мультисервисной информационно-телекоммуникационной системы специального назначения представлены как многоплоскостные и многоуровневые, взаимосвязанные между собой информационными и материальными связями, а сам процесс обеспечения эксплуатации мультисервисной информационно-телекоммуникационной системы рассматривается относительно максимально допустимого времени простоя информационного направления связи, требуемое значение среднего времени восстановления соединений в котором, образованных сетью и предназначенных для передачи сообщений, зависит от класса обслуживаемых информационных потоков и их видов. **Результаты:** определены базовые характеристики информационно-телекоммуникационной сети единой межведомственной системы управления; выбраны методы исследования; выработан комплекс мероприятий управления по обеспечению эксплуатации мультисервисной информационно-телекоммуникационной системы; сформирована концептуальная модель процессов обеспечения эксплуатации мультисервисной информационно-телекоммуникационной системы; разработаны модели выбора стратегий комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной информационно-телекоммуникационной системы на различных этапах ее жизненного цикла; выделен этап операциональных исследований решения задач комплексного обеспечения эксплуатации информационно-телекоммуникационной системы специального назначения. **Практическая значимость:** представленный этап операциональных исследований позволяет определить взаимосвязь между различными типами ресурсов, задействованных при комплексном обеспечении эксплуатации информационно-телекоммуникационной системы специального назначения. Кроме того, он показал необходимость взаимоувязывания ресурсов по всем уровням иерархии системы эксплуатации информационно-телекоммуникационной системы. При этом сделан вывод, что применительно к концептуальному и операциональному этапу, адекватность формулируемых моделей условиям эксплуатации может быть получена только с учетом характера воздействий дестабилизирующих факторов.

**Ключевые слова:** информационно-телекоммуникационная система, комплексное обеспечение эксплуатации, концептуальная модель, мультисервисная сеть связи, этапы жизненного цикла.

**Введение**

Анализ направлений развития информационно-телекоммуникационных систем специального назначения (ИТКС СН) [1] показывает, что данный тип систем относится к эволюционно-развивающимся системам. Это предопределяет тот факт, что исследование проблемы комплексного обеспечения их эксплуатации целесообразно проводить в соответствии с этапами обобщенной схемы исследования проблемы управления качеством эволюционно-развивающихся систем (рис. 1) [1, 2].

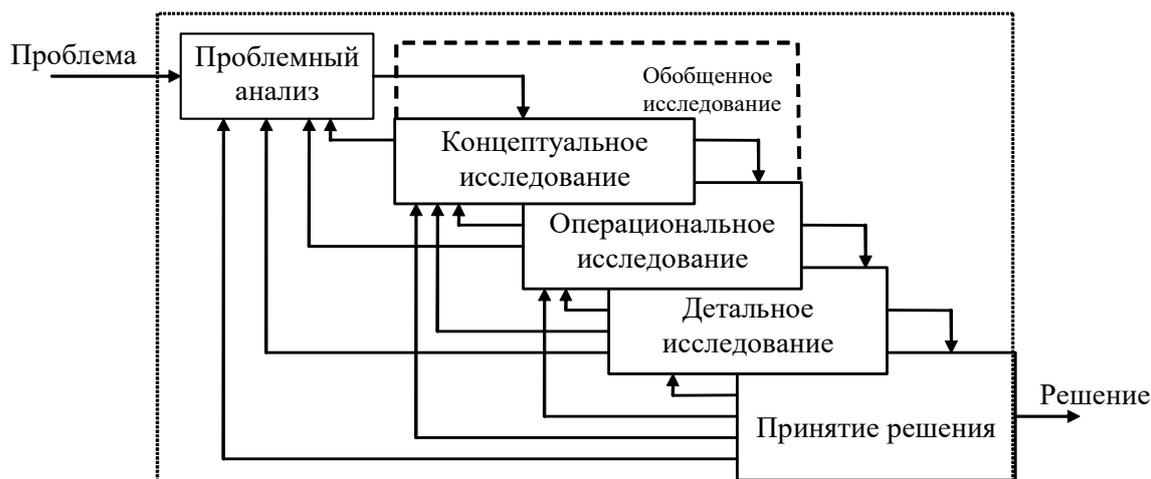


Рис. 1. Основные этапы исследования проблемы комплексного обеспечения эксплуатации ИТКС СН

Сложность решения данной задачи заключается в том, что относительно создания мультисервисной ИТКС, в соответствии с этапностью развития единой межведомственной системы управления (ЕМВСУ), в настоящее время отсутствует достаточный уровень знаний о возможном характере поведения ИТКС такого класса в условиях динамически изменяющихся внутренних и внешних дестабилизирующих факторов, обусловленных применением информационных систем, возросшими возможностями радиоэлектронного и информационного воздействия, нестационарностью информационных потоков в ходе противоборства конфликтующих сторон, конечной надежностью аппаратно-программных средств связи (АПСС).

### 1. Базовые характеристики ИТКС единой межведомственной системы управления

Вместе с тем анализ [1, 2] показал, что особенность организации эксплуатации мультисервисной ИТКС СН с учетом ее базовых характеристик (рис. 2) определяется всеми этапами эволюции жизненного цикла создаваемой системы. Данное обстоятельство потребовало детализации проблемы комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН, что легло в основу ее логической схемы исследований.

Применительно к обобщенной схеме (рис. 1) логическая схема исследований комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН может быть представлена в виде взаимоувязанного на единой методологической основе контура эволюции фаз её жизненного цикла. При этом в соответствии с основными этапами исследований (рис. 1) формирование облика системы эксплуатации ИТКС СН и ее обеспечивающих подсистем будет проводиться на этапе концептуальных исследований.

### 2. Выбор метода исследования

Анализ [1, 2] показал, что однозначного подхода к последовательности и методам проведения концептуальных исследований процесса обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН в настоящее время не существует. В то же время наиболее полным, позволяющим взаимоувязать цели основных подсистем системы технической эксплуатации (СТЭ) ЕМВСУ с мероприятиями комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН по этапам ее эволюционной схемы развития является структурно-параметрический метод исследований (рис. 3) [1-5].

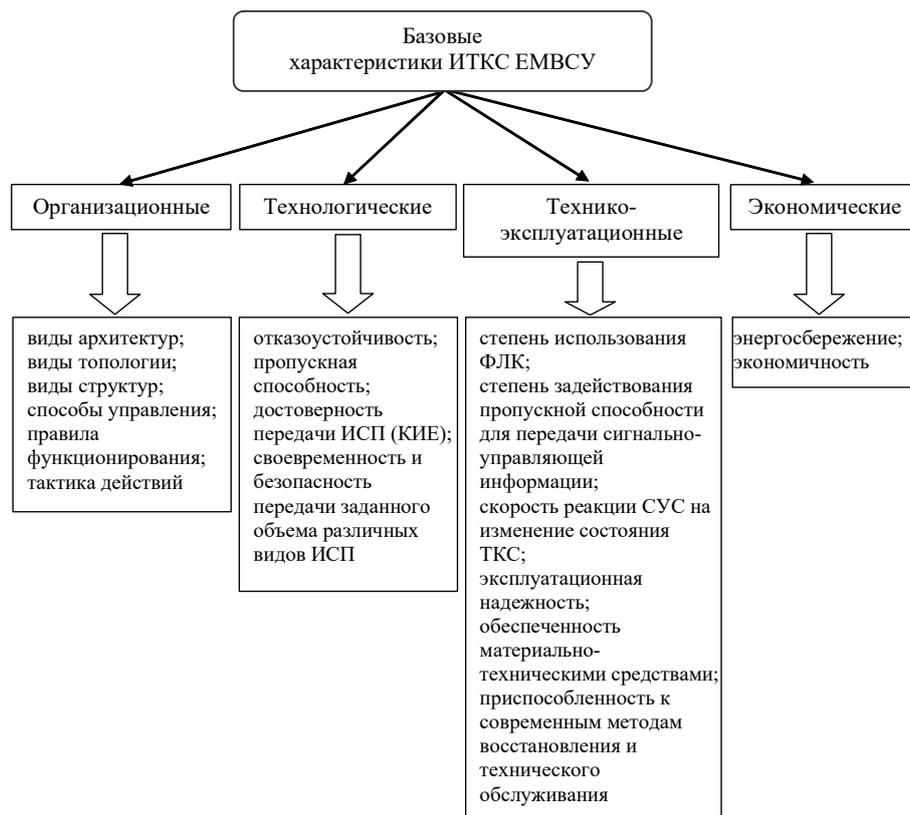


Рис. 2. Базовые характеристики ИТКС ЕМВСУ

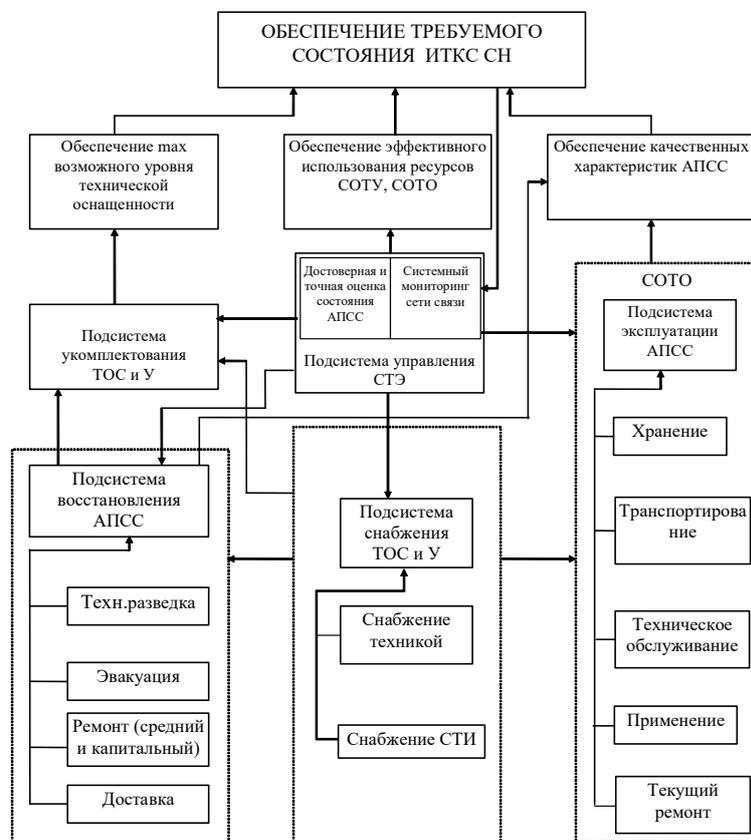


Рис. 3. Схема взаимоотношений целей процесса эксплуатации телекоммуникационной системы с основными мероприятиями его технологического уровня

Использование данного метода позволяет на первом этапе концептуальных исследований разработать структурно-параметрическую модель процесса поддержания требуемого состояния мультисервисной ИТКС СН в условиях преднамеренных и случайных повреждений и отказов ее элементов [3]. Предлагается в содержание структурно-параметрической модели ввести следующие обозначения:  $S'_f$  – информационный поток о невыполнении заданных требований (снижение качества обслуживания потребителей;  $S_f$  – управляющий поток элементами полиструктуры ИТКС СН;  $U$  – уровень агрегатирования элементов ИТКС СН (оперативный, оперативно-технический и технический);  $S^e_f$  – неисправный, неработоспособный, требующий различных объемов работ по техническому обслуживанию и восстановлению ресурс сети;  $S^{*}_f$  – исправный, работоспособный ресурс сети;  $M$  – запасы АПСС;  $N_{\text{вти}}$  – объемы запасов специального технического имущества (СТИ) для обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН;  $T_{\text{в}}$  – время восстановления свойств информационных направлений связи (ИНС) ИТКС СН, в том числе отказавших или поврежденных АПСС, физических логических каналов (ФЛК), элементов полиструктуры ИТКС СН в требуемых объемах,  $T_{\text{п}}$  – время простоя отказавших или поврежденных АПСС, ФЛК, элементов полиструктуры мультисервисной ИТКС СН.

Отличие такой модели от известных [1, 6, 7] заключается в том, что в ней процессы обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН представлены как многоплоскостные и многоуровневые, взаимосвязанные между собой информационными и материальными связями, а сам процесс обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН рассматривается относительно максимально допустимого времени простоя ИНС. При этом требуемое значение среднего времени восстановления соединений в ИНС, образованных сетью и предназначенных для передачи сообщений, зависит от класса обслуживаемых информационных потоков и их видов (рис. 4).

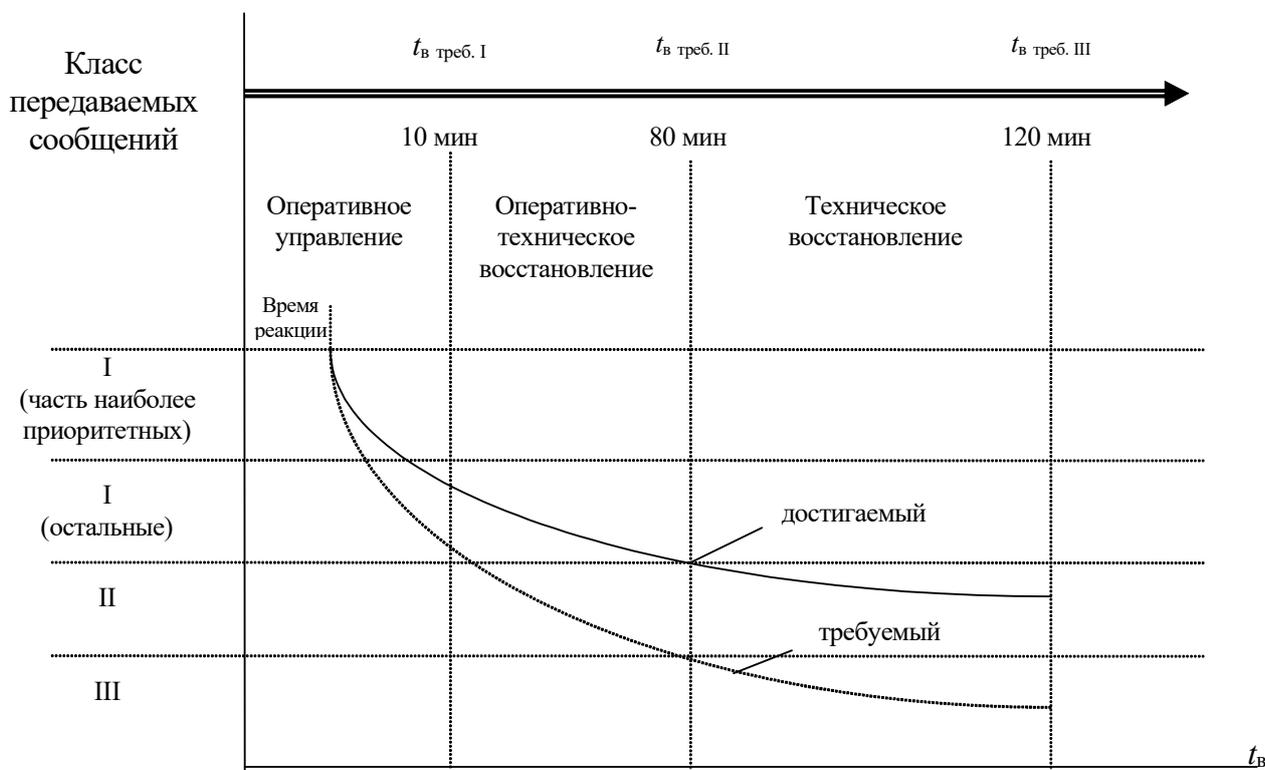


Рис. 4. Зависимость требуемого времени восстановления соединений в ИТКС СН от различных классов сообщений

### 3. Комплекс мероприятий управления по обеспечению эксплуатации мультисервисной ИТКС СН

Анализ [1, 6, 9] показывает, что обеспечение требуемого времени восстановления ИНС в условиях множественных отказов и повреждений элементов ИТКС СН в современных сетях связи возможен посредством: комплекса мероприятий, направленных на реконструкцию, реконфигурацию ИНС; использования мобильных средств и создаваемого резерва; применения разных способов и методов ремонта АПСС или поставки новых образцов оборудования с предприятий промышленности.

Выбор того или другого метода восстановления определяется не только временными ресурсами, обусловленными особенностями организации связи, но и оперативно-техническими возможностями системы эксплуатации ИТКС СН по восстановлению (устранению) отказов и повреждений. При этом достигаемый эффект (время восстановления – затраты) в зависимости от выбранного метода будет существенно различаться. Кроме того, в соответствии со структурой иерархии процесса эксплуатации полиструктуры ИТКС СН, будет меняться сложность задач, выполняемых системой технической эксплуатации. Это обусловлено тем, что с ростом уровня принятия решений увеличивается степень обобщения причин ухудшения качества функционирования ИТКС СН, что предполагает задействование её комплексных ресурсов. В то же время, чем ниже уровень принятия решения, тем с более уникальными событиями сталкивается обслуживающий персонал ЕМВСУ при выполнении мероприятий обеспечения сетевыми ресурсами мультисервисной ИТКС СН [3, 10, 11].

Исходя из допустимого времени простоя ИНС в мультисервисной ИТКС СН в условиях множественных отказов и повреждений процесс обеспечения её эксплуатации целесообразно рассматривать относительно трех уровней [3, 12].

1) *Уровень оперативного управления* обеспечением эксплуатации мультисервисной ИТКС СН предназначен для поддержания сетевых ресурсов, обслуживающих информационные потоки I класса, в том числе и сигнально-управляющих потоков АСУ связью. Обеспечение вероятностно-временных характеристик по поддержанию эксплуатационных свойств ИНС на этом уровне, как правило, производится посредством методов реконфигураций ИТКС СН.

2) *Уровень оперативно-технического управления* обеспечением эксплуатации ИТКС СН направлен на восстановление функционирования части её элементов посредством оперативного резерва с использованием в основном метода реконструкции сети. Данный уровень восстанавливает сетевые ресурсы ИТКС СН, в первую очередь для передачи всего объема информационных сообщений пользователей (ИСП) I-го и II-го классов.

3) *Технический уровень управления* обеспечением эксплуатации ИТКС СН предназначен для ремонта оборудования и восстановления его технического ресурса, программного обеспечения АПСС, ФЛК (например, узловых станций различных видов, коммутационных центров (КЦ), необслуживаемых (обслуживаемых) усилительных (регенерационных (НРП, ОРП)) пунктов (НУП, ОУП), пунктов сигнализации (ПС), транзитных ПС (ТПС) и других элементов) с целью обеспечения своевременной передачи в полном объеме информационных потоков I, II, III классов с требуемым качеством во всех организуемых через ИТКС СН информационных направлениях связи.

Сам процесс управления данными уровнями осуществляется на основе оценки состояния элементов мультисервисной ИТКС СН посредством реализации мероприятий, проводимых административными и оперативными органами управления (рис. 5). Причем оценка состояния мультисервисной ИТКС СН производится ее системой мониторинга путем сбора и обработки текущей информации посредством телеметрии и оперативных донесений, а также учетно-отчетной документации служб материально-технического обеспечения.



Рис. 5. Мероприятия управления по обеспечению эксплуатации мультисервисной ИТКС СН

#### 4. Этап концептуального моделирования процессов обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН

Однако все приведенные рассуждения относительно выделенных уровней в структурно-параметрической модели адекватны процессам эксплуатации только в том случае, если учтены особенности функционирования мультисервисной ИТКС СН. Эти особенности были выделены при проведении проблемного анализа. Они заключаются в том, что при целевом использовании мультисервисных ИТКС СН формирование ее сетевого ресурса во многом будет определяться характером функционирования ее специализированных и обеспечивающих подсистем. Поэтому в процессе концептуальных исследований на этапе построения структурно-параметрической модели в ИТКС СН был выделен ряд плоскостей, которые обеспечивают выполнение взаимоувязанных частных задач.

С этих позиций мультисервисную ИТКС СН можно декомпозировать на плоскости:

- пользователей,
- сетевой тактовой синхронизации,
- баз данных,
- сигнализации,
- управления сетями.

Каждая из плоскостей в свою очередь включает ряд взаимоувязанных элементов (терминальные (оконечные) устройства; цифровые линии связи, образованные посредством различных видов цифровых систем передачи; сетевые узлы и станции; пункты (центры) информационного обслуживания, включающие справочные службы, банки данных и другие информационно-вычислительные системы коллективного пользования для предоставления услуг пространственно-рассредоточенным потребителям информации и т. д.), обеспечивающих формирование сетевых ресурсов требуемого качества и объемов.

Таким образом, первый этап концептуальных исследований моделирования процессов обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН должен завершиться разработкой ее концептуальной модели (рис. 6).

Анализ данной модели и эволюционной схемы развития ЕМВСУ показывает, что как на каждом этапе развития, так и на всех уровнях любой из плоскостей мультисервисной ИТКС СН характер реализации задач и комплекс проводимых мероприятий по обеспечению эксплуатации зависит от выбранного системой управления варианта решения.

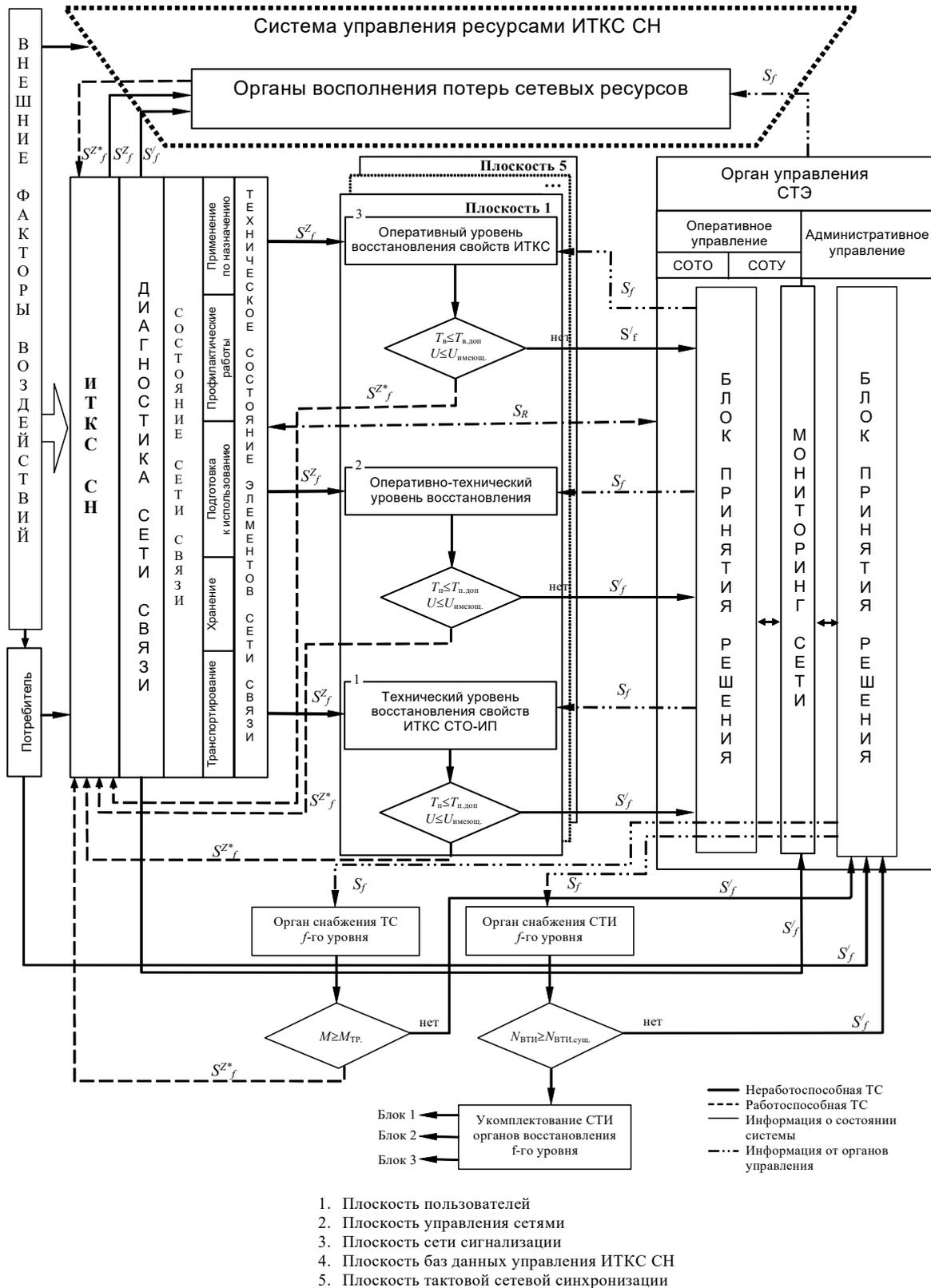


Рис. 6. Модель процесса поддержания требуемых состояний ИТКС СН

При этом относительно процесса создания мультисервисной ИТКС СН реализуемые цели этапов могут совпадать, а могут иметь альтернативную направленность (например, устойчивость – стоимость; обеспечение дальности связи за счет повышения мощности передатчиков – улучшение разведзащищенности и электромагнитной совместимости и т. д.).

Следовательно, разрешение проблемы комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН соответствует классу задач исследования многоцелевых систем, которые могут решаться методами многопараметрической оптимизации [1, 2, 4].

В то же время относительно каждой из реализуемых целей и для достижения глобальной цели функционирования мультисервисной ИТКС СН должна быть выбрана схема принятия решений по комплексному обеспечению её эксплуатации, в соответствии с этапами развития ЕМВСУ. Как показывает анализ [1, 2, 4], из существующих концепций рационального выбора решений в пространстве возможных ситуаций наиболее адекватной является концепция адаптивизации. Данная концепция предполагает возможность оперативного реагирования в ходе целевого функционирования мультисервисной ИТКС СН на поступающую текущую информацию об изменении условий в ЕМВСУ.

При этом область допустимых стратегий комплексного обеспечения эксплуатации может видоизменяться в процессе поступления текущей информации. Кроме того, в качестве реакции на поступающую информацию и прогноз условий эксплуатации мультисервисной ИТКС СН может изменяться и цель обеспечения её эксплуатации.

В этом случае рациональной следует считать такую адаптивную стратегию  $u(t)$  комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН из множества  $U(t, \tau)$ , которая позволит обеспечить выполнение условия [2, 21]

$$W_i(u^*(t), \tau) \geq W_i^{TP}(u(t), \tau), u(t) \in U(t, \tau), \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время;  $\tau$  – время упреждения прогноза.

Запись  $W_i$  означает, что показатель рациональности мероприятий, обеспечивающих эксплуатацию, может меняться во времени. Концепция адаптивизации позволяет целеустремленно и гибко действовать на всех стадиях эволюционного развития ИТКС СН. В свою очередь в основу реализации данной концепции в соответствии с целевыми требованиями и граничными условиями целевого функционирования ИТКС СН может быть положена модель разрешения проблемой ситуации (рис. 7).

В модели введем следующие обозначения:  $A_0$  – цель комплексного обеспечения эксплуатации ИТКС СН;  $U$  – множество стратегий лица, принимающего решения (ЛПР) для достижения поставленной цели;  $U^*$  – множество наилучших стратегий, с точки зрения ЛПР, для достижения поставленной цели;  $\Lambda$  – множество значений определенных и неопределенных факторов, возникающих при целевом использовании ИТКС СН;  $G$  – множество стратегий, обеспечивающих эксплуатацию ИТКС СН;  $Y$  – вектор характеристик стратегий комплексного обеспечения эксплуатации  $g \in G$ ;  $H$  – модель отображения, ставящая в соответствие множествам стратегий  $U$  и факторов  $\Lambda$  множество результатов  $Y(G)$ ;  $W$  – частная цель комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН;  $\Psi$  – оператор соответствия «результат – частная цель»;  $K$  – правило выбора стратегии комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН;  $P$  – модель предпочтений ЛПР на элементах множества  $P = \{U, \Lambda, G, Y, W, K\}$ ;  $\Theta$  – дополнительная информация, необходимая для выработки решения  $h$ , о стратегии комплексного обеспечения эксплуатации ИТКС СН с учетом ограничений на создание и эксплуатацию её элементов.

### 5. Модели выбора стратегий комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН на различных этапах ее жизненного цикла

В рассматриваемом случае модель выбора стратегий комплексного обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН может быть представлена в виде

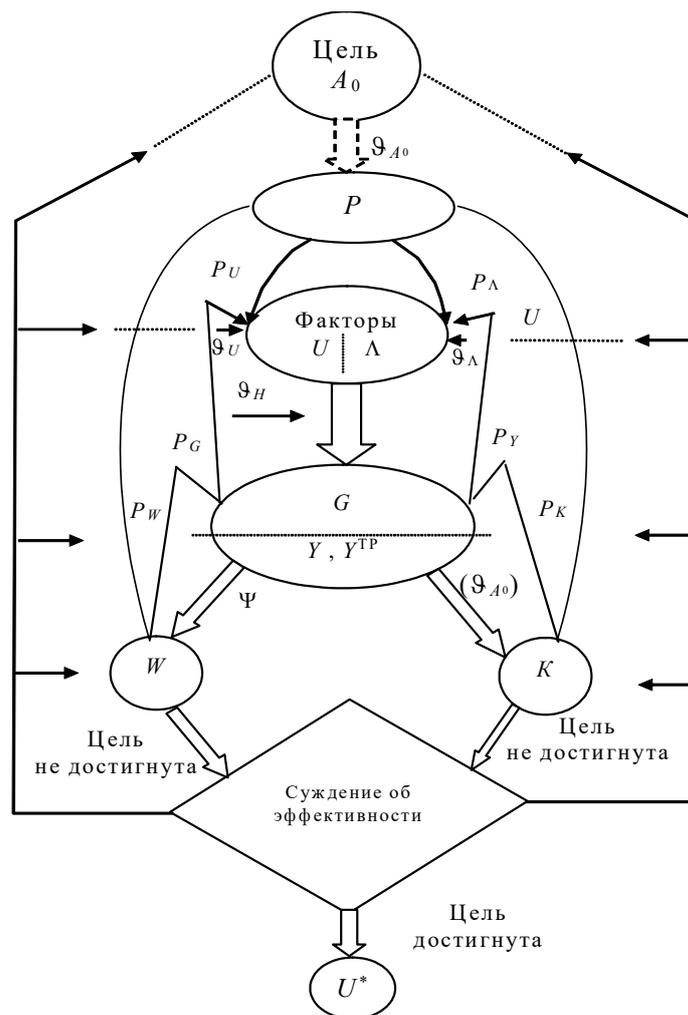


Рис. 7. Модель разрешения проблемной ситуации

$$U^* = (U, \Lambda, H, G, Y, \Psi, W, K, P, \vartheta). \tag{2}$$

Анализ [2, 4] показывает, что решение (2), как правило, приводит к выделению некоторого множества «нехудших» альтернатив. В этой ситуации для однозначного выбора лучшей альтернативы необходимо формирование составного критерия – решающего правила, включающего как формальные, так и неформальные предписания по вынесению суждения о рациональности методов обеспечения эксплуатации при применении мультисервисной ИТКС СН. Это решающее правило может быть задано элементами модели предпочтений  $P$  на множествах  $G - P_G, Y - P_Y, W - P_W$  и т. д.

При этом модель разрешения проблемной ситуации при выработке рациональных стратегий комплекса мероприятий, направленных на обеспечение эксплуатации ИТКС СН, с учетом ограничивающих условий примет вид

$$\Psi : \{Y \setminus H : U \times \Lambda \xrightarrow{\vartheta} Y(G)\} \xrightarrow{\vartheta} W, \tag{3}$$

а процесс анализа результатов, может быть представлен как

$$P \xrightarrow{\vartheta} K : U \xrightarrow{W} U^*. \tag{4}$$

В (3) выражение  $\{H : U \times \Lambda \xrightarrow{\vartheta} Y(G)\}$  означает множественность моделей, которые соответствуют различным этапам исследования процессов обеспечения эксплуатации ИТКС СН.

Приведенный порядок выбора рациональных стратегий обеспечения эксплуатации ИТКС СН целесообразно рассматривать относительно всех этапов эволюции её жизненного цикла. Это предполагает, что второй этап концептуальных исследований поставленной

проблемы должен завершиться разработкой комплекса моделей относительно всех этапов ее логической схемы исследования. В соответствии с результатами, полученными в [1, 2, 4], данный комплекс моделей, охватывающий все этапы жизненного цикла элементов ИТКС СН, может быть представлен следующей совокупностью:

1) *Модель исходных условий* возникновения потребности в обеспечении эксплуатации элементов ИТКС СН. Модель устанавливает соответствие способов обеспечения эксплуатации элементов ИТКС (П) для нормированных условий их эксплуатации (требований по стойкости, наличия запасных частей, инструмента и принадлежностей (ЗИП), требуемой укомплектованности аппаратно-программными средствами, возможности противоборствующей системы по воздействию на элементы ИТКС СН и т. п.) уровню потенциальных возможностей ИТКС ( $Y_a$ ) по перечню и качеству предоставляемых пользователям услуг.

Неопределенным фактором модели является начальная величина причины возникновения потребности в обеспечении эксплуатации элементов мультисервисной ИТКС СН, определяющая ее характер ( $\Pi_0$ ) и уровень ожидаемого эффекта ( $Y_a$ ) от приобретаемых ценностей (внедрения службы связи, услуги, технико-технологического решения и т. д.)  $\alpha_{и.у} \sim d\Pi_0/dY_a$ .

Формализованная запись модели имеет вид

$$q_{и.у} : \{ \Pi_0, Y_a, \alpha_{и.у} \} \rightarrow \{ \Pi \}. \quad (5)$$

2) *Модель описания* требуемой системы ценностей, получаемых посредством комплексного обеспечения эксплуатации элементов мультисервисной ИТКС СН. Модель устанавливает соответствие между различными способами обеспечения эксплуатации элементов ИТКС и уровнем реализации требований, выступающих в качестве норм удовлетворения потребностей пользователей в телекоммуникационных услугах.

Неопределенным фактором модели является соответствие мероприятий обеспечения эксплуатации элементов ИТКС ( $D_0$ ) степени выполнения требований к услугам ( $N$ ), предоставляемых мультисервисной ИТКС СН:  $\alpha_{с.п.} \sim dD_0/dN$ .

Формализованная запись модели имеет вид

$$q_{с.п.} : \{ D_0, N, \Pi, \alpha_{с.п.} \} \rightarrow \{ D \}. \quad (6)$$

3) *Модель целеполагания*. Модель устанавливает соответствие между уровнем целевых требований к эксплуатационным нормам функционирования мультисервисной ИТКС СН и уровнем организационно-технической реализуемости ее элементов. Неопределенным фактором модели является соответствие частных целей ( $\lambda_0$ ) комплексного обеспечения эксплуатации элементов мультисервисной ИТКС СН и эффективности способов их реализации ( $U_p$ ):  $\alpha_{ц.п.} \sim d\lambda_0/dU_p$ .

Формализованная запись модели имеет вид

$$q_{ц.п.} : \{ \lambda_0, U_p, D, \alpha_{ц.п.} \} \rightarrow \{ \lambda \}. \quad (7)$$

4) *Модель организационно-технического облика*. Модель устанавливает соответствие между уровнем качественного описания организационно-технических функций системы эксплуатации ИТКС СН и уровнем ее эволюционного развития.

Неопределенными факторами модели являются требуемый технико-технологический уровень системы эксплуатации ИТКС  $K_{т.о.}$  и критерии их эффективности  $E_{т.о.}$ , характеризующие качественную меру полезности, совершенства и прогрессивности развития:  $\alpha_{т.о.} \sim dK_{т.о.}/dE_{т.о.}$ .

Формализованная запись модели имеет вид

$$q_{т.о.} : \{ K_{т.о.}, E_{т.о.}, \lambda, \alpha_{т.о.} \} \rightarrow \{ K_{т.о.} \}. \quad (8)$$

5) *Модель структуры технического задания*. Модель устанавливает соответствие между возможностями обеспечения эксплуатации элементов ИТКС  $T_p$  и уровнем задач, решаемых на стадиях предпроектных и проектных исследований по созданию ЕМВСУ.

Неопределенным фактором модели является исходная величина минимально необходимого уровня обеспечения эксплуатации развития будущей мультисервисной ИТКС СН ( $T_{p_0}$ ), определяемого принципами номенклатурного и количественного нормирования требований, включаемых в техническое задание, и иерархией задач, решаемых при реализации задаваемых требований, в архитектуре создаваемой ИТКС ( $J$ ):  $\alpha_{т.з.} \sim dT_{p_0}/dJ$ .

Формализованная запись модели имеет вид

$$q_{т.з.} : \{T_{p_0}, J, K_{т.з.}, \alpha_{т.з.}\} \rightarrow \{T_p\}. \quad (9)$$

Свертка моделей (5) – (9) позволяет сформировать модель замысла заказчика (ЛПР) по методам обеспечения эксплуатации мультисервисной ИТКС СН на этапах целеполагания, формирования ее облика, проведения НИР и ОКР. Данная модель может быть представлена как композиция частных моделей  $q_{з.з.} = [q_{и.у.}; q_{с.ц.}; q_{ц.п.}; q_{с.о.}; q_{т.з.}]$  и будет иметь вид

$$q_{з.з.} : \{P_0; \alpha_{и.у.}; D_0; \alpha_{с.ц.}; \lambda_0; \alpha_{ц.п.}; K_{т.з.}; \alpha_{т.о.}; T_{p_0}; \alpha_{т.з.}; Z_{\Sigma}\} \rightarrow \{\gamma\}, \quad (10)$$

где  $Z_{\Sigma} : \{Y_a; N; U_p; E_{т.о.}; J\}$  – определяет степень реализации методов обеспечения эксплуатации элементов мультисервисной ИТКС СН в целях удовлетворения требований по качеству предоставляемых пользователям услуг, определенных на этапе ее проектирования.

В том случае, когда условие достижения требуемого уровня  $Z_{\Sigma}$  на стадии проектирования или модернизации ИТКС СН, используется в качестве критерия для принятия решений, результаты модели (10) можно считать прогнозируемым уровнем гарантии выполнения требований, предъявляемых к разрабатываемой системе эксплуатации мультисервисной ИТКС СН.

В то же время относительно логической схемы исследования проблемы эти результаты являются исходными данными для моделирования последующих этапов формирования СТЭ ИТКС СН. Тогда следующий комплекс моделей должен отражать взаимосвязь качества формируемого сетевого ресурса мультисервисной ИТКС СН с процессом обеспечения эксплуатации её элементов непосредственно на этапах создания и целевого применения. Поэтому в рамках исследуемой проблемы важно продолжить рассмотрение необходимого комплекса моделей.

б) *Модель изготовления и контроля качества опытных образцов.* Модель устанавливает соответствие между уровнем качества функционирования элементов ИТКС СН относительно условий и методов, обеспечивающих их эксплуатацию, определенных в замысле заказчика, а также уровнем затрат на контроль их качества в процессе производства. Неопределенными факторами модели являются уровень отработанности опытной технологии, определяющей начальный уровень бездефектности опытных образцов АПСС  $R_{и.оп_0}$ , и уровень эффективности применения средств производственного контроля:  $\alpha_{и.оп} \sim dR_{и.оп_0}/dC_{и.оп}$ , где  $C_{и.оп}$  – затраты на изготовление опытных образцов АПСС.

Таким образом, формализованная запись модели может быть представлена в виде

$$q_{и.оп} : \{R_{и.оп_0}, C_{и.оп}, \gamma, \alpha_{и.оп}\} \rightarrow \{R_{и.оп}\}. \quad (11)$$

Причем параметры модели (11) зависят от объема и технологичности производства элементов ИТКС СН, взаимосвязей в производственной кооперации изготовления комплектующих, квалификации персонала и других факторов, определяющих качество изделий (АПСС).

7) *Модель экспериментальной отработки.* Модель устанавливает соответствие между уровнем отработанности конструкторской документации и уровнем затрат на экспериментальную отработку. Неопределенными факторами модели являются уровень отработанности процесса синтеза (проектирования), определяющий начальный уровень

отработанности (качества) конструкторской документации  $R_{3_0}$ , и уровень эффективности методов и средств экспериментальной отработки при  $C_3$  затратах на изготовление конструкторской документации:  $\alpha_3 \sim dR_{3_0}/dC_3$ .

На результативность процесса отработки также влияет уровень бездефектности опытных образцов АПСС  $R_{и.оп}$ . Таким образом, формализованная запись модели экспериментальной отработки может быть представлена в виде

$$q_3 : \{ R_{3_0}, C_3, R_{и.оп}, \alpha_3 \} \rightarrow \{ R_3 \}. \quad (12)$$

При этом параметры зависят от степени новизны обрабатываемых решений, оснащенности экспериментальной базы и других характеристик мультисервисной ИТКС СН.

8) *Модель изготовления и контроля качества серийных образцов АПСС.* Модель аналогична соотношению (11) и может быть представлена в виде

$$q_{ис} : \{ R_{ис_0}, R_3, C_{ис}, \alpha_{ис} \} \rightarrow \{ R_{ис} \}, \quad (13)$$

где  $\alpha_{ис} \sim dR_{ис_0}/dC_{ис}$ .

9) *Модель эксплуатации.* Модель устанавливает соответствие между уровнем качества (в том числе надежности) серийных образцов АПСС, находящихся в эксплуатации, и уровнем эксплуатационных затрат на местах применения их по назначению. Неопределенным фактором модели выступает зависимость качества функционирования АПСС от уровня воздействий противоположной стороны, и возможностями системы технического обеспечения связи и управления (ТОС и У) по проведению мероприятий поддержания и восстановления эксплуатационных свойств элементов ИТКС СН:  $\alpha_{экс} \sim dR_{экс_0}/dC_{экс}$ .

При этом начальный уровень эксплуатационных свойств АПСС на стадии их ввода в эксплуатацию определяется отработанностью и бездефектностью  $R_{ис}$  серийных образцов. Таким образом, формализованная запись модели эксплуатации элементов мультисервисной ИТКС СН имеет вид

$$q_{экс} : \{ R_{ис}, R_{экс_0}, \alpha_{экс}, C_{экс} \} \rightarrow \{ R_{экс} \}, \quad (14)$$

где  $R_{экс}$  – текущее, а  $R_{экс_0}$  – начальное значения эксплуатационных параметров АПСС.

10) *Модель функционирования элементов мультисервисной ИТКС СН.* Модель устанавливает соответствие между эффективностью применения элементов ИТКС СН и уровнем затрат, направленных на реализацию мероприятий по обеспечению их функционирования, в том числе с учетом потока отказов и повреждений, вызванных дестабилизирующими факторами как природного, так и технологического характера. Неопределенным фактором модели является зависимость качества функционирования ИТКС при реализации целевого процесса в ЕМВСУ от эффективности мероприятий ее системы технической эксплуатации:  $\alpha_\phi \sim dR_{\phi_0}/dC_\phi$ .

Тогда формализованную запись модели функционирования мультисервисной ИТКС СН можно представить в виде

$$q_\phi : \{ R_{экс}, R_{\phi_0}, \alpha_\phi, C_\phi \} \rightarrow \{ R_\phi \}. \quad (15)$$

Учитывая тот факт, что основу ИТКС СН составляют многофункциональные АПСС, множество состояний которых не может быть однозначно охарактеризовано двумя классами состояний (работоспособностью и неработоспособностью), поэтому действенность мероприятий, обеспечивающих функционирование элементов ИТКС, целесообразно оценивать относительно снижения их эксплуатационного ресурса до некоторого порогового уровня  $G_\phi$ . В этом случае формализованную запись модели можно представить в виде

$$q_\phi : \{ R_{экс}, R_{\phi_0}, \alpha_\phi, G_\phi, C_\phi \} \rightarrow \{ W_\phi \}, \quad (16)$$

где  $W_{\phi}$  – дифференциальный или интегральный выходной эффект, получаемый при функционировании ИТКС СН.

11) *Модель целевого применения ИТКС СН.* Модель устанавливает соответствие между эффективностью функционирования ИТКС ( $Q_{\text{прм}}$ ) и издержками системы технического обеспечения связи и управления (ТОС и У), обеспечивающими процесс функционирования ИТКС СН. Неопределенным фактором модели является уровень требований  $V_{\text{тр}}$  относительно обеспечения паритета по управлению силами и средствами в условиях интенсивно развивающихся средств противоборства. При этом основные характеристики ИТКС отражают эффективность ее применения через показатели качества функционирования  $R_{\phi}$  или через выходной эффект функционирования  $W_{\phi}$ .

Формализованная запись модели применения ИТКС СН в ЕМВСУ может быть представлена в виде

$$q_{\text{прм}}: \{R_{\phi}, V_{\text{тр}}, Q_{\text{прм}}\} \rightarrow \{Y\}, \quad (17)$$

или

$$q_{\text{прм}}: \{W_{\phi}, V_{\text{тр}}, Q_{\text{прм}}\} \rightarrow \{Y'\}.$$

Аналогично представлению (10) формализованная запись обобщенной модели создания и целевого применения ИТКС СН может быть представлена как композиция частных моделей

$$q = [q_{\text{и.оп}}, q_{\text{э}}, q_{\text{ис}}, q_{\text{экс}}, q_{\phi}, q_{\text{прм}}]. \quad (18)$$

Таким образом, этап концептуальных исследований проблемы комплексного обеспечения эксплуатации ИТКС должен заканчиваться комплексом моделей, взаимосвязанных по всем стадиям жизненного цикла ИТКС СН. В то же время степень детализации моделей каждого этапа в зависимости от выбора проектных параметров, особенностей конструктивных и технологических решений может существенно меняться. При этом согласно логической схеме (рис. 1) каждый предыдущий ее этап исследований (совокупность этапов) выступает в качестве исходных данных и ограничений на последующие этапы исследований.

Однако следует отметить, что этап концептуального моделирования позволяет выявлять только общие закономерности в исследовании проблемы комплексного обеспечения эксплуатации ИТКС СНУ. Он не дает формы представления параметров и критериев. Анализ [1, 2, 4, 5] показал, что взаимосвязку целей, комплексных ресурсов системы эксплуатации ИТКС, временных параметров, определяющих процесс обеспечения её эксплуатации, функций и задач системы эксплуатации можно провести на этапе операциональных исследований.

## 6. Этап операциональных исследований решения задач комплексного обеспечения эксплуатации ИТКС СН

При этом на этапе операциональных исследований для взаимосвязывания задач комплексного обеспечения эксплуатации ИТКС СН при ее целевом использовании схему исследований целесообразно соотносить с изменением ресурсных характеристик ИТКС СН. В то же время сам процесс использования комплексных ресурсов может рассматриваться в едином взаимосвязанном операционном контуре, элементами которого являются комплексные ресурсы ИТКС, среда и условия их применения, органы управления (рис. 8).

При этом в соответствии с целью функционирования ИТКС СН, в условиях внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, комплексные ресурсы ИТКС целесообразно разделить на два типа.

Первый тип (А) непосредственно участвует в основном процессе формирования сетевых ресурсов ИТКС СН (пространственных, временных, коммутационных, энергетических ресурсов, АПСС, обслуживающего персонала и т. д.).

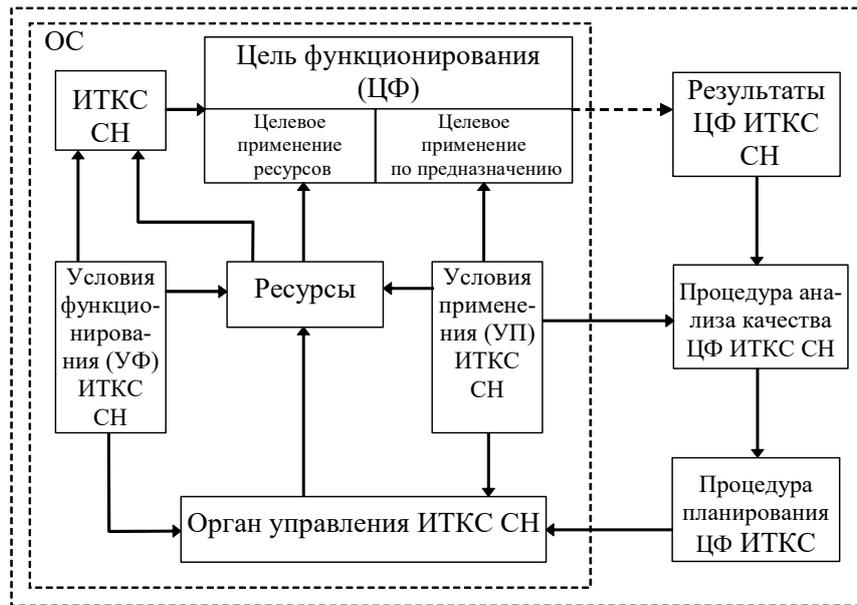


Рис. 8. Операционный комплекс реализации процесса эксплуатации ИТКС СН

Ко второму типу ( $\Delta B$ ) можно отнести такие ресурсы, которые обеспечивают устойчивость формирования сетевых ресурсов в условиях внутренних и внешних дестабилизирующих факторов (это необходимые запасы АПСС, СТИ, ЗИП, технологическое оборудование для выполнения ремонтно-профилактических и ремонтно-восстановительных работ и т. д). В общем случае при определенных условиях функционирования мультисервисной ИТКС СН это ресурсы избыточные. В отличие от первого типа ресурсов их потеря не приведет к множественному изменению пространства допустимых состояний ИТКС, хотя и может снизить базовые характеристики качества её функционирования.

Следует отметить, что отнесение конкретного ресурса к какому-либо типу определяется не столько его физической природой, сколько складывающейся ситуацией в ИТКС СН. Так, различные виды резервов и ЗИП могут быть отнесены к первому типу ресурсов в условиях нормального функционирования элементов ИТКС и ко второму типу – при выполнении на этих же элементах ремонтно-восстановительных работ. Следовательно, граница между указанными типами ресурсов может изменяться в зависимости от характера воздействий дестабилизирующих факторов.

В то же время цель функционирования мультисервисной ИТКС СН, которую необходимо достигнуть на заданном интервале времени будет зависеть от наличия всей совокупности ресурсов, которую в соответствии с концептуальной моделью можно представить в виде иерархического дерева (рис. 9).

Тогда для ресурсов первого и второго типа относительно одного из уровней обеспечения эксплуатации ИТКС СН (например, оперативно-технического, соответствующего  $g$ -му уровню и выделенной подсистемы (например,  $\mu$ -ой, что в общем случае для данного уровня соответствует одному из узлов связи ИТКС СН) можно записать:

- для ресурсов первого типа  $A_{g\mu} = \bigcap_{\forall v} A_{g+1,v}$ , где  $v = 1, \dots, m$ ;
- для ресурсов второго типа  $B_{g\mu} = \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}$ , где  $v = 1, \dots, m$ .

В условиях потока отказов и повреждений, возникающих под действием внутренних и внешних дестабилизирующих факторов процесс обеспечения функционирования ИТКС СН можно рассматривать как последовательное изменение состояний элементов или же изменение ситуаций в ИТКС, что соответствует изменению ресурсов  $A_{g\mu}$  и  $\Delta B_{g\mu}$ . В этом

случае мероприятия  $M_{g+1,v}$  ( $v = 1, \dots, m$ ), связанные с организацией работ на  $q$ -м уровне с задействованием ресурсов  $(q+1)$ -го уровня в соответствующие периоды  $\tau_i$ , можно представить упорядоченной совокупностью действий, выполняемых по отношению к ресурсам первого типа  $A_{g+1,v}$  с помощью ресурсов второго типа  $\Delta B_{g+1,v}$ . Тогда пространство возможных состояний, в которых будут находиться ресурсы, можно представить в виде

$$M_{g+1,v}^{\tau_i} : \prod_{\forall v} A_{g+1,v}^{\tau_{i-1}} \times \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}^{\tau_{i-1}} \rightarrow \prod_{\forall v} A_{g+1,v}^{\tau_i} \times \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}^{\tau_i}, \quad (19)$$

где знак « $\times$ » обозначает совокупное рассмотрение отображения различных множеств состояний ресурсов в единое пространство.

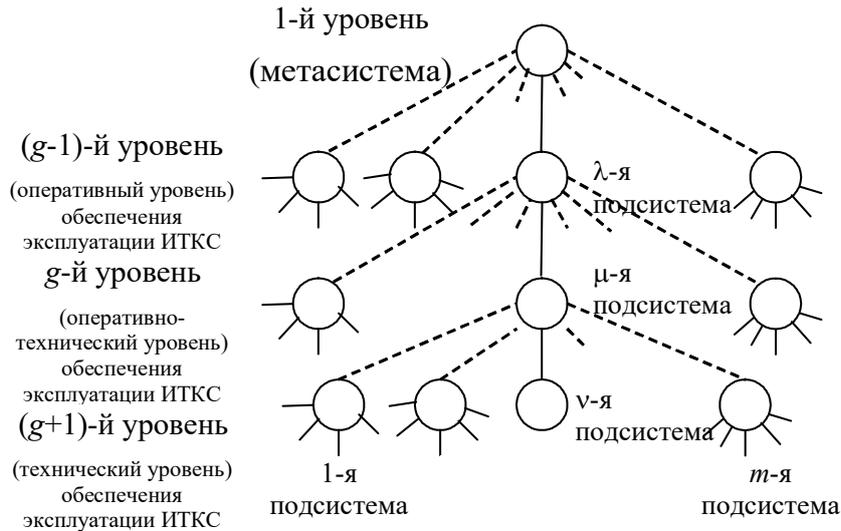


Рис. 9. Взаимоотношения формирования комплексного ресурса в мультисервисной ИТКС СН

Тогда относительно подготовительного периода, непосредственного применения элементов ИТКС по назначения и их восстановления по причине отказа формализация процессов с использованием ресурсов первого и второго типа, рассмотренных выше, может быть представлена следующим образом:

– в подготовительный период  $z$  для интервала  $\tau_{i-1}$ , в котором выполняются мероприятия  $M_{g+1,v}^{\tau_{i-1,z}}$  по использованию ресурсов  $A_{g+1,v}^{\tau_{i-2}}$  и  $\Delta B_{g+1,v}^{\tau_{i-2}}$ , пространство возможных состояний ресурсов ИТКС можно представить в виде

$$M_{g+1,v}^{\tau_{i-1,z}} : \prod_{\forall v} A_{g+1,v}^{\tau_{i-2}} \times \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}^{\tau_{i-2}} \rightarrow \prod_{\forall v} A_{g+1,v}^{\tau_{i-1,z}} \times \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}^{\tau_{i-1,z}}; \quad (20)$$

– в период непосредственного, целевого применения  $s$  для интервала  $\tau_i$ , связанного с проявлением дестабилизирующих факторов  $W_{g+1,v}^{\tau_{is}}$ , требующий учета данных воздействий на ресурсы  $A_{g+1,v}^{\tau_{i-1,z}}$  и  $\Delta B_{g+1,v}^{\tau_{i-1,z}}$  и необходимых мероприятий  $M_{g+1,v}^{\tau_{is}}$  по устранению отказов и повреждений элементов ТКС или восполнению данных ресурсов, можно представить в виде

$$M_{g+1,v}^{\tau_{is}} : \bigcup_{\forall v} W_{g+1,v}^{\tau_{is}} \times \prod_{\forall v} A_{g+1,v}^{\tau_{i-1,z}} \times \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}^{\tau_{i-1,z}} \rightarrow \prod_{\forall v} A_{g+1,v}^{\tau_{is}} \times \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}^{\tau_{is}}; \quad (21)$$

– в восстановительный период  $o$ , характеризуемый выполнением мероприятий  $M_{g+1,v}^{\tau_{i+1,o}}$  в период  $\tau_{i+1}$  по восстановлению качества функционирования ИТКС СН посредством использования ресурсов  $A_{g+1,v}^{\tau_{is}}$  и  $\Delta B_{g+1,v}^{\tau_{is}}$ , можно представить в виде

$$M_{g+1,v}^{\tau_{i+1,o}} : \prod_{\forall v} A_{g+1,v}^{\tau_{is}} \times \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}^{\tau_{is}} \rightarrow \prod_{\forall v} A_{g+1,v}^{\tau_{i+1,o}} \times \bigcup_{\forall v} \Delta B_{g+1,v}^{\tau_{i+1,o}}. \quad (22)$$

### Выводы

Таким образом, этап операциональных исследований позволяет определить взаимосвязь между различными типами ресурсов, задействованных при комплексном обеспечении эксплуатации ИТКС СН. Кроме того, он показал необходимость взаимоувязывания ресурсов по всем уровням иерархии системы эксплуатации ИТКС СН. В то же время, как показали исследования применительно к концептуальному и операциональному этапу, адекватность формулируемых моделей условиям эксплуатации может быть получена только с учетом характера воздействий дестабилизирующих факторов. Поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть комплекс моделей угроз, которые будут определять причинно-следственные связи изменения качества функционирования ИТКС СН, а, следовательно, и комплекс мероприятий, связанный с устранением влияния дестабилизирующих факторов.

### Литература

1. Курнос В. И., Лихачев А. М. Методология проектных исследований и управление качеством сложных технических систем электросвязи. – СПб.: ТИРЕКС, 1998.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдудевский (пред.), В. И. Кузнецов, Н. Д. Кузнецов и др. – М.: Машиностроение, 1988.
3. Кузнецов В. Е., Лихачев А. М. Теоретические и методологические основы построения системы сигнализации объединенной автоматизированной цифровой системы связи. – М.: МО РФ, 2001.
4. Лихачев А. М. Теоретические основы восстановления военной техники связи и их практические приложения. – СПб.: ВУС, 1999.
5. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1994.
6. Ионов С. В. Организация технического обеспечения связи и автоматизации управления группировки Сухопутных войск ВС РФ в локальных вооруженных конфликтах. – СПб.: ВАС, 1997.
7. Швиденко Г. Л. Формирование системы восстановления военной техники связи в общевойсковом соединении. – СПб.: ВАС, 1997.
8. Полковников И. А. Построение сетевой службы системы сигнализации объединенной автоматизированной цифровой системы связи Вооруженных сил Российской Федерации. СПб.: ВУС, 2001.
9. Семенюк А. А. Основы технического обеспечения связи и автоматизации объединений, соединений. – СПб.: ВАС, 1992.
10. Денисов И. И. Методика выбора рационального уровня конструктивного построения военной техники связи. Сборник научно-методических материалов ТВВАИУ. – Тамбов: ТВВАИУ, 1996.
11. Денисов И. И. Исследование зависимости времени восстановления военной техники связи от вида отказа в ней. Сборник научно-методических материалов ТВВАИУ. – Тамбов: ТВВАИУ, 1996.
12. Калашников В. В. Качественный анализ поведения сложных систем методом пробных функций. – М.: Наука, 1988.

### References

1. Kurnosov V. I., Likhachev A. M. *Metodologiya proektny`x issledovanij i upravlenie kachestvom slozhny`x texnicheskix sistem e`lektrosvyazi* [Methodology of design research and quality management of complex technical telecommunication systems]. St. Petersburg. TIREX Publ., 1998 (in Russian).
2. *Nadezhnost` i e`ffektivnost` v texnike: Spravochnik. V 10 t* [Reliability and efficiency in technology: A reference book. In 10 tons]. Ed. council: V. S. Avduevsky (pred.), V. I. Kuznetsov, N. D. Kuznetsov, etc. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1988 (in Russian).
3. Kuznetsov V. E., Likhachev A. M. *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy` postroeniya sistemy` signalizacii ob`edinennoj avtomatizirovannoj cifrovoj sistemy` svyazi* Theoretical and methodological foundations of building an alarm system of a unified automated digital communication system. – М.: Ministry of Defense of the Russian Federation, 2001 (in Russian).
4. Likhachev A. M. *Teoreticheskie osnovy` vosstanovleniya voennoj texniki svyazi i ix prakticheskie prilozheniya* [Theoretical foundations of the restoration of military communications equipment and their practical applications]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 1999 (in Russian).

5. *Nadezhnost` texnicheskix sistem: Spravochnik* [Reliability of technical systems]. Guide / Edited by I. A. shakov. Moscow. Radio and Communications Publ., 1994 (in Russian).

6. Ionov S. V. *Organizaciya texnicheskogo obespecheniya svyazi i avtomatizacii upravleniya gruppировки Suxoputny`x vojsk Vooruzhenny`x Sil Rossijskoj Federacii v lokal`ny`x vooruzhenny`x konfliktax* [Organization of technical support for communications and automation of control of the grouping of the Ground Forces of the Armed Forces of the Russian Federation in local armed conflicts]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 1997 (in Russian).

7 Shvidenko G. L. *Formirovanie sistemy` vosstanovleniya voennoj texniki svyazi v obshhevojskovom soedinenii* [Formation of a system for restoring military communications equipment in a combined arms unit]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 1997 (in Russian).

8. Polkovnikov I. A. *Postroenie setевой sluzhby` sistemy` signalizacii ob`edinennoj avtomatizirovannoj cifrovoj sistemy` svyazi Vooruzhenny`x sil Rossijskoj Federacii* [Building a network service for the alarm system of the unified automated digital communication system of the Armed Forces of the Russian Federation]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 2001 (in Russian).

9. Semenyuk A. A. *Osnovy` texnicheskogo obespecheniya svyazi i avtomatizacii ob`edinenij, soedinenij* [Fundamentals of technical support for communication and automation of associations, connections]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 1992 (in Russian).

10. Denisov I. I. *Metodika vy`bora racional`nogo urovnya konstruktivnogo postroeniya voennoj texniki svyazi* [Methodology for choosing a rational level of constructive construction of military communications equipment]. *Sbornik nauchno-metodicheskix materialov* [Collection of scientific and methodological materials]. Tambov. TVAIU Publ., 1996 (in Russian).

11. Denisov I. I. *Issledovanie zavisimosti vremeni vosstanovleniya voennoj texniki svyazi ot vida otkaza v nej* [Investigation of the dependence of the recovery time of military communications equipment on the type of failure in it]. *Sbornik nauchno-metodicheskix materialov* [Collection of scientific and methodological materials]. Tambov: TVAIU Publ., 1996 (in Russian).

12. Kalashnikov V. V. *Kachestvenny`j analiz povedeniya slozhny`x sistem metodom probny`x funkcij* [Qualitative analysis of the behavior of complex systems by the method of trial functions]. Moscow. Nauka Publ., 1988 (in Russian).

Статья поступила 12 мая 2024 г.

### Информация об авторах

*Винокур Михаил Викторович* – генеральный директор. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные системы» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: системный анализ и требования к построению систем связи специального назначения. Тел.: +7(812)295-50-69. E-mail: VinokurMV@inteltech.ru. Адрес: 197342, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

*Курнос Валерий Игоревич* – главный специалист. ПАО «Интелтех». Доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: системы связи, навигации и управления специального назначения. Тел.: +7(812)295-50-69. E-mail: vi-kurnosov@mail.ru. Адрес: 197342, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

*Лукин Константин Игоревич* – генеральный директор. ОАО «Супертел». Кандидат технических наук. Область научных интересов: системы связи, навигации и управления специального назначения. Адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Петроградская наб., д. 38 А. Тел.: (812) 644 04 25. E-mail: info@supertel.ru.

### Topical issues of integrated maintenance of special-purpose information and telecommunication systems

M. V. Vinokur, V. I. Kurnosov, K. I. Lukin

**Annotation.** *The purpose of the work: to detail the problem of integrated maintenance of a multiservice information and telecommunication system for special purposes. Methods: there is currently no unambiguous approach to the sequence and methods of conducting conceptual studies of the process of ensuring the operation*

of a multiservice information and telecommunications system for special purposes. At the same time, the most complete, allowing to link the goals of the main subsystems of the technical operation system of the unified interdepartmental management system with the measures of comprehensive maintenance of the operation of a multiservice communication network according to the stages of its evolutionary development scheme, is the structural parametric research method. **Novelty:** The difference between this model and the known ones lies in the fact that in it the processes of ensuring the operation of a multiservice information and telecommunications system for special purposes are presented as multi-plane and multilevel, interconnected by information and material connections, and the process of ensuring the operation of a multiservice information and telecommunications system is considered relative to the maximum allowable downtime of the information communication direction, the required value the average recovery time of connections formed by the network and intended for message transmission depends on the class of information flows served and their types. **Results:** the basic characteristics of the information and telecommunications network of the unified interdepartmental management system are determined; research methods are selected; a set of management measures has been developed to ensure the operation of a multiservice information and telecommunications system; a conceptual model of the processes of ensuring the operation of a multiservice information and telecommunications system has been formed; models for choosing strategies for the integrated operation of a multiservice information and telecommunications system at various stages of its life cycle have been developed; a stage of operational research for solving problems of integrated operation of a special-purpose information and telecommunications system has been highlighted. **Practical significance:** the presented stage of operational research allows us to determine the relationship between the various types of resources involved in the integrated operation of a special-purpose information and telecommunications system. In addition, he showed the need for interconnection of resources at all levels of the hierarchy of the information and telecommunications system operation system. At the same time, it is concluded that, with regard to the conceptual and operational stage, the adequacy of the formulated models to the operating conditions can be obtained only taking into account the nature of the effects of destabilizing factors.

**Keywords:** information and telecommunication system, integrated operation support, conceptual model, multiservice communication network, life cycle stages.

### Information about Authors

*Mikhail Viktorovich Vinokur* – General Director. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Systems" (PJSC "Inteltech"). Research interests: system analysis and requirements for the construction of special purpose communication systems. Tel.: +7(812)295-50-69. E-mail: VinokurMV@inteltech.ru Address: 197342, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

*Valery Igorievich Kurnosov* – Chief Specialist. PJSC "Inteltech". Doctor of Technical Sciences, Professor. Research interests: communication, navigation and control systems for special purposes. Tel.: +7(812)295-50-69. E-mail: vi-kurnosov@mail.ru. Address: 197342, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

*Konstantin Igorievich Lukin* – General Director. JSC "Supertel". Candidate of Technical Sciences. Research interests: communication, navigation and control systems for special purposes. Tel.: +7(812)644-04-25. E-mail: info@supertel.ru. Address: 197101, St. Petersburg, Petrogradskaya nab., 38 A.

### Библиографическая ссылка на статью:

Винокур М. В., Курносков В. И., Лукин К. И. Актуальные вопросы комплексного обеспечения эксплуатации информационно-телекоммуникационных систем специального назначения // Техника средств связи. 2024. № 2 (166). С. 12-29. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-12-29

### Reference for citation:

Vinokur M. V., Kurnosov V. I., Lukin K. I. Topical issues of integrated maintenance of special-purpose information and telecommunication systems. *Means of Communication Equipment*. 2024. No. 2 (166). Pp. 12-29 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-12-29

**СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 621.3396.946

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-30-35

**Глубина подводного радиоприема  
при неоптимальной ориентации приемной антенны**

Акулов В. С., Угрик Л. Н., Петров А. Н.

**Аннотация.** *Цель работы:* показать, что на сверхдлинных волнах в неопределенных условиях подводного радиоприема возможно отклонение ориентации кабельной антенны от оптимального курса её буксировки. В то же время, существующие **методы** оценки предельной дальности и глубины подводного приема не в полной мере учитывают ряд важных параметров волновода, радиолиний и условий приема. **Новизна:** делается предположение, что поля сигнала и атмосферных шумов испытывают с глубиной одинаковое экспоненциальное затухание относительно своих значений на поверхности, при этом в выражение определения предельной глубины приема вводится множитель, обобщающий выражение для предельной глубины на случай произвольной ориентации приемной антенны, поскольку наводимое в ней напряжение пропорционально проекции напряженности падающего поля на это направление. Расчетные соотношения получены в предположении, что антенна полностью находится в погруженном положении, а глубина является глубиной нахождения ее ходового конца. Представлены **результаты** расчетов зависимости от расстояния глубин приема и максимально возможных отклонений ориентации приемной антенны от оптимальной. Для примера рассмотрен режим медленной передачи при угле буксировки приемной антенны в 5 градусов. При этом нерегулярное поведение поля на неосвещенных трассах является характерным. Полученные результаты иллюстрируют довольно широкие возможности вариаций глубины и курса объекта для сохранения энергетического контакта. Причем, в неопределенных условиях приема сигналов возможно отклонение ориентации кабельной антенны от оптимального курса буксировки. При наличии достаточного энергетического запаса такое допустимое отклонение может быть существенным, что полезно учитывать в реальных условиях. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть использованы исследователями и разработчиками сверхдлинноволновых радиолиний при выборе параметров и вариантов применения подводных буксируемых антенн с учетом глубины погружения подводного объекта и курса её буксировки.

**Ключевые слова:** буксируемая антенна, глубина погружения, глубина приема, курс буксировки антенны, сверхдлиннные волны.

При подводном радиоприеме в диапазоне сверхдлинных волн (СДВ) в качестве приемной используют выпускную кабельную антенну, обеспечивающую возможность расположения объекта на достаточной глубине [1]. Такая антенна в силу принципа своего действия обеспечивает максимальный уровень сигнала при ее ориентации в горизонтальной плоскости вдоль геодезической линии между корреспондентами. Указанную ориентацию обычно и предполагают при анализе условий передачи информации [2, 3]. Однако на практике такая ориентация не всегда реализуема. Вместе с тем, при некотором энергетическом запасе оказывается возможным осуществить коммуникацию при отклонении курса движения объекта от оптимального значения. Такая ситуация требует отдельного количественного анализа.

Возможные предельные глубины приема для оптимальной ориентации приемной антенны проанализированы в работе [3], где делается естественное предположение, что поля сигнала и атмосферных шумов испытывают с глубиной одинаковое экспоненциальное затухание относительно своих значений на поверхности  $E_{s0}(R, z)$  и  $E_{at10}(z)$ . В этом случае предельная глубина приема определяется выражениями

$$z = \frac{\delta_s}{2} \ln[G(R, \Delta\phi, \theta)], \quad (1)$$

$$G(R, \Delta\phi, \theta) = \frac{E_{s0}^2(R) \cos^2(\Delta\phi) - h^2 \Delta f E_{at10}^2}{h^2 \Delta f E_{at}^2(\theta)}, \quad (2)$$

где  $\delta_s$  – размер скин-слоя в воде;  $h$  – требуемое отношение сигнал/помеха по напряжению;  $\Delta f$  – эффективная (шумовая) полоса частот приемного устройства;  $\Delta\phi$  – отклонение ориентации приемной антенны от оптимального значения;  $\theta$  – угол буксировки кабельной антенны относительно горизонтали.

В формулу (2) введен множитель  $\cos(\Delta\phi)$ , обобщающий выражение для предельной глубины на случай произвольной ориентации приемной антенны, поскольку наводимое в ней напряжение пропорционально проекции напряженности падающего поля на это направление.

Эквивалентное поле шумов кабельной антенны определяется выражением

$$E_{a1} = U_{a1} \cdot 120 \pi \sigma \operatorname{tg} \theta, \quad (3)$$

где  $U_{a1}$  – напряжение шумов антенного усилителя, отнесенное к полосе 1 Гц;  $\sigma$  – удельная проводимость морской воды.

В монографии [2] показано, что шумы  $E_{a1}(U_{a1})$  в диапазоне СДВ являются преобладающими из местных, не зависящих от глубины, шумов. Напряжение  $U_{a1}$  может быть измерено при подключении антенного усилителя к эквиваленту антенны.

Формула (3) также получена в работе [3], причем величина  $E_{a1}$ , как и напряженности  $E_{s0}(R, z)$  и  $E_{at10}(z)$ , приведена к вертикальной компоненте поля на поверхности. При выводе формулы использован метод расчета действующей длины антенны, изложенный в монографии [2] и сделано предположение, что коренной конец находится на глубине

$$x = \frac{l_a}{\delta_s} \sin \theta \geq (1.5 - 2.0) \delta_s. \quad (4)$$

В этом случае эквивалентное поле шумов (3) не зависит от геометрической длины активной части антенны  $l_a$ .

Параметр  $x$  равен превышению глубины коренного конца активной части антенны относительно глубины ее ходового конца, отнесенной к скин-слою, и условие (4) обычно хорошо выполняется. Так, на частоте 20 кГц, при длине  $l_a = 50$  м и угле  $\theta = 5^\circ$   $x \approx 5$ , а при угле  $\theta = 3^\circ$   $x \approx 3$ .

Из формулы (1) следует, что энергетический контакт имеет место, если  $G(R, \Delta\phi, \theta) \geq 1$ , а из условия  $G(R, \Delta\phi, \theta) = 1$  с использованием выражения (2) определяется максимально возможное отклонение  $\Delta\phi_m$  ориентации приемной антенны от оптимального значения при расположении ходового конца антенны на поверхности ( $z = 0$ ), а именно

$$\cos^2(\Delta\phi_m) = h^2 \Delta f \frac{E_{at10}^2 + E_{a1}^2}{E_{s0}^2}. \quad (5)$$

Формулы (1) – (3) получены в предположении, что антенна полностью находится в погруженном положении, а глубина  $z$  является глубиной нахождения ее ходового конца.

В работе [4] показано, что расположение активной части антенны целиком на поверхности не дает заметного выигрыша в отношении сигнал/шум, поэтому рассмотрение такой ситуации представляется достаточным.

На рис. 1 приведены результаты расчетов зависимости от расстояния  $R$  глубин приема и максимально возможных отклонений ориентации приемной антенны от оптимальной. Для примера рассмотрен режим медленной передачи ( $\Delta f = 1$  Гц,  $h = 3$ ) на частоте 20 кГц, угол буксировки приемной антенны  $\theta = 5^\circ$ . Задавалась характерная для таких устройств чувствительность антенного усилителя  $U_{a1} = 3$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Поле сигнала  $E_{s0}(R)$  вычислялось по программам, разработанным Санкт-Петербургским государственным университетом. Статистические параметры атмосферных шумов определялись по данным МСЭ [5]. Выбрана трасса азимутом  $270^\circ$  от источника с координатами ( $64^\circ$  с. ш.,  $40^\circ$  в. д.) и с излученной мощностью  $P_\Sigma = 500$  кВт. Эта трасса направлена на центральную Атлантику, и на расстояниях  $R > 2$  Мм она чисто морская. Сплошными кривыми показаны зависимости предельной глубины  $z(R)$ , рассчитанные по формулам (1) – (3) для оптимальной ориентации антенны ( $\Delta\phi = 0$ , левая ось  $Y$ ). Пунктир относится к значениям возможных отклонений ориентации антенны  $\Delta\phi_m(R)$  (правая ось  $Y$ ), полученным по формуле (5) при  $z = 0$ . Монотонные кривые соответствуют дневной трассе (июнь, 18 ч Московского времени), осциллирующие кривые рассчитаны для ночной трассы (январь, 6 ч Московского времени). Нерегулярное поведение поля на неосвещенных трассах является характерным.

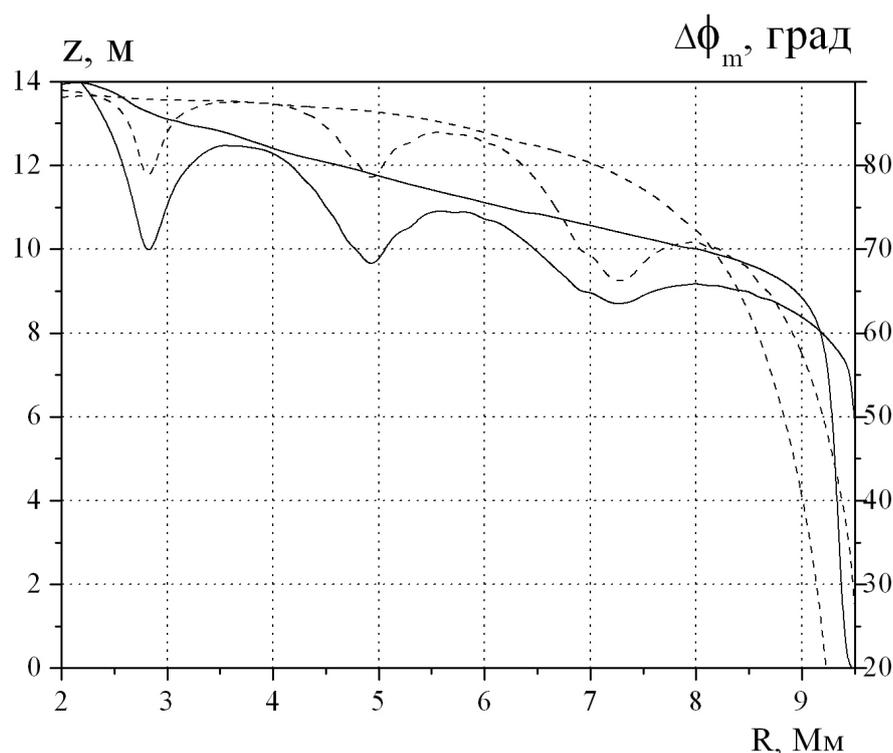


Рис. 1. Зависимость качества связи от расстояния  $R$  глубин приема  $z$  и максимально возможных отклонений ориентации приемной антенны от оптимального направления

Например, на расстоянии  $R = 5$  Мм предельная глубина приема в ночных условиях составляет примерно 10 м. Если же ходовой конец приемной антенны в этих условиях поднять на поверхность ( $z = 0$ ), то при сохранении приема возможно отклонение ориентации антенны от оптимальной примерно до  $80^\circ$ . Это иллюстрирует довольно широкие возможности вариаций глубины и курса объекта для сохранения энергетического контакта.

Более детально проиллюстрировать указанные вариации можно, если рассчитать зависимости  $z(\Delta\phi)$  в заданной точке. Результаты таких расчетов приведены на рис. 2. Рассмотрена та же трасса и те же режимы передачи. Показанные на рисунке расстояния соответствуют конкретной географической точке на данной трассе. По формуле (5) рассчитывалось максимально возможное отклонение курса от оптимального  $\Delta\phi_m$  при  $z = 0$ . Затем по формулам (1) – (3) табулировалась зависимость  $z(\Delta\phi)$  на промежутке  $[0, \Delta\phi_m]$ . Возможные для сохранения энергетического контакта значения  $(z, \Delta\phi)$  находятся под соответствующими кривыми.

Сплошные кривые построены для тех же условий, что данные, показанные на рис. 1 при угле буксировки  $\theta = 5^\circ$ . Пунктиром показаны результаты расчетов для угла буксировки  $\theta = 3^\circ$ . Меньший угол буксировки обеспечивает большие глубины приема. Это естественно, поскольку при этом увеличивается действующая длина антенны и, в соответствии с формулой (3), уменьшается эквивалентное поле шумов антенны. Надо при этом не забывать, что речь идет о глубине ходового конца антенны. Коренной же ее конец при меньшем угле  $\theta$  будет располагаться на меньшей глубине, что не всегда желательно. Предельные глубины, меньшие 6 м, на рис. 2 не показаны, поскольку они становятся равными нулю при дальнейшем увеличении отклонения  $\Delta\phi$  всего на 1 – 1,5 градуса.

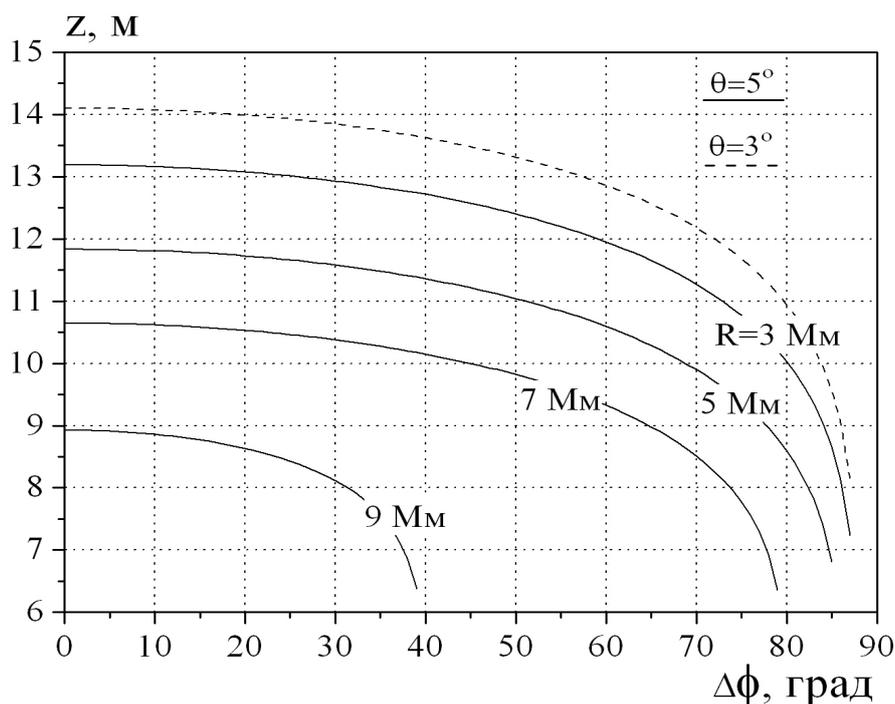


Рис. 2. Качество связи при отклонении ориентации приемной антенны от оптимального направления на различных дальностях и глубинах ее буксировки

Для количественной оценки изменения возможной глубины приема  $z$  от угла буксировки  $\theta$  достаточно с помощью формул (1) – (3) составить разность

$$\Delta z = z(\theta_2) - z(\theta_1) = \delta_s \ln(\theta_1 / \theta_2), \tag{6}$$

где принято во внимание приближение  $\text{tg}(\theta) \approx \theta$ , поскольку реальные углы буксировки антенны не превышают 7 – 8 градусов.

Естественно, что расчеты по формуле (6) соответствуют данным, представленным на рис. 2. Когда  $\theta_1 < \theta_2$ , разность  $\Delta z < 0$ , поскольку при большем значении угла  $\theta$ , как уже указывалось, ожидаемая глубина приема уменьшается. Если при этом  $|\Delta z| > z(\theta_1)$ , то энергетический контакт уже теряется.

Таким образом, в неопределенных условиях приема сигналов возможно отклонение ориентации кабельной антенны от оптимального курса буксировки. При наличии достаточного энергетического запаса такое допустимое отклонение может быть существенным, что полезно учитывать в реальных условиях.

### Литература

1. Соловьев В. И., Новик Л. И., Морозов И. Д. Связь на море. Л.: Судостроение, 1978. 320 с.
2. Додонов А. В., Михеев А. Ф. Подводный радиоприем. М.: Военное издательство, 1996. 190 с.
3. Акулов В. С., Талагаев В. И., Угрик Л. Н. Анализ дальности связи и глубины приема сигналов на сверхдлинных волнах // Техника средств связи. 2022. №3 (159). С. 9-14. DOI: 10.24412/2782-2141-2023-3-9-14.
4. Акулов В. С., Угрик Л. Н., Жебрун А. М. Влияния глубины буксировки выпускной приемной антенны на качество приема // Техника средств связи. 2024. №1 (165). С. 9-14. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-1-22-25.
5. Рекомендации МСЭ-R. Р.372.13 (09/2016). Радиошум.

### References

1. Solovyov V. I., Novik L. I., Morozov I. D. *Svyaz` na more* [Communication at sea]. Leningrad. Shipbuilding Publ., 1978. 320 p. (in Russian).
2. Dodonov A. V., Mikheev A. F. *Podvodny`j radiopriem* [Underwater radio receiver]. Moscow. Military Publishing House, 1996. 190 p. (in Russian).
3. Akulov V. S., Talagaev V. I., Ugrik L. N. Analysis of communication range and depth of signals reception on ultra-long waves. *Means of communication equipment*. 2022. No. 3 (159). Pp. 9-14 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2022-3-9-14.
4. Akulov V. S., Ugrik L. N., Zhebrun A. M. The influence of the towing depth of the exhaust receiving antenna on the reception quality. *Means of communication equipment*. 2024. No. 1 (165). Pp. 9-14 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-1-9-14.
5. ITU Recommendations-R. R.372.13 (09/2016). Radio noise (in Russian).

Статья поступила 14 мая 2024 г.

### Информация об авторах

*Акулов Валерий Семёнович* – Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник. Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий ВМФ, корабельных комплексов и средств обмена информацией и разведки (НИЦ ТТ ВМФ КК СОИ Р) НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Область научных интересов: повышение эффективности обеспечения радиосвязи с морскими объектами. Тел.: +7(812)542-90-54.

*Угрик Лариса Николаевна* – Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник. Старший научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ КК СОИ Р НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Область научных интересов: повышение эффективности обеспечения радиосвязи с морскими объектами. Тел.: +7(812)542-90-54.

*Петров Андрей Николаевич* – Начальник научно-исследовательского отделения. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: разработка систем телекоммуникаций специального назначения. Тел.: +7(812)448-96-58. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

## The depth of the underwater radio reception with a non-optimal orientation of the receiving antenna

V. S. Akulov, L. N. Ugrik, A. N. Petrov

**Annotation.** *The purpose of the work is to show that at ultra-long waves in unsaturated conditions of underwater radio reception, it is possible to deviate the orientation of the cable antenna from the optimal course of its towing. At the same time, existing methods for estimating the maximum range and depth of underwater reception do not fully take into account a number of important parameters of the waveguide, radio lines and reception conditions. Novelty: it is assumed that the signal and atmospheric noise fields experience the same exponential attenuation with depth relative to their values on the surface, while a multiplier is introduced into the expression for determining the maximum depth of reception, generalizing the expression for the maximum depth in the case of an arbitrary orientation of the receiving antenna, since the voltage induced in it is proportional to the projection of the incident field strength in this direction. The calculated ratios are obtained under the assumption that the antenna is completely submerged, and the depth is the depth of its running end. The results of calculations of the dependence on the distance of the receiving depths and the maximum possible deviations of the orientation of the receiving antenna from the optimal one are presented. For example, the slow transmission mode is considered with a 5-degree towing angle of the receiving antenna. At the same time, the irregular behavior of the field on unlit tracks is characteristic. The results obtained illustrate the rather wide possibilities of variations in the depth and course of the object to maintain energy contact. Moreover, in unsaturated signal reception conditions, the orientation of the cable antenna may deviate from the optimal towing course. If there is a sufficient energy reserve, such an acceptable deviation can be significant, which is useful to take into account in real conditions. Practical significance: the results of the work can be used by researchers and developers of ultra-long wavelength radio lines when choosing parameters and application options for underwater towed antennas, taking into account the depth of immersion of an underwater object and the course of its towing.*

**Keywords:** towed antenna, diving depth, receiving depth, antenna towing course, ultra-long waves.

### Information about authors

*Valery Semenovich Akulov* – Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher at the Research. The Scientific Research Center for Telecommunications Technologies of the Navy, Ship Complexes and means of information Exchange and Intelligence of the Scientific Research Institute of the OSIS of the Navy VUNTS of the Navy "Naval Academy" Tel.: +7 (812)542-90-54.

*Larisa Nikolaevna Ugrik* – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Research. The Scientific Research Center for Telecommunications Technologies of the Navy, Ship Complexes and means of information Exchange and Intelligence of the Scientific Research Institute of the OSIS of the Navy VUNTS of the Navy "Naval Academy" Tel.: +7(812)542-90-54.

*Andrey Nikolaevich Petrov* – is the Head of the research department. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies" (PJSC "Inteltech"). Research interests: development of special purpose telecommunications systems. Tel.: +7(812)448-96-58. E-mail: intelteh@inteltech.ru. Address: 197342, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

### Библиографическая ссылка на статью:

Акулов В. С., Угрик Л. Н., Петров А. Н. Глубина подводного радиоприема при неоптимальной ориентации приемной антенны // Техника средств связи. 2024. № 2 (166). С. 30-35. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-1-30-35.

### Reference for citation:

Akulov V. S., Ugrik L. N., Petrov F. N. The depth of the underwater radio reception with a non-optimal orientation of the receiving antenna. *Means of Communication Equipment*. 2024. No. 2 (166). Pp. 30-35 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-30-35.

## Анализ эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» на уровне сверхдлинноволновой радиолинии

Жебрун А. М.

**Аннотация.** *Цель работы:* определение потенциально достижимых значений эффективности функционирования радиолиний диапазона сверхдлинных волн в направлении «берег-море» в зависимости от складывающейся сигнально-помеховой обстановки и циркулирующей в ней нагрузки. **Методы:** оптимальная стратегия управления мощностью радиопередающим устройством или/и скоростью передачи информации может быть найдена в результате применения методов теории игр. При этом в работе предложена игра с дополнительным ограничением на множестве стратегий игроков, являющейся нетрадиционной для теории игр. При получении решения использовались методы линейного программирования, нелинейного программирования, пороговый и балансный. **Новизна:** для получения гарантированного выигрыша оптимальных стратегий обоих игроков целесообразно использовать пороговый и балансный методы, основанные на выполнении ограничений при использовании пары чистых стратегий второго игрока (баланс чистых стратегий). Для решения задачи анализа эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» определяется обобщенный показатель эффективности ее функционирования. В качестве целевой функции, как наиболее в данном случае приемлемой, выбрана квадратичная форма показателя эффективности функционирования СДВ радиолинии. **Результаты:** осуществлена разработка алгоритма анализа эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» на уровне СДВ радиолинии при выделении ресурса в интересах отдельных СДВ радиолиний и позволяющего, в отличие от существующих, учесть возможности подсистемы управления СДВ радиолиниями перераспределять имеющийся в их распоряжении ресурс в зависимости от складывающейся сигнально-помеховой обстановки и текущей циркулирующей в сети нагрузки. **Практическая значимость:** в рамках разработанного алгоритма, кроме того, осуществляется выработка управляющих воздействий, предназначенных для изменения режимов функционирования СДВ радиолиниями с целью поддержания требуемого качества связи. Также наряду с экономией затрат ресурсов выигрыш в энергопотенциале СДВ радиолиний приводит и к повышению ее разведзащищенности.

**Ключевые слова:** балансный метод, гарантированное значение выигрыша, обобщенный показатель эффективности, радиолиния, радиопередающее устройство, сверхдлинные волны, смешанная стратегия матричной игры, теория игр.

### Введение

Различные условия функционирования радиолиний диапазона сверхдлинных волн (СДВ) показывают необходимость определения их потенциально достижимых значений эффективности в зависимости от складывающейся сигнально-помеховой обстановки и циркулирующей в ней нагрузки. При этом возникает задача в определении гарантированных значений показателя эффективности функционирования СДВ радиолиний в процессе управления режимами функционирования, которые обеспечивают оптимальное распределение имеющихся ресурсов в зависимости от имеющейся обстановки.

В статье рассмотрим функционирование СДВ радиолинии в направлении «берег-море», с возможностью управления мощностью радиопередающего устройства (РПДУ), необходимого для обеспечения требуемого качества связи. В состав РПДУ входят передатчик и антенно-фидерное устройство. Следует отметить, что при совпадении направления прихода сигнала и помехи такая задача вырождается в задачу управления излучаемой мощностью. Управление скоростью передачи информации осуществляется за счет использования кодовых конструкций с различной избыточностью, что соответствует дискретному переключению градаций информационного формата сообщений пользователей.

### 1. Решение задачи управления скоростью передачи информации в СДВ радиолинии

При управлении мощностью передатчика множество значений управляемых параметров  $g_{U_i} \in G_U, i = \overline{1, n_U}$  имеет следующий вид  $G_U = \{P_{\text{РПД}i}\}$ , а при управлении скоростью передачи информации  $G_U = \{C_i\}$ , и каждое значение  $g_{U_i}$  соответствует текущему состоянию СДВ радиолинии. Каждому элементу  $g_{U_i} \in G_U, G_U = \{P_{\text{РПД}i}\} ((G_U = \{C_i\}))$  можно поставить в однозначное соответствие элемент  $g_{V_j}$  множества  $G_V = \{g_{V_j}\}, j = \overline{0, n_V}$ , равный минимально необходимой мощности помех  $g_{V_j} = P_{\text{П}j}$ , которую система радиоподавления должна выделить для полного подавления СДВ радиолинии, находящейся в  $i$ -м состоянии  $g_{U_i} = \{P_{\text{РПД}i}\} (g_{U_i} = \{C_i\})$  [1].

Оптимальная стратегия  $\lambda^*$  управления мощностью РПДУ или/и скоростью передачи информации может быть найдена в результате решения игры  $\Gamma(L, M, \Delta P)$  ( $\Gamma(L, M, C)$ ). Стратегия первого игрока (СДВ радиолинии) в ней заключается в выборе распределения вероятностей  $\lambda = \{\lambda_i\}, i = \overline{1, n_U}$ , где  $\lambda_i$  – вероятность установления  $i$ -го состояния  $g_{U_i} = \{P_{\text{РПД}i}\} (g_{U_i} = \{C_i\})$  СДВ радиолинии,  $\lambda \in L$ , где  $L$  – множество допустимых распределений  $\lambda$ . Однако, при управлении мощностью РПДУ эта игра имеет одну немаловажную особенность – существует ограничение на множестве стратегий первого игрока, заключающееся в ограничении средней величины расходуемых энергетических ресурсов:

$$\sum_{i=1}^{n_U} \lambda_i P_{\text{РПД}i} = \bar{P}_{\text{РПДУ}}, \tag{1}$$

Стратегия второго игрока (система радиоэлектронного подавления (СРП)) заключается в выборе распределения вероятностей  $\mu = \{\mu_j\}, j = \overline{0, n_V}$ , где  $\mu_j$  – вероятность установления  $j$ -го состояния  $g_{V_j} = P_{\text{П}j}$  СРП противника;  $\mu \in M$ , где  $M$  – множество допустимых распределений  $\mu$ , которое в данном случае принимает вид [2]:

$$\sum_{j=0}^{n_V} \mu_j P_{\text{П}j} = \bar{P}_{\text{П}}, \tag{2}$$

где  $\bar{P}_{\text{П}}$  – мощность помех, в среднем за время  $T$  выделяемая СРП для подавления СДВ радиолинии,  $T$  – длительность функционирования СДВ радиолинии, она же длительность ее радиоподавления.

В представленной игре средний выигрыш СДВ радиолинии эквивалентен показателю выигрыша затрат энергетических ресурсов (мощности РПДУ)  $\Delta P$  при выборе игроками своих стратегий:

$$\Delta P = \sum_{i=0}^{n_U} \lambda_i \sum_{j=0}^{n_V} \mu_j \Delta P_{ij}. \tag{3}$$

При управлении скоростью передачи информации выигрыш эквивалентен средней реализованной скорости передачи информации  $C$ . При этом:

$$C = \sum_{i=0}^{n_U} \lambda_i \sum_{j=0}^{n_V} \mu_j C_{ij}. \tag{4}$$

Игра с дополнительным ограничением на множестве стратегий игроков является нетрадиционной для теории игр, поэтому в [3] были разработаны специальные методы ее решения. Это методы линейного программирования, нелинейного программирования, пороговый и балансный. Произвести вычисление гарантированного выигрыша можно с

использованием любого метода, но для определения оптимальных стратегий обоих игроков целесообразно использовать пороговый и балансный методы. Обычно используют балансный метод, который основан на выполнении ограничения (2) при использовании пары чистых стратегий второго игрока (баланс чистых стратегий). Например, если справедливо неравенство:

$$P_{\Pi} < \bar{P}_{\Pi} < P_{\Pi 2}, \tag{5}$$

и  $P_{\Pi 0} < P_{\Pi 1} < \dots < P_{\Pi n_V}$ , то для того, чтобы не нарушать условие (2), второй игрок может использовать только следующие пары своих чистых стратегий:  $P_{\Pi 0} P_{\Pi 2}, P_{\Pi 0} P_{\Pi 3}, \dots, P_{\Pi 0} P_{\Pi n_V}, P_{\Pi 1} P_{\Pi 2}, P_{\Pi 1} P_{\Pi 3}, \dots, P_{\Pi 1} P_{\Pi n_V}$ ; причем для каждой пары  $P_{\Pi \alpha} P_{\Pi \beta}$  должно выполняться уравнение баланса:

$$P_{\Pi \alpha} k_{\alpha \beta} + P_{\Pi \beta} (1 - k_{\alpha \beta}) = \bar{P}_{\Pi}, \tag{6}$$

где  $k_{\alpha \beta} = k_{\xi}$  – коэффициент баланса  $0 \leq k_{\xi} \leq 1$ .

$$k_{\xi} = k_{\alpha \beta} = \begin{cases} \frac{P_{\Pi \beta} - \bar{P}_{\Pi}}{P_{\Pi \beta} - P_{\Pi \alpha}}, & \text{если } \beta > \alpha, \\ 1, & \text{если } \beta = \alpha, \text{ т. е. } P_{\Pi \beta} = P_{\Pi \alpha} = \bar{P}_{\Pi}. \end{cases} \tag{7}$$

В общем случае число таких пар чистых стратегий:

$$N_V = \begin{cases} (r+1) \cdot (n_V - r), & \text{при } P_{\Pi(r)} \leq \bar{P}_{\Pi} \leq P_{\Pi(r+1)}, \\ r \cdot (n_V - r) + 1, & \text{при } P_{\Pi(r)} = \bar{P}_{\Pi}, r \geq 1. \end{cases} \tag{8}$$

На этом основании можно перейти к рассмотрению игры  $\Gamma'(L, M', C)$  у которой в качестве чистых стратегий второго игрока ( $\xi = \overline{1, N_V}$ ) выступают пары его чистых стратегий в исходной игре  $\Gamma(L, M, C)$ , связанные условием (6), стратегия второго игрока заключается в выборе в игре  $\Gamma'(L, M', C)$  распределения вероятностей  $\mu' = \{\mu'_{\xi}, \xi = \overline{1, N_V}\}$  [4].

Изоморфность игр  $\Gamma'(L, M', C)$  и  $\Gamma(L, M, C)$  обеспечивается при выполнении следующих условий:

$$C = \sum_{i=1}^{n_U} \sum_{j=0}^{n_V} \lambda_i \mu_j C_{ij} = \sum_{i=1}^{n_U} \sum_{\xi=1}^{N_V} \lambda_i \mu'_{\xi} C'_{i\xi}, \tag{9}$$

$$C'_{i\xi} = k_{\xi} \cdot C_{i\alpha} + (1 - k_{\xi}) \cdot C_{i\beta}, \tag{10}$$

где  $i = \overline{1, n_U}; \alpha = \overline{0, r}; \beta = \overline{r+1, n_V}; k_{\xi} = k_{\alpha \beta}; \mu'_{\xi} = \mu'_{\alpha \beta}$ .

Если  $P_{\Pi(r)} < \bar{P}_{\Pi} < P_{\Pi(r+1)}$ , то

$$\mu_j = \begin{cases} \sum_{\beta=r+1}^{n_V} k_{j\beta} \cdot \mu'_{j\beta}, & \text{при } j = \overline{0, r}, \\ \sum_{\alpha=0}^r (1 - k_{\alpha j}) \cdot \mu'_{\alpha j}, & \text{при } j = \overline{r+1, n_V}, \end{cases} \tag{11}$$

если  $\bar{P}_{\Pi} = P_{\Pi(r)}, r \geq 1$ , то

$$\mu_j = \begin{cases} \sum_{\beta=r+1}^{n_V} k_{j\beta} \cdot \mu'_{j\beta}, & \text{при } j < r, \\ \mu'_{jj}, & \text{при } j = r, \\ \sum_{\alpha=0}^{r-1} (1 - k_{\alpha j}) \cdot \mu'_{\alpha j}, & \text{при } j = \overline{r+1, n_V}. \end{cases} \tag{12}$$

Из [4] известно, что для того, чтобы  $\lambda^* = \{\lambda_i^*\}_{i = \overline{1, n_U}}$  была оптимальной смешанной стратегией матричной игры  $\Gamma'(L, M', C)$  и платежной матрицей  $\|C'_{i\xi}\|, i = \overline{1, n_U}, \xi = \overline{1, N_V}$  и ценой игры (гарантированным значением выигрыша первого игрока)  $C^* = \max_{\lambda} \min_{\mu'} C(\lambda, \mu')$  необходимо и достаточно выполнение следующих неравенств:

$$\sum_{i=1}^{n_U} C'_{i\xi} \cdot \lambda_i^* \geq C^*, \xi = \overline{1, N_V}. \quad (13)$$

Аналогично для второго игрока для того, чтобы  $\mu'^* = \{\mu'_\xi\}_{\xi = \overline{1, N_V}}$  была оптимальной смешанной стратегией второго игрока, необходимо и достаточно выполнение следующих неравенств [5]:

Кроме того,  $\lambda^*$  и  $\mu'^*$  должны удовлетворять условию, свойственному для любых вероятностных распределений, т. е.

$$\sum_{\xi=1}^{N_V} C'_{i\xi} \cdot \mu'_\xi \leq C^*, i = \overline{1, n_U}. \quad (14)$$

Кроме того,  $\lambda^*$  и  $\mu'^*$  должны удовлетворять условию, свойственному для любых вероятностных распределений, т. е.:

$$\sum_{i=1}^{n_U} \lambda_i^* = 1, \lambda_i^* \geq 0, i = \overline{1, n_U}, \quad (15)$$

$$\sum_{\xi=1}^{N_V} \mu'_\xi = 1, \mu'_\xi \geq 0, \xi = \overline{1, N_V}. \quad (16)$$

Разделим неравенства (13), (14) и (15), (16) на  $C^*$  и введем обозначения:  $\lambda_i^*/C^* = p_{xi}$  и  $\mu'_\xi/C^* = p_{y\xi}$ . Тогда получим (13) – (16) в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{n_U} p_{xi} = 1/C^*; \sum_{i=1}^{n_U} C'_{i\xi} \cdot p_{xi} \geq 1, p_{xi} \geq 0, \quad (17)$$

$$\sum_{\xi=1}^{N_V} p_{y\xi} = 1/C^*; \sum_{\xi=1}^{N_V} C'_{i\xi} \cdot p_{y\xi} \leq 1, p_{y\xi} \geq 0. \quad (18)$$

Так как первый игрок стремится найти такие значения  $\lambda_i^*$  и, следовательно,  $p_{xi}$ , чтобы цена игры была максимальна, то решение задачи поиска  $\lambda^*$  сводится к нахождению таких неотрицательных значений  $p_{xi}$ , при которых:

$$\sum_{i=1}^{n_U} p_{xi} \rightarrow \min; \sum_{i=1}^{n_U} C'_{i\xi} \cdot p_{xi} \geq 1. \quad (19)$$

Так как второй игрок стремится найти такие значения  $\mu'_\xi$  и, следовательно,  $p_{y\xi}$ , чтобы цена игры была наименьшей, то решение задачи поиска  $\mu'^*$  сводится к нахождению таких неотрицательных значений  $p_{y\xi}$ , при которых:

$$\sum_{\xi=1}^{N_V} p_{y\xi} \rightarrow \max; \sum_{\xi=1}^{N_V} C'_{i\xi} \cdot p_{y\xi} \leq 1. \quad (20)$$

Формулы (19) и (20) выражают двойственные друг другу задачи линейного программирования, для решения которых имеются апробированные методы, например

симплекс-метод. Результатами решения этих задач являются значения  $p_{xi}$ ,  $p_{y\xi}$  и  $C^*$ , на основе которых рассчитываются значения вероятностей  $\lambda_i^*$  и  $\mu_\xi^*$ .

У игры  $\Gamma'(L, M', C)$  и  $\Gamma(L, M, C)$  оптимальная стратегия первого игрока  $\lambda^*$  и гарантированное значение его выигрыша  $C^*$  совпадают. Зная оптимальное распределение  $\mu^*$  в игре  $\Gamma'(L, M', C)$  и используя обратные преобразования (11) и (12) балансного метода, легко определить искомую оптимальную стратегию  $\mu^* = \{\mu_j^*\}$  второго игрока в игре  $\Gamma(L, M, C)$ .

Из этого следует, что определение оптимальных значений управляющих воздействий осуществляется в два этапа, причем определение текущего гарантированного значения СДВ радиолинии определяется на первом этапе, что, по сравнению с существующими методами, повышает оперативность процесса анализа эффективности, который производится одновременно с принятием решения на управление, а не до него.

## 2. Алгоритм управления мощностью радиопередающего устройства в СДВ радиолинии

Наряду с рассмотренным управлением скоростью передачи информации на уровне СДВ радиолинии необходимо рассмотреть алгоритм управления ее энергопотенциалом (мощностью РПДУ). В этом случае каждый элемент множества  $G_U$  сам является множеством, состоящим из двух элементов:

$$g_{Ui} = \{P_{\text{РПДУ}i}, \Psi_i\}, \tag{21}$$

где  $P_{\text{РПДУ}i}, \Psi_i$  – соответствующие  $i$ -му состоянию СДВ радиолинии значение мощности РПДУ. Существует интервал стационарности  $\Delta t \rightarrow 0$ , в пределах которого помеховая обстановка не меняется. В этом случае энергетические затраты на  $j$ -м интервале  $\Delta t$ , ( $j = \overline{1, n}; n = T/\Delta t$  где  $T \rightarrow \infty$  – длительность функционирования СДВ радиолинии) определяются соотношением порога помехоустойчивости  $\sigma_j$ , соответствующего текущим значениям  $P_{\text{РПДУ}i}, \Psi_i$  и действующей на этом же интервале мощности помех  $P_{\text{П}i}$ . Проведем следующие уточнения: пусть  $P_{\text{РПДУ}l}$ ,  $l = \overline{1, n_p}$  –  $l$ -я градация мощности передатчика,  $n_p$  – общее число градаций,  $P_{\text{РПДУ}l} < P_{\text{РПДУ}l+1}$ , а  $s_r$  – количество градаций мощности РПДУ, используемых в случае работы СДВ радиолинии,  $s_r \leq n_p, \Psi_r = \overline{r}$ , где  $r = \overline{1, \Psi_{\text{max}}}$ . Пусть  $\Psi_{\text{max}} = n_m$ , где  $n_m$  – общее количество элементов РПДУ [6],

$$\sum_{r=1}^{n_m} s_r = n_U, \tag{22}$$

$$s_0 = 1. \tag{23}$$

Каждому элементу множества  $g_{Ui}$  можно поставить в однозначное соответствие элемент  $g_{Vj}$  множества  $G_V = \{g_{Vj}\}$ ,  $j = \overline{0, n_V}$ , равный минимально необходимой мощности помех  $g_{Vj} = P_{\text{П}j}$ , которую система радиоподавления должна выделить для полного подавления СДВ радиолинии, находящейся в  $i$ -м состоянии  $g_{Ui} = \{P_{\text{РПДУ}i}, \Psi_i\}$ . Оптимальная стратегия  $\lambda^*$  управления мощностью РПДУ может быть найдена в результате решения игры  $\Gamma(L, M, \Delta \Theta)$ .

Стратегия первого игрока (СДВ радиолинии) в ней заключается в выборе распределения вероятностей  $\lambda = \{\lambda_i\}$ ,  $i = \overline{1, n_U}$ , где  $\lambda_i$  – вероятность установления  $i$ -го состояния  $g_{Ui} = \{P_{\text{РПДУ}i}, \Psi_i\}$  СДВ радиолинии,  $\lambda \in L$ , где  $L$  – множество допустимых

распределений  $\lambda$  с учетом ограничения (17). Оптимальная стратегия второго игрока (СРП) заключается в выборе распределения вероятностей  $\mu = \{\mu_j\}, j = \overline{0, n_V}$ , где  $\mu_j$  – вероятность установления  $j$ -го состояния  $g_{ij} = P_{ij}$  СРП противника;  $\mu \in M$ , где  $M$  – множество допустимых распределений  $\mu$  с учетом ограничения (2).

В описанной игре средний выигрыш СДВ радиолинии эквивалентен показателю выигрыша затрат ресурсов (энергопотенциала) при выборе игроками своих стратегий и имеет вид:

$$\Delta \mathcal{E} = \sum_{i=0}^{n_U} \lambda_i \sum_{j=0}^{n_V} \mu_j \Delta \mathcal{E}_{ij} \quad (24)$$

В качестве элементов матрицы игры предлагается использовать показатель выигрыша затрат ресурсов равный отношению максимального энергетического ресурса СДВ радиолинии к затратам ресурсов, соответствующих используемым на данном этапе  $P_{РПДУi}, \Psi_i$ , т. е.  $\Delta \mathcal{E}_{ij} = \mathcal{E}_{\max} / \mathcal{E}_i$ , где  $\mathcal{E}_i = f(P_{РПДУi}, \Psi_i)$ , вычисляемое в соответствии с первым уравнением передачи. Матрица выигрышей  $\|\Delta \mathcal{E}_{ij}\|, i = \overline{0, n_U}, j = \overline{0, n_V}$  игры  $\Gamma(L, M, \Delta \mathcal{E})$  задается аналогично случаю управления мощностью РПДУ.

Методика решения такой игры заключается в следующем. Используя преобразования (13) – (16) исходную игру  $\Gamma(L, M, \Delta \mathcal{E})$  можно свести к изоморфной игре  $\Gamma'(L, M', \Delta \mathcal{E})$  с матрицей выигрышей  $\|\Delta \mathcal{E}'_{i\xi}\|, i = \overline{0, n_U}, \xi = \overline{1, N_V}$  с учетом замены в выражениях (15), (16)  $C$  на  $\Delta \mathcal{E}$  и  $C'_{i\xi}$  на  $\Delta \mathcal{E}'_{i\xi}$ . Игра  $\Gamma'(L, M', \Delta \mathcal{E})$  имеет еще одно ограничение – на множестве стратегий первого игрока. Для ее решения используется балансный метод, модифицированный с целью учета специфики множества  $G_U$ . При этом принцип соблюдения условия баланса при использовании пары чистых стратегий не претерпевает никаких изменений.

На этом основании можно перейти к рассмотрению игры  $\Gamma''(L', M', \Delta \mathcal{E})$ , у которой в качестве чистых стратегий первого игрока ( $\eta = \overline{1, N_U}$ ) выступают пары его чистых стратегий в игре  $\Gamma'(L, M', \Delta \mathcal{E})$ . При этом стратегия первого игрока заключается в выборе распределения вероятностей  $\lambda' = \{\lambda'_\eta\}, \eta = \overline{1, N_U}$ , где  $\lambda'_{\alpha\beta} = \lambda'_\eta$ .

Результатом решения игры  $\Gamma''(L', M', \Delta \mathcal{E})$  являются стратегии  $\lambda^* = \{\lambda'_\eta\}, \eta = \overline{1, N_U}; \mu^* = \{\mu'_\xi\}, \xi = \overline{1, N_V}$  и гарантируемое значение СДВ радиолинии  $\Delta \mathcal{E}^*$ .

Оптимальные стратегии обоих игроков  $\lambda^*$  и  $\mu^*$  в исходной игре  $\Gamma(L, M, \Delta \mathcal{E})$  могут быть найдены с помощью преобразований (11), (12).

Определение текущих наибольших гарантированных значений сети СДВ осуществляется параллельно с выбором оптимальных стратегий управления параметрами СДВ радиолиний, ее образующих. Это повышает оперативность оценки эффективности сети СДВ и позволяет оценить потенциальные возможности отдельных линий и сети в целом.

Полученные гарантированные значения сети СДВ служат основой для вычисления сети связи в направлении «берег-море». Определенные значения гарантированного энергетического выигрыша  $\Delta \mathcal{E}^*$  ( $\Delta P^*$ ) для СДВ радиолиний по формуле (24) позволяют определить затраты энергетического ресурса на эксплуатацию  $jj'$ -го направления связи (СДВ радиолинии) при выполнении требований к качеству связи:

$$\mathcal{E}_{jj'} = \sum_{k=1}^2 (\mathcal{E}_{\max kjj'} - \Delta \mathcal{E}^*_{kjj'}) \cdot t_{\text{эксп}kjj'}, \quad (25)$$

где  $t_{\text{эксп}kjj'}$  – время эксплуатации  $k$ -го участка  $jj'$ -го направления связи.

Зная текущие затраты энергетических ресурсов в каждом направлении связи на доставку сообщений можно определить и общие затраты энергетических ресурсов сети связи в направлении «берег-море» на обеспечение процесса ее функционирования, т. е. значение затратного показателя качества. Однако для решения этой задачи необходимо знать параметры потока требований на обслуживание во всех СДВ радиоприемах и сети связи в целом.

Для определения значений интенсивностей потока требований от пользователей в каждом информационном направлении (СДВ радиоприемах) воспользуемся разработанным алгоритмом оптимального оценивания случайных процессов [7]. В результате фильтрации наблюдаемых радиосигналов и помех можно получить вектор оценок значений числа требований на ресурс во всех СДВ радиоприемах на  $k$ -ый момент времени

$$\hat{X}(k) = \{\hat{X}_j(k)\}, j = \overline{1, J}.$$

На основе этих данных можно определить и оценку вектора интенсивностей потока требований:

$$\hat{\lambda}_j(k) = \frac{\hat{X}_j(k) - \hat{X}_j(k-s)}{s}, k \geq s, \quad (26)$$

где  $\hat{\lambda}_j(k)$  – оценка интенсивности потока требований в  $k$ -й момент времени от  $j$ -ой СДВ радиостанции;  $\hat{X}_j(k)$  – оценка числа требований на ресурс от  $j$ -ой СДВ радиостанции в  $k$ -й момент времени;  $s = \text{sup}(1 \text{ ед.вр.}/T)$  – наибольшее целое число периодов смены состояний цепи Маркова, укладываемое на выбранной единице измерения.

Полученные с помощью алгоритма фильтрации [5] и выражения (26) оценки параметров потока требований служат основой для вычисления сети связи в направлении «берег-море» [8].

Следует отметить, что наряду с экономией затрат ресурсов выигрыш в энергопотенциале СДВ радиоприемах приводит и к повышению ее разведзащищенности. Определение значения времени доступности к сообщению в  $jj'$ -й СДВ радиоприеме в условиях наблюдения за текущим состоянием и оценивания вектора состояния целесообразно производить следующим образом [8]:

$$\hat{t}_{дjj'} = t_{персjj'} - \hat{t}_{ожppjj'} - t_{нэмдjj'}, \quad (27)$$

где  $t_{персjj'} = t_{перjj'} + \tau_{ppv} + t_{вх.схjj'}$  – время передачи сообщения в  $jj'$ -й СДВ радиоприеме при нормальных условиях ее функционирования, определяемое временем распространения радиоволн, вхождения в синхронизм и собственно передачи сообщения;  $\hat{t}_{ожppjj'}$  – оценка времени ожидания начала радиоперехвата сообщения в  $jj'$ -й СДВ радиоприеме, определяемое по методике, изложенной в [2];  $t_{нэмдjj'}$  – время электромагнитной недоступности средств радиоперехвата к сообщению в  $jj'$ -ых СДВ радиоприемах.

Время электромагнитной недоступности средств радиоперехвата к сообщению в  $jj'$ -ых СДВ радиоприемах определяется по формуле:

$$t_{нэмдjj'} = t_{персjj'} \cdot T\%(G_{ppjj'})/100\%, \quad (28)$$

где  $T\%(G_{ppjj'})$  – надежность канала радиоразведки при запасе уровня высокочастотного сигнала  $G_{ppjj'}$ .

Для определения  $G_{ppjj'}$  воспользуемся известными соотношениями, связывающими значение сигнала на входе приемника радиоразведки и реальной чувствительностью приемника разведки, при которой выполняются требования по обеспечению заданной надежности:

$$G_{PPjj'} = P_{с\text{вх} ПРМjj'} - P_{P450\%}, \tag{29}$$

где  $P_{с\text{вх} ПРМjj'} = f(\Delta\Theta^*)$  – является функцией известного вида от затрат энергопотенциала (мощности РПУ СДВ радиолинии).

На основе определенных с помощью выражений (26) – (29) значений  $\hat{t}_{дjj'}$ , во всех информационных направлениях, можно вычислить и время доступности к сообщению в сети связи в целом:

$$\hat{t}_д = \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^{J'} \frac{\hat{\lambda}_{jj'}}{\Lambda} \hat{t}_{дjj'}, \tag{30}$$

где  $\Lambda = \sum_{j,j'}^J \hat{\lambda}_{jj'}$  – интенсивность потока сообщений в сети связи в направлении «берег-море».

Для определения оценки времени доставки сообщений в  $jj'$ -м направлении воспользуемся следующей формулой:

$$\hat{t}_{дсjj'} = \hat{t}_{ожjj'} + \frac{K}{C^*} + \tau_{РРВ}, \tag{31}$$

где  $\hat{t}_{ожjj'}$  – оценка времени ожидания сообщением начала обслуживания в  $jj'$ -м направлении связи, определяемая при дисциплине обслуживания «первым пришел – первым обслужился» на основе вычисленного наибольшего гарантированного значения скорости передачи информации  $C^*$ , определяемого выражением (9).

На основе определенных значений времени доставки сообщений во всех  $jj'$ -х направлениях связи, можно с помощью выражения (31) определить время доставки сообщения в сети связи в направлении «берег-море» путем замены  $\hat{t}_д$  на  $\hat{t}_{дс}$  и  $\hat{t}_{дjj'}$  на  $\hat{t}_{дсjj'}$ .

В результате, на основе наибольших текущих гарантированных значений СДВ радиолинии, полученных в результате оптимизации управляющих воздействий противодействующих систем, определены текущие значения сети связи в направлении «берег-море». Однако по этим значениям судить об эффективности функционирования сети связи нельзя [8]. Для решения задачи анализа эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» необходимо определить обобщенный показатель эффективности ее функционирования (целевую функцию). В качестве целевой функции, как наиболее в данном случае приемлемой [7], выбрана квадратичная форма показателя эффективности функционирования  $L(Y(\vec{x}); Y_{тр}) = M \{ (Y(\vec{x}) - Y_{тр})^2 \}$ , где  $Y(\vec{x})$ ,  $Y_{тр}$  – соответственно имеют смысл сети связи в направлении «берег-море» и требований к ним предъявляемых. Свертка отдельных компонент осуществляется методом идеальной точки.

### 3. Алгоритм оперативного анализа эффективности функционирования СДВ радиолиний

Разработанный в соответствии с приведенными аналитическими выражениями алгоритм оперативного анализа эффективности функционирования представлен на рис. 1.

Последовательность действий по анализу эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» в соответствии с представленным алгоритмом заключается в следующем. В блоках 1, 2 на основе исходных данных формулируются требования к пороговым значениям сети связи  $\vec{Y}_{тр}$ . Далее на каждом  $k$ -м шаге функционирования производится оценка текущего состояния потока требований на

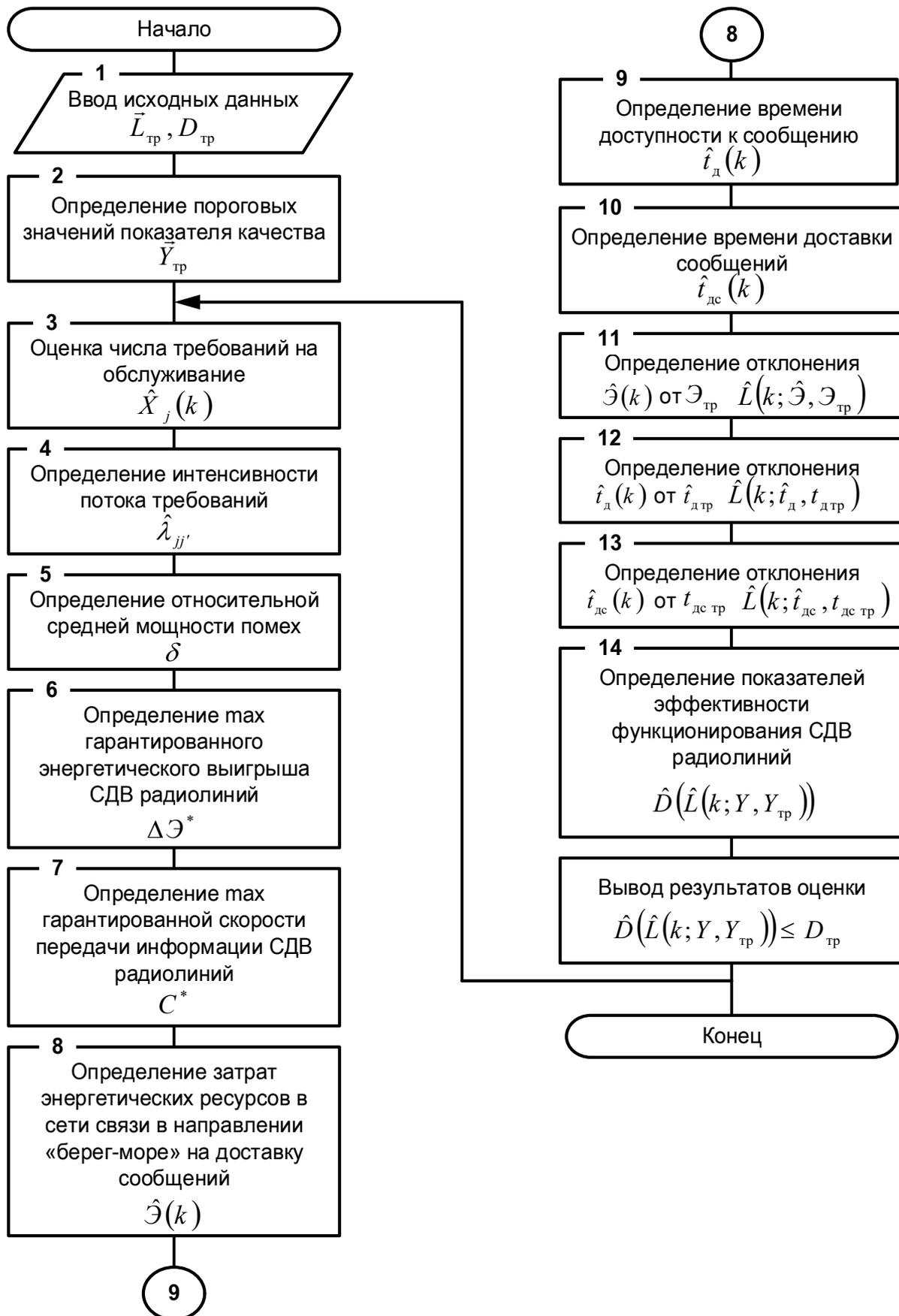


Рис. 1. Алгоритм анализа эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» на уровне СДВ радиолинии

обслуживание во всех направлениях связи (СДВ радиолинии)  $\hat{X}(k)$ , представленное блоком 3. Используя текущие наблюдения за состоянием потока требований, в блоке 4, вычисляются интенсивности поступления заявок на обслуживание в соответствии с выражением (26). Параллельно с этим в блоке 5 производится измерение относительной средней мощности помех. На основе полученных оценочных значений переменных состояния СДВ радиолинии в блоках 6, 7 осуществляется определение наибольших гарантированных значений сети связи в направлении «берег-море». Следует отметить, что одновременно с вычислением наибольших гарантированных ее значений осуществляется и определение оптимальных стратегий управления режимами функционирования СДВ радиолинии.

На основе определенных в блоках 6, 7 значений СДВ радиолинии и оценочных значений параметров потока требований (блоки 3, 4) в блоках 8 – 10 осуществляется вычисление значений сети связи в направлении «берег-море» на  $k$ -м шаге функционирования (выражения (25) – (31)). Взаимосвязь сети связи в направлении «берег-море» с СДВ радиолиниями определяется соотношением (30).

На основе определенных элементов системы показателей качества и требованиях к ним предъявляемых в блоках 11 – 13 производится вычисление отклонений показателей качества от пороговых значений. После чего в блоке 14 осуществляется определение целевой функции (показателя эффективности функционирования) сети связи в направлении «берег-море»  $\hat{D}\left(\hat{L}\left(k; \hat{Y}, Y_{\text{тр}}\right)\right)$  на основе метода идеальной точки.

### Заключение

Таким образом, осуществлена разработка алгоритма анализа эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» на уровне СДВ радиолинии при выделении ресурса в интересах отдельных СДВ радиолиний и позволяющего, в отличие от существующих, учесть возможности подсистемы управления СДВ радиолиниями перераспределять имеющийся в их распоряжении ресурс в зависимости от складывающейся сигнально-помеховой обстановки и текущей циркулирующей в сети нагрузки.

В рамках разработанного алгоритма, кроме того, осуществляется выработка управляющих воздействий, предназначенных для изменения режимов функционирования СДВ радиолиниями с целью поддержания требуемого качества связи. Определенный на основе описанного алгоритма показатель эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» на  $k$ -м шаге функционирования сети  $\hat{D}\left(\hat{L}\left(k; \hat{Y}, Y_{\text{тр}}\right)\right)$  сравнивается с требуемым (допустимым) значением  $D_{\text{тр}}$  (блок 15). При невыполнении требований к эффективности функционирования рассматриваемой сети возникает потребность в перераспределении ее ресурсов. Для этой цели, как направление дальнейших исследований необходимо осуществить разработку алгоритма анализа эффективности функционирования на уровне сети.

### Литература

1. Кошарюк В. Ю., Одоевский С. М. Моделирование, анализ эффективности функционирования и пути практической реализации радиолинии с управляемой скоростью передачи информации. В сб.: Вопросы электромагнитной совместимости и расчета антенн и радиолиний. – Л.: ВАС, 1991. – С. 19-41.
2. Перунов Ю. М., Куприянов А. И. Методы и средства радиоэлектронной борьбы. Монография. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 376 с.

3. Чуднов А. М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. – 1991. – Т. 27. – № 3. – С. 57-65.
4. Бухалёв В. А., Скрынников А. А., Болдинов В. А. Игровое управление системами со случайной скачкообразной структурой. Монография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 176 с.
5. Применение инноваций при разработке радиотехнических систем. Коллективная монография. Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук М. Ю. Звездиной. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2015. – 224 с.
6. Постюшков В. П. Оптимальное распределение энергетических ресурсов в системах связи с составными сигналами. – Л.: ВАС, 1978. – 72 с.
7. Терентьев В. М. Оптимизация организационного построения систем управления сетями многоканальной радиосвязи. – Л.: ВАС, 1988. – 70 с.
8. Терентьев В. М., Парашук И. Б. Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи. – СПб.: ВАС, 1995. – 96 с.

### References

1. Kosharyuk V. Yu., Odoevsky S. M. *Modelirovanie, analiz e`ffektivnosti funkcionirovaniya i puti prakticheskoy realizacii radiolinii s upravlyaemoj skorost`yu peredachi informacii* [Modeling, analysis of the effectiveness of functioning and ways of practical implementation of a radio line with a controlled information transmission rate]. In the collection: *Voprosy` e`lektromagnitnoj sovmestivosti i rascheta antenn i radiolinij* [Issues of electromagnetic compatibility and calculation of antennas and radio lines]. Leningrad. Military Academy of Communications Publ., 1991. Pp. 19-41 (in Russian).
2. Perunov Yu. M., Kupriyanov A. I. *Metody` i sredstva radioe`lektronnoj bor`by`* [Methods and means of electronic warfare]. Vologda. Infra-Engineering Publ., 2021. 376 p. (in Russian).
3. Chudnov A. M. *Teoretiko-igrovye zadachi sinteza algoritmov formirovaniya i priema signalov* [Theoretical and game problems of synthesis of algorithms for the formation and reception of signals]. *Problemy` peredachi informacii* [Problems of information transmission]. 1991. Vol. 27. No. 3. Pp. 57-65 (in Russian).
4. Bukhalyov V. A., Skrynnikov A. A., Boldinov V. A. *Igrovoe upravlenie sistemami so sluchajnoj skachkoobraznoj strukturoj* [Game control of systems with a random jump-like structure]. Moscow. Fizmatlit Publ., 2021. 176 p. (in Russian).
5. *Primenenie innovacij pri razrabotke radiotekhnicheskix sistem* [Application of innovations in the development of radio engineering systems]. Moscow. Publishing House of the Academy of Natural Sciences. 2015. 224 p. (in Russian).
6. Postyushkov V. P. *Optimal`noe raspredelenie e`nergeticheskix resursov v sistemax svyazi s sostavny`mi signalami* [Optimal distribution of energy resources in communication systems with composite signals]. Leningrad. Military Academy of Communications Publ., 1978. 72 p. (in Russian).
7. Terentyev V. M. *Optimizaciya organizacionnogo postroeniya sistem upravleniya setyami mnogokanal`noj radiosvyazi* [Optimization of organizational construction of multichannel radio communication network management systems]. Leningrad. Military Academy of Communications Publ., 1988. 70 p. (in Russian).
8. Terentyev V. M., Parashuk I. B. *Teoreticheskie osnovy` upravleniya setyami mnogokanal`noj radiosvyazi* [Theoretical foundations of multichannel radio communication network management]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 1995. 96 p. (in Russian).

Статья поступила 24 мая 2024 г.

### Информация об авторе

Жебрун Антон Михайлович – Заместитель директора научно-технического центра по научной работе. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: разработка систем телекоммуникаций специального назначения. Тел.: +7(812)4489658. E-mail: intelteh@inteltech.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

## Analysis of the effectiveness of the functioning of the communication network in the "coast-sea" the direction is at the level of an ultra-long-wave radio line

A. M. Zhebrun

**Annotation.** *The purpose of the work is to determine the potentially achievable values of the efficiency of the radio lines of the ultra-long wave range in the coast-sea direction, depending on the prevailing signal-interference situation and the load circulating in it. **Methods:** an optimal strategy for controlling the power of a radio transmitting device or/and the speed of information transmission can be found as a result of the application of game theory methods. At the same time, the paper proposes a game with an additional restriction on the set of player strategies, which is unconventional for game theory. Linear programming, nonlinear programming, threshold and balanced methods were used to obtain the solution. Novelty: to obtain a guaranteed win for the optimal strategies of both players, it is advisable to use threshold and balance methods based on the fulfillment of restrictions when using a pair of pure strategies of the second player (balance of pure strategies). To solve the problem of analyzing the effectiveness of the functioning of the communication network in the "coast-sea" direction, a generalized indicator of the effectiveness of its functioning is determined. As the objective function, as the most acceptable in this case, the quadratic form of the indicator of the efficiency of the operation of the shift radio line is chosen. **Results:** an algorithm has been developed to analyze the effectiveness of the functioning of the communication network in the "coast-sea" direction at the level of the shift radio line when allocating a resource in the interests of individual SHIFT radio lines and allowing, unlike existing ones, to take into account the capabilities of the SHIFT radio control subsystem to redistribute the resource at their disposal depending on the prevailing signal-interference situation and the current load circulating in the network. **Practical significance:** within the framework of the developed algorithm, in addition, control actions are being developed designed to change the modes of operation of the shift by radio lines in order to maintain the required communication quality. Also, along with saving resource costs, the gain in the energy potential of the shift of radio lines also leads to an increase in its intelligence protection.*

**Keywords:** *balanced method, guaranteed win value, generalized efficiency indicator, radio line, radio transmitting device, ultra-long waves, mixed matrix game strategy, game theory.*

### Information about author

*Anton Mikhailovich Zhebrun – Deputy Director of the Scientific and Technical Center for Scientific Work. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies" (PJSC "Inteltech"). Research interests: development of special purpose telecommunications systems. Tel.: +7(812)448-96-58. Email: intelteh@inteltech.ru.*

*Address: 197342, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya St. 8*

### Библиографическая ссылка на статью:

*Жебрун А. М. Анализ эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» на уровне сверхдлинноволновой радиолинии // Техника средств связи. 2024. № 2 (166). С. 36-47. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-36-47.*

### Reference for citation:

*Zhebrun A. M. Analysis of the effectiveness of the functioning of the communication network in the "coast-sea" the direction is at the level of an ultra-long-wave radio line. Means of Communication Equipment. 2024. No. 2 (166). Pp. 36-47 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-36-47.*

УДК 621.391.28

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-48-57

## Эффективность функционирования сети военной связи

Киселев А. А., Сударев А. П., Жебрун А. М.

**Аннотация.** *Постановка задачи:* на основе теории эффективности целенаправленных процессов и системного анализа разработать подход по формулировке эффективности функционирования сети военной связи, ее показателей, а также их оценке, позволяющий обоснованно реализовать ее построение и эксплуатационное обслуживание для выполнения требований по качеству связи. **Целью работы** является достижение требуемых значений показателей эффективности сети военной связи, в ходе ее функционирования. **Используемые методы:** теория эффективности целенаправленных процессов, системный анализ. **Новизна** состоит в том, что предложен единый системный комплекс показателей функционирования сети военной связи, который реализуется в ходе выполнения ею целевой функции, определяемый результативностью, ресурсоемкостью и временем функционирования, и позволяющий осуществить как предварительную оценку эффективности функционирования сети на этапе ее проектирования (планирования), так и в ходе эксплуатационного обслуживания. **Результат** заключается в том, что предлагаемый подход позволяет обеспечить выбор наиболее целесообразного (рационального) варианта построения сети военной связи по критерию эффективности ее функционирования. **Практическая значимость:** разработанная последовательность оценки вариантов построения сети военной связи позволяет соответствующим должностным лицам с единых системных позиций при проектировании (планировании) осуществить обоснованный выбор ее структуры, а в ходе эксплуатационного обслуживания вносить соответствующие корректировки по обеспечению эффективности ее функционирования.

**Ключевые слова:** показатели эффективности функционирования, критерий эффективности, сеть военной связи, системный анализ.

### Введение

На основных этапах жизненного цикла сети военной связи (в ходе проектирования (планирования), при эксплуатации и техническом обслуживании, как отдельных элементов, так и сети связи в целом) реализуется основная цель ее функционирования – выполнение требований по качеству связи, или, другими словами, обеспечение абонентов (потребителей) связью с заданным (требуемым) качеством. Для достижения этой цели предусматривается и выполняется комплекс организационно-технических мер и мероприятий, направленных на гарантированное предоставление услуг абонентам (потребителям) в местах их постоянного и временного пребывания, в соответствии с предоставленными им статусом и правами.

Построение сетей военной связи является сложной научно-технической и технологической задачей, требующей всестороннего, комплексного рассмотрения различных вариантов ее состава и конфигурации, с учетом предъявляемых требований, имеющихся ресурсов и времени, для конкретных условий ее функционирования.

Одним из подходов обеспечения качества военной связи, с точки зрения рациональности, является ее оценка по эффективности функционирования сети военной связи. Это позволит комплексно учитывать свойства сети военной связи и ресурсы, обеспечивающие ее функционирование. При этом за методологическую основу такого подхода примем теорию эффективности целенаправленных процессов [1, 2] и системный анализ [3, 4].

### 1. Показатели эффективности сети военной связи

Опираясь на источники [1, 3, 4], сформулируем определение эффективности функционирования сети военной связи.

*Эффективность* (от лат. *effectus* – исполнение) *сети военной связи* – это комплексное свойство, характеризующее ее приспособленность к достижению цели, реализуемой сетью в ходе ее функционирования, это ее способность приносить эффект, а также действенность такой способности, т. е. результативность, соотношенная с затратами ресурсов всех видов.

Или, иными словами, под эффективностью сети военной связи понимается количественная или качественная характеристика, позволяющая судить о степени выполнения сетью заданных ей функций.

Процесс функционирования сети военной связи определяется не только целевой функцией, т. е. заданным каким-либо образом состоянием, в котором она должна оказаться, а еще целым рядом других факторов. К ним можно отнести: условия, в которых она функционирует; ресурсы, которыми она располагает для доброкачественного функционирования; временной интервал, в течение которого она реализует свои функции. Кроме того, понятием целевой функции не охватывается все многообразие функций сети, в частности, остаются в стороне неосновные функции случайного характера, тем или иным образом влияющие на ее эффективность.

Эффективность анализируемой системы характеризуется показателями – количественными величинами или качественными понятиями, с помощью которых можно оценивать системы и сравнивать их между собой. В системном анализе показатели эффективности не выводятся (например, аналитически), а подбираются и назначаются в результате поиска компромисса между требуемым состоянием и реальным. При этом выбираемые показатели должны удовлетворять условиям [5]: представительности (адекватности), чувствительности (критичности), полноты (комплексности), стохастичности, относительной простоты.

Показатели функционирования сети военной связи установим исходя из определения эффективности и источников [1, 4] (рис. 1):

- результативность функционирования сети военной связи ( $S_{СВС}$ );
- ресурсоемкость сети военной связи ( $R_{СВС}$ );
- время функционирования сети военной связи ( $T_{фСВС}$ ).



Рис. 1. Показатели функционирования сети военной связи

На этом основании будет справедлива функциональная зависимость эффективности сети военной связи  $\mathcal{E}_{СВС}(T_{фСВС})$ :

$$\mathcal{E}_{СВС}(T_{фСВС}) = F(S_{СВС}(T_{фСВС}), R_{СВС}(T_{фСВС}))_{V_{СВС}(t)}, \tag{1}$$

где  $V_{СВС}(t)$  – множество воздействий, влияющих на функционирование сети военной связи.

*Результативность* функционирования сети военной связи обуславливается целевым эффектом, получаемым вследствие реализации сетью основных своих свойств.

Сеть военной связи, как любая сложная система, обладает некоторым счетным множеством свойств, характеризующих ее с точки зрения соответствия основному целевому предназначению – информационно-телекоммуникационному обеспечению абонентов связью с требуемым качеством. То есть, она должна обеспечить абонентам (потребителям) безопасную, своевременную, непрерываемую и достоверную доставку сообщений, а также удобство в пользовании средствами связи.

Эти свойства связи являются по существу внешними (функциональными) свойствами, определяющими требования к построению и функционированию сети связи. Кроме того, любая сеть связи характеризуется внутренними (структурными) свойствами, позволяющими обеспечить требуемое качество связи. Для реализации функциональных требований (внешних свойств) система связи должна находиться в состоянии постоянной *готовности* к обеспечению пользователей информационно-телекоммуникационными услугами и обладать определенными свойствами: *устойчивостью, мобильностью, пропускной способностью, разведзащищенностью (скрытостью) и управляемостью* [6, 7].

Дадим краткую характеристику перечисленным свойствам.

Оценить *готовность сети военной связи* к выполнению задач по предназначению можно с помощью коэффициента готовности ( $K_{ГСВС}$ ). Он определяется отношением количества выполненных мероприятий по переводу сети (ее элементов) в высшую степень готовности ( $N_{\text{вып}}$ ) к общему количеству требуемых основных мероприятий ( $N^*$ ) за установленное время перевода:

$$K_{ГСВСi} = \frac{N_{\text{вып}i}}{N_i^*}, \text{ при } t_{\text{пер}i} \leq T_{\text{пер}i}^*, \quad (2)$$

где  $i$  – требуемая степень готовности;  $t_{\text{пер}i}$  – время перевода сети военной связи (ее элементов) в степень готовности;  $T_{\text{пер}i}^*$  – нормированное время перевода сети военной связи (ее элементов) в степень готовности.

Оценить готовность разрабатываемой (проектируемой) сети военной связи можно по вероятности выполнения требуемого комплекса мероприятий за планируемое (допустимое, нормативное, требуемое) время перевода:

$$P_{\text{вып}} \left[ N_{\text{вып}i} / (t_{\text{пер}i} \leq T_{\text{пер}i}^*) \right]. \quad (3)$$

*Устойчивость функционирования сети военной связи* в общем случае является интегральным свойством, которое определяется в виде функции от его частных свойств – живучести ( $J_{СВС}$ ), помехоустойчивости ( $H_{СВС}$ ) и надежности  $Q_{СВС}$ :

$$Y_{СВС} = f(J_{СВС}, H_{СВС}, Q_{СВС}). \quad (4)$$

При условии, что различные воздействия на сеть военной связи независимы друг от друга, вероятность устойчивого функционирования элемента сети (направления) связи определяется как произведение вероятностей выживания ( $P_{\text{выж}СВСi}$ ) данного элемента по живучести, помехоустойчивости и надежности:

$$P_{\text{уф}СВСi}(\Delta t) = P_{\text{выж}СВС}^J(\Delta t) \cdot P_{\text{выж}СВС}^H(\Delta t) \cdot P_{\text{выж}СВС}^Q(\Delta t). \quad (5)$$

Вероятность выживания  $i$ -го элемента сети военной связи ( $P_{\text{выж}СВСi}(\Delta t)$ ) при воздействии на него различных дестабилизирующих факторов за промежуток времени  $\Delta t$  определяется как

$$P_{\text{выж}СВСi}(\Delta t) = P(O_{\text{р}СВСi} \geq O_{\text{min}СВСi}, \Delta t), \quad (6)$$

где  $O_{pCCB_i}$  – сохранившийся уровень работоспособности, а  $O_{\min CCB_i}$  – минимальный заданный уровень работоспособности элемента сети военной связи.

Показателем *мобильности сети военной связи* является время изменения ее структуры или состояния ( $t_{\text{измСВС}}$ ), которое требуется для выполнения необходимого комплекса мероприятий. Оно рассчитывается как сумма времени на подготовку сети военной связи к перестроению ( $t_{\text{подг.пер}}$ ) и времени непосредственного перестроения ( $t_{\text{пер}}$ ):

$$t_{\text{измСВС}} = t_{\text{подг.пер}} + t_{\text{пер}}. \quad (7)$$

*Пропускная способность сети (направления) связи* ( $U_{\text{СВС}}$ ) определяется как функция от потока поступающих заявок на передачу сообщений ( $\lambda$ ), объема передаваемых сообщений ( $W$ ) и скорости их передачи ( $V$ ), а также от числа каналов ( $N_k$ ), необходимых для передачи необходимого объема сообщений с заданной (допустимой) вероятностью потерь ( $P_{\text{п}}$ ):

$$U_{\text{СВС}} = f(\lambda, W, V, N_k, P_{\text{п}}). \quad (8)$$

К основным показателям *разведзащищенности* относятся среднее время скрытой от разведки противника работы ( $t_{\text{скр}}$ ) сети (элемента, объекта) связи и вероятность такой работы ( $P_{\text{скр}}$ ).

Они определяются на основе оценки частных показателей, характеризующих степень подверженности сети (элемента) связи разведке противника.

Частными показателями *разведзащищенности* являются время и вероятность обнаружения и распознавания объекта сети военной связи ( $t_{\text{обн}}, t_{\text{расп}}, P_{\text{обн}}, P_{\text{расп}}$ ).

Способность сети военной связи при воздействии на нее должностных лиц органов управления связью изменять свое состояние в необходимых пределах называется *управляемостью*. Возможность сети военной связи к изменению своего состояния определяется коэффициентом устойчивости управления ( $K_{\text{упр}}$ ), характеризующим пределы изменения показателей ( $\Delta G$ ) свойств сети военной связи в заданные сроки с учетом внутренних и внешних воздействий:

$$K_{\text{упр}}^{\text{г, м, у, проп. сп, рз}} = 1 - \frac{\Delta G}{G_{\text{max}}}, \quad (9)$$

где  $G_{\text{max}}$  – максимальное (потенциальное, предельно заданное) значение показателя каждого из свойств сети военной связи.

В итоге целевой эффект результативности функционирования сети военной связи определяется основными свойствами сети:

$$S_{\text{СВС}} = \langle K_{\text{гСВС}}, J_{\text{СВС}}, H_{\text{СВС}}, Q_{\text{СВС}}, t_{\text{измСВС}}, U_{\text{СВС}}, t_{\text{скр}}, K_{\text{упр}} \rangle. \quad (10)$$

*Ресурсоемкость* сети военной связи ( $R_{\text{СВС}}$ ), определяется использованием (затратами) всех видов ресурсов сети для обеспечения ее нормального функционирования. Под ресурсами сети военной связи понимают совокупность эксплуатационно-технических ( $r_{\text{этр}}$ ), временных ( $r_t$ ), частотных ( $r_f$ ), энергетических ( $r_3$ ), управленческих ( $r_y$ ), обеспечивающих ( $r_{\text{об}}$ ), резерва сил и средств ( $r_{\text{рез}}$ ) и других ресурсов [6]:

$$R_{\text{СВС}} = \langle r_{\text{этр}}, r_t, r_f, r_3, r_y, r_{\text{об}}, r_{\text{рез}} \rangle. \quad (11)$$

Уточним понятие временных ресурсов, которые складываются из времени на проектирование (планирование), строительство (развертывание), подготовки элементов сети военной связи к функционированию (настройка, вхождение в связь, доведение параметров каналов посредством регулировки до требуемого уровня), времени на проведение различных видов технического обслуживания и регламентов, времени на ремонт и восстановление объектов сети и т. п. То есть время функционирования в эту

составляющую не входит, оно учитывается отдельно, т. к. оно является «квинтэссенцией» эффективности функционирования сети военной связи для достижения поставленной цели.

*Время функционирования* сети военной связи ( $T_{\text{фСВС}}$ ), определяется периодом, в течение которого абонентам (потребителям) сети военной связи предоставляются услуги с заданным (требуемым) качеством связи. Оно будет определяться:

$$T_{\text{фСВС}} = t_{\text{общ}} - t_{\text{пр}}, \quad (12)$$

где  $t_{\text{общ}}$  – общее время работы сети военной связи,  $t_{\text{пр}}$  – время простоя, когда абонентам (потребителям) сети военной связи услуги с заданным (требуемым) качеством связи не могут быть предоставлены по различным причинам.

Учитывая неопределенность (стохастичность) условий функционирования сети военной связи, которая обусловлена воздействием случайных факторов, разнородность единиц физических величин измерения свойств, ресурсов и времени, показатели эффективности и сама эффективность функционирования сети военной связи будут носить вероятностный характер:

$$P_{\text{эфСВС}}(T_{\text{фСВС}}) = P(S_{\text{СВС}} \cdot R_{\text{СВС}} \cdot T_{\text{фСВС}}). \quad (13)$$

Вероятность  $P_{\text{эфСВС}}(T_{\text{фСВС}})$  есть не что иное, как вероятность достижения цели функционирования сети военной связи (вероятность выполнения задачи) и является *показателем эффективности функционирования* сети военной связи, т. е. мерой степени достижения цели.

Критерием вероятностной оценки эффективности функционирования сети военной связи является:

$$P_{\text{эфСВС}}(T_{\text{фСВС}}) \geq P_{\text{эфСВС}}^*(T_{\text{фСВС}}). \quad (14)$$

Необходимо отметить, что полная характеристика функционирования сети военной связи возможна только при комплексном учете приведенных выше показателей и не может быть представлена одним или несколькими перечисленными показателями, это, во-первых. Во-вторых, с точки зрения системного анализа, представленный комплекс показателей функционирования сети военной связи не может являться полным, окончательным и законченным, т. е. в зависимости от конкретной сети, от ее организационно-технического построения, условий функционирования, каких-либо дополнений или ограничений и т. п. показатели могут добавляться, изменяться или удаляться.

## **2. Общая последовательность оценки вариантов построения сети военной связи**

На основании представленного подхода к определению эффективности функционирования сети военной связи можно сформировать общую последовательность ее оценки, позволяющую осуществить выбор наиболее рационального варианта ее построения и функционирования для различных условий (рис. 2).

В качестве иллюстрации приведем примеры расчета вероятности эффективности функционирования для сетей военной связи, построенных тремя способами, получившими на сегодняшний день наибольшее распространение (рис. 3).

Первый вариант основан на строительстве (развертывании) линий прямой связи непосредственно между узлами связи пунктов управления (рис. 3, а), с самостоятельным образованием канального ресурса. В этом случае линии связи могут быть образованы, как правило, средствами спутниковой и (или) радиорелейной связи, в зависимости от ранга пункта управления, расстояний между узлами связи и рельефа местности.

Наиболее часто применимым является второй вариант – строительство (развертывание) на основе линий привязки к арендуемому канальному ресурсу

операторов сети связи общего пользования ЕСЭ России (рис. 3, б). При таком способе построения линии связи создаются радиорелейными или проводными средствами, так же, как и в первом варианте, это зависит от ранга пункта управления, расстояний между узлами связи и рельефа местности. Этот способ является самым затратным по финансовым соображениям.



Рис. 2. Общая последовательность оценки вариантов построения сети военной связи по критерию эффективности ее функционирования

Третий вариант предполагает строительство (развертывание) военной сети связи на основе опорной сети (рис. 3, в), которая включает магистральные и рокадные линии связи. Эти линии связи могут быть образованы радиорелейными или проводными средствами связи. На сегодняшний день этот способ применяется не часто.

По имеющимся предварительным результатам и равном времени функционирования рассматриваемых сетей связи, для каждого представленного варианта имеем:

- для первого –  $S_{CBC1} = 0,35 - 0,46$ ,  $R_{CBC1} = 0,24 - 0,37$ ,  $T_{CBC1} = 0 - 1$ ;
- для второго –  $S_{CBC2} = 0,27 - 0,33$ ,  $R_{CBC2} = 0,19 - 0,26$ ,  $T_{CBC2} = 0 - 1$ ;
- для третьего –  $S_{CBC3} = 0,39 - 0,51$ ,  $R_{CBC2} = 0,19 - 0,26$ ,  $T_{CBC3} = 0 - 1$ .

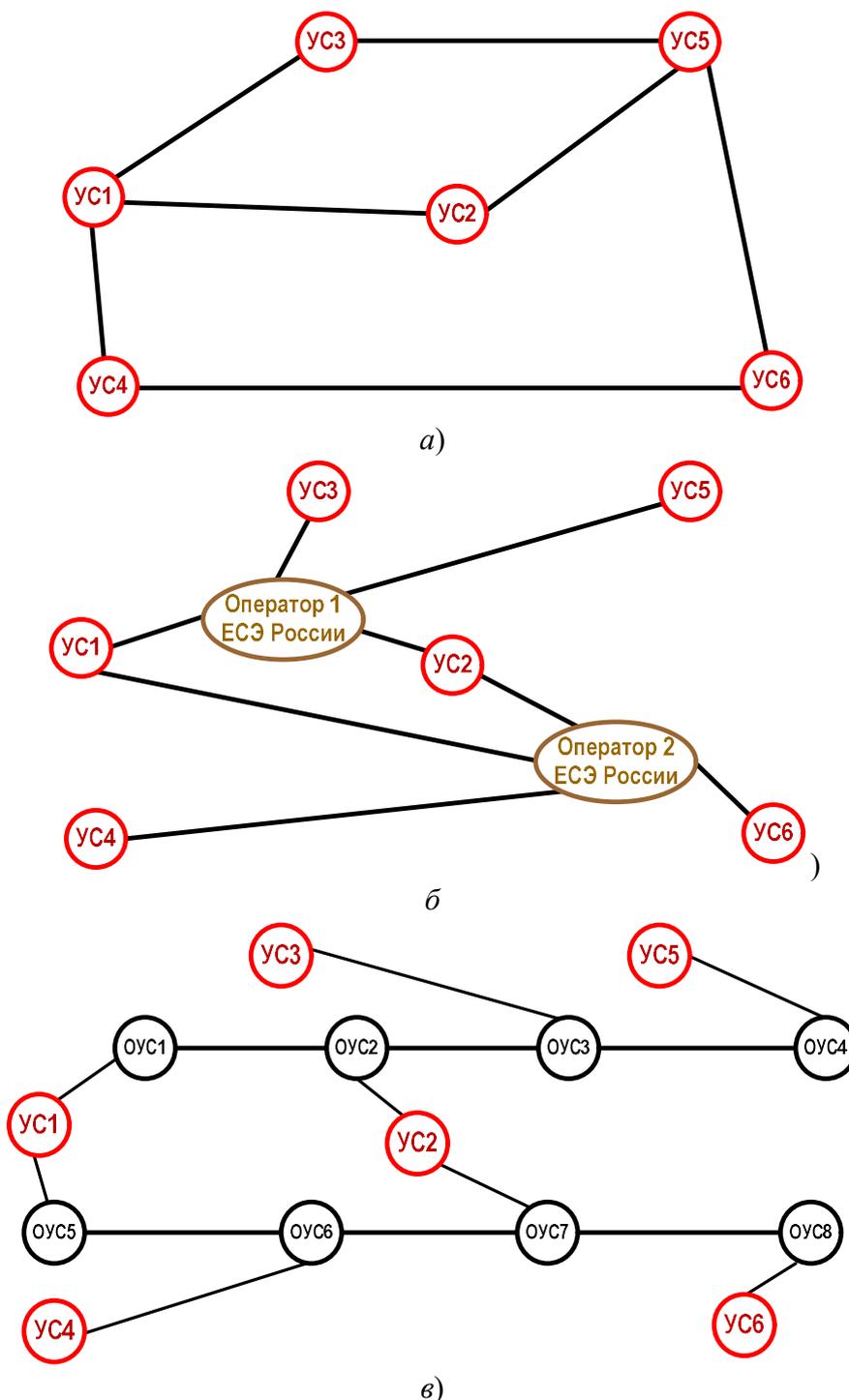


Рис. 3. Варианты построения сетей военной связи:

- а) на основе линий прямой связи;
- б) на основе линий привязки к арендуемому каналному ресурсу операторов ЕСЭ России;
- в) на основе опорной сети связи

### 3. Оценка эффективности функционирования сетей связи

Результаты проведенного расчета эффективности функционирования сетей связи для большей наглядности представим графически (рис. 4).

Анализируя полученные зависимости эффективности функционирования сетей связи по трем вариантам можно сделать вывод о предпочтительности построения сети

военной связи на основе опорной сети, следующим идет вариант на основе линий прямой связи, и самым низкоэффективным является второй вариант – на основе линий привязки к арендуемому каналному ресурсу операторов сети связи общего пользования Единой сети электросвязи (ЕСЭ) России. С сожалением можно констатировать, что именно третий вариант, в настоящее время, является наиболее распространенным способом построения сетей военной связи.

Эффективность функционирования сети военной связи является определяющей для качества военной связи (качества услуг, предоставляемых сетью), т. е.

$$K_{BC} = f(P_{эфBC}). \tag{15}$$

Этим самым обеспечивается выполнение целевой установки функционирования сети военной связи – обеспечение абонентов (потребителей) связью с заданным (требуемым) качеством.

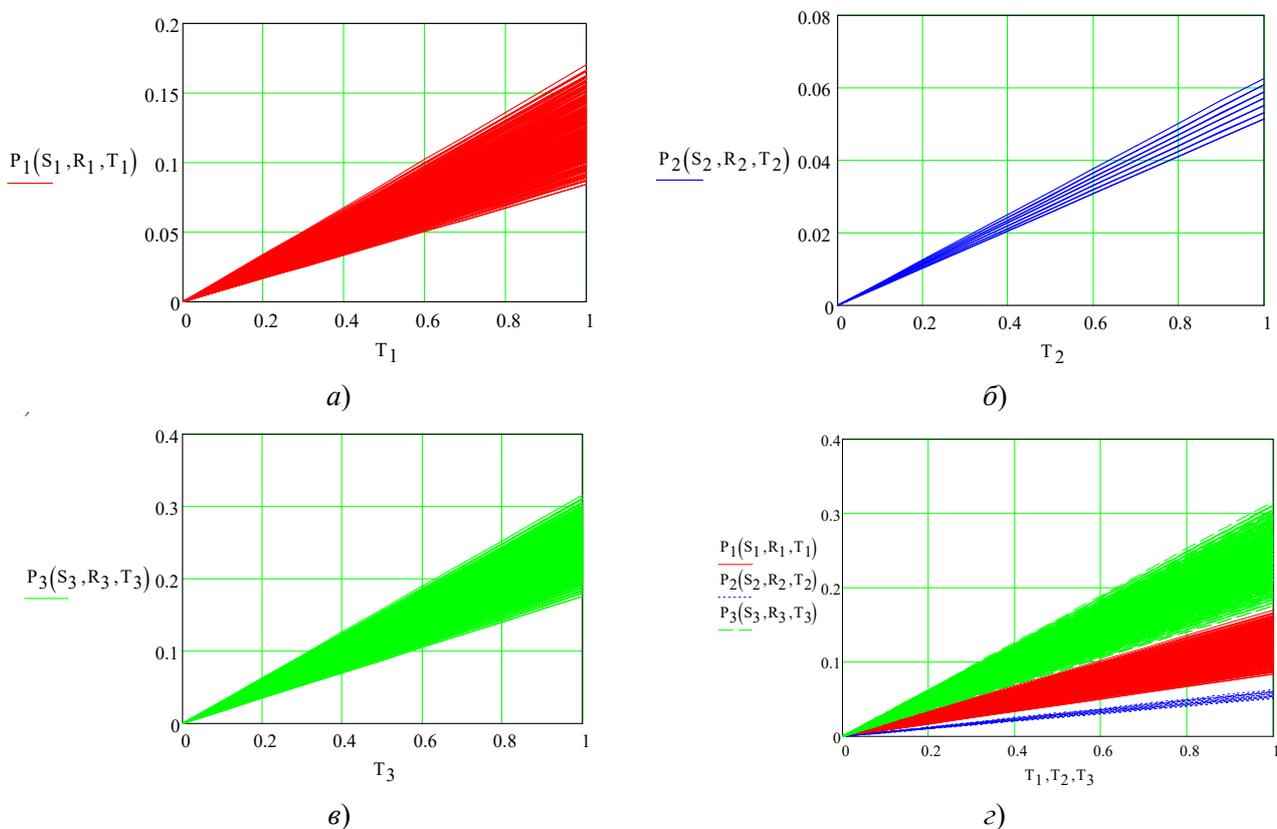


Рис. 4. Результаты расчета эффективности функционирования сетей связи:  
 а) на основе линий прямой связи,  
 б) на основе линий привязки к арендуемому каналному ресурсу операторов ЕСЭ России,  
 в) на основе опорной сети связи,  
 г) обобщенный результат по трем вариантам

### Выводы

Представленный подход описания эффективности функционирования сети военной связи и ее оценки, в отличие от известных, позволяет:

- учитывать в едином системном комплексе показатели функционирования сети, которые реализуются в ходе выполнения ею целевой функции, определяемые результативностью, ресурсоемкостью и временем функционирования;
- проводить предварительную оценку эффективности функционирования сетей как на этапе их проектирования (планирования), так и в ходе их эксплуатационного обслуживания;

- обеспечить выбор наиболее целесообразного (рационального) варианта построения сети военной связи по критерию эффективности ее функционирования;
- использовать методологические аспекты теории эффективности целенаправленных процессов и системного анализа, которые являются не только основой обоснования сложных, многокомбинаторных решений, но и формируют комплексное мировоззрение на объект исследования и раскрывают многоаспектную сущность рассматриваемых (изучаемых) явлений.

### Литература

1. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник / Под ред. В. Н. Волковой, А. А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 848 с.
2. Душкин А. В., Новосельцев В. И., Сумин В. И., Кочедыков С. С. Системный анализ и принятие решений: монография. – Иркутск: ООО «Мегапринт», ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России, 2018. – 245 с.
3. Бобронников В. Т. Системный анализ в инженерных исследованиях. – М.: Изд-во МАИ, 2018. – 144 с.
4. Ермишян А. Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях. Часть 1. Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи. – СПб.: ВАС, 2005. – 740 с.
5. Боговик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. – СПб.: ВАС, 2006. – 183 с.
6. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.
7. Киселев А. А., Моисеев А. А. Сети связи специального назначения для нужд обороны страны как объект системного анализа: монография. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 86 с.

### References

1. *Teoriya sistem i sistemnyj analiz v upravlenii organizacijami* [Systems theory and system analysis in the management of organizations]. Guide. Edited by V. N. Volkova, A. A. Yemelyanov. Moscow. Finance and Statistics Publ., 2006. 848 p. (in Russian).
2. Dushkin A. V., Novoseltsev V. I., Sumin V. I., Kochedykov S. S. *Sistemnyj analiz i prinyatie reshenij* [System analysis and decision-making]. Irkutsk, Megaprint LLC; Voronezh, Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia. 2018. 245 p. (in Russian).
3. Bobronnikov V. T. *Sistemnyj analiz v inzhenernyh issledovaniyah* [System analysis in engineering research]. Moscow. Publishing House of Moscow Aviation Institute. 2018. 144 p. (in Russian).
4. Ermishyan A. G. *Teoreticheskie osnovy postroeniya sistem voennoj svyazi v ob"edineniyah i soedineniyah. CHast' 1. Metodologicheskie osnovy postroeniya organizacionno-tekhnicheskikh sistem voennoj svyazi* [Theoretical foundations of the construction of military communications systems in associations and formations. Part 1. Methodological foundations of the construction of organizational and technical systems of military communications]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 2005. 740 p. (in Russian).
5. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Effektivnost' sistem voennoj svyazi i metody ee ocenki* [Effectiveness of military communications systems and methods of its assessment]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 2006. 183 p. (in Russian).
6. Petukhov G. B., Yakunin V. I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya celenapravlennyh processov i celeustremlennyh sistem* [Methodological foundations of external design of purposeful processes and purposeful systems]. Moscow. ACT Publ., 2006. 504 p. (in Russian).
7. Kiselev A. A., Moiseev A. A. *Seti svyazi special'nogo naznacheniya dlya nuzhd oborony strany kak ob"ekt sistemnogo analiza* [Special purpose communication networks for the needs of national defense as an object of system analysis]. St. Petersburg. POLYTECH PRESS, 2022. 86 p. (in Russian).

Статья поступила 14 апреля 2024 г.

### Информация об авторах

*Киселев Алексей Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент, начальник сектора ПАО «Интелтех». Область научных интересов: исследование построения систем связи и автоматизации. Тел.: +7-911-962-14-60. E-mail: kiseljovorl@yandex.ru.

*Сударев Аркадий Прокопьевич* – кандидат технических наук, доцент, начальник сектора ПАО «Интелтех». Область научных интересов: исследование построения систем связи и автоматизации. Тел.: +7-921-329-08-15. E-mail: suark@yandex.ru.

*Жебрун Антон Михайлович* – заместитель директора научно-технического центра по научной работе по специальной тематике. Область научных интересов: исследование построения систем связи и автоматизации. Тел.: +7(812)448-96-03. E-mail: zhebrunam@inteltech.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

### The effectiveness of military communications networks

A. A. Kiselev, A. P. Sudarev, A. M. Zhebrun

**Annotation. Task statement:** based on the theory of the effectiveness of targeted processes and system analysis, to develop an approach to formulate the effectiveness of the functioning of the military communications network, its indicators, as well as its assessment, which makes it possible to reasonably implement its construction and maintenance to meet the requirements for the quality of communication. **The aim of the work** is to achieve the required values of performance indicators of military communications networks during its operation. **Methods used:** theory of the effectiveness of targeted processes, system analysis. **Novelty** it consists in the fact that a single system set of indicators of the functioning of a military communications network is proposed, which is implemented during the performance of its target function, determined by the effectiveness, resource intensity and operating time and allows for both a preliminary assessment of the effectiveness of the functioning of networks at the stage of their design (planning) and during their operational maintenance. **The result** is that it allows you to ensure the choice of the most appropriate (rational) option for building a military communications network based on the criterion of the effectiveness of its functioning. **Practical significance:** the proposed approach allows relevant officials to make an informed choice of the structure of the military communications network from a unified system position when designing (planning), and during its operational maintenance to make appropriate adjustments to ensure the effectiveness of its functioning.

**Keywords:** performance indicators, performance criterion, military communications network, system analysis.

### Information about Authors

*Alexey Alekseevich Kiselev* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the sector of PJSC Inteltech. Tel.: +79119621460. E-mail: kiseljovorl@yandex.ru.

*Arkady Prokopyevich Sudarev* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the sector of PJSC Inteltech. Tel.: +79213290815. E-mail: suark@yandex.ru.

*Anton Mikhailovich Zhebrun* – Deputy Director of the Scientific Research Center for scientific work on special topics. Phone: +7(812)4489603. E-mail: ZhebrunAM@inteltech.ru.

Address: 197342, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

### Библиографическая ссылка на статью:

Киселев А. А., Сударев А. П., Жебрун А. М. Эффективность функционирования сети военной связи // Техника средств связи. 2024. № 2 (166). С. 48-57. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-48-57.

### Reference for citation:

Kiselev A. A., Sudarev A. P., Zhebrun A. M. The effectiveness of military communications networks. *Means of Communication Equipment*. 2024. No. 2 (166). Pp. 48-57 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-48-57.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 621.317

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-58-66

**Аналитическая модель цифрового потока,  
поступающего с выхода источника сообщений на вход акселератора трафика**

Маркин А. В., Иванов В. А., Овсянкин С. В., Иванов И. В.

**Аннотация.** Применение оптимизаторов трафика позволяет повысить эффективность использования пропускной способности сетей связи за счет устранения избыточности передаваемых в каналах связи сообщений и повторяющихся при передаче приложений и служебной информации. **Методы:** в статье представлена математическая модель цифрового потока, разработанная с привлечением математического аппарата многосвязных двоичных цепей Маркова. Аппроксимация потока Марковским случайным процессом опирается на конечность корреляционных связей между элементами двоичных последовательностей, генерируемых источниками сообщений. Значение достаточной связности для цепи Маркова рассчитывается с помощью автокорреляционной функции, которая определяет соответствие сигнала с его копией, сдвинутой по времени. С позиции архивации трафика рассмотрено описание источника сообщений цепью Маркова через категории энтропии и алфавита сообщения. Доказано, что избыточность в процессе укрупнения алфавита не изменяется и определяется неравномерностью распределения вероятностей элементов вторичного алфавита. При укрупнении алфавита ослабляются взаимные вероятностные связи между элементами сообщения. При выборе длины вторичного алфавита превосходящей протяженности, действия вероятностных связей между элементами первичного алфавита и вероятностные связи между элементами укрупненного алфавита отсутствуют. При этом избыточность в процессе укрупнения не изменяется и практически полностью определяется неравномерностью распределения вероятностей элементов вторичного алфавита. **Цель работы** заключается в определении оптимальной длины для цепи Маркова, обеспечивающей не избыточное и достаточно точное описание случайного процесса, а также влияние процедуры укрупнения алфавита на избыточность сжимаемого сообщения. **Новизна** работы состоит в расчете достаточной связности для цепи Маркова через автокорреляционную функцию, которая определяет связь основного сигнала с его копией, последовательно сдвигаемой по времени на заданную глубину отсчетов. **Практическая ценность** работы заключается в использовании модели для выбора оптимальных алгоритмов сжатия потоков.

**Ключевые слова:** математическая модель, двоичный случайный процесс, цифровой поток, многосвязная цепь Маркова, автокорреляционная функция, источник сообщения, акселерация трафика

**Введение**

В настоящее время одним из способов повышения эффективности использования пропускной способности сетей связи является применение оптимизаторов трафика, которые устраняют избыточность непосредственно передаваемых в каналах связи сообщений и повторяющихся при передаче приложений и служебной информации. Для обнаружения закономерностей и выявления особенностей процесса предлагается модель цифрового потока (ЦП), разработка которой преследует две цели:

- 1) актуализацию выбранного математического аппарата к свойствам потока, обеспечивая адекватность и конструктивность модели;
- 2) получение информации об инструменте генерации реализаций цифрового потока в различных интерпретациях по вероятности распределений двоичных векторов на участках локальной стационарности. Первая цель достигается при разработке

аналитической модели цифрового потока и решается в статье. Достижение второй цели обеспечивается при разработке имитационной модели цифрового потока, поступающего на вход акселератора трафика.

### Аппроксимация цифрового потока Марковским случайным процессом

Аппроксимация потока Марковским случайным процессом опирается на конечность корреляционных связей между элементами двоичных последовательностей, генерируемых источниками сообщений (ИС) [1, 2]. Представление потока на участке локальной стационарности сводится к посимвольному описанию дискретных процессов и состоит в задании  $n$ -мерных условных (переходных) вероятностей для значений этого процесса на  $i$ -ой позиции при известных значениях на  $n$  предшествующих позициях  $p(a_i / a_{i-1}, \dots, a_{i-n})$  или  $(n+1)$ -мерных совместных вероятностей для значений процесса на  $n+1$  смежных позициях  $p(a_{i-n}, \dots, a_i)$  [3, 4].

Математическое описание случайного процесса цепью Маркова (ЦМ) использует понятие связности цепи, показывающей глубину корреляционных связей между элементами последовательности, и значности цепи, определяющей множество состояний источника сообщений. Так, например, представление состояний ИС одним символом приводит к двоичной цепи Маркова, а укрупнение алфавита посредством объединения соседних двоичных символов в их комбинации – к четверичным, восьмеричным и другим цепям Маркова.

Для  $n$ -связной цепи Маркова [5, 6] условная вероятность некоторого исхода  $a_k$  в любом  $i$ -м испытании определяется набором исходов в предыдущих  $n$  испытаниях, и не зависит от более ранних исходов:

$$p(a_k^i / a^{(i-1)}, a^{(i-2)}, \dots, a^{(i-n)}) = p(a_k^i / a^{(i-1)}, a^{(i-2)}, \dots, a^{(i-n)}). \quad (1)$$

Соответственно выбор связности для цепей Маркова, аппроксимирующей вероятностный процесс, влияет на точность расчёта вероятностей, отражающих статистические связи между символами сообщения. Условие (1) определяет достаточность для состояний ЦМ, отражающей полноту учета статистических свойств источника сообщений. При этом изменение связности ЦМ от (1) в сторону увеличения приводит к избыточному описанию случайного процесса в модели и увеличению сложности вычислительного эксперимента, а уменьшение – к снижению точности результатов моделирования

Для условия (1) значение достаточной связности ЦМ рассчитывается с помощью автокорреляционной функции, общий вид которой для непрерывного сигнала определяется формулой (2).

$$R(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)f(t-r)dr, \quad (2)$$

где  $r$  – сдвиг по времени между сигналом  $f(t)$  и его копией  $f(t-r)$ .

Для дискретного процесса, представляемого временным рядом отсчетов, автокорреляционная функция имеет следующий вид:

$$R(k) = \frac{\sum_{t=k+1}^T (x_t - \bar{m})(x_{t-k} - \bar{m})}{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{m})^2}, \quad (3)$$

где  $T$  – длина выборки;  $k$  – сдвиг по количеству отсчетов;  $\bar{m}$  – выборочное среднее.

Автокорреляционная функция для случайного процесса определяет соответствие (связь) сигнала с его копией, сдвинутой по времени. Для оценки статистических свойств

задается порог, ниже которого связь считается незначимой и не учитывается при аппроксимации случайного процесса.

На рис. 1 представлена графическая интерпретация подхода к оцениванию величины статистических связей между элементами дискретного случайного процесса от количества позиций между ними на основе анализа значений автокорреляционной функции (АКФ).

Для двоичных случайных последовательностей значения коэффициентов АКФ  $R(k)$ , вычисляется по формуле (4), предложенной в работе [6]:

$$R(k) = \frac{\sum_{i=0}^{T-k-1} \varphi(x_i, x_{i+k})}{T-k}, \tag{4}$$

где  $\varphi(x_i, x_j) = \begin{cases} 1, & x_i = x_j \\ 0, & x_i \neq x_j \end{cases}$  – операторная функция, описывающая операцию отрицания сложения по модулю 2;  $T$  – длина последовательности  $X$ .

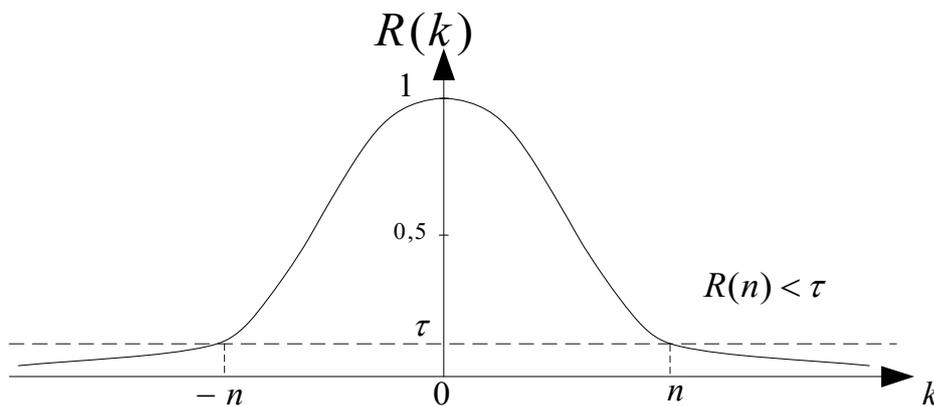


Рис. 1. График автокорреляционной функции, показывающий оценку связности для элементов дискретного случайного процесса

Таким образом, в  $l$ -связной цепи Маркова связь между последовательными элементами определяется зависимостью между  $n + 1$  соседними символами. Для вычисления ряда распределения многомерных двоичных комбинаций на некотором отрезке последовательности достаточно знать условные вероятности  $P(a_k^i / a^{(i-1)}, a^{(i-2)}, \dots, a^{(i-n)})$  появления символов алфавита  $a_k$ , задаваемые в виде матрицы переходных вероятностей, и распределение символов на предыдущих позициях по отношению к рассматриваемому интервалу  $a^{(i-1)}, a^{(i-2)}, \dots, a^{(i-n)}$ .

При описании двоичного источника сообщений  $l$ -связной  $k$ -ичной цепью Маркова матрица условных вероятностей имеет вид (5) с размерностью  $(2^k - 1)^l \times 2^k - 1$ , поскольку при описании двоичной последовательности на выходе источника сообщения в виде  $l$ -связной  $k$ -ичной цепи Маркова вероятность элемента сообщения из алфавита объема  $2^k$  определяется комбинацией из  $l$  символов алфавита того же объема.

$$P = \begin{pmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \cdot & p_{0,2^k-1} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & \cdot & p_{1,2^k-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{(2^k-1),0} & p_{(2^k-1),1} & \cdot & p_{(2^k-1),2^k-1} \end{pmatrix}, \tag{5}$$

В матрице (5) элементы  $p_{ij}$  определяют условные вероятности  $p(x_j|x_i)$  появления комбинаций  $k$ -ичных символов  $x_j$  при условии, что в предыдущий момент времени источник выдал комбинацию  $k$ -ичных символов  $x_i$ . Выражение (5) содержит полную информацию, достаточную для представления дискретного случайного процесса  $l$ -связной цепью Маркова, состоящего из двоичных последовательностей генерируемых источником сообщений.

Матрица (5) является стохастической и прямоугольной с неотрицательными элементами [7], сумма элементов каждой ее строки равна единице. Учитывая стационарность битовых последовательностей, для определения состояния, на произвольной  $i$ -й позиции достаточно знать начальные вероятности появления символов на первой или предыдущих  $l$  позициях. Графическая интерпретация процедуры аппроксимации цепью Маркова битовой последовательности для двоичного ИС представлена на рис. 2.

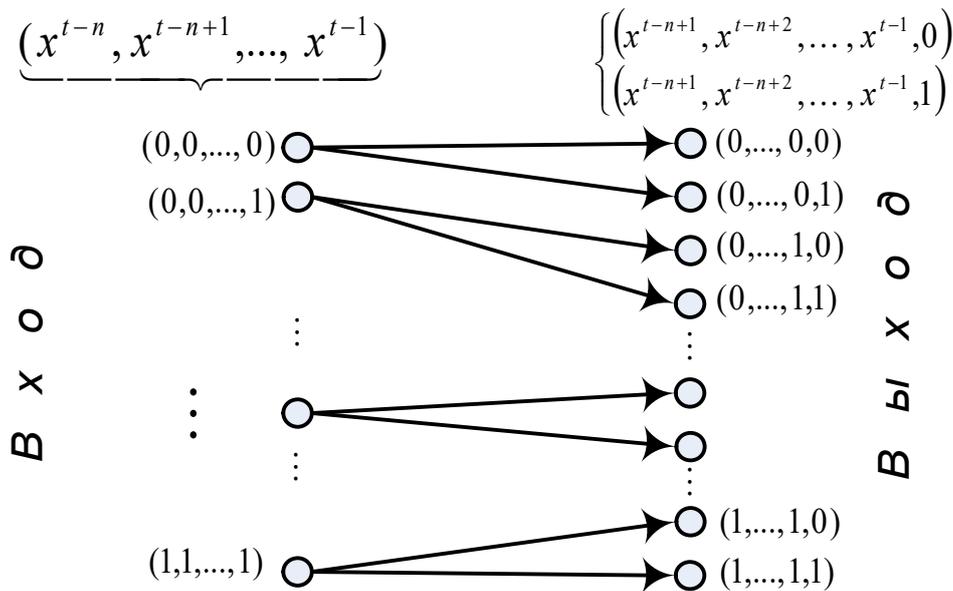


Рис. 2. Граф вероятностей переходов для двоичного источника сообщений при описании источника сложной цепью Маркова

Одним из условий акселерации трафика является возможность сжатия сообщений за счет снижения их избыточности в передаваемом цифровом потоке. Для разработки процедуры архивации ЦП рассмотрим описание источника сообщений цепью Маркова через категории энтропии и алфавита сообщения. Для эргодических источников корреляционные связи распространяются на конечное число элементов. При этом в последовательности существуют безусловные вероятности  $p(x_k)$  выбора  $k$ -го элементарного сообщения:

$$p(x_k) = \sum_{q=1}^r P_q p_q(x_k). \tag{6}$$

Для стационарного источника зависимых дискретных сообщений энтропия определяется как предел совместной энтропии  $H(x^{(a_0)}, x^{(a_1)}, \dots, x^{(a_n)})$  или условной энтропии  $H(x^{(a_n)} | x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n-1)})$ , т. е.

$$H(X) = \lim_{n \rightarrow \infty} H_n, \tag{7}$$

где

$$H_n = \frac{1}{n} H(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}) \text{ или } H_n = H(x^{(n)} | x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n-1)}), \tag{8}$$

$$H_q = - \sum_{k=1}^l p_q(x_k) \log p_q(x_k), \tag{9}$$

где  $H_q$  – математическое ожидание количества информации для элемента источника сообщения, находящегося в  $q$ -м состоянии (энтропия  $q$ -го состояния источника рассчитанную на один элемент).

С помощью процедуры усреднения рассчитаем энтропию источника на один элемент с учетом всех его состояний

$$H(x) = - \sum_{q=1}^r \sum_{k=1}^l P_q p_q(x_k) \log p_q(x_k). \tag{10}$$

Для случая, когда связи между элементами отсутствуют и исходят из безусловных вероятностей  $p(x_k)$ , получаем энтропию источника на один элемент в следующем виде:

$$H^* = - \sum_{k=1}^l \left( \sum_{q=1}^r P_q p_q(x_k) \right) \log \left( \sum_{q=1}^r P_q p_q(x_k) \right). \tag{11}$$

Если объемы алфавитов и вероятности появления элементов в сообщениях равны, то энтропия источника зависимых сообщений  $H$  всегда меньше энтропии источника независимых сообщений  $H^*$  и выполняется условие (12) [7, 8].

$$H_0 \geq H_1 \geq H_2 \geq \dots \geq H_n, \tag{12}$$

где  $H_0$  – максимальная энтропия;  $H_1$  – энтропия источника независимых сообщений;  $H_2$  – энтропия источника, когда учитывается статистическая связь между двумя элементарными сообщениями и т. д.

Представляет интерес сравнение энтропии, определяемой выражением (10), с максимально возможной энтропией, которая для данного алфавита определяется как (13)

$$H_{\max} = \log l. \tag{13}$$

С этой целью введено понятие избыточности сообщения, которая определяется по следующей формуле:

$$\chi_u = \frac{H_{\max} - H(X)}{H_{\max}} = 1 - \frac{H(X)}{H_{\max}} = 1 - \frac{H(X)}{\log l}. \tag{14}$$

Условие (13) и выражения (14, 15) показывают, что энтропия источника на элемент сообщения зависит от выбора алфавита (способа разделения сообщений на элементы). Пусть источник сообщений с объемом алфавита  $l_1$  имеет энтропию на элемент сообщения  $H_1$ . Произведем укрупнение алфавита, считая каждую последовательность из любых  $n$  элементов первичного алфавита одним элементом нового, вторичного алфавита. Очевидно,

что объем вторичного алфавита  $l_2 = l_1^n$ . Энтропия на один элемент вторичного алфавита  $H_2 = nH_1$ . Из определения количества информации следует, что в некотором конкретном элементе вторичного алфавита содержится ровно столько же информации, сколько ее содержится в  $n$  элементах первичного алфавита, входящих в его состав. Количество информации в одном конкретном элементе первичного алфавита  $\varphi$  является случайной величиной, принимающей различные значения для разных элементов. Количество информации в элементе вторичного алфавита  $\Phi$  является суммой  $n$  случайных величин  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ . Математическое ожидание величины  $\Phi$ , равное по определению  $H_2$ , как известно [12], равно сумме математических ожиданий слагаемых  $\varphi_k$  ( $k=1, \dots, n$ ), а так как каждое из последних равно  $H_1$ , то

$$H_2 = nH_1. \quad (15)$$

Определим избыточность вторичного алфавита  $\chi_{u2}$ . Максимальная энтропия для алфавита объемом  $l_2 = l_1^n$  составляет  $H_{2\max} = \log l_2 = n \log l_1$ , откуда, учитывая выражение (14), получим выражение (16)

$$\chi_{u2} = 1 - \frac{H_2}{H_{2\max}} = 1 - \frac{nH_1}{n \log l_1} = 1 - \frac{H_1}{H_{1\max}} = \chi_{u1}. \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что избыточность сообщения при укрупнении алфавита не изменяется.

При укрупнении алфавита ослабляются взаимные вероятностные связи между элементами сообщения. Если выбрать величину  $n$  значительно превосходящей протяженность действия вероятностных связей между элементами первичного алфавита, то вероятностными связями между элементами укрупненного алфавита можно пренебречь. Поскольку избыточность в процессе укрупнения не изменяется, то она должна практически полностью определяться неравномерностью распределения вероятностей элементов вторичного алфавита.

Таким образом, операция укрупнения алфавита служит для «декорреляции» элементов сообщения, т. е. для устранения взаимных вероятностных связей между ними. Энтропия  $H(X)$  определяет среднюю неопределенность состояния источника сообщений, являясь объективной характеристикой, и вычисляется априорно до получения сообщения, если известна статистика сообщений. Величина же  $I(H)$  определяется апостериорно, т. е. после получения сообщений. Другими словами,  $H(X)$  – мера недостатка информации о состоянии отдельной системы, и с поступлением информации о состоянии системы энтропия последней снижается (рис. 3).

### Выводы

Опираясь на результаты анализа свойств цифрового потока, условия применения цепей Маркова для аппроксимации случайных процессов, снижения избыточности источника сообщений и оценку информативности дискретных последовательностей можно сделать следующие выводы:

- возможность актуализации математического аппарата двоичных многосвязных цепей Маркова к свойствам ЦП опирается на возможность аппроксимации двоичных случайных последовательностей участками локальной стационарности и ограниченное число элементов последовательности, на которые распространяется корреляционные связи;

- выбор связности цепи Маркова, аппроксимирующей случайный процесс генерации двоичных символов, определяется глубиной корреляционных связей в наблюдаемом ЦП;

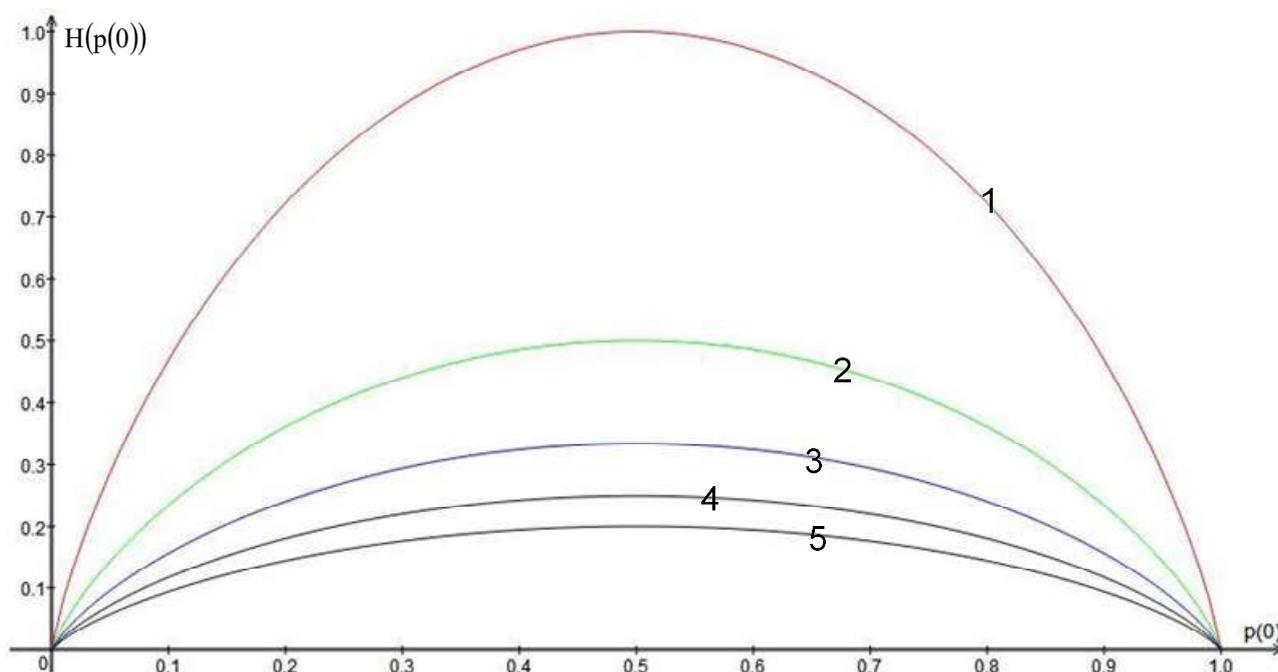


Рис. 3. Энтропия цифрового потока (1 – независимый случайный поток, 2 – односвязная ЦМ, 3 – двухсвязная ЦМ, 4 – трехсвязная ЦМ, 5 – четырехсвязная ЦМ)

– используя функцию автокорреляции и допустимый порог значимости, получено выражение для расчета критерия достаточности связности и описания всех возможных состояний цепи Маркова, отражающей статистические свойства источника сообщений;

– степень сжатия сообщения определяется его избыточностью, которая связана с энтропией источника сообщений, и зависит от способа разделения сообщений на элементы кодирования при сжатии (выборе алфавита). При этом укрупнение алфавита на величину, не превышающую глубину корреляционных связей, не приводит к изменению избыточности сообщения;

– аналитическая модель цифрового потока, помимо описания основных свойств процесса, позволяет рассчитать параметры, которые необходимы для разработки условий постановки и проведения математических вычислительных экспериментов, расстановки ограничений и экстраполяции полученного результата. Кроме того, аналитические выражения, полученные в модели, определяют общую математическую схему имитационной модели цифрового потока как инструмента его генерации с заданными свойствами.

### Литература

1. Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Назаров М. В., Финк Л. М. Теория передачи сигналов. – М.: Связь, 1980. – 288 с.
2. Коньшев М. Ю., Иванов В. А. Двоичные цепи Маркова и их приложения. Монография. – М.: РТУ – МИРЭА, 2023. – 184 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1998. – 576 с.
4. Вентцель Е. С., Овчарков Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988.
5. Баруча-Рид А. Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
6. Левин Б. Р., Шварц В. Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.

7. Комарович В. Ф., Устинов А. А. Совместное стохастическое кодирование сообщений нескольких избыточных источников в системах конфиденциальной связи // Информация и Космос. 2006. № 1. С. 91–100.

8. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. – М.: Радио и связь, 1987. – 384 с.

### References

1. Zyuko A. G., Klovsy D. D., Nazarov M. V., Fink L. M. *Teoriya peredachi signalov* [Theory of signal transmission]. Moscow. Svyaz Publ., 1980. 288 p. (in Russian).

2. Konyshov M. Yu., Ivanov V. A. *Dvoichny'e cepi Markova i ix prilozheniya* [Binary Markov chains and their applications]. Moscow. RTU – MIREA Publ., 2023. 184 p. (in Russian).

3. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnostej* [Probability theory]. Moscow. Higher School Publ., 1998. 576 p. (in Russian).

4. Wentzel E. S., Ovcharkov L. A. *Teoriya veroyatnostej i ee inzhenerny'e prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow. Nauka Publ., 1988 (in Russian).

5. Baruch-Reed A. T. *E'lementy` teorii markovskix processov i ix prilozheniya* [Elements of the theory of Markov processes and their applications]. Moscow. Nauka Publ., 1969. 512 p. (in Russian).

6. Levin B. R., Schwartz V. *Veroyatnostny'e modeli i metody` v sistemax svyazi i upravleniya* [Probabilistic models and methods in communication and control systems]. Moscow. Radio and Communications Publ., 1985. – 312 p. (in Russian).

7. Komarov V. F., Ustinov A. A. *Sovmestnoe stoxasticheskoe kodirovanie soobshhenij neskol`kix izby`tochny`x istochnikov v sistemax konfidencial`noj svyazi* [Joint stochastic encoding of messages from several redundant sources in confidential communication systems]. Information and Space. 2006. No. 1. Pp. 91-100 (in Russian).

8. Clark J., Kane J. *Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemax cifrovoj svyazi* [Coding with error correction in digital communication systems]. Moscow. Radio and Communications Publ., 1987. – 384 p. (in Russian).

Статья поступила 18 апреля 2024 г.

### Информация об авторах

*Маркин Алексей Валерьевич* – директор ФГУП «НТЦ «ОРИОН». Область научных интересов: моделирование сложных организационно-технических систем. Тел: +8(495)914-94-11, E-mail: markin.a.v@fgupntcorion.ru. Адрес: г. Москва, ул. Образцова, д. 38, стр.1.

*Иванов Владимир Алексеевич* – доктор военных наук, профессор, главный специалист ФГУП «НТЦ «ОРИОН». Область научных интересов: моделирование сложных организационно-технических систем. Тел.: +7-926-474-78-12, E-mail: iva.mac@mail.ru. Адрес: г. Москва, ул. Образцова, д. 38, стр. 1.

*Овсянкин Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, ведущий специалист ЦУП АО «Радиозавод им. А.А. Попова». Область научных интересов: моделирование сложных организационно-технических систем. Тел.: +7-910-748-28-39, E-mail: interleave@mail.ru. Адрес: г. Москва, ул. Радио, д. 21, стр.1.

*Иванов Иван Владимирович* – доктор технических наук, Ведущий научный сотрудник РТУ – МИРЭА. Область научных интересов: моделирование сложных организационно-технических систем. Тел.: +7-926-191-09-90, E-mail: iva.mac@mail.ru. Адрес: г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

### An analytical model of the digital flow coming from the output of the message source to the input of the traffic accelerator

A. V. Markin, V. A. Ivanov, S. V. Ovsyankin, I. V. Ivanov

**Annotation.** *The use of traffic optimizers makes it possible to increase the efficiency of using the bandwidth of communication networks by eliminating the redundancy of messages transmitted in communication channels and repetitive during the transfer of applications and service information. The article presents a mathematical model of digital current, developed using the mathematical apparatus of multiconnected binary Markov circuits. The approximation of the flow by a Markov random process is based on the finiteness of correlations between elements of binary sequences generated by message sources. The value of sufficient connectivity for the Markov chain is calculated using an autocorrelation function, which determines the correspondence of the signal with its time-shifted copy. From the perspective of traffic archiving, the description of the message source by the Markov chain through the categories of entropy and the alphabet of the message is considered. It is proved that redundancy in the process of alphabet enlargement does not change and is determined by the uneven probability distribution of the elements of the secondary alphabet. When the alphabet is enlarged, the mutual probabilistic connections between the elements of the message are weakened. When choosing the length of the secondary alphabet that exceeds the length of the probabilistic relationships between the elements of the primary alphabet, there are no probabilistic relationships between the elements of the enlarged alphabet. At the same time, redundancy does not change during the enlargement process and is almost completely determined by the uneven probability distribution of the elements of the secondary alphabet. **The aim of the work** is to determine the optimal length for the Markov chain, which provides a non-redundant and sufficiently accurate description of the random process, and the effect of the alphabet enlargement procedure on the redundancy of the compressed message. **The novelty of the work** consists in calculating sufficient connectivity for the Markov chain through an autocorrelation function, which determines the connection of the main signal with its copy, sequentially shifted in time to a given depth of samples. **The practical value** of the work lies in using the model to select optimal stream compression algorithms.*

**Keywords:** *mathematical model, binary random process, digital current, multi-connected Markov chain, autocorrelation function, message source, traffic generation*

### Information about the authors

*Alexey Valerievich Markin* – Director of FSUE "STC "ORION". Research interests: modeling of complex organizational and technical systems. Tel: +8(495)914-94-11, E-mail: markin.a.v@fgupntcorion.ru. Address: Moscow, Obraztsova str., 38/1.

*Ivanov Vladimir Alekseevich* – Doctor of Military Sciences, Professor, chief specialist of FSUE "STC "ORION". Research interests: modeling of complex organizational and technical systems. Tel: +7-926-474-78-12, E-mail: iva.mac@mail.ru. Address: Moscow, Obraztsova str., 38/1.

*Ovsyankin Sergey Vladimirovich* – Candidate of Technical Sciences, leading specialist MCC AO "Radio Plant named after A.A. Popov". Research interests: modeling of complex organizational and technical systems. Tel: +7-910-748-28-39, E-mail: interleave@mail.ru. Address: Moscow, Radio str, 21/1.

*Ivanov Ivan Vladimirovich* – Doctor of Technical Sciences, a leading researcher at RTU-MIREA. Research interests: modeling of complex organizational and technical systems. Tel: +7-926-191-09-90, E-mail: iva.mac@mail.ru. Address: 78 Vernadsky Avenue, Moscow.

### Библиографическая ссылка на статью:

Маркин А. В., Иванов В. А., Овсянкин С. В., Иванов И. В. Аналитическая модель цифрового потока, поступающего с выхода источника сообщений на вход акселератора трафика // Техника средств связи. 2024. № 2 (166). С. 58-66. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-58-66.

### Reference for citation:

Markin A. V., Ivanov V. A., Ovsyankin S. V., Ivanov I. V. An analytical model of the digital flow coming from the output of the message source to the input of the traffic accelerator. *Means of Communication Equipment*. 2024. No. 2 (166). Pp. 58-66. (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-58-66.

**ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

УДК 621. 317

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-67-88

**Постановка задачи на разработку метода синтеза системы сетевого мониторинга нового поколения**

Будко Н. П., Груздев А. А., Шаталов А. Е.

**Аннотация. Актуальность:** анализ особенностей развития современных информационно-телекоммуникационных сетей обращает внимание на географическую рассредоточенность источников и получателей информации, а также сетевых ресурсов; пульсирующий характер сетевого трафика; гетерогенность элементов сети и применяемых сетевых технологий; случайность режимов функционирования; реально существующую нестационарность основных характеристик. Все это влечет за собой практическую недостижимость полного математического описания сети и неприменимость существующих методов контроля ее состояния, а также актуальность поиска новых методов синтеза систем функционального контроля и мониторинга реального времени на базе интеллектуальных подходов. **Цель работы:** формализованная постановка задачи на разработку метода синтеза системы интеллектуального мониторинга распределенной информационно-телекоммуникационной сети. **Постановка задачи:** на основе многоуровневого подхода к описанию информационно-телекоммуникационных систем и методов синтеза сетевых инфраструктур осуществить постановку задачи на разработку метода синтеза системы интеллектуального мониторинга распределенной информационно-телекоммуникационной сети с использованием этапов структурного и параметрического синтеза, а также методов структурного анализа, позволяющих идентифицировать вид состояния сети в интересах системы ее ситуационного управления с целью недопущения перехода из работоспособного в предотказное и аварийное состояния. **Используемые методы:** модели и методы теории надежности; методы многоуровневого синтеза сложных технических систем; методы структурного синтеза и методы параметрического синтеза информационно-телекоммуникационных сетей, методы их объектно-субъектного описания. **Новизна:** интеллектуальность процесса идентификации отказов (аварийного состояния) сети связи обеспечивается применением мультиагентного подхода, процедурой анализа измерительной информации на основе технологии BigData с этапами оффлайн- и онлайн-анализа декларативных и процедурных знаний о техническом состоянии сетевых элементов и состоянии сети в целом, а задача синтеза перспективной системы интеллектуального мониторинга сводится к задаче управления сетевыми ресурсами на сенсорном, телекоммуникационном и диспетчерском уровнях. **Результаты:** осуществлена вербальная и математическая постановка задачи по разработке метода синтеза системы интеллектуального мониторинга состояния информационно-телекоммуникационной сети, а также технических и технологических решений по реализации данного метода. **Практическая значимость:** предложенная математическая постановка задачи на разработку метода позволяет не только проводить структурно-параметрический синтез системы мониторинга нового поколения, но и осуществить структурный анализ состояния сети в целом, соответственно на сенсорном, телекоммуникационном и диспетчерском уровнях ее построения в системном аспекте в режиме мягкого реального времени в процессе ее функционирования.

**Ключевые слова:** диспетчерский уровень, задача параметрического синтеза, задача структурного синтеза, интеллектуальный мониторинг, информационно-телекоммуникационная сеть, сенсорный уровень, сетевой мониторинг, системы мониторинга, телекоммуникационный уровень.

**Введение**

Стремительное развитие информационно-телекоммуникационных и интеллектуальных технологий (ИТ) в новом тысячелетии привели к существенным изменениям в понимании сущности, путей развития и методов построения перспективных информационно-

телекоммуникационных сетей (ИТКС) и систем общего пользования (ОП) на межведомственном и корпоративном уровнях. При этом для успешного решения задач поддержания распределенных сетевых инфраструктур в готовности к эффективному использованию, а также обеспечения безаварийной эксплуатации гетерогенного комплекса сетевого оборудования в целом крайне важно применение современных концепций и перспективных подходов к синтезу систем мониторинга его функциональной безопасности на основе обращения к интеллектуальным *IT*-решениям и измерительным технологиям нового поколения. Это связано прежде всего с тем, что современные ИТКС ОП имеют следующие особенности построения и функционирования [1]:

- географическая распределенность источников, получателей информации, ресурсов сети;
- пульсирующий характер генерируемого в разных часовых поясах сетевого трафика;
- гетерогенность (разнородность) элементов сети и применяемых сетевых технологий;
- трудности, а порой и невозможность, построения полноценной математической модели мультисервисной сети в целом, и отдельных ее подсетей, при несомненной необходимости в ней;
- случайность режимов функционирования ИТКС, что влечет за собой сложности при проведении ситуационного в ходе мониторинга её состояния и организации управления;
- существенная нестационарность функциональных состояний ИТКС и технического состояния ее элементов, вызывающая разную реакцию на одну и ту же ситуацию в разное время.
- необъяснимая «нетерпимость» ИТКС ОП к управлению, под которой понимают то, что гетерогенная сеть связи предназначена прежде всего для сопряжения и передачи информации, а не для управления ею, т. е. функционирует независимо от системы управления.

Беря во внимание изложенные особенности построения и функционирования ИТКС ОП, а также высокие темпы эволюции современных комплексов связи, их систем управления и контроля, включающей *этап автоматизации* (1970–1990 гг.), *этап интеграции* (1990–2010 гг.), *этап унификации* (2010–2030 гг.), необходимо отметить, что мы вплотную подошли к рубежу, когда сложными гетерогенными распределенными сетевыми инфраструктурами управлять вручную невозможно из-за несовершенства существующего научно-методического аппарата диагностики и систем контроля, ориентированных на применение в однородных (гомогенных) сетевых структурах, а также о необходимости поиска новых технических и технологических решений и подходов к синтезу систем распределенного мониторинга функционального состояния сетевых элементов и всей сети в целом, на основе новых методов интеллектуального мониторинга [2, 3]. По сути, мы находимся в начале *этапа интеллектуализации* (до 2050 г.)

Все это выводит на первый план *актуальность* поиска новых методов синтеза систем функционального контроля и мониторинга реального времени на базе интеллектуального подхода. При этом возникает ряд сложных задач, среди которых выделяется задача своевременного получения измерительной информации (ИИ) о техническом состоянии (ТС) территориально-распределенных элементов системы, важной для организации эффективной процедуры управления ею в режиме реального времени как со стороны *SLA*-инженеров телеком-оператора, так и со стороны автоматизированной системы управления связью (АСУС). Решающее значение при реализации этой задачи играет структура системы мониторинга и непосредственно организация процедуры сетевого мониторинга [4].

*Целью статьи* является вербальная и формализованная постановка задачи на разработку метода синтеза системы интеллектуального мониторинга распределенной ИТКС ОП ведомства.

## 1. Степень разработанности темы

В соответствии с историей зарождения и развития сетей связи сложилось, что задача синтеза территориально-распределенных ИТКС рассматривается с позиции трех важных этапов:

- структурного синтеза;

- параметрического синтеза;
- выбора методов управления на них [1].

Учитывая, что структуры систем контроля (мониторинга) накладываются на структуры ИТКС, то может показаться, что этап синтеза системы мониторинга сводится к синтезу самой сети. Однако это не так. Синтезируемая система контроля будет иметь три уровня функционирования:

- сенсорный (сбор информации о функциональном состоянии сетевых элементов);
- телекоммуникационный (объединяет каналный ресурс для передачи ИИ диспетчеру);
- диспетчерский (обработка ИИ и представление результатов в удобном виде для АСУС).

При этом отметим наличие значительных отличий технологий управления современными ИТКС ОП от технологий контроля и мониторинга, что требует для распределенных гетерогенных сетевых инфраструктур решения самостоятельной задачи синтеза их систем мониторинга.

В современной телекоммуникационной отрасли синтез систем мониторинга процессов функционирования географически распределенных ИТКС исследован весьма слабо. Связано это прежде всего с тем, что каждая корпорация-производитель и оператор связи, ориентированные на продвижение своих ИТ-продуктов и услуг старается скрыть существенные наработки в технологиях распределенного мониторинга за вывеской коммерческой тайны («Ноу-хау»), на что накладываются также и значительные ограничения на трансферт технологий, затрудненные незаконной, но активно применяемой Западом сегодня санкционной политикой товаров и услуг.

Современные ИТКС можно всецело отнести к гетерогенным сетям (сетевые структуры, образующиеся посредством объединения различных сетей ведомств с разными принципами построения, сетевыми технологиями доставки и/или защиты информации, и/или программно-аппаратными средствами [5]), что также накладывает определенные трудности на особенности синтеза их систем мониторинга. При этом в ходе решения задачи синтеза систем мониторинга нового поколения на гетерогенных ИТКС фундаментальной проблемой остается, как и прежде – эффективное использование и согласование всего комплекса сетевых ресурсов с ресурсами систем контроля, для обеспечения качества обслуживания (*QoS – Quality of Service*) пользователей [6].

В работах [2-5] рассмотрены вопросы организации процедуры мониторинга состояния ИТКС, в то же время, на географически распределенных сетях связи эту задачу необходимо решать с привлечением распределенных систем искусственного интеллекта (РСИИ) и автоматизации [7, 8] (вручную администрировать сложные территориально распределенные системы невозможно). При этом важно выработать эффективные процедуры получения в интересах систем поддержки принятия решения (СППР) и АСУС достоверных данных, как о ТС элементов сети, так и о функциональном состоянии ИТКС в целом, а также протекающих в них процессах. Причем системы мониторинга глобальной, региональной либо локальной сети, фактически анализируют измерительную информацию с помощью операций ее сбора и получения, передачи и хранения, обработки и представления, поиска и прогноза на распределенной ИТКС, что является задачей далеко не тривиальной.

Для решения такой задачи необходимо согласование структуры системы мониторинга с действующей структурой ИТКС (*структурный синтез*), а также разработка общих методов оптимизации вероятностно-временных характеристик (ВВХ) и параметров этих сложных систем (*параметрический синтез*) при обмене ИИ в интересах обеспечения качества процесса сетевого мониторинга, включая его достоверность, оперативность и точность [9].

В отдельных научных публикациях [10] предлагается решить данную сетевую задачу на физическом и канальном уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС), что соответствует звену передачи данных. Однако такой подход не позволяет считать распределенную ИТКС единым целым с позиции взаимодействия ее систем, каналов и устройств в процессе функционирования, и, соответственно, не позволяют получить оптимального (а скорее всего – рационального для глобальных структур) распределения

значений параметров и ВВХ сети для входящей в неё системы мониторинга, обеспечивающих минимизации средней задержки ИИ, являющуюся не менее важной составляющей *QoS*, чем вероятность отказов, т. е. происходит разобщенный синтез ИТКС и ее системы мониторинга.

Научные школы и направления в области контроля ТС сложных динамических систем, а именно О. В. Абрамова, С. П. Ксёнга, А. В. Назарова, Г. Г. Раннева, В. В. Федоренко, Л. А. Фомина, Ф. Л. Черноусько, и других выдающихся ученых [2, 11], ведут поиск решения подобных задач, как в теории надежности и технической диагностике, так и в родственных теориях, однако эти разработки слабо ориентированы к решению задач контроля динамично меняющихся распределенных сетевых инфраструктур. При этом следует обратить внимание на активно развивающиеся сегодня интеллектуальные системы контроля (ИСК) и мониторинга (ИСМ) [12, 13] состояния сложных динамических систем на основе мультиагентного подхода с использованием интеллектуальных агентов (ИА), а также методов РСИИ [7, 8], которые отличает от адаптивных высокая оперативность, чувствительность к аварийным режимам функционирования, и которые характеризуются возможностью реплицирования измерительной информации от смежных серверов мониторинга, а также аккумуляции на этой основе совокупности знаний о состоянии наблюдаемого объекта контроля (ОК) в виде правил применения методик идентификации его ТС и отсутствием ограничений на масштаб процесса контроля, присущих адаптивным системам контроля. Исходя из этого интеллектуальный подход, учитывающий свойства ИТКС и ИСМ нового поколения, позволит нивелировать «временной разрыв», технологическую и техническую отсталость существующих средств контроля от опережающего развития ИТКС ОП [7, 14].

Решение задачи синтеза системы сетевого мониторинга невозможно без опоры на многоуровневый подход, чему посвящено большое число публикаций зарубежных и отечественных ученых в областях теории контроля, теории управления, общей теории связи. Из них особо следует обратить внимание на труды Д. Д. Кловского, В. В. Игнатова, А. М. Лихачева, В. Ф. Комаровича, О. Н. Маслова, Е. Н. Хохлачева и многих других. Также звенья измерительных систем как элементов ИТКС на физическом и канальном уровне ЭМВОС рассматриваются на методологической базе статистической теории связи, получившей свое фундаментальное развитие в работах зарубежных и отечественных научных школ, например Д. Миддлтона, Э. Сейджа, Б. Р. Левина, Ю. Г. Сосулина, В. И. Тихонова, Г. И. Тузова, Г. П. Тартаковского и др. Важной особенностью изложенных в них методов передачи ИИ является достижение их высокой эффективности лишь в условиях стационарных или квазистационарных случайных процессов, протекающих в сетях связи и их звеньях, при низком уровне априорной неопределенности относительно их статистических ВВХ. Повышение эффективности функционирования измерительной системы на сети связи возможно путем расширения диапазона статистических ситуаций введением стохастического многокритериального управления ее структурой, режимами работы, параметрами, и сетевыми ресурсами. Научные основы теории стохастического оптимального управления изложены в работах Р. Беллмана, Р. Е. Калмана Н. А. Красовского, Н. Н. Красовского, Б. Н. Петрова, и др. При этом математической основой синтеза систем мониторинга выступают теории массового обслуживания и теория очередей. Инструментом же моделирования процедур мониторинга, как составляющей процесса управления сетевыми ресурсами является теория телетрафика, основные научные направления которой включают исследования физических ресурсов сети, а также ресурсов информационно-измерительных систем, оказывающих мониторинговые услуги. Данным научным направлением занимались У. Шернер, Б. Валльстрем и др. Наряду с этим, сегодня бурно развивается еще одно направление теории телетрафика, изучающее логические ресурсы сети и средств контроля.

Нынешний уровень техники сетевого мониторинга также можно представить некоторыми техническими устройствами и способами, совокупность которых после увязки

единой целевой установкой можно квалифицировать как научно-обоснованным технологическим решением (*технологией*).

Известно устройство адаптивного контроля и управления системой передачи информации [15], которое состоит из системы передачи информации, источника возмущений и помех, устройства идентификации (контроля), регистрирующего устройства и устройства управления.

Недостатком данного устройства является относительно низкая достоверность контроля, а наличие всего одного контура управления для распределенной системы требует измерения и обработки огромного числа параметров, и, как следствие, увеличения времени контроля и объемов передаваемых данных управления, при ее обработке приборами низкой производительности.

Также известно устройство, реализующее способ автоматического контроля и адаптивного управления распределенной системой [16], которое состоит из распределенной системы, сопряженной с источником помех, и соединенной с первым и вторым блоками измерений, выходы которых поступают на блок идентификации состояния системы, связанный с шиной априорных сведений о системе и подключенный к блоку управления, взаимодействующим с распределенной системой и источником помех.

Недостатком данного устройства является то, что в процессе функционального контроля и управления распределенной системой на её локальном или глобальном уровнях, не осуществляется статистический анализ разносторонних внутренних и внешних дестабилизирующих факторов (ДФ) и режимов нагрузки для каждого из уровней.

В качестве прототипа к создаваемой системе мониторинга использовано устройство, описывающее способ многоуровневого комплексного контроля технического состояния (ТС) радиоэлектронных систем (РЭС) [17] и состоящее из распределенной группы ОК в виде радиоэлектронного оборудования (РЭО) по нескольким уровням разукрупнения, соединенных с распределенными блоками датчиков по каждому из уровней, связанных выходной шиной «Измерительная информация» с устройством комплексного контроля ТС и управления РЭС сопряженной шиной «Управляющая информация» с РЭО распределенной группы ОК.

Недостатком прототипа является то, что в процессе выработки управляющего воздействия устройство ориентировано на оценку ТС отдельных ОК, не учитывая интеллектуального анализа РСИИ состояния всей распределенной РЭС, переориентированной с «ручного» на автоматизированное управление связью. Также в устройстве не производится статистический анализ разносторонних ДФ, режимов нагрузки на каждом из уровней распределенной РЭС и оценки достаточности аппаратных, канальных и структурных ресурсов по ее уровням управления.

## **2. Формирование структуры системы интеллектуального мониторинга ИТКС ОП на основе многоуровневого подхода**

Структуру системы сетевого мониторинга рассмотрим с позиции многоуровневого синтеза, при этом представление ИТКС ОП в виде иерархической территориально-распределенной системы, позволяющей осуществлять перераспределение её аппаратного, канального и структурного ресурсов с целью недопущения аварийных состояния сети системой мониторинга в зависимости от текущего на данный момент времени состояния ИТКС, рис. 1.

Многоуровневый подход к построению системы интеллектуального мониторинга, направленный на поддержание сети в функциональном состоянии, заключается в принятии оперативных решений СППР (2) на основе поступающей из ИТКС ОП министерства (ведомства) (1) измерительной информации, обработанной системой интеллектуального мониторинга ситуационного центра (СЦ) (3) в его серверах сенсорного (3.1), телекоммуникационного (3.2) и диспетчерского (3.3) уровней.

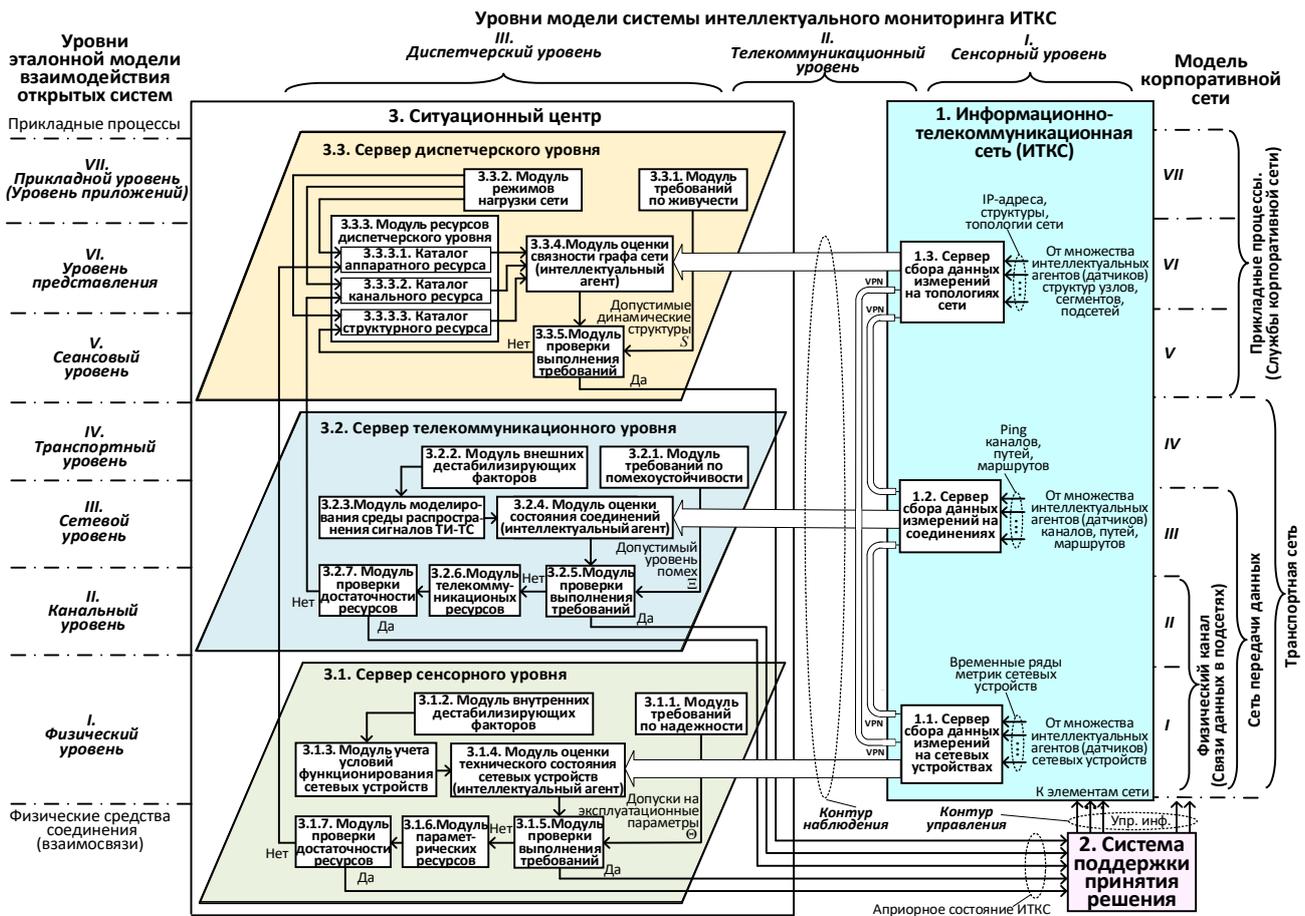


Рис. 1. Многоуровневый подход к постановке задачи синтеза системы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС ОП, как к задаче управления ее ресурсами

Выходная информация серверов каждого уровня управления ресурсами характеризует априорное состояние ИТКС в виде задействованных на них ресурсов, а также рекомендаций по запрашиваемым недостающим сетевым ресурсам в интересах СППР при управлении сетевыми элементами. При этом, используя многоуровневый подход к построению ИТКС, функционал серверов сенсорного уровня совпадает с функциями *физического* уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС), телекоммуникационного – с функциями *канального, сетевого и транспортного* уровней ЭМВОС (характеризующих транспортную сеть по модели корпоративной сети), а диспетчерского – с функциями уровней ЭМВОС: *сеансового, представления и приложений* (охватывающих прикладные процессы служб корпоративной сети) [1, 5]. Причем особый интерес представляет возможность системы производить самоподстройку (адаптацию) под имеющиеся условия, в процессе функционирования ИТКС, не снижая при этом показатели качества процедуры мониторинга.

Причем важно отметить, что функционирование системы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС ОП осуществляется с использованием трех основных этапов:

- первый этап (*формирование контура наблюдения*) реализован в ИТКС ОП (1);
- второй этап (*идентификация вида технического состояния*) реализован на ситуационном центре (3), обеспечивающем функционирование сетевой инфраструктуры;
- третий этап (*формирование контура управления*) реализован в СППР (2), функционирующей самостоятельно (см. рис. 1) или входя в состав ситуационного центра министерства (ведомства).

Как отмечалось выше, исторически сложилось, что задача синтеза глобальных ИТКС рассматривается с точки зрения трех основных этапов: структурного синтеза, параметрического синтеза и выбора методов управления на них [1, 5]. Поэтому с позиции структурного синтеза перспективной системы мониторинга ИТКС, распределенной на большой территории (ИТКС министерства или ведомства), как правило, имеет трехуровневую иерархию, включающую:

– *сенсорный уровень*, где осуществляется сбор ИИ о функциональном состоянии сетевых элементов. Применительно к модели ЭМВОС, соотносящийся с физическим уровнем ИТКС, он представлен сенсорами в виде программно-реализуемых интеллектуальных агентов (ИА-датчиков), размещаемых на всех сетевых элементах (устройствах, каналах и трактах, подсетях);

– *телекоммуникационный уровень*, объединяет каналы телеизмерений-телесигнализации (ТИ-ТС) для передачи ИИ от ИА-датчиков сети к интеллектуальным агентам СЦ (ИА-преобразователям), соотносится с канальным, сетевым и транспортным уровнями ЭМВОС;

– *диспетчерский уровень*, производит сбор измерительной информации, ее обработку и представление результатов в удобном виде для принятия решения на диспетчерском пункте управления (ДПУ) предприятия, (СЦ ведомства) или в СППР. Соответственно этот уровень системы мониторинга охватывает уровни ЭМВОС: сеансовый, представления, приложений. На рис. 1 второй этап реализован на ситуационном центре, а третий – в СППР, получающей информацию после ситуационного анализа – на ДПУ ИТКС ОП.

### **3. Формирование контура наблюдения (сбора измерительной информации) на сенсорном уровне системы интеллектуального мониторинга ИТКС ОП**

Многоуровневое представление ИТКС позволяет перейти от строгой централизации к децентрализованному управлению ею и осуществлять децентрализованный мониторинг [18].

При реализации децентрализованного мониторинга формирование контура наблюдения (первого этапа мониторинга) заключается в том, что с ИА-датчиков элементов сети осуществляется сбор ИИ отдельно на сервера сбора данных измерений на сетевых устройствах (1.1), на соединениях (1.2) (каналах, путях, маршрутах) и на топологиях сети (1.3) (подсетях, сегментах и узлах, на рис. 1 не показаны). Причем на каждом из этих сетевых устройствах и элементах может быть по несколько ИА-датчиков, которые транслируют ИИ на соответствующие серверы (1.1, 1.2, 1.3) временные ряды метрик тех или иных их параметров и характеристик. Так же и серверов сбора данных измерений может быть больше (в зависимости от сложности структуры распределенной сети). Это вызвано тем, что для наблюдения за ТС сложного сетевого устройства одного сенсора, даже если это интеллектуальный агент недостаточно. Поэтому метрики значений контролируемых параметров, получаемые в различные интервалы времени в виде временных рядов, должны дополнять друг друга и поступать с нескольких ИА-датчиков. В этом случае необходимо объединить метрики наблюдаемых параметров, полученных с одного сетевого устройства, но разными серверами мониторинга. Для чего каждый из серверов (1.1, 1.2, 1.3 на рис. 1) связан высокоскоростными *VPN*-трактами с соседними серверами по назначению для репликации данных измерений таким образом, что от одного интеллектуального агента измерительная информация может быть доступной на нескольких серверах сбора данных измерений, например, как показано на рис. 2 и в табл. 1. В них представлен пример осуществления мониторинга состояния единого дифференциального сервиса Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS/GALILEO при его использовании в Министерстве транспорта Российской Федерации в интересах сегментов ИТКС Федеральных Агентств Росавтодора, Росжелдора, Росавиации, Росморречфлота и Ространснадзора для управления движением поездов (ДП), автомобильным транспортом (АПК «Умный город»), систем связи и радиотехнического обеспечения при организации системы управления воздушным движением (ВД), систем автоматизированного управления (АСУ) движения судов (ДС) на внутренних водных путях и в морских акваториях. При этом серверы сбора данных измерений размещаются как на

телекоммуникационных структурах автомобильных и железных дорог, районов воздушного движения и районных администраций бассейнов рек (озер), так и присутствуют на Единых центрах управления (ЕЦУ) ДП, ЕЦУ ВД, ЕЦУ ДС и в СЦ Минтранса России. В данной сетевой инфраструктуре группа маршрутизаторов  $D1 - D12$  представляют фактические сетевые устройства, соединенные между собой оптоволоконными либо радиоканалами и образующие ячеистую сеть. Вокруг них показаны серверы мониторинга  $M1 - M6$ , взаимодействующие друг с другом для обмена измерительной информацией (репликации) и координации своих действий.

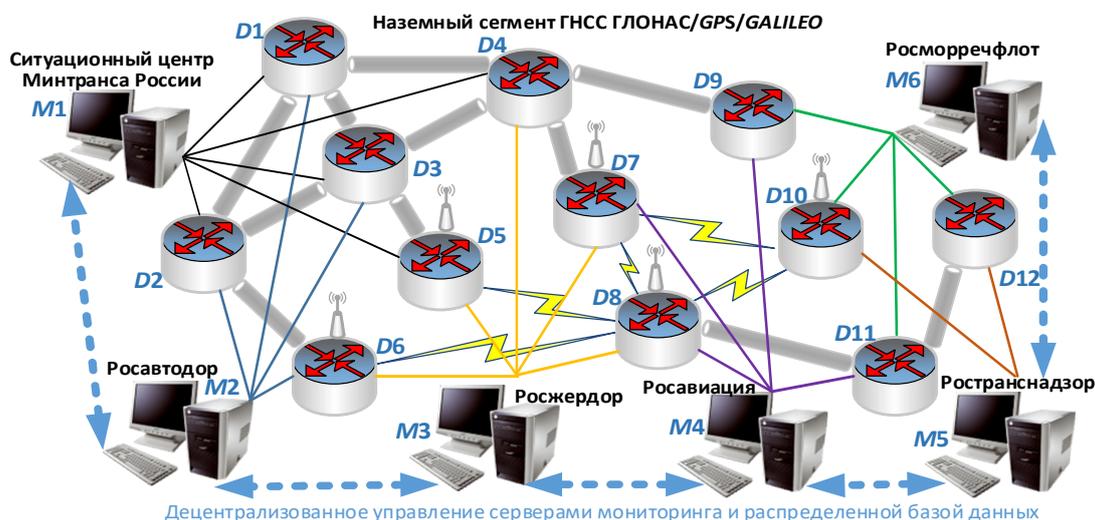


Рис. 2. Децентрализованная подсистема сетевого мониторинга (на примере Минтранса России)

Таблица 1 – Сопоставление серверов мониторинга и сетевых устройств (на рис. 2)

Сетевое устройство	Сервер мониторинга	Сетевое устройство	Сервер мониторинга	Сетевое устройство	Сервер мониторинга
$D1$	$M1, M2$	$D5$	$M1, M3$	$D9$	$M4, M6$
$D2$	$M1, M2$	$D6$	$M2, M3$	$D10$	$M5, M6$
$D3$	$M1, M2$	$D7$	$M3, M4$	$D11$	$M4, M6$
$D4$	$M1, M3$	$D8$	$M3, M4$	$D12$	$M5, M6$

Измерительная информация от ИА-датчиков поступает на взаимодействующие с ними ИА-преобразователи серверов мониторинга для последующего выявления аварийных состояний (отказа сетевого оборудования).

#### 4. Представление телекоммуникационного уровня системы интеллектуального мониторинга ИТКС ОП

Как было показано выше, телекоммуникационный уровень объединяет каналы ТИ-ТС для передачи измерительной информации от ИА-датчиков сети ИА-преобразователям ситуационного центра, а также высокоскоростные каналы и тракты репликации между серверами, и соотносится с каналным, сетевым и транспортным уровнями ЭМВОС ( $OSI$ ). При этом в качестве канального ресурса телекоммуникационного уровня могут использоваться фактически каналы всех родов связи, доступные на объектах размещения и в зависимости от особенностей размещения ОК в различных средах (космическое, воздушное, наземное, надводное и подводное пространство). Многообразие каналов связи в различных средах еще не говорит о достаточности канального ресурса, поскольку не все из них могут быть доступны на объектах размещения ОК и серверов мониторинга. Мало того, для эффективного их применения по назначению необходимо, чтобы и уровень ДФ различной природы, воздействующий на среду передачи ИИ (сигналов ТИ-ТС), обеспечивал требуемые значения вероятности связи в линиях связи системы мониторинга ИТКС ОП.

Для обеспечения гарантированного доведения измерительной информации от объектов контроля (ИА-датчиков) до серверов мониторинга (ИА-преобразователей) в работе предлагается использовать ряд запатентованных технических решений [19] для повышения помехоустойчивости обмена данными, возможные к применению на радио- и гидроакустических каналах, как наиболее подверженных различным помехам и шумам (их относят к каналам низкой надежности и высоким коэффициентом ошибок).

Для передачи ИИ по радиоканалам и трактам ТИ-ТС с ОК критически важной инфраструктуры предлагается использовать новые сигнально-кодовые конструкции (СКК) на основе применения линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов с левым и правым градиентами наклона вместо традиционных «точек» и «тире» Азбуки Морзе, которые являются более помехоустойчивыми к сосредоточенным по спектру сигнала ТУ-ТС или шумовой помехам, рис. 3. При этом традиционная СКК Азбуки Морзе (с «точками» и «тире» в виде вертикальных элементов на спектрограмме) полностью подавляется сосредоточенной по спектру помехой, наблюдаемой на спектрограмме (в квадранте «время – частота», рис. 3 *а*) в виде вертикальной линии, в то время, как предлагаемая СКК на основе применения ЛЧМ-сигналов хорошо визуализируется оператором, а следовательно устойчиво идентифицируется с применением цифровой фильтрации в режиме автоматического приема сигналов ТУ-ТС системой мониторинга. При этом возможна модификация предлагаемой СКК на основе использования сигналов дискретно меняющихся по закону ЛЧМ (ДЛЧМ-сигналов) также с левым и правым градиентами наклона (рис. 3 *б*, *в*). Более подробно данные технические решения описаны в работе [20]. Важно учесть, что применение новых СКК в перспективных системах мониторинга потребует обновления парка существующих систем контроля на программно-аппаратные ИСМ на базе многоканальных технических средств.

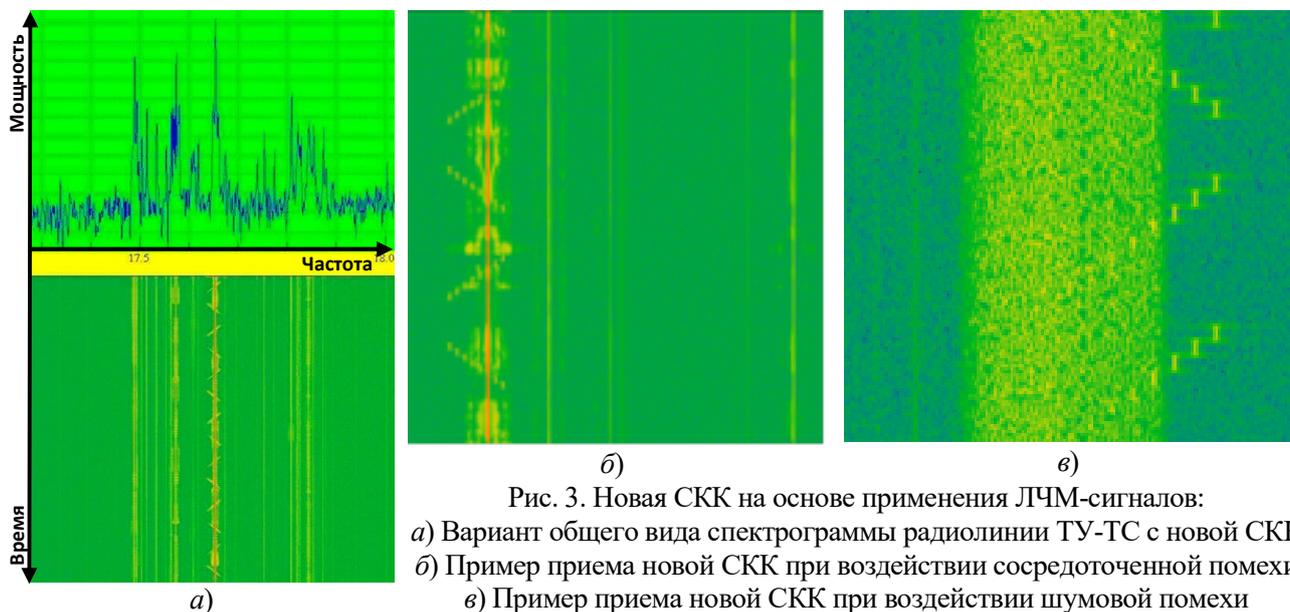


Рис. 3. Новая СКК на основе применения ЛЧМ-сигналов:  
*а*) Вариант общего вида спектрограммы радиолинии ТУ-ТС с новой СКК  
*б*) Пример приема новой СКК при воздействии сосредоточенной помехи  
*в*) Пример приема новой СКК при воздействии шумовой помехи

## 5. Выработка рекомендаций на управление сетевыми ресурсами в интересах СППР на втором этапе сетевого мониторинга серверами ситуационного центра

Как было указано в п. 2, второй этап процедуры сетевого мониторинга реализуется на диспетчерском уровне (III) системы мониторинга, т. е. на ситуационном центре (3), обеспечивающем эффективное функционирование сетевой инфраструктуры, (рис. 1). Ключевыми элементами СЦ ИТКС ОП являются серверы сенсорного, телекоммуникационного и диспетчерского (3.1, 3.2, 3.3) уровней, формально выполняющие обработку поступающей от сенсорного уровня (I) через телекоммуникационный уровень (II) измерительной информации, определяющих априорное состояние ИТКС и осуществляющие

оценку задействования доступных на каждом из уровней управления сетевыми ресурсами (параметрическими, телекоммуникационными и структурными), а также ресурсами резервирования диспетчерского уровня (аппаратного, канального и топологического) в интересах СППР (2) контура управления.

При этом ИИ в виде временных рядов метрик сетевых устройств, собранных от их ИА-датчиков сервером сбора данных измерений на сетевых устройствах (1.1) поступает в модуль оценки ТС сетевых устройств (3.1.4) *сервера сенсорного уровня*, программно выполненного в виде ИА-преобразователя, на второй вход которого поступает статистическая информация от модуля учета условий функционирования сетевых устройств (3.1.3), построенного на основе специального программного обеспечения алгоритмов реализации промышленных испытательных стендов сетевого оборудования, моделирующего условия функционирования устройств сети на основе внутренних ДФ (температура, влажность при эксплуатации, динамические изменения питающих напряжений, нарушения электромагнитной совместимости и пр.), полученных из модуля внутренних ДФ (3.1.2). Причем оценка ТС сетевых устройств, полученная в одноименном модуле 3.1.4 по метрикам параметров сетевых устройств и статистических данных модуля учета условий функционирования сетевых устройств (3.1.3), сравнивается с допусками на эксплуатационные параметры  $\Theta$ , поступающими из модуля требований по надежности (3.1.1) в модуле проверки выполнения требований (3.1.5). В случае соответствия значения измеренного параметра сетевого устройства заданному допуску на эксплуатационный параметр  $\Theta$ , информация по выходу «Да» из модуля 3.1.5 передается в СППР (2). В случае нарушения измеренного значения эксплуатационного параметра по допуску  $\Theta$ , информация по выходу «Нет» из модуля 3.1.5 передается в модуль параметрических ресурсов (3.1.6), где осуществляется подбор необходимого параметрического ресурса для регулировки наблюдаемого параметра до нормы с проверкой в модуле проверки достаточности ресурсов (3.1.7) на возможность возврата его в зону допуска. При осуществлении такой возможности по выходу «Да» модуля 3.1.7 информация о задействовании параметрического ресурса сетевого элемента по регулируемому параметру поступает в СППР, в противном случае через выход «Нет» модуля 3.1.7 передается запрос в каталог аппаратного ресурса (3.3.3.1) из состава модуля ресурсов диспетчерского уровня (3.3.3) на замену неправильно функционирующего основного устройства на резервное. По результатам этого ситуационного анализа реализуется управление аппаратным ресурсом в интересах СППР.

Измерительная информация в виде временных рядов метрик параметров каналов, путей, маршрутов, собранных от их ИА-датчиков сервером сбора данных измерений на соединениях (1.2) поступает в модуль оценки состояния соединений (3.2.4) сервера телекоммуникационного уровня, программно выполненного в виде ИА-преобразователя, на второй вход которого поступает статистическая информация от модуля моделирования среды распространения сигналов ТИ-ТС (3.2.3), построенного на основе алгоритмов реализации математических моделей дискретных каналов связи, например, показанных в [10], которые на основе возможных внешних помех и воздействий естественного и искусственного происхождения, полученных из модуля внешних ДФ (3.2.2) моделирует среду передачи. Причем оценка состояния соединений, полученная в одноименном модуле 3.2.4 из временных рядов метрик сетевых соединений и статистических данных модуля моделирования среды распространения сигналов ТИ-ТС (3.2.3) сравнивается с допустимым уровнем помех  $\Xi$ , поступающими из модуля требований по помехоустойчивости (3.2.1) в модуле проверки выполнения требований (3.2.5). В случае соответствия вероятности ошибки  $p_{\text{ош}}$  в математической модели канала связи (вероятности связи  $P_{\text{св}}$  в радиолинии, или коэффициента ошибок  $K_{\text{ош}}$  в тракте доведения, на сетевом маршруте) заданному (допустимому или требуемому) значению по помехоустойчивости  $p_{\text{ош}}^{\text{доп}}, P_{\text{св}}^{\text{тр}}, K_{\text{ош}}^{\text{доп}}$ , информация по выходу «Да» из модуля 3.2.5 передается в СППР (2). В случае нарушения измеренного значения помехоустойчивости ( $p_{\text{ош}}, P_{\text{св}}, K_{\text{ош}}$  и др.) требуемому (допустимому) значению  $p_{\text{ош}}^{\text{доп}}, P_{\text{св}}^{\text{тр}}, K_{\text{ош}}^{\text{доп}}$ , информация по выходу «Нет» из модуля 3.2.5 передается в модуль

телекоммуникационных ресурсов (3.2.6), где осуществляется подбор необходимого телекоммуникационного ресурса для доведения (регулировки) наблюдаемого параметра (например, переход с основной на запасную (резервную, дневную, ночную) частоту, повышение уровня передачи в тракте, изменение сигнально-кодовой конструкции при воздействии помех, увеличении (снижении) мощности излучения и пр.) до нормы с проверкой в модуле проверки достаточности ресурсов (3.2.7) на возможность возврата его в зону допуска по помехоустойчивости. При осуществлении такой возможности по выходу «Да» модуля 3.2.7 информация о задействовании телекоммуникационного ресурса сетевого соединения (канала связи) поступает в СППР (2), в противном случае через выход «Нет» модуля 3.2.7 передается запрос в каталог канального ресурса (3.3.3.2) из состава модуля ресурсов диспетчерского уровня (3.3.3) сервера диспетчерского уровня (3.3) на замену непригодного канала связи (тракта, маршрута) функционирующего сетевого соединения на резервный, в том числе и с использованием различных родов связи (радио, космос, провод и пр.). По результатам этого ситуационного анализа реализуется управление канальным ресурсом в интересах СППР.

Измерительная информация в виде временных рядов метрик параметров сетевых структур, собранных от их ИА-датчиков сервером сбора данных измерений на топологиях сети (1.3) поступает в модуль оценки связности графа сети (3.3.4) сервера диспетчерского уровня, программно выполненного в виде ИА-преобразователя, на второй, третий и четвертый входы которого поступает информация от каталогов, соответственно, аппаратного (3.3.3.1), канального (3.3.3.2) и структурного (3.3.3.3) ресурса из состава модуля ресурсов диспетчерского уровня (3.3.3) об используемых ресурсах каждого уровня. Расчетная оценка связности графа сети поступает в модуль проверки выполнения требований (3.3.5), на другой вход которого транслируются допустимые требования по живучести (связности) структуры сети, необходимые для определения уровня деградации ИТКС, а также в случае перехода ее из ненагруженного в нагруженный и перегруженный режим функционирования, способный вызвать блокировку сети. Функционирование модуля оценки связности графа сети может осуществляться различными способами, известными из теории графов, например методы на основе расстояния редактирования графов и процедуры применения средних графов для выявления аномальных состояний сети (*msa*, *mma*, *msd*, *mmd*) [12]. В случае определения нормального функционирования ИТКС через выход «Да» модуля 3.3.5 в СППР (2) передается информация о задействованном ресурсе текущей топологии сети, в противном случае через выход «Нет» модуля 3.3.5 передается запрос в каталог структурного ресурса (3.3.3.3) из состава модуля ресурсов диспетчерского уровня (3.3.3) сервера диспетчерского уровня (3.3) на изменение топологии сети, для вывода ИТКС из состояния блокировки. По результатам этого анализа реализуется управление структурным ресурсом ИТКС.

Третий этап (*формирование контура управления*) – реализован в СППР (2), предназначенной для выработки управляющих воздействий на элементы ИТКС (1) на основе информации, поступающей из СЦ (3) по шине «Априорное состояние ИТКС» для поддержания ее в функциональном состоянии (СППР широко распространены в АСУС и системах ситуационного управления на СЦ, известны по структурам, задачам и функциям [1] и в данном случае подробно не рассматриваются). При этом необходимо отметить, что все выходы «Да» модулей проверки выполнения требований (3.1.5, 3.2.5 и 3.3.5) в каждом из серверов 3.1, 3.2 и 3.3, а также модулей проверки достаточности ресурсов (3.1.7 и 3.2.7) из состава серверов 3.1 и 3.2 объединяются в шину «Априорное состояние ИТКС» в интересах СППР, поскольку в реальном масштабе времени (масштабе мягкого реального времени) отображают состояние контролируемой сети при нормальном ее функционировании. Эти сведения крайне важны при выработке управляющего воздействия СППР, особенно те, которые поступают из модулей проверки достаточности ресурсов (3.1.7, 3.2.7) соответственно из состава серверов сенсорного (3.1) и телекоммуникационного (3.2) уровней для выработки управляющих воздействий по регулировкам параметров аппаратных и канальных сетевых элементов. Сведения же, поступающие в СППР (2) из модуля проверки выполнения требований (3.3.5) из состава сервера

диспетчерского уровня (3.3) необходимы для выработки управляющих воздействий по замене основных аппаратных и канальных средств сети на резервные. Причем выходы СППР «Управляющая информация» доходят до каждого сетевого элемента ИТКС, объединены в шину и замыкают *контур управления* модели системы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС.

#### **6. Формирование контура управления (выработки управляющих воздействий) в системе поддержки принятия решения ситуационного центра ИТКС ОП**

Как было указано в п. 2, третий этап процедуры сетевого мониторинга реализуется в СППР (2), рис. 1, предназначенной для выработки управляющих воздействий на элементы ИТКС (1) на основе информации, поступающей из СЦ (3) по шине «Априорное состояние ИТКС» для поддержания ее в функциональном состоянии (СППР широко распространены в АСУС и системах ситуационного управления на СЦ, известны по структурам, задачам и функциям [4]).

Вариант построения структурной схемы СППР на основе интеллектуального анализа данных (ИИ) представлен на рис. 4. Особенностью данной схемы является внедрение в СППР (2) технологии *Hadoop* (в виде хранилища данных 2.1) на основе использования аналитики больших объемов данных (*Big Data*) в виде собираемой с распределенных телекоммуникационных инфраструктур измерительной информации и систематизации ее в виде так называемых «витрин данных» [21] (2.2), например, с помощью блока многомерных данных (2.3), построенного на базе технологии *OLAP*-кубов (*On-Line Analytical Processing* – интерактивный анализ данных) [22, 23].

Новизна такого решения для формирования системы интеллектуального мониторинга состоит в применении «витрин данных» о техническом состоянии устройств распределенной ИТКС, формируемых с помощью мультиагентного подхода от совокупности нескольких серверов сбора данных измерений (1.1, 1.2, 1.3 на рис. 1), работающих под системами сетевого мониторинга (*Prometheus*, *Zabbix* и пр.), где данные (ИИ) реплицируются во времени с использованием *VPN*-трактов, и после обработки серверами ситуационного центра (3.1, 3.2, 3.3) поступающие в хранилище данных (2.1 на рис. 4) СППР. По выходе «Сырые данные» неструктурированные данные из хранилища данных через «Витрину данных» (2.2) поступают в блок многомерных данных (2.3). В данном случае в предложенном варианте СППР используется многомерная система в виде *MOLAP*-куба, где данные в виде ИИ об каждом сетевом элементе (устройстве, канале, подсети) представляется *n*-мерным кубом, в котором по осям обозначены контролируемые параметры, а на их пересечении находятся данные с их значениями.

Пример построения (формирования) трёхмерного *MOLAP*-куба метрик сетевого устройства, как со стороны децентрализованной системы интеллектуального мониторинга ИТКС ОП, наблюдаемой несколькими серверами мониторинга (серверами сбора данных измерений), так и со стороны внутренней системы контроля, приведён на рис. 5. При этом по одной оси *MOLAP*-куба могут откладываться временные ряды, характеризующие функционирование процессора, по другой – относящиеся к загрузке памяти, по третьей – интерфейса и т. д. Причем пользователь (оператор) могут выбирать нужные в заданное время параметры и получать измерительную информацию по разным измерениям. При необходимости может быть выполнен «срез» и агрегация статистики изменения измерительной информации одного сетевого устройства (пути, маршрута, канала) на заданном временном интервале и у оператора системы появляется возможность одновременной визуализации наиболее важных метрик как в заданное время, так и на предыдущем временном отрезке.

Это позволяет *OLAP*:

– моделировать поведение сети при изменениях функциональной безопасности её структур;

- выявлять между разными метриками причинно-следственные связи;
- строить гипотезы и прогнозировать развитие аварии (отказа);
- диагностировать причины аварийных состояний и отказов на сети.

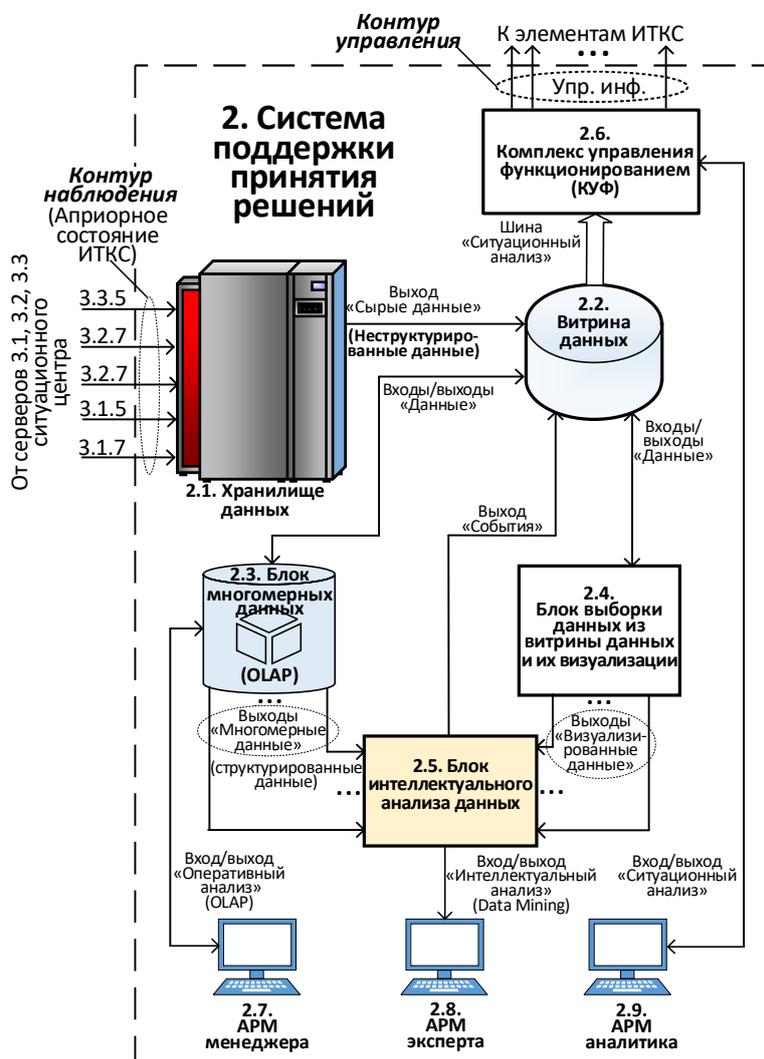


Рис. 4. Структурная схема системы поддержки принятия решения на основе интеллектуального анализа данных (Вариант)

Другим ключевым элементом СППР является блок интеллектуального анализа данных (2.5), см. рис. 4, к функциям которого можно отнести формирование «витрины данных» в виде «таблицы событий» как «таблицы фактов» о состоянии объекта мониторинга.

Функциональная схема данного блока приведена на рис. 6, на которой показаны программно реализованные модули отображения (2.5.1) и диспетчеризации событий (2.5.2), базы знаний, совмещенной с базой правил (2.5.3), а также компоненты оффлайн- и онлайн-анализа (2.5.4, 2.5.5) с модулями диагностики отказов, обнаружения аномалий и прогноза технического состояния сетевых элементов. Через выход «События» блок интеллектуального анализа данных (2.5) сопряжен с витриной данных (2.2) позволяющей визуализировать как техническое состояние отдельных сетевых элементов, так и общее состояние функционирования всей распределенной ИТКС, учитывая ее аварийное (предаварийное) состояние, вызывающее деградацию и блокировку.

В российском научном сообществе построением «Витрин данных» на основе многомерных кубов данных систем мониторинга с представлением сети как единого целого одними из первых занимались в научной школе профессора Ю. М. Шерстюка [22, 23].

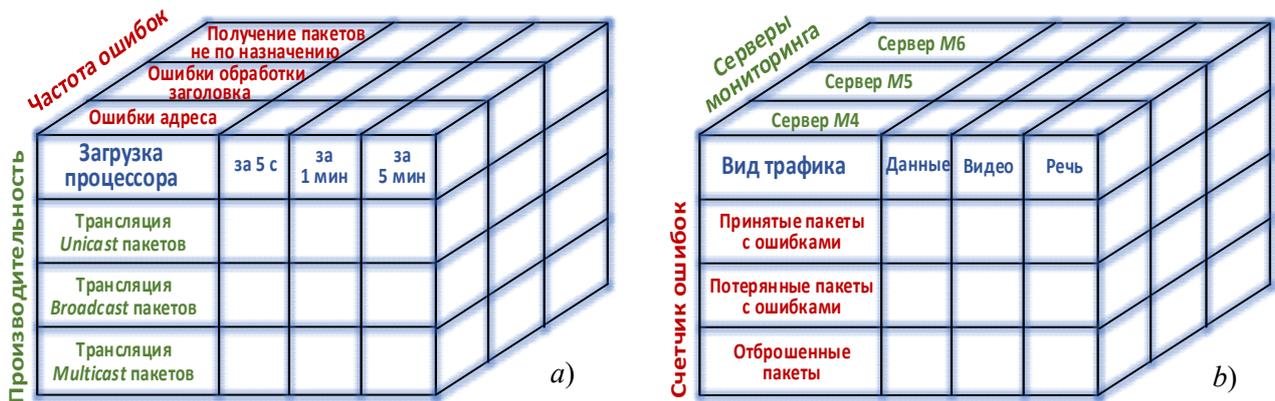


Рис. 5. Вариант формирования трёхмерного MOLAP-куба метрик одного сетевого элемента: а) его внутренней системой контроля; б) децентрализованной системой мониторинга ИТКС

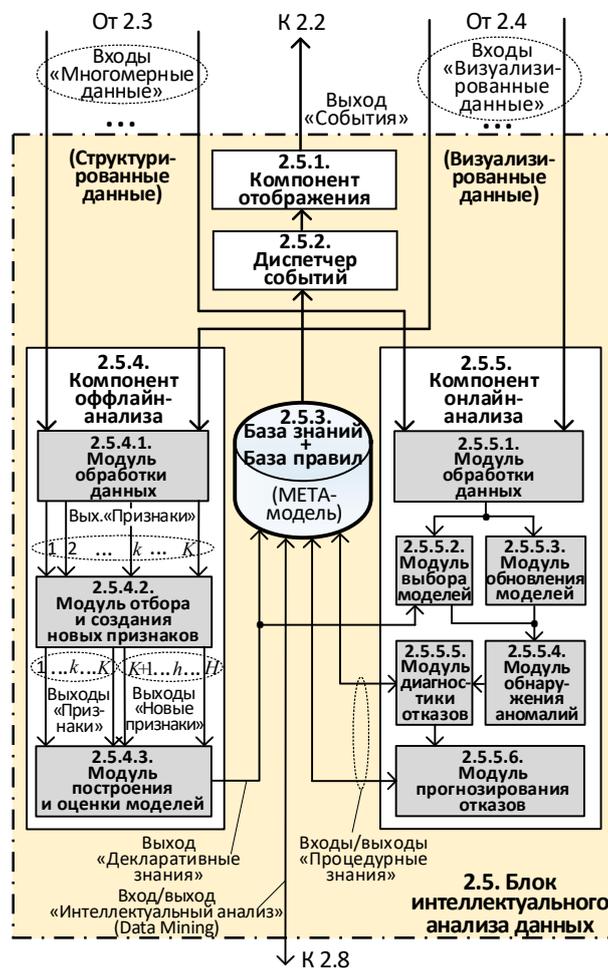


Рис. 5. Функциональная схема блока интеллектуального анализа данных (Вариант)

На рис. 6 представлены варианты использования «Витрин данных» на ситуационных центрах и в СППР. Здесь же показан вариант размещения на ситуационном центре автоматизированных рабочих мест (АРМ) менеджера (2.7), эксперта (2.8) и аналитика (2.9), обозначенных на рис. 4 и сопряженных соответственно с блоком (2.3) многомерных данных (OLAP), блоком интеллектуального анализа данных (2.5) и комплексом управления функционированием (2.6).

*Этап формирования контура управления* (выработки управляющих воздействий) непосредственно реализуется в комплексе управления функционированием (КУФ) (2.6, рис. 4), предназначенном для выработки управляющих воздействий на элементы ИТКС на основе информации, поступающей из ситуационного центра по шине «Априорное состояние ИТКС», многомерной (в блоке 2.3) и интеллектуальной (в блоке 2.5) обработки данных измерений, визуализации протекающих в объектах мониторинга событий посредством «Витрины данных» (2.2) и представления по шине «Ситуационный анализ» в КУФ данных для последующего ситуационного управления при выработке управляющей информации в интересах поддержания ИТКС ОП в функциональном состоянии (КУФ достаточно широко распространены в автоматизированных системах управления и системах ситуационного управления (СЦ), известны по структурам, задачам, функциям, и в статье подробно не рассматриваются). При этом выходы КУФ «Управляющая информация» доходят до каждого сетевого элемента ИТКС, объединены в шину и замыкают *контур управления* предлагаемой структуры системы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС ОП.



Рис. 6. Вариант представления «Витрин данных» с отображением событий анализа Big Data на примере: а) размещения оборудования СППР: АРМ эксперта, АРМ менеджера (SLA-инженера), АРМ аналитика; б) АРМ диспетчера системы управления движением судов (федеральное агентство Росморречфлота)

### 7. Формализованная (математическая) постановка задачи на разработку метода синтеза системы сетевого мониторинга нового поколения

Исходя из сказанного, любой сетевой элемент, взаимодействующий в системе, как ОК можно представить в виде кортежа  $G(\Theta, \Xi)$ , где  $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$  – наблюдаемые параметры (параметрический ресурс сенсорного уровня, модуль 3.1.6, рис. 1), а  $\Xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$  – условия эксплуатации ОК, включая различные среды передачи сигналов ТИ-ТС в процессе мониторинга (телекоммуникационный ресурс: каналы связи с различными средами передачи, модуль 3.2.6). Тогда, критерий качества функционирования системы интеллектуального мониторинга можно задать в виде функционала  $\Phi = \Phi(G, S)$ , где  $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$  – структура системы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС (ресурсы диспетчерского уровня, модуль 3.3.3). В связи с вышеизложенным, под процессом интеллектуального мониторинга называется такая стратегия, которая всякую пару  $\Phi = \Phi(G, S)$  приводит к цели – правильной идентификации состояния ИТКС и ее элементов, формируя в интересах СППР результаты ситуационного анализа для последующего использования сетевых ресурсов с целью недопущения аварийного состояния (деградации) ИТКС ОП, что является задачей формирования контура управления ею.

Тогда задача на разработку метода синтеза системы мониторинга нового поколения для ИТКС ОП сводится к последовательному решению оптимизационных задач на *сенсорном*  $\Theta^*$ , *телекоммуникационном*  $\Xi^*$  и *диспетчерском*  $S^*$  уровнях иерархии, соответственно реализуемых серверами сенсорного, телекоммуникационного и диспетчерского уровней (3.1, 3.2, 3.3) СЦ:

$$\Theta^* = \arg \operatorname{extr}_{\Theta} \Phi[G(\Theta, \Xi), S], \Theta \in \Omega_{\Theta}, \quad (1)$$

$$\Xi^* = \arg \operatorname{extr}_{\Xi} \Phi[G(\Theta, \Xi), S], \Xi \in \Omega_{\Xi}, \quad (2)$$

$$S^* = \arg \operatorname{extr}_S \Phi[G(\Theta, \Xi), S], S \in \Omega_S, \quad (3)$$

где  $\Omega_{\Theta}$ ,  $\Omega_{\Xi}$ ,  $\Omega_S$  – допустимые множества, в рамках которых варьируются параметры элементов сети, их условия эксплуатации и условия эксплуатации системы мониторинга, а также структура системы мониторинга нового поколения на основе использования параметрических, телекоммуникационных ресурсов и ресурсов диспетчерского уровня в модулях 3.1.6, 3.2.6 и 3.3.3.

Исходя из этого, в описании осуществления модели использована совокупность трех групп показателей: показателей внутренних условий функционирования системы на сенсорном уровне  $\Theta^*$  – по выражению (1) при управлении параметрическими ресурсами сетевых устройств; показателей внешних условий функционирования системы на телекоммуникационном уровне  $\Xi^*$  – по выражению (2) при управлении каналными ресурсами; показателей общих требований к качеству функционирования системы на диспетчерском уровне  $S^*$  – по выражению (3). При этом в каждом из серверов 3.1, 3.2, 3.3 за обеспечение заданных требований отвечают соответствующие модули требований по надежности (3.1.1), помехоустойчивости (3.2.1), живучести (3.3.1), транслирующие, соответственно требования по допускам эксплуатационных параметров  $\Theta$  сетевых устройств, допустимому уровню помех  $\Xi$  в соединениях и допустимым динамическим структурам сети  $S$ , фиксируя нижний уровень деградации ИТКС в целом.

Данные группы показателей можно использовать под конкретную решаемую задачу таким образом, что какие-то фиксировать в качестве исходных данных, или ограничений, а другие рассматривать как показатели качества, рассчитываемые при структурно-параметрическом синтезе, и которые выделять в группу показателей качества системы интеллектуального мониторинга  $Q$ .

Связующим звеном между основными этапами предложенной системы мониторинга состояния ИТКС ОП в соответствии с принятой стратегией мониторинга и различными видами элементарных его циклов, совокупность которых позволяет сформировать процедуру интеллектуального мониторинга в целом, являются алгоритмы выбора методов контроля и распределения (перераспределения) ресурсов  $\Omega$  системы мониторинга. Выбор того или иного алгоритма определяется видом и степенью неоднородности объектов контроля, степенью их автономности, оперативностью процедуры мониторинга, объемом проводимых операций, достоверностью и оценкой информации о состоянии ИТКС в целом и ее элементов, среды их функционирования (внутренние и внешние ДФ), а также наличием ресурсов, ограничивающих область принятия решений.

При этом важно отметить, что адаптивность алгоритма мониторинга означает, что цель обеспечивается на всем классе объектов контроля и функционалов принятия решений. Поэтому в данном процессе, вообще говоря, остается неизвестным, с помощью каких ресурсов из допустимых множеств ( $\Omega_{\Theta}$ ,  $\Omega_{\Xi}$ ,  $\Omega_S$ ) осуществляется мониторинг [24].

Внутренние характеристики системы «ИТКС – ситуационный центр – СППР» можно представить группой параметров распределения потребляемых ресурсов  $x$  по алгоритмам заданного логического уровня сети при мониторинге состояния сетевых элементов, определяющих аналитическую связь по формулам (1) – (3) между группами характеристик

$$Q = F(\Phi, \Xi, \Omega).$$

В такой постановке задачи, фиксируя две любые группы внешних характеристик (например, характеристик требований к сенсорному и телекоммуникационному уровню, модули 3.1.1, 3.2.1 на рис. 1), по метрикам третьей группы принимается решение об эффективности процедуры мониторинга технического состояния сетевых устройств (при свертке в один показатель  $Q$ ) в целом на заданном уровне. Причем решение оптимизационной задачи

распределения ресурсов заключается в максимизации выбранного показателя  $Q$  через поиск значений параметров  $x \in X = X(\Omega)$ . Данная запись означает зависимость допустимого множества значений  $X$  от внутренних  $\Theta$  и внешних  $\Xi$  ресурсов системы интеллектуального мониторинга, что позволяет на одном уровне провести декомпозицию внешних характеристик при контроле требуемых значений показателей качества других уровней. Это позволит строить взаимно увязанные иерархические модели. Поскольку функционирование сетевых элементов рассматривается в виде контролируемого процесса, реагирующего на изменения состояния ОК и изменения внешних условий, то важно подробно рассмотреть задачи мониторинга на разных уровнях системы, для учета особенностей при решении задач оптимизации ресурсов ИТКС. Приведенные на рис. 1 виды ресурсов сенсорного, телекоммуникационного и диспетчерского уровня системы интеллектуального мониторинга служат составляющими для формирования топологических структур ИТКС в итоге.

### Заключение

Исходя из сказанного и выбранного многоуровневого представления системы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС в описании модели, основная ее задача не может быть решена с помощью известных методов одноуровневой оптимизации, использующих довольно простые аналитические выражения для целевых функций или вероятностно-параметрические модели процесса мониторинга с небольшим числом состояний такого распределенного ОК как ИТКС, и потому требует применения новых интеллектуальных подходов и технологий к исследованию процессов функционирования и мониторинга состояния компонент и элементов ИТКС (сетевых устройств, каналов, подсетей) на основе принципов многоуровневого моделирования, последовательной декомпозиции целей и задач, комплексного оценивания ТС объекта мониторинга, прогнозирования отказа и итеративной процедуры выработки решений.

Таким образом, возникает самостоятельная задача по формированию метода перспективной системы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС ОП на основе многоуровневого подхода, в которой задача синтеза такой системы решается как задача распределения ресурсов на втором и третьем уровнях (телекоммуникационном, диспетчерском), учитывая, что первый уровень представлен локально сервером сенсорного уровня с малыми возможностями по наращиванию структуры сети.

Учитывая вышеизложенное, под синтезом системы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС можно понимать такую стратегию, приводящую всякую пару  $\Phi = \Phi(G, S)$  к цели – правильной идентификации состояния сети и ее элементов при решении оптимизационных задач (1)–(3), выбором методов РСИИ, где критерий качества функционирования системы мониторинга задан функционалом  $\Phi = \Phi\{G(\Theta, \Xi), S\}$ , и решается на базе мультиагентных систем и интеллектуальных агентов (датчиков – со стороны ИТКС, преобразователей – со стороны СЦ), обладающих большей оперативностью, чувствительностью к аварийности, характеризующихся возможностью обновления и аккумуляции совокупности знаний о наблюдаемом техническом состоянии объекта контроля, а также отсутствием ограничений по масштабу процесса мониторинга по сравнению с адаптивными системами, как прототипом модели синтезируемой системы интеллектуального мониторинга.

В первую очередь при этом возникает самостоятельная задача по формированию общей структуры и обобщенной архитектуры перспективной системы сетевого мониторинга, совершенствованию принципов ее внутрисетевой организации и разработке концептуальной модели подсистемы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС на основе многоуровневого подхода, в которой задача синтеза подсистемы мониторинга ИТКС решается как задача распределения ресурсов на втором и третьем уровнях (телекоммуникационном и диспетчерском), учитывая, что первый уровень представлен локальным сервером мониторинга.

В итоге, исходя из вышеизложенного и сформулированной цели, общая задача исследования декомпозирована на ряд частных задач:

1) Концептуальное моделирование подсистемы интеллектуального мониторинга состояния ИТКС ОП.

2) Разработка метода синтеза подсистемы интеллектуального мониторинга состояния распределенной ИТКС ОП, включающего этапы структурного и параметрического синтеза.

3) Разработка технических и технологических решений в виде устройств (систем) и способов интеллектуального мониторинга, объединяемых в технологию интеллектуального мониторинга распределенных ИТКС ОП.

При этом интеллектуальность процесса идентификации отказов (аварийного состояния) сети связи обеспечивается применением мультиагентного подхода, процедурой анализа измерительной информации на основе технологии *BigData* с этапами оффлайн- и онлайн-анализа декларативных и процедурных знаний о техническом состоянии сетевых элементов и состоянии сети в целом, а задача синтеза перспективной системы интеллектуального мониторинга сводится к задаче управления сетевыми ресурсами на сенсорном, телекоммуникационном и диспетчерском уровнях информационно-телекоммуникационной сети общего пользования и системы интеллектуального мониторинга её состояния.

### Литература

1. Будко П. А. Управление ресурсами информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации: монография. СПб.: Военная академия связи, 2012. 512 с.

2. Будко П. А., Винограденко А. М., Меженев А. В., Чикирев А. А. Способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 235-283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108.

3. Будко П. А., Винограденко А. М., Кузнецов С. В., Гойденко В. К. Реализация метода многоуровневого комплексного контроля технического состояния морского робототехнического комплекса // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 4. С. 71-101. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-04/04-Budko.pdf>

4. Зацаринный А. А., Шабанов П. А. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. – М. : ТОРУС ПРЕСС, 2015. – 232 с.

5. Инфокоммуникационные сети: энциклопедия. Кн. 4. Гетерогенные сети связи: принципы построения, методы синтеза, эффективность, цена, качество / П. А. Будко, И. А. Кулешов, В. И. Курносов, В. И. Мирошников; под ред. проф. В. И. Мирошникова. М.: Наука, 2020. 683 с.

6. Будко П. А., Линец Г. И., Мухин А. В., Фомин Л. А. Эффективность, цена и качество информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации: монография. СПб.: ВАС, 2011. 420 с.

7. Винограденко А. М. Методология интеллектуального контроля технического состояния автоматизированной системы связи специального назначения. – СПб.: Научно-технические технологии, 2020. – 180 с.

8. Пузанков Д. В., Мирошников В. И., Пантелеев М. Г., Серегин А. В. Интеллектуальные агенты, многоагентные системы и семантический Web: концепции, технологии, приложения. – СПб.: ООО «Технолит», 2008. – 292 с.

9. Будко П. А., Голунов М. В., Аллакин В. В. Повышение надежности средств радиосвязи автоматизированного радицентра за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов в процессе функционального контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 204-227. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.

10. Ершов В. А., Ершова Э. Б., Ковалев В. В. Метод расчета пропускной способности звена Ш-ЦСИС с технологией АТМ при мультисервисном обслуживании // Электросвязь. 2000. № 12. С. 20-23.

11. Абрамов О. В. Планирование профилактических коррекций параметров технических устройств и систем // Информатика и системы управления. 2017. № 3 (53). С. 55-66.

12. Аллакин В. В., Будко Н. П., Васильев Н. В. Общий подход к построению перспективных систем мониторинга распределенных информационно-телекоммуникационных сетей // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 125-227. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-125-227.
13. Сухопаров М. Е., Лебедев И. С. Модели анализа функционального состояния элементов устройств сетей и телекоммуникаций «Индустрии 4.0». СПб.: Политех-Пресс, 2020. 121 с.
14. Бакланов И. Г. Оправдание OSS. М.: Издательские решения, 2016. 131 с.
15. Левин Б. Р., Шварц В. Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. М.: Радио и связь, 1985. С. 268.
16. Фомин Л. А., Будко П. А., Линец Г. И., Рачков В. Е., Гайчук Д. В., Шлаев Д. В. Способ автоматического контроля и адаптивного управления распределенной системой и устройство для его осуществления. Патент RU № 2312389 МПК G06F 15/76; G05B 23/02, опубл. 10.12.2007, бюл. № 34. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_37588932\\_70523354](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37588932_70523354) (дата обращения 12.06.2024).
17. Будко П. А., Федоренко В. В., Винограденко А. М., Кузнецов С. В., Литвинов А. И., Самойленко В. В. Способ многоуровневого комплексного контроля технического состояния радиоэлектронных систем. Патент RU № 2694158 МПК G06B 23/02; G01R 31/28, опубл. 09.07.2019, бюл. № 19. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_40991556\\_95558450](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_40991556_95558450) (дата обращения 12.06.2024).
18. Будко Н. П. Концептуальная модель подсистемы интеллектуального мониторинга состояния информационно-телекоммуникационной сети общего пользования // Системы управления, связи и безопасности. 2021. №5. С. 65-119. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-5-65-119.
19. Будко Н. П., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жолдасова А. Е., Жуков Г. А., Кулешов И. А., Мальцев Д. С., Мирошников В. И., Николашин Ю. Л., Фатюхин И. Н. Способ передачи и приема бинарной информации по каналам радиосвязи в неавтоматическом режиме (Варианты). Патент RU № 2605045 МПК H04L 17/00, опубл. 20.12.2016, бюл. № 35. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_37413014\\_37569863](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37413014_37569863).
20. Будко Н. П. Методы доведения измерительной информации от удаленных и глобально перемещающихся объектов до сервера мониторинга распределенной информационно-телекоммуникационной сети Росморречфлота // Техника средств связи. 2022. № 2 (158). С. 77-100. DOI 10.24412/2782-2141-2022-2-77-100.
21. Будко Н. П., Васильев Н. В., Груздев А. А. Сбор и обработка больших данных в системах мониторинга информационно-телекоммуникационных сетей средствами технологии Hadoop // Техника средств связи. 2023. № 1 (161). С. 78-88. DOI: 10.24412/2782-2141-2023-1-78-88.
22. Воронков К. Л., Григорьева А. И., Шерстюк Ю. М. Автоматизация описания и построения многомерных кубов данных // X Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика – 2006 (РИ-2006)», Санкт-Петербург, 24-26 октября 2006 г.: Материалы конференции. – СПб.: СПОИСУ, 2006. – С. 28-29.
23. Воронков К. Л., Григорьева А. И., Шерстюк Ю. М. Организация сбора и использование ретроспективных данных мониторинга средств телекоммуникаций // X Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика – 2006 (РИ-2006)», Санкт-Петербург, 24-26 октября 2006 г.: Материалы конференции. – СПб.: СПОИСУ, 2006. – С. 77.
24. Будко, Н.П. Постановка задачи синтеза подсистемы мониторинга распределенной информационно-телекоммуникационной сети общего пользования // I-methods. 2021. № 4. С. 1-15.

## References

1. Budko P. A. *Upravlenie resursami informacionno-telekommunikacionnyh sistem. Metody optimizacii* [Resource Management of information and telecommunication systems. Optimization methods]. St. Petersburg, Military Academy of communications Publ., 2012. 512 p. (in Russian).
2. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Mezhenov A. V., Chikirev A. A. Method and equipment of the intelligent express control of the technical condition of ground-based means of communication and radio-technical flight support. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 235-283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108 (in Russian).
3. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Kuznetsov S. V., Goydenko V. K. Realization of a Method of Multilevel Complex Control of Technical Condition of a Sea Robot. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 4, pp. 71-101. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-04/04-Budko.pdf> (in Russian).

4. Zatsarinny A. A., Shabanov P. A. *Texnologiya informacionnoj podderzhki deyatel'nosti organizacionny`x sistem na osnove situacionny`x centrov* [Technology of information support for the activities of organizational systems based on situational centers]. Moscow. TORUS PRESS Publ., 2015. 232 p. (in Russian).

5. Budko P. A., Kuleshov I. A., Kurnosov V. I., Miroshnikov V. I. *Infokommunikacionnye seti: enciklopediya. Kn. 4. Geterogennye seti svyazi: principy postroeniya, metody sinteza, effektivnost', cena, kachestvo* [Infocommunication networks: encyclopedia. Book 4. Heterogeneous communication networks: principles of construction, synthesis methods, efficiency, price, quality]. Moscow. Nauka Publ., 2020. 683 p. (in Russian).

6. Budko P. A., Linets G. I., Mukhin A. V., Fomin L. A. *E`ffektivnost', cena i kachestvo informacionno-telekommunikacionny`x sistem. Metody` optimizacii* [Efficiency, price and quality of information and telecommunication systems. Optimization methods]. St. Petersburg. Military Academy of communications Publ., 2011. 420 p. (in Russian).

7. Vinogradenko A. M. *Metodologiya intellektual'nogo kontrolya texnicheskogo sostoyaniya avtomatizirovannoj sistemy` svyazi special'nogo naznacheniya* [Methodology of intelligent control of the technical condition of an automated communication system for special purposes]. St. Petersburg. Science-intensive Technologies Publ., 2020. 180 p. (in Russian).

8. Puzankov D. V., Miroshnikov V. I., Pantelev M. G., Seregin A. V. *Intellektual`ny'e agenty`, mnogoagentny`e sistemy` i semanticheskij Web: koncepcii, texnologii, prilozheniya* [Intelligent agents, multi-agent systems and the semantic Web: concepts, technologies, applications]. St. Petersburg. Technolit LLC Publ., 2008. 292 p. (in Russian).

9. Budko P. A., Golyunov M. V., Allakin V. V. Improving the reliability of radio communication facilities of an automated radio center due to the timely detection of their parametric failures in the process of functional control. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 204-227 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.

10. Ershov V. A., Ershova E. B., Kovalev V. V. *Metod rascheta propusknoj sposobnosti zvena Sh-CzSIS s texnologiej ATM pri mul'tiservisnom obsluzhivanii* [Method of calculating the throughput of the Sh-CSIS link with ATM technology for multiservice maintenance]. *E`lektrosvyaz`* [Telecommunication]. 2000. No. 12. Pp. 20-23 (in Russian).

11. Abramov O. V. *Planirovanie profilakticheskix korekciy parametrov texnicheskix ustrojstv i sistem* [Planning of preventive corrections of parameters of technical devices and systems]. *Informatika i sistemy` upravleniya* [Informatics and control systems]. 2017. No. 3 (53). Pp. 55-66 (in Russian).

12. Allakin V. V., Budko N. P., Vasiliev N. V. A general approach to the construction of advanced monitoring systems for distributed information and telecommunications networks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 4, pp. 125-227 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-125-227.

13. Sukhoparov M. E., Lebedev I. S. *Modeli analiza funkcional'nogo sostoyaniya elementov ustrojstv setej i telekommunikacij «Industrii 4.0»* [Models of analysis of the functional state of elements of devices of networks and telecommunications "Industry 4.0"]. St. Petersburg. Polytech-Press, 2020. 121 p. (In Russian).

14. Baklanov I. G. *Opravdanie OSS* [Justification of OSS]. Moscow. Izdatel'skie resheniya [Publishing solutions], 2016. 131 p. (in Russian).

15. Levin B. R., Schwartz V. *Veroyatnostny`e modeli i metody` v sistemax svyazi i upravleniya* [Probabilistic models and methods in communication and control systems]. Moscow. Radio and Communications Publ., 1985. Pp. 268 (in Russian).

16. Fomin L. A., Budko P. A., Linets G. I., Rachkov V. E., Gaichuk D. V., Shlaev D. V. *Sposob avtomaticheskogo kontrolya i adaptivnogo upravleniya raspredelennoj sistemoj i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya* [Method of automatic control and adaptive control a distributed system and a device for its implementation]. Patent RU No. 2312389 IPC G06F 15/76; G05B 23/02, publ. 10.12.2007, bul. No. 34. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_37588932\\_70523354](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37588932_70523354) (in Russian). (accessed 12 June 2024).

17. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M., Kuznetsov S. V., Litvinov A. I., Samoylenko V. V. *Sposob mnogourovnevnogo kompleksnogo kontrolya texnicheskogo sostoyaniya radioelektronny`x sistem* [Method of multilevel integrated control of the technical condition of radioelectronic systems]. Patent RU No. 2694158 IPC G06B 23/02; G01R 31/28, publ. 09.07.2019, bul. No. 19. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_40991556\\_95558450](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_40991556_95558450) (in Russian). (accessed 12 June 2024).

18. Budko N. P. Conceptual model of the subsystem of intelligent monitoring of the state of a public information and telecommunications network. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 5, pp. 65-119. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-5-65-119 (in Russian).

19. Budko N. P., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zholdasova A. E., Zhukov G. A., Kuleshov I. A., Maltsev D. S., Miroshnikov V. I., Nikolashin Y. L., Fatyukhin I. N. *Sposob peredachi i priema binarnoy informacii po kanalam radiosvyazi v neavtomaticheskom rezhime (Varianty)* [Method of transmitting and receiving binary information via radio communication channels in non-automatic mode (Options)]. Patent RU No. 2605045 IPC H04L 17/00, publ. 12/20/2016, issue No. 35. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_37413014\\_37569863](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37413014_37569863) (in Russian).

20. Budko N. P. Methods of bringing measurement information from remote and globally moving objects to the monitoring server of the distributed information and telecommunications network of Rosmorrechflot. *Means of Communication Equipment*. 2022. No 2 (158). Pp. 77-100. DOI 10.24412/2782-2141-2022-2-77-100 (in Russian).

21. Budko N. P., Vasiliev N. V., Gruzdev A. A. Collection and processing of big data in monitoring systems of information and telecommunication networks by means of Hadoop technology. *Means of Communication Equipment*. 2023. No. 1 (161). Pp. 78-88 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2023- 1-78-88.

22. Voronkov K. L., Grigorieva A. I., Sherstyuk Yu. M. *Avtomatizatsiya opisaniya i postroeniya mnogomerny`x kubov danny`x* [Automation of description and construction of multidimensional data cubes]. *X Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferenciya «Regional`naya informatika – 2006 (RI-2006)»* [X St. Petersburg International Conference "Regional Informatics – 2006 (RI-2006)"]. St. Petersburg, October 24-26, 2006. Conference proceedings. St. Petersburg. SPOISU, 2006. Pp. 28-29 (in Russian).

23. Voronkov K. L., Grigorieva A. I., Sherstyuk Yu. M. *Organizatsiya sbora i ispol`zovanie retrospektivny`x danny`x monitoringa sredstv telekommunikacij* [Organization of collection and use of retrospective monitoring data of telecommunications facilities]. *X Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferenciya «Regional`naya informatika – 2006 (RI-2006)»* [X St. Petersburg International Conference "Regional Informatics – 2006 (RI-2006)"]. St. Petersburg, October 24-26 2006. Conference proceedings. St. Petersburg. SPOISU, 2006. Pp. 77-78 (in Russian).

24. Budko N. P. *Postanovka zadachi sinteza podsistemy` monitoringa raspredelennoj informacionno-telekommunikacionnoj seti obshhego pol`zovaniya* [Formulation of the problem of synthesis of the monitoring subsystem of a distributed information and telecommunication network of general use]. I-methods. 2021. No 4. Pp. 1 15 (in Russian).

Статья поступила 14.06.2024 г.

*Будко Никита Павлович* – кандидат технических наук, независимый специалист. Область научных интересов: системы сетевого мониторинга. E-mail: budko62@mail.ru. Адрес: 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Бутлерова, д. 9, корп. 1, кв. 252.

*Груздев Алексей Андреевич* – студент Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: системы анализа больших данных. E-mail: gruzdev.a.a26@mail.ru. Тел.: +7(999)360-16-72. Адрес: Россия, 355002, г. Ставрополь, ул. Мичурина, д. 2, лит. В.

*Шаталов Антон Евгеньевич* – независимый специалист. Область научных интересов: системы сетевого мониторинга. E-mail: antoha\_26rus2018@mail.ru. Адрес: 356030 Ставропольский край, Красногвардейский район, ул. Энгельса, д. 46.

### Setting the task of developing a method for synthesizing a new generation network monitoring system

N. P. Budko, A. A. Gruzdev, A. E. Shatalov

**Annotation. Relevance:** *the analysis of the features of the development of modern information and telecommunication networks draws attention to the geographical dispersion of sources and recipients of information, as well as network resources; the pulsating nature of network traffic; heterogeneity of network elements and applied network technologies; randomness of operating modes; the actual non-stationarity of the main characteristics. All this entails the practical unattainability of a complete mathematical description of the*

network and the inapplicability of existing methods for monitoring its condition, as well as the relevance of finding new methods for synthesizing systems of functional control and real-time monitoring based on intelligent approaches. **The purpose of the work:** a formalized statement of the task of developing a method for synthesizing an intelligent monitoring system for a distributed information and telecommunications network. **Task statement:** based on a multi-level approach to the description of information and telecommunication systems and methods for the synthesis of network infrastructures, the task is to develop a method for the synthesis of an intelligent monitoring system for a distributed information and telecommunications network using stages of structural and parametric synthesis, as well as structural analysis methods that identify the type of network state in the interests of its situational management system in order to preventing the transition from a workable to a pre-failure and emergency state. **Methods used:** models and methods of reliability theory; methods of multilevel synthesis of complex technical systems; methods of structural synthesis and methods of parametric synthesis of information and telecommunication networks, methods of their object-subject description. **Novelty:** the intelligence of the process of identifying failures (emergency condition) of the communication network is provided by the use of a multi-agent approach, a procedure for analyzing measurement information based on BigData technology with stages of offline and online analysis of declarative and procedural knowledge about the technical condition of network elements and the state of the network as a whole, and the task of synthesizing a promising intelligent monitoring system is reduced to the task of managing network resources at the sensor, telecommunications and dispatch levels. **Results:** a verbal and mathematical formulation of the problem of developing a method for synthesizing a system for intelligent monitoring of the state of an information and telecommunications network, as well as technical and technological solutions for the implementation of this method, has been carried out. **Practical significance:** the proposed mathematical formulation of the problem for the development of the method allows not only to carry out a structural-parametric synthesis of a new generation monitoring system, but also to carry out a structural analysis of the state of the network as a whole, respectively, at the sensory, telecommunications and dispatcher levels of its construction in the system aspect in soft real time during its operation.

**Keywords:** dispatcher level, parametric synthesis task, structural synthesis task, intelligent monitoring, information and telecommunication network, sensory level, network monitoring, monitoring systems, telecommunication level.

### Information about Authors

*Nikita Pavlovich Budko* – is a candidate of technical Sciences, an independent specialist. Research interests: network monitoring systems. E-mail: budko62@mail.ru. Address: 195220, St. Petersburg, Butlerova str., 9, building 1, sq. 252.

*Alexey Andreevich Gruzdev* – is a student of the St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M. A. Bonch-Bruевич. Research interests: big data analysis systems. E-mail: gruzdev.a.a26@mail.ru Phone: +7(999)360-16-72. Address: Russia, 355002, Stavropol, Michurina str., 2, lit. V.

*Anton Evgenievich Shatalov* – is an independent specialist. Research interests: network monitoring systems. E-mail: antoha\_26rus2018@mail.ru. Address: 356030 Stavropol Territory, Krasnogvardeysky district, Engels str., 46.

### Библиографическая ссылка на статью:

Будко Н. П., Груздев А. А., Шаталов А. Е. Постановка задачи на разработку метода синтеза системы сетевого мониторинга нового поколения // Техника средств связи. 2024. № 2 (166). С. 67-88. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-67-88.

### Reference for citation:

Budko N. P., Gruzdev A. A., Shatalov A. E. Setting the task of developing a method for synthesizing a new generation network monitoring system. *Means of Communication Equipment*. 2024. No. 2 (166). Pp. 67-88 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-67-88.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.383

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-89-98

**Алгоритм определения пороговых значений датчика кожно-гальванической реакции работников опасных производств**

Михайлов В. А., Баринов М. А.

**Аннотация. Постановка задачи:** одним из значимых факторов различных чрезвычайных ситуаций, возникающих на предприятиях промышленности при работе, требующей повышенной концентрации, является стресс, поэтому в интересах производства важно начинать управление стрессом заблаговременно. В этом могут помочь данные с устройств, измеряющих биосигналы человека, такие как кожно-гальваническая реакция и другие. Большинство существующих решений для разметки кожно-гальванической реакции на наличие стресса основаны на машинном обучении и достигают точности выше 82 %, однако авторы этих исследований мало внимания уделяли тому, что данные кожно-гальванической реакции весьма сильно зависят от особенностей конкретного человека и оценивали свои решения на небольшом количестве испытуемых. **Целью работы** является разработка точного алгоритма для автоматической разметки пороговых значений по данным с устройства измерения кожно-гальванической реакции, учитывающего индивидуальные особенности человека. **Используемые методы:** анализ научных статей, монографий, известных алгоритмов, а также других первоисточников, проведение экспериментов, написание программного кода. **Новизна:** состоит в том, что в предлагаемом алгоритме была учтена специфика данных кожно-гальванической реакции, а также повышена точность определения стресса. **Результат:** заключается в том, что был разработан алгоритм для автоматической разметки данных кожно-гальванической реакции на наличие стресса, который будет учитывать индивидуальные особенности человека. **Практическая значимость:** предложенный алгоритм может быть стандартизирован и применен на производстве для мониторинга состояния работников с целью предотвращения нештатных ситуаций.

**Ключевые слова:** датчик, кожно-гальваническая реакция, разметка, пороговые значения, выявление стресса, дрейф данных, adaptive windowing.

**Введение**

Целью исследования является разработка точного алгоритма для автоматической разметки данных с устройства измерения кожно-гальванической реакции (КГР) на наличие стресса, который будет учитывать индивидуальные особенности человека.

Устройства измерения кожно-гальванической реакции, учитывающие индивидуальные особенности человека, широко применяются в медицине, и разработка точного алгоритма для автоматической разметки данных может носить прикладной характер.

Проблеме выявления стресса уделяется большое внимание в междисциплинарных исследованиях. Это связано с тем, что стресс является одним из значимых факторов различных чрезвычайных ситуаций, возникающих на производстве или работе, требующей повышенной концентрации, а также в возникновении многих серьёзных заболеваний [1]. КГР – это изменение кожного сопротивления, которое сообщает о различных эмоциональных и стрессовых реакциях, происходящих в результате изменения деятельности потовых желез. Существующие исследования [2, 3] показали, что повышения уровня КГР и ситуации возникновения стрессового состояния имеют высокий положительный коэффициент корреляции. Это делает КГР одним из лучших индикаторов стресса.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ существующих подходов к разметке данных КГР;
- 2) разработать метод автоматической разметки КГР;
- 3) провести качественное и количественное исследование результатов.

## 1. Обзор предметной области

В данный момент большинство авторов решают поставленную задачу, используя подход, основанный на «машинном обучении с учителем» (построение аналитических моделей на основе множества примеров, содержащих пары «известный вход – известный выход») [4-9]. В рамках этого подхода наиболее известны модели бинарной классификации *kNN* (метод *k*-ближайших соседей), *LDA* (линейный дискриминантный анализ) *SVM* (метод опорных векторов), *BayesNet* (байесовская сеть), с разными этапами предобработки данных, имеющие ряд общих недостатков:

1) показатели КГР у людей очень разные и могут сильно отличаться даже в одинаковых стрессовых ситуациях, что учитывается недостаточно;

2) модель на вход получает последовательность значений кожной проводимости на отрезке времени, которой присваивается метка «стресс» или «спокойствие», но это не совсем корректно, т. к. последовательность может содержать оба состояния.

В другом подходе к решению поставленной задачи, лишенному недостатков «машинного обучения с учителем» и изложенному в исследовании авторов *Bakker J., Pechenizkiy, M., & Sidorova* [3], предлагается размечать сигнал КГР на предмет стресса последовательно с помощью алгоритма *Adaptive Windowing (ADWIN)* [3], но этот алгоритм демонстрирует погрешность 2.5 минуты, что достаточно велико.

Таким образом, выявив причины, по которым *ADWIN* демонстрирует низкую точность, и устранив их можно получить результат лучший, чем при применении «машинного обучения с учителем» и алгоритма *Adaptive Windowing (ADWIN)*, изложенного в исследовании [3] (далее-алгоритм).

## 2. Описание метода решения

### 2.1. Этапы обработки данных

На входе у алгоритма временной ряд – необработанный сигнал КГР, уровень которого достаточно низкий и находится в пределах  $10^{-6}$  См (микросименсы). Далее применяется следующая последовательность этапов обработки входных данных:

1) удаление шума из данных с помощью медианного фильтра;

2) агрегация данных: из каждого блока данных, соответствующего интервалу времени, равному одной минуте, извлекается среднее значение КГР;

3) дискретизация временного ряда КГР с помощью символьной агрегатной аппроксимации (*SAX*);

4) детектирование аномалий (стресса) в данных.

В качестве детектора предлагается использовать алгоритм под названием *ADWIN (ADaptive WINdowing)* [10]. Этот алгоритм предназначен для того, чтобы обнаруживать дрейф данных. Алгоритм работает, как указано на рис. 1.

Идея алгоритма заключается в следующем. Формируется некий буфер, в который последовательно накапливается сигнал, т. е. на каждой итерации в него добавляется один новый элемент временного ряда (сигнала). Этот буфер становится динамически расширяющейся подпоследовательностью исходного временного ряда. Также на каждой итерации рассматриваются всевозможные пары подпоследовательностей накопленного буфера. Для каждой пары вычисляются длины подпоследовательностей, их средние значения и пороговое значение. Если модуль разности длин этих подпоследовательностей превосходит пороговое значение, то фиксируется точка резкого изменения, а также из буфера удаляется более старая подпоследовательность из пары той итерации, на которой зафиксировано резкое изменение. И на выходе получается последовательность временных меток в формате [\*начало стресса\*; \*конец стресса\*; \*начало стресса\*; \*конец стресса\*; ...].

Приведём более формальное объяснение алгоритма. Пусть дан временной ряд *X* длиной *N*. Тогда имеет место блок-схема, приведённая на рис. 1.

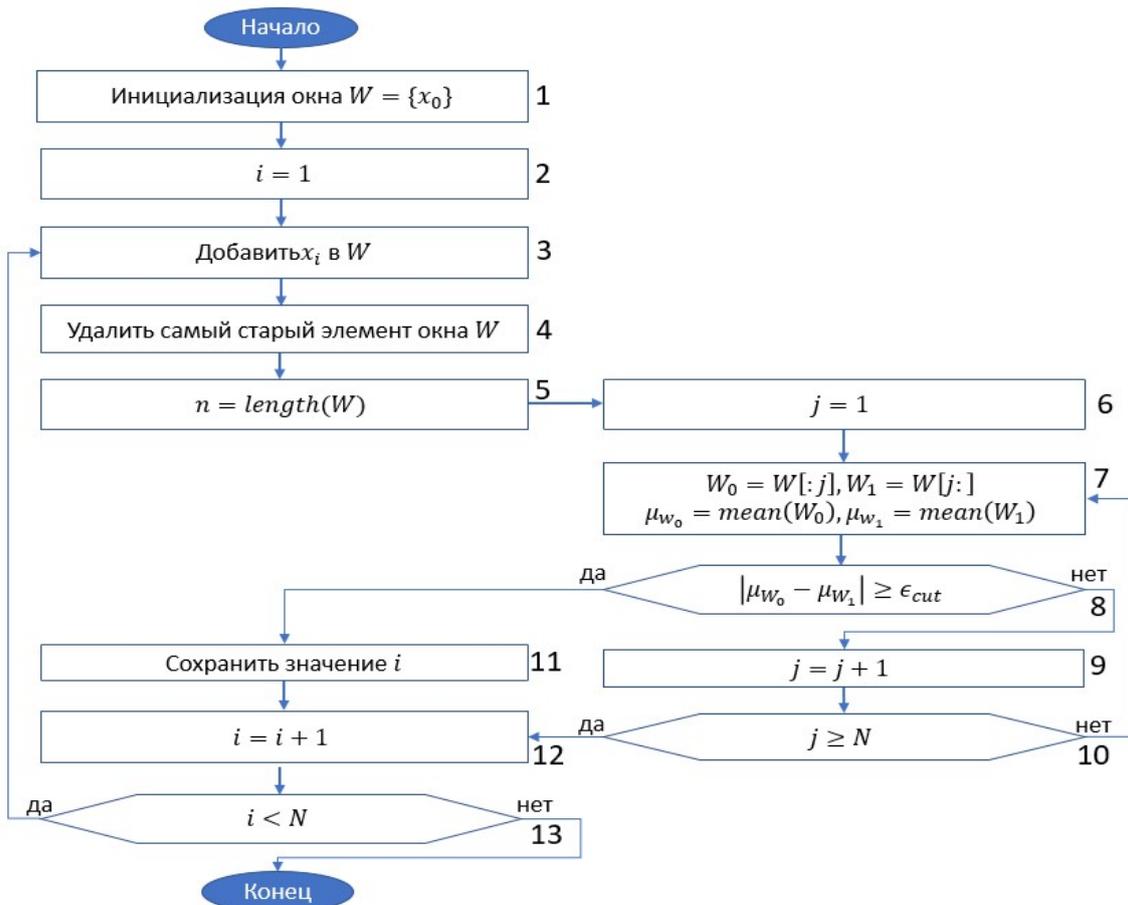


Рис. 1. Блок-схема алгоритма ADWIN

Раскроем обозначения, приведённые на блок-схеме.  $W_0 = W[:j]$  означает, что в подокно  $W_0$  записывается подпоследовательность первых  $j$  элементов окна  $W$ . В свою очередь  $W[j:]$  означает подпоследовательность последних  $(n - j)$  элементов.  $\epsilon_{cut}$  – некоторое пороговое значение, вычисляется по формуле (1).

$$\epsilon_{cut} = \sqrt{\frac{1}{2m} \cdot \ln \frac{4}{\delta'}}, \tag{1}$$

где  $m = \frac{1}{\frac{1}{n_0} + \frac{1}{n_1}}$ ;  $\delta' = \frac{\delta}{n}$ ;  $\delta$  – входной параметр алгоритма (обычно равен 0,002).

Такой подход не позволил получить достаточно высокую точность разметки.

### 2.2. Выбор порогового значения

В ходе исследований в качестве детектора стресса применялись уже реализованные другими авторами библиотечные функции, однако они не давали желаемого результата — большинство моментов начала «стресса» не было обнаружено. Причина, возможно, кроется в том, что авторы алгоритма ADWIN предлагают [10] на практике использовать другое пороговое значение, а именно

$$\epsilon_{cut} = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot \sigma_w^2 \cdot \ln \frac{2}{\delta'}} + \frac{2}{3m} \ln \frac{2}{\delta'}, \tag{2}$$

где  $\sigma_w^2$  – дисперсия окна  $W$ .

Такое предложение следует из того, что исходное пороговое значение не предназначено для распределений с малой дисперсией.

Если предположить, что специфика данных КГР заключается в достаточно высокой дисперсии, и запрограммировать реализацию алгоритма с использованием порогового значения (1), то в основном «стресс» будет обнаруживаться.

Однако в медицинской практике встречаются сигналы и с низкой дисперсией (менее 0.01). Пример приведён на рис. 2, на котором отмечено несколько моментов стрессовых промежутков.

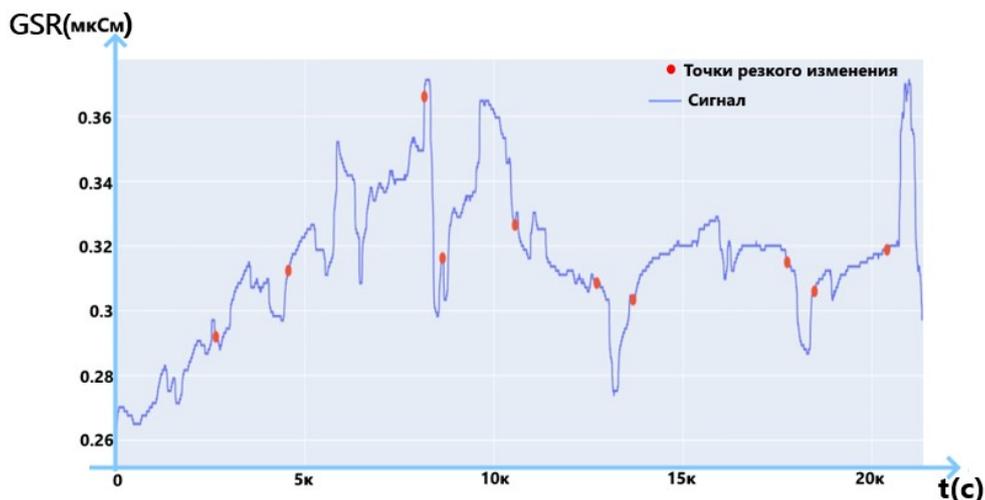


Рис. 2. Сигнал с малой дисперсией

Подлинное медицинское объяснение, что означает такой сигнал, не известно. Однако, исходя из того, что на сигналах с дисперсией меньше 0.01 крайне трудно обнаружить привычные паттерны стресса (рис. 3), а общий вид сигнала значительно отличается от большинства, можно сделать вывод о том, что вероятность того, что в таких сигналах присутствуют индикаторы стресса, весьма мала и, следовательно, для сигналов с маленькой дисперсией целесообразно использовать более строгое пороговое значение (2). После этого алгоритм перестал считать за стресс сигналы, которые почти не колеблются.

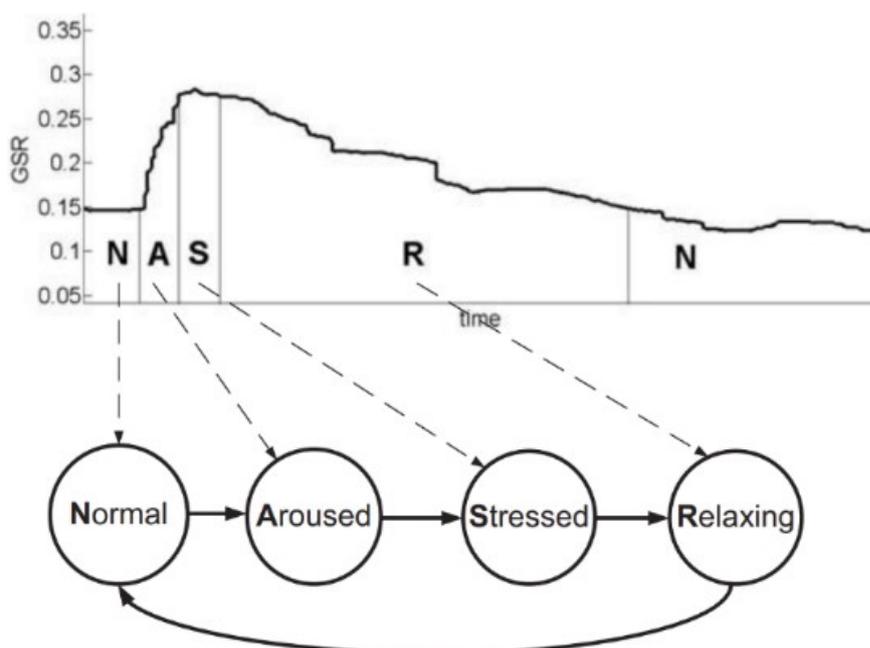


Рис. 3. Паттерн стресса на КГР

### 2.3 Множественное обнаружение «стресса»

Другой проблемой является то, что, при постепенном возрастании уровня КГР, «стресс» можно фиксировать дважды. Такая ситуация показана на рис. 4.

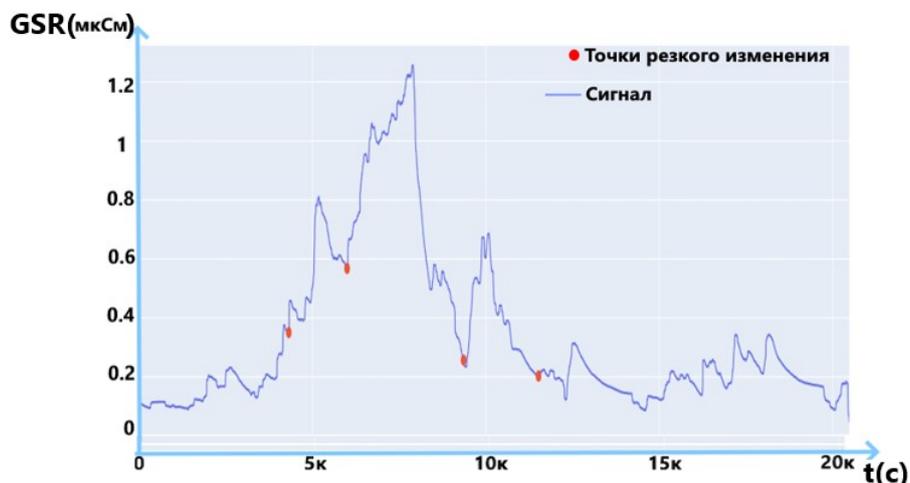


Рис. 4. Первые две красные точки означают начало стресса, вторые две – окончание

С точки зрения цели исследования каждая вторая точка не имеет смысловой нагрузки и, значит, является лишней. Также нужно зафиксировать следующее понимание: если человек вошёл в состояние стресса, то уровень КГР повысился (пройдено пороговое значение (1) или (2)), после чего алгоритм должен работать в режиме ожидания окончания стресса. Другими словами, это означает, что, как только обнаружен стресс, алгоритм должен игнорировать ситуации превышения порога  $\epsilon_{cut}$  при повышении уровня КГР, но при этом должен зафиксировать момент превышения порога  $\epsilon_{cut}$ , если уровень КГР понизится.

Приняв во внимание описанные соображения, в алгоритм была добавлена бинарная переменная («флаг»), которая принимала значение «True», когда нужно игнорировать повышение уровня КГР, и наоборот. Такая модификация устранила проблему с множественным обнаружением «стресса».

### 2.4. Сопоставление полученного результата с исходным рядом

Последовательность меток, которая получается на выходе обработки данных, содержит метки, соответствующие агрегированным данным, но моменты начала и окончания стресса нужно определять на исходном сигнале, в связи с чем возникает проблема, связанная с необходимостью обратного корректного преобразования этих меток к исходным данным (рис. 5 и 6).

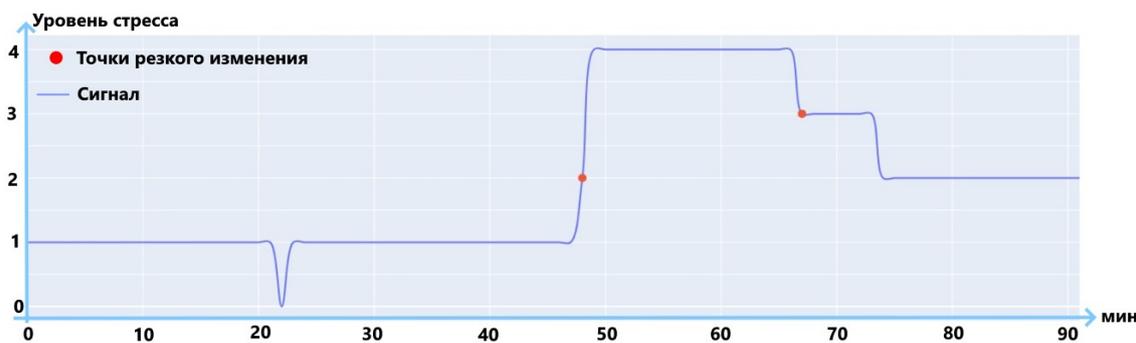


Рис. 5. Агрегированный и дискретизированный сигнал. Красным обозначены точки начала и окончания стресса

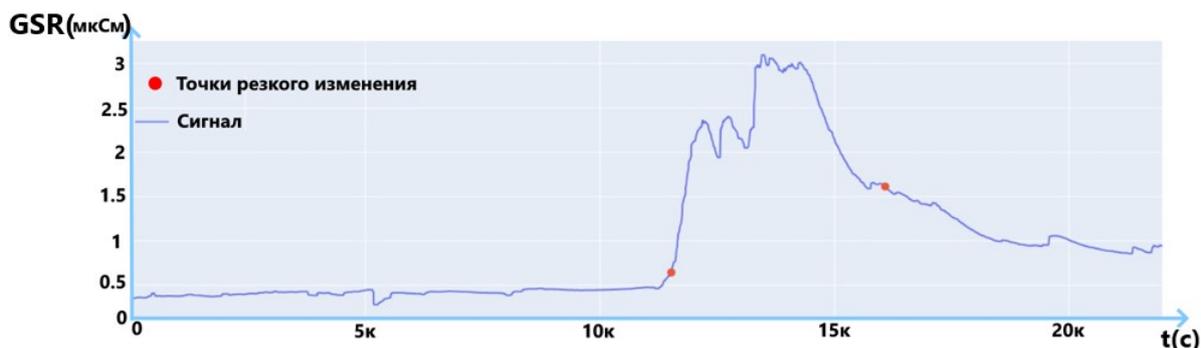


Рис. 6. Исходный сигнал

Поскольку период агрегации данных составлял одну минуту, то, при умножении значения метки на 60 секунд и значение, соответствующее частоте дискретизации (обычно 4 Гц), в лучшем случае результат будет получен с точностью до минуты (такой случай достигается не всегда из-за нюансов дискретизации сигнала). Поэтому после такого преобразования необходимо скорректировать значение полученной метки.

Корректировка производится за счёт поиска локальных минимумов на двухминутной окрестности преобразованной временной метки.

Чтобы лучше понять, что это значит, можно рассмотреть пример. Допустим, нужно преобразовать метку начала стресса со значением 30. Первый этап преобразования:  $30 \times 4 \times 60 = 7200$ . Нет оснований полагать, что именно в точке 7200 начался стресс. Поэтому производится анализ сигнала в окрестности этой точки, и, если будет найдено значение КГР ниже, чем в точке 7200, то метка смещается в этот минимум.

Также измеряются интервалы между моментами окончания одного стресса и началом следующего. Если этот интервал меньше двух минут, то два промежутка стресса объединяются в один. Пример можно увидеть на рис. 7, где красные точки – действительные моменты начала и конца стресса (идут парами «начало-конец»), а фиолетовые точки – удалённые моменты конца и начала стресса.

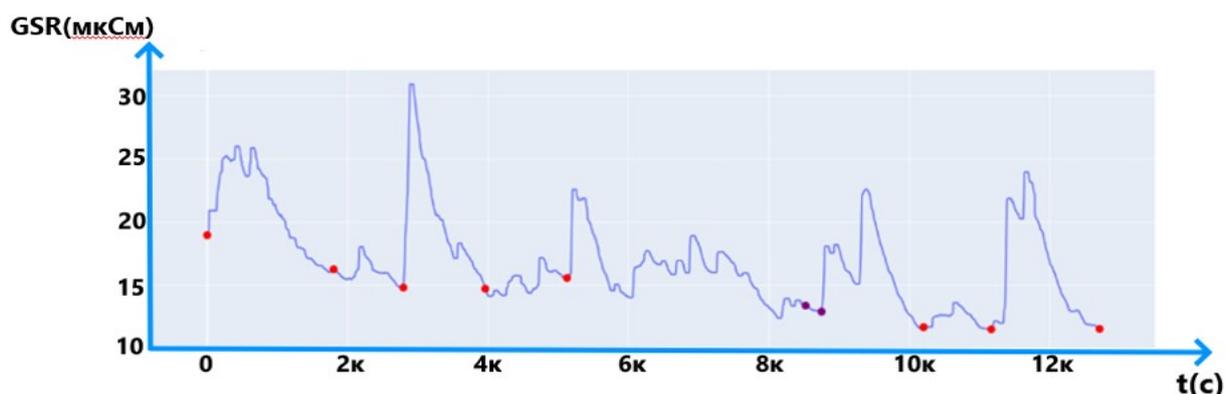


Рис. 7. Моменты окончания одного стресса и начала следующего

Таким образом, было изучено поведение алгоритма на трёх наборах данных из разных экспериментов по вызыванию стресса, что позволило найти места для улучшения алгоритма, описанного в пункте 2.1. Применены следующие изменения:

- 1) дифференциация сигналов в зависимости от дисперсии;
- 2) объединение меток начала «стресса» в одну, если их обнаруживается несколько;
- 3) объединение промежутков «стресса», если расстояние между окончанием одного «стресса» и началом следующего пренебрежимо мало;
- 4) Проработка этапа преобразования меток к исходному сигналу на основе анализа окрестности метки.

### 3. Оценка метода решения

Оценка точности алгоритма производилась на трёх независимых наборах данных. На каждый временной ряд приходилось некоторое количество эталонных точек изменения и некоторое количество предсказанных точек изменения. Под погрешностью можно понимать среднее расстояние между ближайшими эталонами и предсказаниями, что является метрикой *MAE* (*mean absolute error*). Однако количество эталонов и предсказаний может не совпадать и это тоже нужно как-то учитывать. Введём некоторый штраф за несовпадение количества предсказаний с количеством эталонов. Получается следующая формула погрешности:

$$error = \sum_i^{\min(n,m)} |r_i - p_i| + k |n - m|, \quad (3)$$

где  $r_i$  – эталонные точки,  $p_i$  – предсказанные точки,  $n$  – количество эталонных точек,  $m$  – количество предсказанных точек,  $k = 1000$  – коэффициент, который уравнивает порядки величин.

Значения погрешностей по формуле (3) составили 0.96 минуты и 1.6 минуты для точек начала и точек окончания стресса соответственно. Относительно базовой версии алгоритма *ADWIN*, погрешность которого составляла 2.5 минуты, модификация полученного алгоритма показывает более достойный результат.

### 4. Практическое применение

Применимость разработанного алгоритма обеспечивается, прежде всего, наличием данных, которые можно проанализировать. Поэтому необходимо понимать, как эти данные можно получить. Для этого понадобятся датчик, измеряющий электрическую активность кожи, и программное обеспечение для операционной системы *Windows* или *Linux*, с помощью которого можно производить сохранение потока данных в файловую систему компьютера. Обычно достаточно определиться с моделью датчика, а требуемое программное обеспечение будет описано в инструкции, прилагающейся к датчику.

В сети Интернет были найдены модели устройств, измеряющих КГР, которые доступны для покупки любому физическому лицу:

- 1) *Shimmer3 gsr+*;
- 2) *Empatica E4*;
- 3) *Grove – GSR sensor*.

Первый датчик продаётся по цене порядка 50 тыс. руб., а второй – порядка 150 тыс. руб. При этом последний в списке датчик можно приобрести менее, чем за 10 тыс. рублей. Ключевое отличие между ними заключается в том, что первые два передают данные на записывающее устройство с помощью *Bluetooth*, а третий требует проводное подключение. Также большая разница в цене обуславливается способностью регистрировать не только КГР, но и другие сигналы.

Итак, если датчик выбран, то на компьютере, который принимает данные, можно настроить работу разработанного алгоритма на обнаружение стресса в режиме реального времени. Это может быть полезно, например, в системах контроля бдительности машиниста, пилота или представителей иных профессий, обязанности которых подразумевают ответственность за жизнь и здоровье большого количества людей. Кроме того, это можно использовать и для обычных офисных работников, т. к. если люди будут проинформированы о своём стрессе на более высоком уровне, то они получают возможность предпринимать некоторые упреждающие действия, чтобы облегчить стресс и, тем самым, снизить вред своему здоровью.

Важно сделать следующее замечание: чтобы описанное применение было эффективным, намного лучше использовать датчики, способные передавать регистрируемый сигнал беспроводным способом – это позволит пациенту чувствовать себя более комфортно и не будет сковывать движения. Однако, качество получаемых данных с помощью тех или иных датчиков остаётся неисследованным.

Проводная технология записи данных подойдёт для проведения лабораторных экспериментов по введению человека в состояние стресса, в ходе которых участникам нужно только сидеть за компьютером и выполнять какие-либо действия по указанию организаторов.

Также стоит отметить то, что данные, полученные только от КГР, менее информативны, чем комбинации разных видов биосигналов (например, КГР+ЭКГ+ЭЭГ), поэтому результаты данной работы имеют скорее стратегический характер. В качестве конкретного примера можно разобрать комбинацию «КГР + Пульс». Сигнал КГР способен давать очень точное знание о том, когда человек находится в стрессе, а когда нет. Однако измерение КГР возможно только при непосредственном физическом контакте с телом человека, что в любом случае может мешать человеку, но этого нельзя на 100 % утверждать о методах регистрации пульсовой волны. Конечно, традиционные методы измерения пульса тоже требуют наличия датчиков, носимых на теле человека, но при этом существует потенциальная возможность измерять пульс по видео лица человека – в этом направлении уже ведутся исследования. В таком случае интересно попробовать создать модель, которая сможет прогнозировать стресс на основе пульса, а для этого понадобится разметка данных, которую можно получить с помощью разработанного в настоящем исследовании алгоритма.

### Заключение

В данной работе была рассмотрена проблема автоматической разметки данных с устройства измерения кожно-гальванической реакции на наличие стресса.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) проанализирована научная литература по теме обнаружения стресса в данных, измеренных датчиком КГР. В результате выделен наиболее предпочтительный подход к разметке данных КГР – поиск дрейфа в дискретизированном сигнале;
- 2) разработан метод автоматической разметки КГР, основанный на применении алгоритма *ADWIN*;
- 3) проведена оценка результатов: точность обнаружения повышена на 51.2 % по сравнению с базовой версией алгоритма.

Таким образом, разработка метода автоматической разметки КГР на наличие стресса была основана на модификации уже предложенной последовательности обработки данных. Причины, по которым *ADWIN* не достигал хорошей точности, были выявлены и устранены. Как итог, был создан новый алгоритм разметки сигнала КГР. Проведен количественный анализ результатов работы модифицированного алгоритма. В результате можно сделать вывод, что точность определения стресса была улучшена по сравнению с существующими решениями.

Связь дисперсии и вероятность обнаружения точки изменения в сигнале может быть изучена более детально, что может позволить точнее дифференцировать стресс и спокойствие, если это потребуется.

Разработанный в ходе этого исследования алгоритм определения стресса по данным с датчика КГР может являться инструментом для формирования разметки на наличие стресса.

### Литература

1. Cacioppo J., Tassinary L., Berntson G. Handbook of Psychophysiology. Cambridge University Press, 2000.
2. Gaviria B., Coyne L., Thetford P. E. (1969). Correlation of skin potential and skin resistance measures. *Psychophysiology*, 5 (5), 465–477. doi:10.1111/j.1469-8986.1969.tb02850.x
3. Bakker J., Pechenizkiy M., Sidorova N. (2011). What's Your Current Stress Level? Detection of Stress Patterns from GSR Sensor Data. 2011 IEEE 11th International Conference on Data Mining Workshops.
4. Sriramprakash S., Prasanna V. D., Murthy O. V. R., “Stress detection in working people,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 115, pp. 359–366, Jan. 2017.
5. Iqbal T., Elahi A., Shahzad A., Wijns W. Review on Classification Techniques used in Biophysiological Stress Monitoring. arXiv 2022, arXiv:2210.16040.
6. Seyed Amir Hossein Aqajari, et al. (2020). GSR Analysis for Stress: Development and Validation of an Open Source Tool for Noisy Naturalistic GSR Data. arXiv preprint arXiv:2005.01834 (2020)
7. Haouij N. El. and et.al., “Feature extraction and selection of electrodermal reaction towards stress level recognition: Two real-world driving experiences,” 47emes Journees de Statistique de la SFdS (JdS), 2015.
8. Hindra and et.al. Kurniawan, “Stress detection from speech and galvanic skin response signals,” in IEEE International Symposium on Computer-Based Medical Systems. IEEE, 2013.
9. Boucsein W. *Electrodermal Activity*. The Springer series in behavioral psychophysiology and medicine. Springer, 2011.
10. Bifet A., Gavalda R. “Learning from time-changing data with ` adaptive windowing,” in Proc. 2007 SIAM Int. Conf. Data Mining, vol. 7. SIAM, 2007, Conference Proceedings, p. 2007.

### References

1. Cacioppo J., Tassinary L., Berntson G. Handbook of Psychophysiology. Cambridge University Press, 2000.
2. Gaviria B., Coyne L., Thetford P. E. (1969). Correlation of skin potential and skin resistance measures. *Psychophysiology*, 5 (5), 465–477. doi:10.1111/j.1469-8986.1969.tb02850.x
3. Bakker J., Pechenizkiy M., Sidorova N. (2011). What's Your Current Stress Level? Detection of Stress Patterns from GSR Sensor Data. 2011 IEEE 11th International Conference on Data Mining Workshops.
4. Sriramprakash S., Prasanna V. D., Murthy O. V. R., “Stress detection in working people,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 115, pp. 359–366, Jan. 2017.
5. Iqbal T., Elahi A., Shahzad A., Wijns W. Review on Classification Techniques used in Biophysiological Stress Monitoring. arXiv 2022, arXiv:2210.16040.
6. Seyed Amir Hossein Aqajari, et al. (2020). GSR Analysis for Stress: Development and Validation of an Open Source Tool for Noisy Naturalistic GSR Data. arXiv preprint arXiv:2005.01834 (2020)
7. Haouij N. El. and et.al., “Feature extraction and selection of electrodermal reaction towards stress level recognition: Two real-world driving experiences,” 47emes Journees de Statistique de la SFdS (JdS), 2015.
8. Hindra and et.al. Kurniawan, “Stress detection from speech and galvanic skin response signals,” in IEEE International Symposium on Computer-Based Medical Systems. IEEE, 2013.
9. Boucsein W. *Electrodermal Activity*. The Springer series in behavioral psychophysiology and medicine. Springer, 2011.
10. Bifet A., Gavalda R. “Learning from time-changing data with ` adaptive windowing,” in Proc. 2007 SIAM Int. Conf. Data Mining, vol. 7. SIAM, 2007, Conference Proceedings, p. 2007.

Статья поступила 24 июня 2024 г.

### Информация об авторах

*Михайлов Виктор Андреевич* – Инженер. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: автоматизированные системы управления. Тел.: +7(951)685-92-52. E-mail: vik.0n@yandex.ru.

Баринов Михаил Анатольевич – Кандидат технических наук, доцент. Начальник отдела. ПАО «Интелтех». Область научных интересов: контроль технического состояния изделий. Тел.: 8(812)295-50-69, доп. 13-98. E-mail: BarinovMA@inteltech.local.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д.8.

### Algorithm for determining the threshold values of the galvanic skin response sensor of workers in hazardous industries

V. A. Mikhaylov, M. A. Barinov

**Abstract. Problem statement:** one of the significant factors of various emergencies that occur in industrial enterprises during work requiring increased concentration is stress, therefore, in the interests of production, it is important to start stress management in advance. This can be helped by data from devices that measure human biosignals, such as galvanic skin response and others. Most of the existing solutions for marking galvanic skin response for stress are based on machine learning and achieve accuracy above 82 %, however, the authors of these studies paid little attention to the fact that these galvanic skin response data are very dependent on the characteristics of a particular person and evaluated their solutions on a small number of subjects. **The aim of the work** is to develop an accurate algorithm for automatic marking of threshold values based on data from a galvanic skin reaction measurement device, taking into account individual human characteristics. **Methods used:** analysis of scientific articles, monographs, well-known algorithms, as well as other primary sources, conducting experiments, writing program code. **Novelty:** the proposed algorithm took into account the specifics of the galvanic skin response data, as well as increased the accuracy of stress determination. **The result:** an algorithm has been developed to automatically mark up the galvanic skin response data for the presence of stress, which will take into account the individual characteristics of a person. **Practical significance:** the proposed algorithm can be standardized and applied in production to monitor the condition of workers in order to prevent emergency situations.

**Keywords:** sensor, galvanic skin response, marking, threshold values, stress detection, data drift, adaptive windowing.

#### Information about Authors

Mikhailov Viktor Andreevich – Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies" (PJSC "Inteltech"). Research interests: automated control systems. Tel.: +7 (951) 685-92-52. E-mail: vik.0n@yandex.ru .

Barinov Michail Anatolevich – PhD, docent. Head of department. PJSC "Inteltech". Field of research: technical state inspection. Tel.: 8(812)295-50-69 (13-98). E-mail: BarinovMA@inteltech.local. Address: 197342, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Михайлов В. А., Баринов М. А. Алгоритм определения пороговых значений датчика кожно-гальванической реакции работников опасных производств // Техника средств связи. 2024. № 2 (166). С. 89-98. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-89-98.

#### Reference for citation:

Mikhaylov V. A., Barinov M. A. Algorithm for determining the threshold values of the galvanic skin response sensor of workers in hazardous industries. *Means of Communication Equipment*. 2024. No. 2 (166). Pp. 89-98 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-2-89-98.

## Решением ВАК № 222-р от 10 июня 2024 года

научно-технический журнал «Means of Communication Equipment» («Техника средств связи») включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень\*) и рекомендован Высшей аттестационной комиссией для публикаций основных результатов по научным специальностям\*\*:

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки);

2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии (технические науки);

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки);

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

\* В Перечне от 10 июня 2024 г. № 86.

\*\* В соответствии с номенклатурой, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24 февраля 2021 г. N 118 и рекомендацией Президиума Высшей аттестационной комиссии N 15/1-нс от 28 мая 2021 г.

### Индексы ГРНТИ:

20.00.00 Информатика.

28.00.00 Кибернетика.

45.00.00 Электротехника.

47.00.00 Электроника. Радиотехника.

47.05.00 Теоретическая радиотехника.

47.41.00 Радиоэлектронные схемы.

47.51.39 Синтез и обработка телевизионных сигналов.

49.00.00 Связь.

49.03.05 Теория обработки сигналов в системах связи.

49.27.00 Система передачи.

49.31.00 Многоканальная связь.

49.39.00 Телефонная связь и аппаратура.

49.43.00 Радиосвязь и радиовещание.

50.00.00 Автоматика. Вычислительная техника.

49.33.35 Надежность сетей связи и защита информации.

50.37.23 Защита от несанкционированного доступа. Физическая защита информации.

50.41.27 Компьютерные вирусы. Антивирусные программы.

81.93.29 Информационная безопасность. Защита информации

