

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

**Николашин Ю.Л.** Генеральный директор ПАО «Интелтех». Кандидат технических наук

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА:**

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

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА**

**(Председатель редколлегии):**

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

**Члены редакционного совета:**

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

**Кузичкин А.В.** Заместитель генерального директора Научно-исследовательского института телевидения по информационным технологиям. Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

**Курносов В.И.** Заместитель генерального директора АО «НИИ «Рубин» по научной работе. Д.т.н., профессор.

**Лычагин Н.И.** Заслуженный работник высшей школы РФ Заместитель директора научно-технического центра по развитию ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор

**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 директора – директор научно-технического центра ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

**Члены редакционной коллегии:**

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

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

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

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

**Жуков Г.А.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). К.т.н., старший научный сотрудник

**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.** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

**Маковий В.А.** АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж). Д.т.н., старший научный сотрудник

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

**Михайлов Р.Л.** Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники (г. Череповец). К.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.т.н., профессор

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

**Nikolashin Y.L.** General Director of PJSC «Inteltech». Doctorate of Technical Sciences

**JOURNAL DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:**

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

**JOURNAL DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF**

**(Editorial Board Chairman):**

**Budko P.A.** Academic Secretary of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, 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.** Deputy Director General of Information technology television Research Institute. Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Science Worker of the Russian Federation.

**Kurnosov V.I.** Director General of JSC "NII" Rubin" in scientific work. Doctor of Technical Sciences, Professor.

**Lychagin N.I.** Higher School Honored Employee of the Russian Federation Deputy Director of Science and Technology Development Center of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor

**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 Director General – Director of Scientific and Technical Center of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

**EDITORIAL BOARD MEMBERS:**

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

**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

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

**Zhukov G.A.** PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctorate of Technical Sciences, Senior Researcher

**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.** Saint Petersburg State LETI Electrotechnical University of V.I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Makoviy V.A.** Concern Constellation JSC (Voronezh). Doctor of Technical Sciences. Senior Researcher

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

**Mikhailov R.L.** Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics (Cherepovets). Doctorate of Technical Sciences

**Odoevskiy 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 RVSN 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 Technical Sciences, Professor

**РЕДАКЦИЯ:** Верстка принт-макета: **Мамончикова А.С.**  
Дизайн обложки: **Шаутин Д.В.**  
Поддержка сетевой версии журнала: **Лебедев Д.А.**  
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: intelteh@inteltech.ru.  
Официальный сайт: www.inteltech.ru; 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.

**СОДЕРЖАНИЕ****СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

<b>Николашин Ю.Л., Козлов К.В., Кулешов И.А.</b> Основные проблемы построения системы управления войсками, оружием морской авиации и войск противовоздушной обороны флота и предложения по их решению.....	2
<b>Моисеев А.А., Киселев А.А.</b> Применение мобильных аппаратных средств связи для обмена данными с морскими объектами.....	10
<b>Абрамкин Р.В., Веселовский А.П., Винограденко А.М., Косарева Л.И.</b> Интеллектуализация систем автономного электроснабжения комплексов связи специального назначения .....	18

**ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

<b>Мирошников В.И., Кулешов И.А., Талагаев В.И.</b> Экспертная система оценки помехозащищенности декаметровых радиоканалов Военно-Морского Флота.....	26
<b>Гук И.И.</b> Оценка фазовой компенсации нелинейных искажений на выходе реального усилителя мощности.....	34
<b>Солозобов С.А., Шевченко В.В., Шукин А.Н.</b> Статистический выбор рабочих частот в декаметровом диапазоне волн для различных видов радиосигналов.....	55
<b>Хвостунов Ю.С.</b> Реализации сетевой синхронизации в автоматизированной сети радиосвязи декаметрового диапазона.....	63
<b>Шаптала В.С., Солнцев Д.В.</b> Модель фрагмента сети цифровой радиосвязи.....	71

**ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

<b>Винограденко А.М., Федоренко В.В., Будко Н.П.</b> Моделирование эволюции области неопределенности контролируемых систем на основе интеллектуального подхода .....	80
---	----

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

<b>Михайлюк П.П., Малаева Е.А.</b> Организация работ в условиях единичного производства печатных плат для государственного заказа в ВМФ.....	91
<b>Для авторов</b> .....	98
<b>Поздравление</b> .....	99

**CONTENTS****COMMUNICATIONS AND TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS**

<b>Nikolashin Y.L., Kozlov K.V., Kuleshov I.A.</b> Problems of construction of a control system of armies, the weapon of sea aircraft and armies of air defence of fleet and offers under their decision.....	2
<b>Moiseev A.A., Kiselev A.A.</b> Application of mobile hardware communications for data exchange with marine objects.....	10
<b>Abramkin R.V., Veselovskiy A.P., Vinogradenko A.M., Kosareva L.I.</b> Intellectualization of autonomous power supply systems for special-purpose communication complexes .....	18

**SIGNAL TRANSMISSION, RECEPTION AND PROCESSING**

<b>Miroshnikov V.I., Kuleshov I.A., Talagaev V.I.</b> Expert system for assessing the noise immunity of the decameter Navy radio channels.....	26
<b>Guk I.I.</b> Phase compensation of nonlinear distortions at the output of the power amplifier. Means of communication equipment.....	34
<b>Solozobov S.A., Shevchenko V.V., Shchukin A.N.</b> Statistical selection of operating frequencies in decameter mode wave range for various types of radio signals.....	55
<b>Khostunov Y.S.</b> Implementation of network synchronization in an automated radio network of HF range.....	63
<b>Shaptala V.S., Solntsev D.V.</b> Model of pilot area of digital radio network.....	71

**ELECTRONIC AND RADIO SYSTEMS**

<b>Vinogradenko A.M., Fedorenko V.V., Budko N.P.</b> Modeling the evolution of the uncertainty domain of controlled systems based on an intelligent approach .....	80
---	----

**ADVANCED RESEARCHES**

<b>Mikhailuyuk P.P., Malaeva E.A.</b> Organization of work in the conditions of a single production of printed circuit boards for the state order in the Navy.....	91
<b>For authors</b> .....	98
<b>Congratulation</b> .....	99

**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

**СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 623.618

**Основные проблемы построения системы управления войсками, оружием морской авиации и войск противовоздушной обороны флота и предложения по их решению**

Николашин Ю.Л., Козлов К.В., Кулешов И.А.

*Аннотация.* Статья раскрывает отдельные проблемы построения системы управления войсками и оружием морской авиации и её интеграции в систему управления группировки авиации и войск противовоздушной обороны и содержит предложения по их решению. В статье отражено, что летательный аппарат морской авиации в процессе полёта по маршруту является объектом нескольких систем управления, различной ведомственной принадлежности. Эти системы имеют различный пространственный (пространственно-территориальный) размах и, как следствие, разные возможности по получению информации о текущем местоположении летательного аппарата в ходе его применения (выполнения полёта или движения по воде). Следствием чего является невозможность управления движением летательного аппарата на всём маршруте в процессе его применения силами и средствами какой-то одной конкретной системы. Представлены выводы из анализа особенностей организации информационного обмена при различных вариантах применения летательного аппарата морской авиации. Изложены предложения по решению рассматриваемых проблем.

**Ключевые слова:** система связи; радиотехническое обеспечение; автоматизация управления; морская авиация; базовый программно-аппаратный комплекс.

Исторический ход развития авиации и войск противовоздушной обороны (ПВО) ВС РФ, геополитическая обстановка, сложившаяся под влиянием объективно-существующих оперативно-стратегических и оперативно-технических факторов, обуславливает необходимость интеграции сил и средств авиации и войск ПВО различной ведомственной и видовой принадлежности в региональные (территориальные) группировки авиации и войск ПВО (ГрАвВПВО) и/или региональные (территориальные) группировки войск (сил), которые в ряде случаев сами целиком или частично могут входить в группировки многонациональных сил. Возможный вариант состава такой группировки приведен на рис. 1.

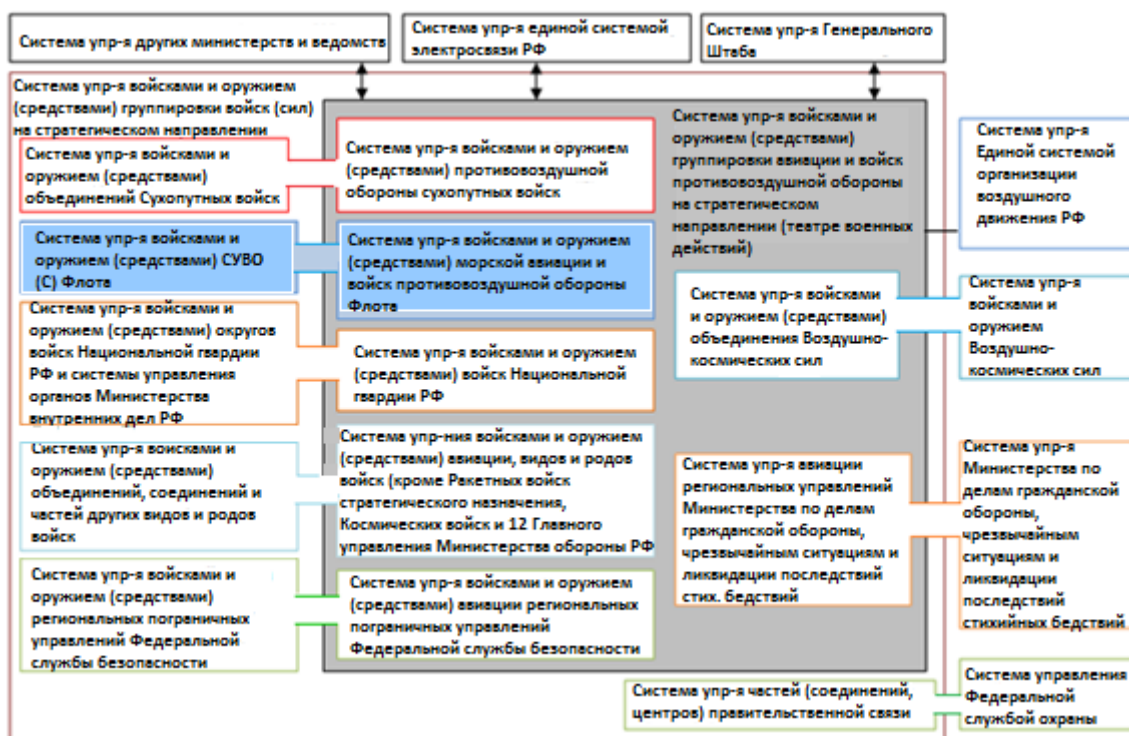


Рис. 1. Вариант состава ГрАвВПВО

Существенная роль в решении задач, стоящих перед такими группировками неизбежно возлагается на силы (средства) морской авиации (МА) (авиацию и войска ПВО флота). Для эффективного выполнения морской авиацией возлагаемых на неё задач, необходимы создание автоматизированной системы управления войсками (силами) и оружием (средствами) (СУВО(С) авиации и войск ПВО флота и её интеграция в единую систему управления войсками (силами) и оружием (средствами) региональной (территориальной) группировки авиации и войск ПВО. Рост роли морской авиации и войск ПВО (ВПВО) флота обусловлен:

1) увеличением роли МА, авианесущих кораблей и ВПВО флота в решении задач, стоящих перед группировкой сил флота, вызванного ростом влияния результатов противоборства в воздушно-космической сфере на результаты вооружённого конфликта (военных действий), в целом;

2) расширением перечня и увеличением объёма задач группировки сил флота (региональной группировки авиации и войск ПВО, региональной группировки войск (сил), решаемых путем применения корабельной и приданной авиации;

3) оснащением кораблей основных классов беспилотными летательными аппаратами (БпЛА) различного назначения, что обуславливает потребность дооснащения корабельных систем управления программно-аппаратными комплексами для управления ими;

4) использованием надводных (в т. ч. авианесущих) кораблей в качестве:

а) пунктов управления авиацией при решении задач управления экипажами летательных аппаратов и БпЛА разнородной и ведомственной принадлежности в районах, необорудованных в отношении связи, радиотехнического обеспечения (РТО) и автоматизации управления;

б) аэродромов базирования корабельной авиации, при необходимости присутствия авиационных групп РФ в районах, необорудованных в аэродромно-техническом отношении, что обусловлено необходимостью решения пилотируемыми и беспилотными авиационными комплексами широкого круга задач – от обеспечения обороноспособности РФ в арктических районах при несении боевого дежурства по ПВО до защиты месторождений полезных ископаемых на морском шельфе (в малоосвоенных приморских районах побережья) и контроля районов мирового океана при проведении отдельных контртеррористических (антипиратских) мероприятий с участием сил (средств) флота;

5) внедрением перспективных телекоммуникационных технологий, без которых удовлетворение растущих потребностей системы управления МА, является невозможным.

Анализ особенностей организации информационного обмена при различных вариантах применения летательного аппарата (ЛА) МА позволяет сделать ряд выводов.

Во-первых, в процессе движения ЛА МА по маршруту и применения оружия, экипаж вынужден в одно и то же время вести информационный обмен (в целях обеспечения управления и взаимодействия) в рамках четырёх (основных) представленных на рис. 2 систем управления, имеющих различные:

- ведомственную и видовую (родовую) принадлежность;
- функциональное назначение;
- пространственный (пространственно-территориальный) размах;
- структуру и иерархию;
- порядок организации управления (и взаимодействия);
- требования к управлению;
- степень автоматизации управления и взаимодействия.

С одной стороны, это обусловлено тем, что представленные на рис. 2 система управления войсками и оружием (средствами) СУВО(С) флота (в её рамках – МА и ВПВО флота), ГрАвВПВО, Федеральная (единая) система контроля использования воздушного пространства (Ф(Е)СКИВП), Единая система организации воздушного движения (ЕС ОрВД) и Система управления службой управления движением судов (СУДС) создавались в разное время (отдельные из них планируется создавать в различные периоды подготовки к ведению и

ведения военных действий). Формирование некоторых из них не завершено до настоящего времени (например, СУВО(С) МА и ВПВО флота, Ф(Е)СКИВП). Данные системы создавались с разными задачами, согласно интересам создающих их ведомств, видов ВС РФ и родов войск.

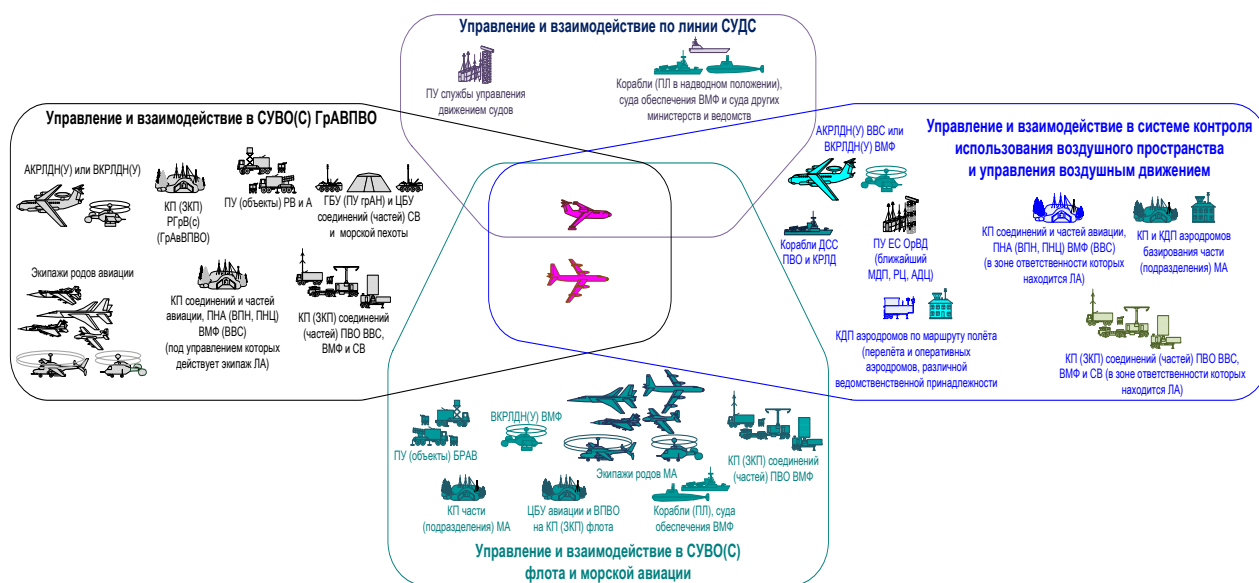


Рис. 2. Системы управления, в которых ЛА МА вынужден вести информационный обмен при любых вариантах его применения

При этом, ряд вопросов взаимодействия между пунктами управления (ПУ) (объектами) указанных систем (имеющих различную ведомственную, видовую (родовую) принадлежность), либо не были учтены, либо не могли быть решены в момент формирования соответствующей системы из-за уровня развития её средств автоматизации управления. В результате этого, обеспечение управления и взаимодействия между ПУ (объектами) рассматриваемых систем осложняются, когда для передачи одной и той же информации (решения одних и тех же задач), в силу существующих ведомственных и видовых особенностей используются: либо различные структуры формализованных сообщений при машинном обмене между средствами автоматизации управления; либо различные виды связи (телекоммуникационные службы).

С другой стороны, немаловажным является то, что представленные на рис. 2 системы имеют различный пространственный (пространственно-территориальный) размах и, как следствие, разные возможности по получению информации о текущем местоположении ЛА МА в ходе его применения (выполнения полёта или движении по воде). Отсюда следует невозможность управления движением ЛА МА на всём маршруте в процессе его применения силами и средствами какой-то одной конкретной системы из приведенных выше.

С третьей стороны, организацию управления ЛА МА осложняет также и то, что ПУ (объекты) рассматриваемых систем предназначены для решения отдельных специфических задач и не способны решать все задачи (в комплексе) по управлению объектом, возникающие как при его движении по маршруту, так и в процессе применения оружия.

При этом, ПУ (объекты) представленных на рис. 2 систем, как правило, одновременно управляют несколькими объектами (группами объектов) – ЛА, надводными кораблями (НК) и судами. Прекращение обмена с этими ЛА, НК для ведения обмена в целях управления конкретным ЛА МА на время, превышающее допустимое, невозможно, во избежание потери (или срыва) управления остальными объектами, находящимися в зоне ответственности ПУ (объекта). По этой причине, для обеспечения управления и взаимодействия с ПУ (объектами) рассматриваемых систем ЛА, МА вынужден вести информационный обмен в сформированных ими информационных сетях (направлениях), а не наоборот. Всё это ведёт к тому, что ЛА МА:

а) в процессе движения по маршруту будет вести информационный обмен с ПУ (объектом), под управлением которого он находится. При этом, неизбежно будет осуществляться передача управления им между ПУ (объектами) различной принадлежности при выходе ЛА МА из зоны их ответственности;

б) в это же время он будет вести непрерывный обмен с ПУ (объектами), управляющими им (либо взаимодействующими с ним) в аспекте применения оружия (или обеспечения применения оружия ими).

Во-вторых, при организации управления (и взаимодействия) в рассматриваемых системах важным является то, что в соответствии с требованиями действующих нормативных документов и сложившейся практикой войск:

а) для управления ЛА МА при его движения по маршруту, управляющий ПУ (объект) должен иметь информацию о его местоположении, поступающую от собственных средств обнаружения, обладающую требуемой точностью, достоверностью и обновляющуюся с требуемой периодичностью;

б) для применения оружия ЛА МА по подвижной цели, управляющий ПУ (объект) должен иметь информацию о местоположении ЛА МА и поражаемой цели, поступающую от собственных средств обнаружения, обладающую требуемой точностью, достоверностью и обновляющуюся с требуемой периодичностью;

в) для применения оружия ЛА МА по неподвижной цели управляющий ПУ (объект) должен иметь информацию о местоположении летательного аппарата МА, поступающую от средств обнаружения любой подчинённости, обладающую требуемой точностью, достоверностью и обновляющуюся с требуемой периодичностью, и ранее полученную информацию о неподвижной цели, обладающую требуемой точностью и достоверностью.

В соответствии с вышеизложенным для ПУ (объекта), управляющего движением ЛА МА и применением им оружия по подвижной цели, зона ответственности не должна превышать границы поля управления ПУ (объекта). Под полем управления понимается пространственное пересечение зон действия средств радионавигации (радионавигационного поля), воздушной радио- и спутниковой связи, а также зон обнаружения средств радиолокации (радиолокационного поля). При этом, поскольку на ЛА МА для пилотирования (управления движением по воде) и применения оружия задействованы разные должностные лица (ДЛ), для обеспечения обмена информацией в указанных целях от управляющего ПУ (объекта) должны формироваться информационные сети (направления) различного назначения. Кроме того, существует ряд особенностей в организации информационного обмена, связанного с обеспечением применения оружия других объектов, находящихся под управлением ЛА МА:

а) для управления движения переданными под управление объектами ЛА МА должен иметь информацию об их местоположении, поступающую от собственных средств обнаружения, обладающую требуемой точностью, достоверностью и обновляющуюся с требуемой периодичностью;

б) для обеспечения применения оружия управляемых объектов по подвижной цели управляющий ЛА МА должен иметь информацию о местоположении управляемого объекта и поражаемой цели, поступающую от собственных средств обнаружения, обладающую требуемой точностью, достоверностью и обновляющуюся с требуемой периодичностью;

в) для обеспечения применения оружия управляемых объектов по неподвижной цели управляющий ЛА МА должен иметь информацию о местоположении управляемого объекта и поражаемой цели, поступающую от собственных средств обнаружения, обладающую требуемой точностью, достоверностью и обновляющуюся с требуемой периодичностью, а также ранее полученную информацию о неподвижной цели, обладающую требуемой точностью и достоверностью.

В соответствии с вышеизложенным для ЛА МА, управляющего движением и применением оружия (обеспечивающим применение оружия) других объектов по подвижной

цели, зона ответственности не должна превышать границы поля управления. При этом, поскольку на ЛА МА для пилотирования (управлением движением по воде) и управления применением оружия (обеспечения применения оружия) других объектов задействованы разные ДЛ, для обмена информацией должны формироваться информационные сети (направления) разного назначения. Одновременно с этим ЛА МА должен иметь возможность ведения информационного обмена со старшим в иерархии СУВО(С) или взаимодействующими ПУ (объектами) как для приема объектов под управление из их зоны ответственности, так и для передачи объектов под управление в их зону ответственности.

Решение вышеуказанных задач возможно путем формирования системы связи (СС), РТО и автоматизации управления (АУ) МА, интегрированной в аналогичную систему ГраВВПВО.

В свою очередь, этому препятствует отсутствие принятых на снабжение унифицированных автоматизированных комплексов авиационной связи ЛА, кораблей (судов) и пунктов управления (береговых объектов), удовлетворяющих предъявляемым к ним требованиям и имеющих необходимый модернизационный запас. Данное обстоятельство:

1) исключает возможность создания единой СС, РТО и АУ авиации ВМФ, обеспечивающей интеграцию (взаимодействие) системы управления войсками и оружием (средствами) авиации флота с аналогичными системами группировки авиации и ВПВО региональной группировки войск (сил) или оперативно-стратегического командования, а также единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД);

2) препятствует осуществлению управления автоматизированным способом экипажами ЛА родов авиации с ПУ и объектов СУВО(С) авиации флота (из-за отсутствия унифицированной технологии обмена данными в сетях воздушной связи);

3) исключает возможность автоматизированного управления с наземных ПУ флота и надводных кораблей авиационными комплексами различного назначения;

4) отодвигает сроки начала и завершения переоснащения (обусловленного естественным старением техники связи, РТО и АУ) существующих:

- командных пунктов авиационных частей (подразделений);
- пунктов наведения авиации;
- командных диспетчерских и стартовых командных пунктов аэродромов и вертолётных площадок;
- испытательного учебно-тренировочного комплекса корабельной авиации Военно-морского флота.

5) ведёт к удорожанию (по причине отсутствия единых технологических решений и унифицированных средств):

- модернизации (переоснащения) системы авиационной связи *тавкр* проекта 1143.5 «Адмирал флота Советского Союза Кузнецов»;
- разработки комплексов (систем) авиационной связи для надводных кораблей (судов обеспечения) существующих и создаваемых проектов.

В качестве выводов и путей решения обозначенных проблем, отмечаем насущную необходимость постановки НИОКР по разработке базового программно-аппаратного комплекса (комплекта) формирования элементов системы связи авиации и войск ПВО флота (БПАК).

Замысел создания БПАК состоит в том, что данный комплекс должен одновременно:

1) являться средством формирования элементов автоматизированной СС, РТО и АУ ГраВВПВО – прежде всего объектов связи, обладающих степенью автоматизации, достаточной для функционирования в контуре системы автоматизации управления связью, РТО и АУ;

2) служить телекоммуникационной основой для формирования перспективных:

а) комплексов авиационной связи из состава боевых постов узлов связи наземных пунктов управления объединений (соединений, частей и подразделений) авиации и ВПВО, узлов связи и РТО аэродромов, гидродромов и вертолётных площадок;

б) бортовых комплексов связи летательных аппаратов.

в) боевых постов авиационной связи надводных авианесущих кораблей с групповым и одиночным базированием воздушных судов (летательных аппаратов), а также надводных неавианесущих кораблей, имеющих на борту корабельный пункт управления авиацией; Структурно-функциональная схема БПАК представлена на рис.3.

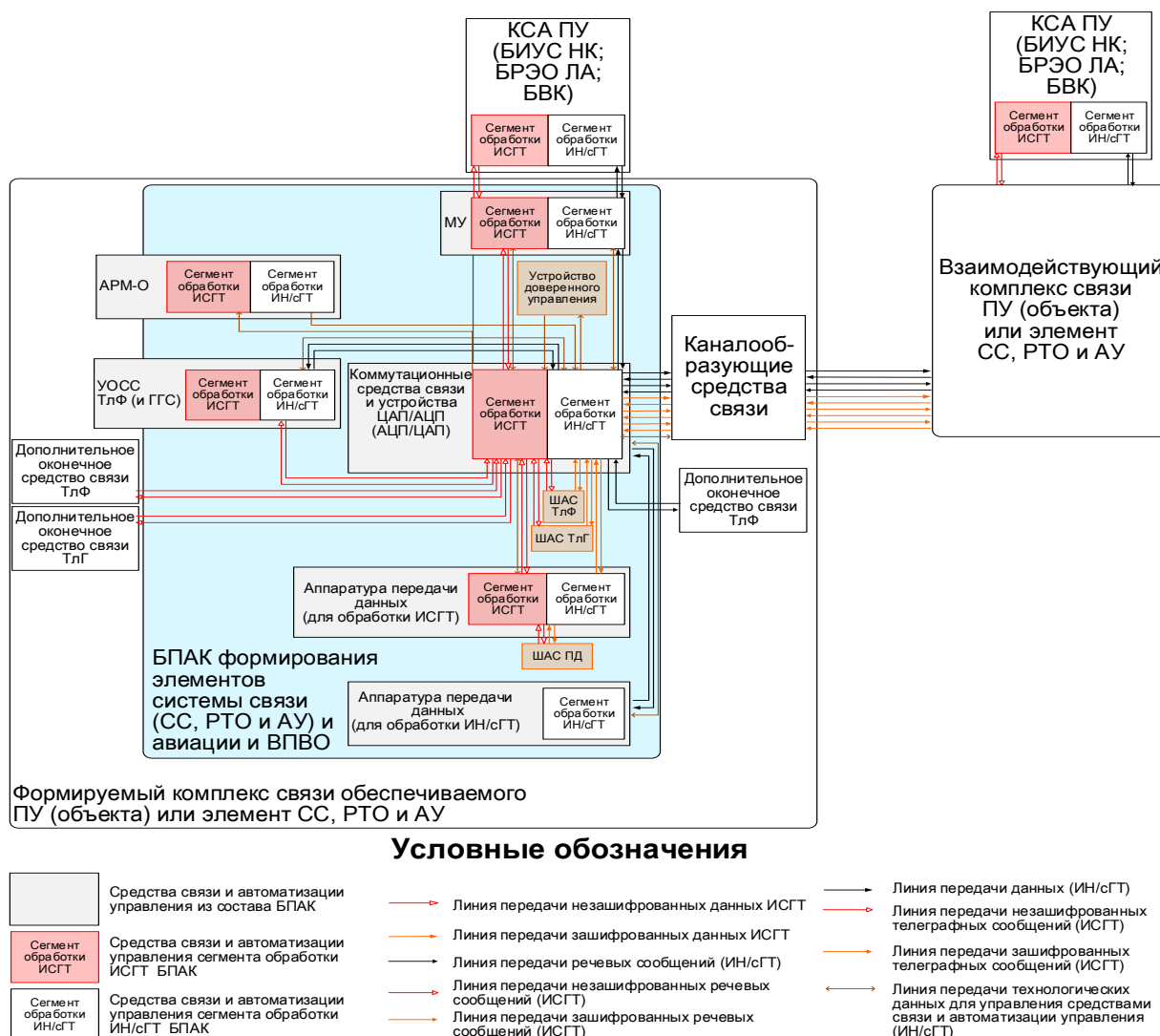


Рис. 3. Структурно-функциональная схема БПАК

Таким образом:

– первая часть замысла направлена на обеспечение построения автоматизированной системы связи, РТО и АУ ГрАВВПВО, что ведёт к сокращению длительности цикла управления войсками (силами) и оружием (средствами) авиации и войск ПВО;

– вторая часть замысла снимает необходимость проведения СЧ ОКР по созданию комплексов связи при ведении ОКР по разработке перспективных образцов вооружения и военной техники (ВВТ), поскольку на основе БПАК могут быть сформированы комплексы связи или элементы объектов связи, обслуживающие создаваемые образцы ВВТ.

Для выполнения вышеизложенного замысла в состав БПАК должны входить:

1) средства автоматизации управления – автоматизированное рабочее место оператора (АРМ-О), и при необходимости, в зависимости от выбранной структуры формируемого комплекса связи и/или модуль управления (МУ); серверное оборудование;

2) средства коммутации, включающие устройства цифро-аналогового (ЦАП) и аналогово-цифрового преобразования (АЦП);



- 3) аппаратура передачи данных (АПД);
- 4) унифицированные оконечные средства телефонной и громкоговорящей связи;
- 5) средства объективного контроля;
- б) средства электропитания.

При дополнении средств из состава БПАК, не входящими в его состав каналообразующими, специальными и оконечными средствами связи становится возможным формирование упомянутых выше элементов автоматизированной системы связи (СС, РТО и АУ) или комплексов связи обслуживаемых объектов ГрАвВПВО.

При этом, в средствах БПАК должна обеспечиваться поддержка:

а) перечня телекоммуникационных служб и видов связи, сочетаний классов излучений (способов модуляции), рабочих диапазонов радиоволн и шага сетки частот, алгоритмов помехозащищённого кодирования и псевдослучайной перестройки рабочих частот, режимов работы командных радиолиний управления, подлежащих реализации в опытном образце;

б) требований к пропускной способности трактов связи программно-аппаратного комплекса обеспечения информационного обмена кораблей (судов) и береговых объектов Военно-морского флота с бортовыми комплексами связи существующих и разрабатываемых летательных аппаратов морской авиации.

В средствах автоматизации управления связью и коммутационных средствах из состава БПАК должна быть предусмотрена возможность масштабирования формируемых комплексов связи, что позволяет оснащать весь перечень пунктов управления и объектов СУВО(С) морской авиации и ВПВО ВМФ.

Оборудование БПАК должно позволять наращивать номенклатуру используемой ШАС и каналообразующих средств связи. Поскольку на перечисленных ПУ (объектах) различные условия эксплуатации средств связи, оборудование из состава БПАК должно выполняться в вариантах, имеющих соответствующую группу исполнения.

Так как в системе управления войсками (силами) и оружием (средствами) ГрАвВПВО используется как информация, содержащая государственную тайну (ИСГТ), так и информация не содержащая государственную тайну (ИН/сГТ), БПАК имеет изолированные сегменты для обработки ИСГТ и обработки ИН/сГТ.

Для обеспечения взаимодействия сегментов и возможности управления средствами связи из состава БПАК, а также не входящими в его состав каналообразующими и специальными средствами связи, необходимыми для формирования элементов автоматизированной системы связи, РТО и АУ или комплексов связи обслуживаемых объектов, в состав БПАК должно входить устройство доверенного управления.

Все средства связи из состава БПАК должны поддерживать дистанционное управление. Дистанционное управление каналообразующих средств связи обеспечивает возможность формирования и конфигурирования типовых трактов связи. Таким образом, обеспечивается поддержка автоматизированного управления связью в формируемых комплексах связи или элементах объектов связи, и тем самым – возможность создания системы автоматизации управления из состава автоматизированной системы авиационной радиосвязи.

#### Литература

1. Козлов К.В., Сорокин К.Н. Некоторые проблемы организации связи в интересах обеспечения управления авиацией и пути их решения // Новые информационные технологии в системах связи и управления. Труды Российской научно-технической конференции. – Калуга, 2009.
2. Духон Ю.И. Справочник по связи и радиотехническому обеспечению полётов. – М.: Воениздат, 1979. – 286 с.
3. Захаров В.А., Гладышев В.А. Основные требования к системе ПВО войск и объектов в современных условиях // Военная мысль. 2007. №1. С. 10-13.

### References

1. Kozlov K.V., Sorokin K.N. *Nekotoryye problemy organizatsii svyazi v interesakh obespecheniya upravleniya aviatsiyey i puti ikh resheniya. Novye informatsionnye tekhnologii v sistemakh svyazi i upravleniya* [Some problems of communication organization in the interests of aviation management and ways of their solution. New information technologies in communication and management systems]. Works of the Russian Scientific and Technical Conference. Kaluga, 2009 (in Russian).
2. Dukhon Y.I. *Handbook on Communication and Radio Engineering Support of Flights*. M.: Vozdat, 1979. 286 p. (in Russian).
3. Zakharov V.A., Gladyshev V.A. *Osnovnyye trebovaniya k sisteme PVO voysk i obyektov v sovremennykh usloviyakh* [Basic requirements to the air defense system of troops and facilities in modern conditions]. Military thought. 2007. №1. P. 10-13 (in Russian).

Статья поступила 12 февраля 2020 г.

### Информация об авторах

Николашин Юрий Львович – Генеральный директор ПАО «Интелтех». Кандидат технических наук. Тлф.: +7(812)295-66-66. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Козлов Константин Валентинович – Заместитель директора научно-технического центра ПАО «Интелтех». Кандидат военных наук. E-mail: k.kozlov@inteltech.ru.

Кулешов Игорь Александрович – Первый заместитель генерального директора ПАО «Интелтех» по научной работе. Доктор технических наук, доцент. E-mail: KuleshovIA@inteltech.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д.8.

### Problems of construction of a control system of armies, the weapon of sea aircraft and armies of air defence of fleet and offers under their decision

Y.L. Nikolashin, K.V. Kozlov, I.A. Kuleshov

**Annotation.** Article opens separate problems of construction of a control system of armies and the weapon of sea aircraft and its integration into a control system of grouping of aircraft and armies of air defence and contains offers under their decision. In article it is reflected that the flying machine of sea aircraft in the course of flight on a route is object of several control systems, a various departmental accessory. These systems have various spatial (spatially-territorial) scope and as consequence - different possibilities on reception of the information on a current site of the flying machine during its application (performance of flight or movement on water). A consequence of that is the impossibility of traffic control of the flying machine on all route in the course of its application by forces and means of any one concrete system from resulted above. Conclusions from the analysis of features of the organisation of an information exchange are resulted at various variants of application of the flying machine of sea aircraft. Offers under the decision of considered problems are stated.

**Keywords:** the communication system; radio engineering; automation of management; sea aircraft; base hardware-software complex.

### Information about authors

Nicolashin Yriy L'vovich – General Director of PJSC «Inteltech». Doctorate of Technical Sciences. Tel: 8(812)295-50-69. E-mail: intelteh@inteltech.ru. Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya, 8.

Kozlov Konstantin Valentinovich – The deputy director of scientific and technical centre PJSC «Inteltech». The candidate of military sciences. Field of research: Control systems and communications. E-mail: k.kozlov@inteltech.ru.

Kuleshov Igor Aleksandrovich – The first deputy of general director PJSC «Inteltech» on scientific work. Dr.Sci.Tech., the senior lecturer. Field of research: Control systems and communications. E-mail: KuleshovIA@inteltech.ru.

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

**Для цитирования:** Николашин Ю.Л., Козлов К.В., Кулешов И.А. Основные проблемы построения системы управления войсками, оружием морской авиации и войск противовоздушной обороны флота и предложения по их решению // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 2-9.

**For citation:** Nikolashin Y.L., Kozlov K.V., Kuleshov I.A. Problems of construction of a control system of armies, the weapon of sea aircraft and armies of air defence of fleet and offers under their decision. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 2-9 (in Russian).

УДК 621.391

## Применение мобильных аппаратных связи для обмена данными с морскими объектами

Моисеев А.А., Киселев А.А.

***Аннотация.** В статье представлена модель, адекватно отображающая процесс обработки каналов передачи (цифровых потоков), с учетом принятой технологии развертывания мобильных аппаратных связи и управления, а также формирования каналов конкретных видов специальной связи. При этом, введенная обратная связь от телекоммуникационных нужд потребителей позволяет опосредованно влиять на формирование необходимого количества цифровых потоков с нормированными показателями качества их функционирования, установленными техническими нормами или заданными требованиями. Разработанный состав мобильных аппаратных связи и управления и технических средств, его образующих, соответствует задачам по обеспечению специальной связи с надводными и подводными морскими объектами, который может варьироваться в зависимости от сложности и объема этих задач. Описаны основные факторы, целесообразные способы организации применения мобильных аппаратных связи и управления и принципы их развертывания и функционирования, которые позволяют выполнять поставленные задачи в любых условиях обстановки и с высоким качеством. Для отражения исходных положений и основных правил построения (развертывания), функционирования и развития системы (сети) специальной связи, с позиции определенного соответствия свойств физического объекта и процесса, реализуемого им, в первом приближении представлена взаимосвязь внешних и внутренних требований к мобильным аппаратным связи и управления. С целью проведения оценки соответствия основному целевому назначению разработана оценка основных свойств системы (сети) специальной связи по готовности к предоставлению потребителям необходимых телекоммуникационных услуг, устойчивости функционирования, мобильности, пропускной способности, разведзащищенности и управляемости. Приведены практические результаты опытных трассовых испытаний применения мобильных аппаратных связи и управления, демонстрирующие возможность применения исследуемого объекта для обмена данными с морскими объектами с позиций минимального времени развертывания антенно-фидерных устройств и обеспечения требования по дальности устойчивой связи, для обеспечения специальной связи в сверхдлинноволновых и коротковолновых частотных диапазонах.*

**Ключевые слова:** *мобильные аппаратные связи и управления; готовность к применению; устойчивость функционирования; мобильность; пропускная способность; разведзащищенность; управляемость.*

### Введение

Одним из условий выполнения основных задач строительства и развития Вооруженных Сил Российской Федерации достигается путем обеспечения надежного функционирования их системы управления в мирное время, в период непосредственной угрозы агрессии и в военное время [1]. При этом неотъемлемой составляющей военного потенциала государства является Военно-Морской Флот (ВМФ), который обеспечивает гарантированную защиту страны от агрессора, как в береговой зоне, так и на морских просторах.

Вопросы управления военно-морскими силами в различных условиях, на сегодняшний день, решены не в полном объеме. Это проявляется, прежде всего, в недостаточной устойчивости функционирования и разведзащищенности системы специальной связи для нужд обороны страны [2] и ее элементов, особенно в военное время. Такое положение дел, в конечном счете, сказывается отрицательно на качестве предоставляемых специальной связью услуг потребителям.

С целью максимального уменьшения или ослабления (в идеальном варианте – устранения) нежелательных воздействий на систему специальной связи и ее элементы в береговой зоне помимо уже имеющегося стационарного компонента предлагается применять

мобильные аппаратные связи и управления (МАСУ). Это позволит осуществить усиление, наращивание, резервирование и восстановление стационарного компонента системы специальной связи ВМФ России, т. к. особенно в периоды непосредственной угрозы агрессии и в военное время этот элемент будет выведен из строя, в первую очередь [3].

**Обобщенная модель, состав и основные положения по применению МАСУ**

МАСУ можно представить в виде модели, отображающей процесс преобразования каналов передачи в каналы специальной связи, станционные тракты которых доводятся до технических норм, позволяющих предоставлять потребителям услуги требуемого качества.

Обобщенная модель МАСУ представляет собой совокупность взаимосвязанных модулей: каналов передачи (цифровых потоков), основного оборудования МАСУ, телекоммуникационных услуг потребителям, а также технологии развертывания МАСУ (рис. 1):

$$M_{\text{МАСУ}} = \langle M_{\text{КП}}, M_{\text{Обор}}, M_{\text{ТКУ}}, M_{\text{ТР}} \rangle, \tag{1}$$

где  $M_{\text{КП}}$  – модуль каналов передачи (цифровых потоков),  $M_{\text{Обор}}$  – модуль основного оборудования МАСУ,  $M_{\text{ТКУ}}$  – модуль телекоммуникационных услуг,  $M_{\text{ТР}}$  – модуль технологии развертывания МАСУ.

Представленная обобщенная модель функционирует следующим образом: на основе сформированных в первичной сети специальной связи каналов передачи (цифровых потоков), в строгом соответствии с принятой технологией развертывания МАСУ (принципами, способами, методами), должностные лица МАСУ с использованием основного оборудования выполняют функции по формированию каналов конкретных видов электросвязи (вторичной сети специальной связи), которые предоставляются потребителям для передачи по ним различных видов сообщений (в виде телекоммуникационных услуг). Телекоммуникационные нужды потребителей при этом могут опосредованно влиять на формирование (прием) необходимого количества каналов передачи (цифровых потоков) с нормированными показателями качества их функционирования, установленными техническими нормами или заданными требованиями:

$$K_{\text{П}} \rightarrow K_{\text{ВЭ}} = f(M_{\text{Обор}}) \rightarrow \text{ТУ} = f(M_{\text{ТКУ}}) \tag{2}$$

$\uparrow$   
 $M_{\text{ТР}}$

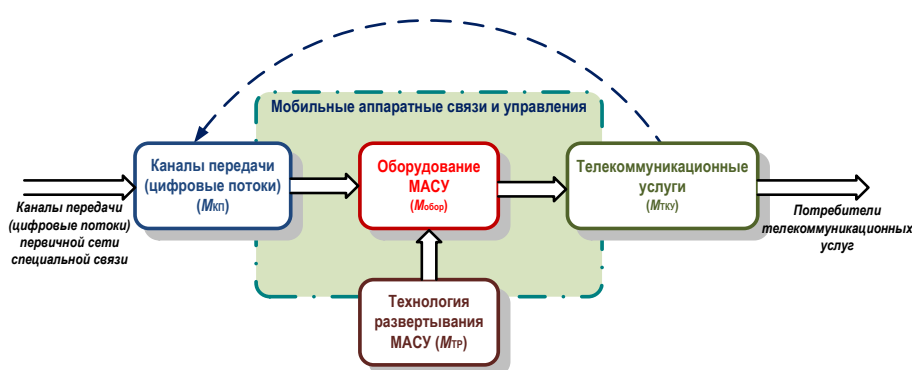


Рис. 1. Обобщенная модель мобильных аппаратных связей и управления

Основными задачами МАСУ являются формирование каналов видов электросвязи и предоставление потребителям специальной связи необходимого перечня услуг (телекоммуникационных, информационных и дополнительных) с требуемым качеством, а также обеспечение информационной безопасности в процессах передачи, приема, обработки, хранения и предоставления информации.

Исходя из указанных задач, с уточнением их для обмена данными с морскими объектами надводного и подводного базирования, в состав МАСУ необходимо включить коротковолновые (КВ) и сверхдлинноволновые (СДВ) системы передачи, для организации радиолиний, обладающих повышенной помехоустойчивостью и разведзащищенностью (скрытостью), за счет использования широкополосных сигналов и режимов передачи с быстрой перестройкой рабочих частот по псевдослучайному закону (режим ППРЧ).

Учитывая необходимые мощности излучения сигналов для обеспечения глобальной связи с морскими объектами, целесообразно радиопередающие устройства (РПДУ) размещать в отдельных мобильных аппаратных с автономными дизель-генераторами.

Кроме того, для решения задач автоматизации, управления и каналообразования в состав МАСУ необходимо включить отдельную аппаратную связи и управления.

Состав МАСУ и его основных технических средств представлен на рис. 2.

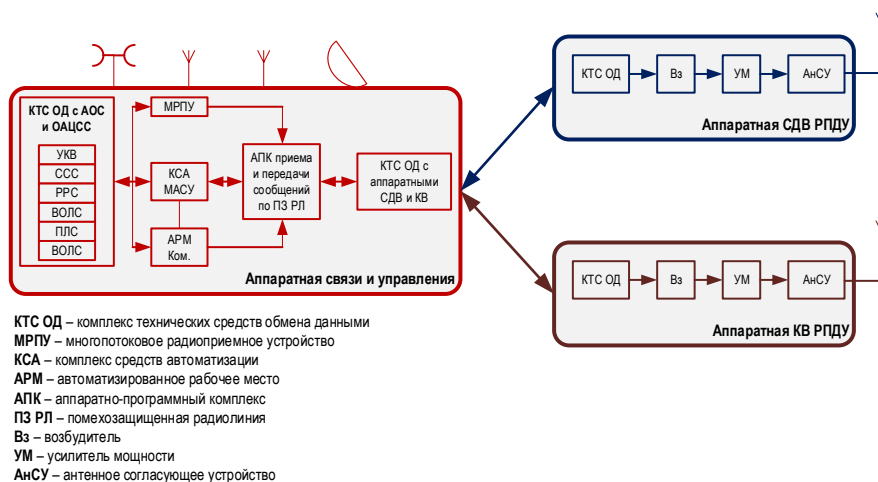


Рис. 2. Состав МАСУ и его основных технических средств

Таким образом, минимальный состав одной группировки (дивизиона) МАСУ (без учета машин обеспечения и охраны) составит три мобильных аппаратных. Количество аппаратных будет зависеть от конкретно решаемых задач по обеспечению специальной связи с надводными и подводными морскими объектами.

Связь управления между аппаратными в ходе совершения марша осуществляется по УКВ радиостанциям малой мощности, а при развертывании, на полевой позиции, по УКВ радиостанциям или по радиорелейным каналам.

Обобщенная схема организации обмена данными мобильных аппаратных связи с морскими объектами приведена на рис. 3.

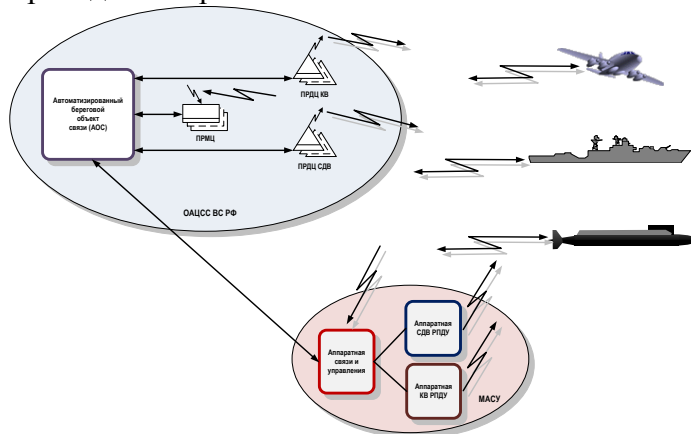


Рис. 3. Схема организации обмена данными мобильных аппаратных связи с морскими объектами (вариант)

Применение МАСУ в мирное и военное время предполагает целенаправленную и организованную подготовку и использование их сил и средств, а также их ресурсов и возможностей для реализации выполнения задач по обмену данными с морскими объектами, находящимися как в надводном, так и в подводном положениях.

К основным факторам, определяющим организацию применения МАСУ, относятся задачи и время, необходимые для подготовки и выполнения данных задач; условия, влияющие на их выполнение; привлекаемые ресурсы (силы и средства).

Наиболее целесообразные способы и методы организации применения МАСУ выбираются на этапе их проектирования (планирования). При этом должны учитываться различные воздействующие на данный процесс факторы: условия обстановки (вид боевых действий), природно-климатические и физико-географические условия, наличие и состояние ресурсов сил и средств связи, время, отведенное для развертывания аппаратных связи, и т. п.

Под способом применения МАСУ понимают совокупность действий, направленных на определение порядка и приемов развертывания аппаратных связи в конкретных условиях обстановки. При этом, МАСУ может выполнять поставленные задачи самостоятельно или во взаимодействии со стационарным компонентом.

МАСУ должны развертываться и функционировать, основываясь на принципах соответствия, единства и рациональности [3].

Реализация представленных принципов в процессе развертывания и эксплуатации МАСУ позволяет выполнять поставленные задачи в любых условиях обстановки и с высоким качеством.

МАСУ, как и любая сложная организационно-техническая система, должны обладать некоторым множеством свойств, характеризующих их с точки зрения соответствия основному целевому предназначению.

При обеспечении специальной связи в мирное и военное время потребителям необходимо осуществить своевременную, безопасную, достоверную и непрерываемую доставку сообщений. Основным требованием, предъявляемым к МАСУ, является качественное обслуживание потребителей, которое определяется комплексным показателем по всем свойствам специальной связи [4]:

$$K_{\text{СПС}} = \langle C_{\text{СПС}}, D_{\text{СПС}}, B_{\text{СС}}, T_{\text{СПС}} \rangle, \quad (3)$$

где  $C_{\text{СПС}}$  – своевременность специальной связи;  $D_{\text{СПС}}$  – достоверность специальной связи;  $B_{\text{СС}}$  – безопасность специальной связи;  $T_{\text{СПС}}$  – непрерываемость специальной связи.

Для реализации качественных показателей специальной связи используется физический объект – система (сеть) специальной связи, элементом (составной частью) которой является МАСУ. На этом основании, требования, предъявляемые к системе (сети) специальной связи будут идентичны требованиям к МАСУ, как к неотъемлемой ее части [3].

Показатели применения по назначению, характеризующие МАСУ, должны иметь величины, позволяющие выполнить требования, предъявляемые к системе специальной связи. Взаимосвязь внешних и внутренних требований к МАСУ, как элементу системы (сети) специальной связи представлены на рис. 4.

Показанные взаимосвязи наглядно отражают исходные положения и основные правила построения (развертывания), функционирования и развития системы (сети) специальной связи, с позиции определенного соответствия свойств физического объекта и процесса, реализуемого им. Наряду с этим, данный рисунок дает лишь первое представление о взаимообусловленности свойств специальной связи и сети специальной связи.

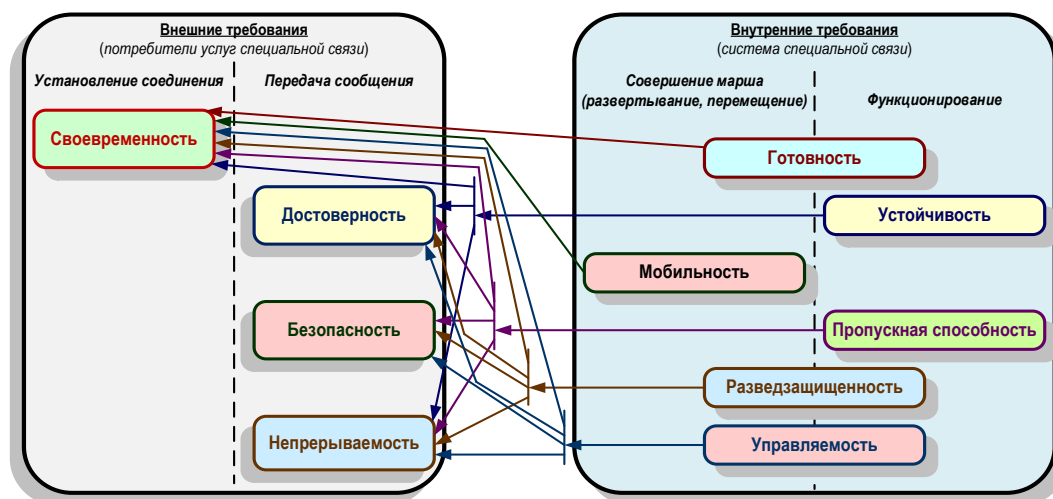


Рис. 4. Взаимосвязь внешних и внутренних требований к МАСУ, как элемента системы (сети) специальной связи

### Основные результаты моделирования

Учитывая специфику организации радиосвязи в частотных диапазонах СДВ и КВ, немаловажным фактором при применении МАСУ является антенно-фидерные тракты.

Как показали расчеты и опытные результаты трассовых испытаний, с точки зрения минимального времени развертывания антенно-фидерных устройств (АФУ) и обеспечения требования по дальности устойчивой связи, для обеспечения связи в КВ и УКВ диапазонах, является применение двух различных АФУ для каждого диапазона.

Так для работы в КВ диапазоне применялась антенна типа «наклонный луч», с подводимой мощностью передатчика до 5 кВт. Для работы в УКВ диапазоне – поворотная логопериодическая антенна (разработка ОНИИП), с подводимой мощностью передатчика до 1 кВт.

Также возможен вариант применения одной широкополосной антенны типа «полуромб» для организации связи в КВ-УКВ диапазоне. При этом время развертывания составляет не более 30 мин; максимально подводимая мощность в диапазоне 3-30 МГц – 6,3 кВт; максимально подводимая мощность в диапазоне 30-80 МГц – 1,2 кВт; КСВ не хуже 2 во всем диапазоне рабочих частот.

В ходе трассовых испытаний была подтверждена результативность предложенного состава технических средств МАСУ. Так на одно-двухскачковых радиотрассах (протяженность до 6 тыс. км) была обеспечена на подвижном объекте вероятность приема сообщений, передаваемых в режиме быстрой ППРЧ (менее 10 мс на одной частоте)

$$P_{\text{пр}} \approx 0,97 - 0,99.$$

Более сложным, в силу своих массогабаритных характеристик, является антенно-фидерный комплекс СДВ диапазона. В этом случае СДВ канал связи является основным средством связи с объектами, находящимися в подводном положении, поэтому обеспечение устойчивого функционирования СДВ тракта является важной и актуальной задачей.

Один из вариантов передающей СДВ «стелящейся» антенны, обеспечивающей работу в особых условиях, представляют из себя проволочные излучатели с общей длиной до 1,5 км, укладываемых на грунт без установки дополнительных опор, что упрощает и сокращает время процесса развертывания антенны. Вместе с тем, при этом излучаемая мощность падает до 50-100 Вт при подводимой мощности до 100 кВт, что снижает дальность устойчивой радиосвязи до 2-3 тыс. км, в зависимости от характера подстилающей поверхности под антенным полотном.

Существенно, более высокими характеристиками (КПД до 50%) обладают тросовые антенны (рис. 5), подъем которых может осуществляться либо с использованием аэростата

типа Au-6 (рис. 6 а) или беспилотного квадрокоптера типа Ка-137 (рис. 6 б), сравнительные характеристики которых приведены в табл. 1.



Рис. 5. Внешний вид тросовой антенны



а)



б)

Рис. 6. Внешний вид аэростата Au-6 и беспилотного квадрокоптера Ка-137

Табл. 1 – Сравнительные характеристики аэростата Au-6 и беспилотного квадрокоптера Ка-137

Основные характеристики	Au-6	Ка-137
Стоимость, млн руб	1	4
Высота подъема антенны, м	1500	2900
Скорость вертикального подъема, м/с	2	5
Грузоподъемность, кг	45	50
Время функционирования	до 15 суток	4
Расходы на 1 подъем, тыс. руб.	56	1,6
Машины доставки образца, ед.	1(прицеп)	1(прицеп)
Количество обслуживающего персонала	6	2
Допустимая скорость ветра, м/с	10	25
Допустимая величина осадков при развертывании, мм/мин	5	15

При этом необходимо отметить, что в условиях мощных ветровых нагрузок или возможного появления «взрывных волн» (ударная волна ядерного взрыва), результативность использования антенны тросового типа не обеспечивает необходимые требования по



обеспечению устойчивости системы (сети) специальной связи, и в таких случаях необходимо применение «стелящихся» антенн.

На сегодняшний день, имеется необходимый научно-технический задел, позволяющий создавать мобильные аппаратные связи и управления, обеспечивающие устойчивый обмен данными с морскими глобально перемещающимися объектами в условиях воздействия случайных и преднамеренных помех, а также повышенной ионизации ионосферы.

### Заключение

Разработанная модель позволяет адекватно представить процесс обработки каналов передачи (цифровых потоков), с учетом принятой технологии развертывания МАСУ и формирования каналов конкретных видов специальной связи. При этом телекоммуникационные нужды потребителей за счет обратной связи опосредованно влияют на формирование необходимого количества цифровых потоков с нормированными показателями качества их функционирования, установленными техническими нормами или заданными требованиями.

Предложенный состав МАСУ и его основных технических средств соответствует задачам по обеспечению специальной связи с надводными и подводными морскими объектами, который может варьироваться в зависимости от сложности и объема этих задач.

Представлены основные факторы, целесообразные способы организации применения МАСУ и принципы их развертывания и функционирования, реализация которых позволяет выполнять поставленные задачи в любых условиях обстановки и с высоким качеством.

Для отражения исходных положений и основных правил построения (развертывания), функционирования и развития системы (сети) специальной связи, с позиции определенного соответствия свойств физического объекта и процесса, реализуемого им, в первом приближении рассмотрена взаимосвязь внешних и внутренних требований к МАСУ.

Практический аспект применения МАСУ представлен основными результатами проведенных опытных трассовых испытаний, наглядно показывающих возможность такого применения для обмена данными с морскими объектами с позиций минимального времени развертывания антенно-фидерных устройств и обеспечения требования по дальности устойчивой связи, для обеспечения специальной связи в СДВ и КВ частотных диапазонах.

Таким образом, применение мобильных аппаратных связи позволяет решать задачи управления военно-морскими объектами надводного и подводного базирования в различных условиях, в том числе и в военное время.

### Литература

1. Президент Российской Федерации. Указы. Военная доктрина Российской Федерации [№Пр-2976 от 25.12.2014].
2. Российская Федерация. Законы. О связи [№ 126-ФЗ от 18 июня 2003 г.]: федер. закон.
3. Боговик А.В., Игнатов В.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. – СПб.: ВАС, 2006. – 183 с.
4. Моисеев А.А., Чуев А.В., Киселев А.А. Качество военной связи как совокупность ее основных свойств // Техника средств связи. 2019. № 2 (146). С. 119-126.

### References

1. President of the Russian Federation. Decrees. Military doctrine of the Russian Federation [No. Pr-2976 of 25.12.2014] (in Russian).
2. Russian Federation. Laws. About communication [№ 126-ФЗ of June 18, 2003]: Feder. Law (in Russian).
3. Bogovich A.V., Ignatov V.V. Effectiveness of military communication systems and methods of its evaluation. – SPB: VAC, 2006. – 183 p. (in Russian).
4. Moiseyev A.A., Chuev A.V., Kiselev A.A. Quality of military communication as a set of its main properties. Communication equipment. 2019. № 2 (146). P. 119-126 (in Russian).

Статья поступила 25 марта 2020 г.

### Информация об авторах

Моисеев Анатолий Алексеевич – кандидат военных наук, профессор, заместитель директора научно-технического центра ПАО «Интелтех». Тел.: +79112950761. E-mail: saldv@inteltech.ru.

Киселев Алексей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, начальник сектора ПАО «Интелтех». Тел.: +79119621460. E-mail: saldv@inteltech.ru.

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

### Application of mobile hardware communications for data exchange with marine objects

A.A. Moiseev, A.A. Kiselev

**Annotation.** *The article presents a model that adequately reflects the process of processing transmission channels (digital streams), taking into account the adopted technology of deployment of MACU and formation of channels of specific types of special communication. At the same time, the introduced feedback from telecommunication needs of consumers allows to indirectly influence the formation of the necessary number of digital flows with standardized indicators of their functioning quality, established technical standards or specified requirements. The developed composition of the ISU and its forming equipment corresponds to the tasks of providing special communication with surface and underwater sea facilities, which can vary depending on the complexity and scope of these tasks. The main factors, expedient methods of organization of MASU application and principles of their deployment and operation, which allow to perform the assigned tasks in any conditions of situation and with high quality, are described. In order to reflect the initial provisions and basic rules of construction (deployment), operation and development of special communication system (network), from the position of certain correspondence of properties of physical object and process implemented by it, in the first approximation the relationship of external and internal requirements to MASU is presented. In order to assess compliance with the main target purpose, an assessment of the main properties of the special communication system (network) has been developed on readiness to provide consumers with the necessary telecommunication services, stability of operation, mobility, capacity, intelligence security and manageability. Practical results of experimental track tests of MASU application, demonstrating the possibility of using the investigated object for data exchange with sea objects from the position of minimum time of antenna-feeder devices deployment and provision of the requirement for the range of stable communication, for provision of special communication in VAS and HF frequency ranges, are presented.*

**Keywords:** *mobile hardware communications and controls; readiness for use; stability of operation; mobility; throughput; intelligence security; manageability.*

### Information about Authors

Moiseev Anatoly Alekseevich – Candidate of military sciences, professor, deputy director of scientific and technical center «Inteltech». Tel. +79112950761. E-mail: saldv@inteltech.ru.

Kiselev Alexey Alekseevich – Candidate of engineering sciences, docent, head of sector «Inteltech». Tel. +79119621460. E-mail: saldv@inteltech.ru.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya street 8.

**Для цитирования:** Моисеев А.А., Киселев А.А. Применение мобильных аппаратных связи для обмена данными с морскими объектами // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 10-17.

**For citation:** Moiseev A.A., Kiselev A.A. Application of mobile hardware communications for data exchange with marine objects. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 10-17 (in Russian).

УДК 621.371

### Интеллектуализация систем автономного электроснабжения комплексов связи специального назначения

Абрамкин Р.В., Веселовский А.П., Винограденко А.М., Косарева Л.И

***Аннотация.** В материалах статьи предложен и обоснован интеллектуальный подход, направленный на улучшение эксплуатационных характеристик комплексов связи специального назначения. Предлагаемый подход основан на наиболее динамично развивающемся направлении силовой электроники, связанным с решением задачи интеллектуального регулирования напряжения в преобразователях постоянного напряжения систем автономного электроснабжения комплексов связи. Линейное регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции с использованием баз правил. Получена линейная регулировочная характеристика во всем диапазоне регулирования от нулевого до максимальных значений. Получена формула регулировочной характеристики выходного напряжения на основе математической модели широтно-импульсного способа регулирования с изменяющейся шириной импульсов.*

***Ключевые слова:** комплексы связи; регулирование напряжения; статические преобразователи напряжения DC-DC; широтно-импульсная модуляция; регулировочная характеристика.*

#### Введение

Новый виток эволюционного развития комплексов связи специального назначения (СН), автономный характер функционирования, постоянное увеличение сложности аппаратуры, а также увеличение требований со стороны органов управления, определяет необходимость повышения эффективности функционирования систем автономного электроснабжения (САЭ) эволюционирующих комплексов связи, на основе интеллектуализации процессов управления.

САЭ комплексов связи СН представляют собой совокупность технических средств, предназначенных для обеспечения элементов автономных систем управления и связи электрической энергией заданного качества в необходимом количестве в районе выполнения задачи. В составе современных САЭ комплексов связи СН применяются электромеханические источники электроэнергии, а также значительное количество вторичных источников питания, представляющих собой системообразующее электротехническое оборудование.

Одними из наиболее значимых элементов данного оборудования являются импульсные преобразователи постоянного тока, так как во многом от их работы зависит состояние системы в целом. Они требуют повышенной точности и скорости регулирования в разомкнутых и замкнутых системах управления. Использование энергосберегающего регулируемого преобразователя постоянного тока, функционирующего с использованием элементов искусственного интеллекта, обеспечивает улучшение эксплуатационных характеристик САЭ комплексов связи СН, в целом [1-8].

Основным параметром преобразователя, наиболее остро влияющим на работу САЭ комплексов связи СН является регулировочная характеристика, определяющая точность и скорость регулирования [9-18].

#### Принципы преобразования постоянного тока

Для улучшения потребительских свойств изделий оптимизируют параметры, повышают рабочую частоту преобразования, уменьшают потери мощности на силовых элементах, а также снижают динамические нагрузки в силовой части схемы. Для

регулирования переменного и постоянного напряжений используются широтно-импульсные методы модулирования с изменяющейся скважностью импульсов [5].

Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения (*DC-DC*) преобразуют постоянное напряжение в импульсное, среднее значение которого необходимо регулировать. Выходное напряжение таких преобразователей (до выходного фильтра), как правило, имеет вид однополярных импульсов.

Частота преобразования зависит от динамических свойств вентиля, на которых выполнен преобразователь. В связи с неизменным значением питающего напряжения, на входе преобразователя естественная коммутация вентиля (тиристоров) невозможна, что требует использования элементов с полным управлением (запираемые тиристоры, транзисторы). *GTO*-тиристоры допускают переключения до 1 кГц, *IGBT*-транзисторы – примерно до 10 кГц, полевые транзисторы – до 1 МГц и выше [12].

Уравнение регулировочной характеристики широтно-импульсного преобразователя с однополярными и равными по длительности импульсами (однополярная модуляция), определяется степенью регулирования  $C$  выходного напряжения:

$$C = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{TU_{\text{вх}}} \int_0^{t_{\text{и}}} U_{\text{вх}} dt = \frac{t_{\text{и}}}{T} \quad (1)$$

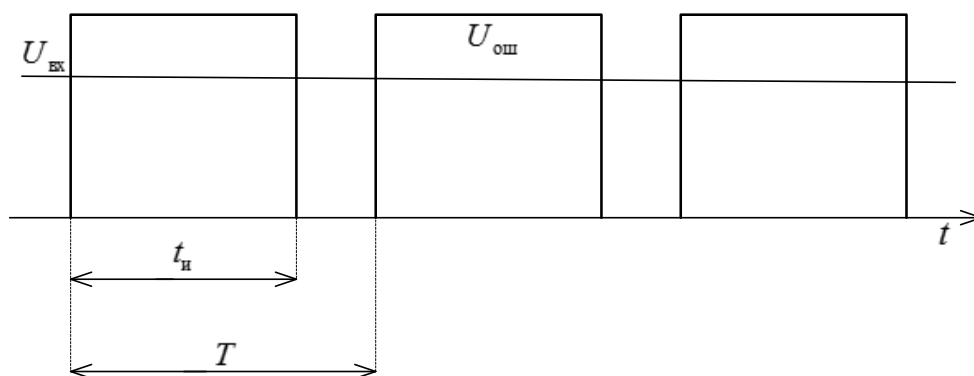


Рис. 1. Широтно-импульсная модуляция преобразователей с однополярными импульсами равной длительности

Существенным моментом в преобразователях постоянного напряжения является желаемая линейная зависимость выходного напряжения от управляющего воздействия. Особенностью зависимости  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{упр}})$  при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения является нелинейность выходной характеристики [1]. Регулировочная характеристика при таком способе регулирования имеет круто падающий характер, что затрудняет разработку регуляторов при использовании микропроцессоров. Линейность характеристики является большим достоинством преобразователя, обеспечивающим оптимальное построение устройств интеллектуального управления процессами в выходной цепи выпрямителей.

Разработан метод модулированного широтно-импульсного управления силовыми элементами преобразователя с изменением длительности силовых импульсов, позволяющий получить линейную зависимость выходного напряжения от управляющего синусоидального напряжения [2] за счет использования базы правил.

Частичную линейность регулировочной характеристики управляемого выпрямителя возможно получить, используя ШИМ при изменении угла управления  $\alpha$  по арккосинусоидальному закону [10].

Авторами предложен метод регулирования выходного напряжения ШИМ, который позволяет получить линейную регулировочную характеристику в диапазоне от 0 до 1.

**Математическое описание предложенного линейного широтно-импульсного метода регулирования**

Совместного решения уравнений линейной и синусоидальной функции нет. Применяется прием, при котором последовательность треугольных импульсов рассматривается как набор линейных функций, пересекаемых синусоидальной функцией, рис. 2.

Применим следующие обозначения:

$U_c \sin x$  – синусоидальное напряжение на полупериоде  $\pi$ ;

$U_T$  – напряжение, соответствующее высоте треугольных импульсов;

$m$  – число треугольных импульсов на участке  $\pi$ ;  $l_1, l_3, \dots, l_{2m-1}$  – нечетные прямые (левые бедра треугольных импульсов);

$l_2, l_4, \dots, l_{2m}$  – четные прямые (правые бедра треугольных импульсов);

$x_0, x_2, \dots, x_{2m}$  – координаты оснований треугольных импульсов на оси  $x$ ;

$x_1, x_3, \dots, x_{2m-1}$  – координаты вершин треугольных импульсов на оси  $x$ ;

$\xi_1, \xi_3, \dots, \xi_m$  – координаты пересечений сторон треугольников с синусоидальной кривой на оси  $x$ ;

$U(x_1), U(x_2), \dots, U(x_n)$  – напряжения синусоидальной кривой, соответствующие координатам  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ;

$k$  – порядковый номер координаты  $x_k$  от  $x_0$  до  $x_{2m}$ .

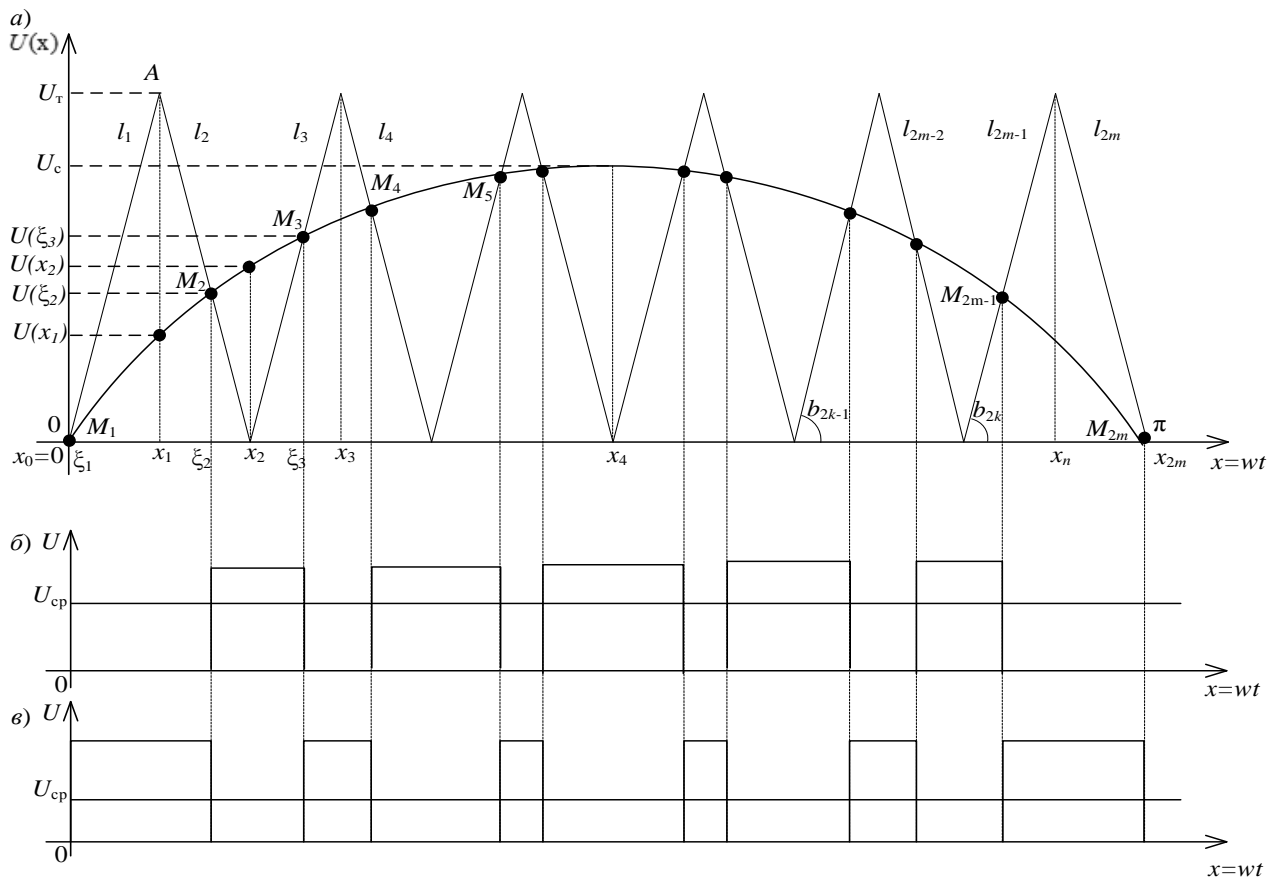


Рис. 2. Пересечение синусоидальной кривой напряжения с  $m$  треугольными импульсами

Нечетные прямые  $l_1, l_3, \dots, l_{2m-1}$  треугольных импульсов пересекают синусоидальную кривую напряжения  $U_c \sin x$  в точках  $M_1, M_3, \dots, M_{2m-1}$  с координатами на оси  $x$ , соответствующим  $x_k = 1, 3, \dots, 2m-1$

$$x_{k_{\text{нечет}}} = \frac{\pi k}{m} \tag{2}$$

Четные прямые  $l_2, l_4, \dots, l_{2m}$  треугольных импульсов пересекают синусоидальную кривую напряжения  $U_c \sin x$  в точках  $M_2, M_4, \dots, M_{2m}$  с координатами на оси  $x$ , соответствующим  $x_k = 1, 3, \dots, 2m$

$$x_{k_{\text{чет}}} = \frac{\pi(1-k)}{m} \tag{3}$$

Учитывая, что уравнение прямой, проходящей через 2 точки с координатами  $(x_1; y_1)$  и  $(x_2; y_2)$  имеет вид (3), допустим

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} \tag{4}$$

Для нечетных сторон треугольника уравнения (4) после подстановки координат  $x_1, x_2$  и  $y_1, y_2$  примет вид:

$$\frac{x-x_{k_{\text{неч}}}}{x_{k_{\text{неч}}} - x_{k_{\text{неч}}}} = \frac{y-0}{U_T-0} \tag{5}$$

где  $y = \frac{mU_T}{\pi} x - kU_T$ , а для четных сторон прямоугольников:

$$y_k = \frac{x - \frac{\pi k}{m}}{-\frac{\pi}{2m}} U_T = -\frac{2mU_T}{\pi} x + 2kU_T \tag{6}$$

Для четных и нечетных прямых (сторон треугольных импульсов) уравнения (4) и (5) запишутся в общем виде:

$$y_{2k} = (-1)^k U_T \left( \frac{2mx}{\pi} - k + \frac{1+(-1)^k}{2} \right) \tag{7}$$

где  $x \in [x_{k-1}; x_k]$ ,  $k = 1, 2, \dots, 2m$ .

Аналитическое представление точки пересечения синусоидальной кривой  $U(x) = U_c \sin x$  с прямыми  $l_k$  ( $k = 1, 2, \dots, 2m$ ) представляется трудно достижимым, поэтому точкой пересечения будем считать точку  $M_k(\xi_k; y(\xi_k))$ .

Ординату этой точки положим равной среднему значению функции  $U(x) = U_c \sin x$  в точках, ограничивающих область задания прямой  $l_k$ . Тогда

$$\begin{aligned} y(\xi_1) &= \frac{U(x_{k-1}) + U(x_k)}{2}, \\ y(\xi_k) &= \frac{1}{2} (U_c \sin x_{k-1} + U_c \sin x_k), \\ y(\xi_k) &= \frac{U_c}{2} 2 \sin \frac{x_{k-1} + x_k}{2} \cos \frac{x_{k-1} - x_k}{2}, \\ y(\xi_k) &= U_c \cos \frac{\pi}{4m} \sin \frac{\pi(2k-1)}{4m}. \end{aligned} \tag{8}$$

Координаты точки  $M_k$  удовлетворяют уравнению прямой  $l_k$ . Тогда

$$y(\xi_k) = (-1)^k U_T \left( \frac{2m}{\pi} \xi_k - k + \frac{1+(-1)^k}{2} \right)$$

Отсюда получаем:

$$\xi_k = ((-1)^k \frac{y(\xi_k)}{U_T} + k - \frac{1+(-1)^k}{2}) \frac{\pi}{2m}$$

Подставляя из (8) выражение для  $y(\xi_k)$ , получаем для  $\xi_k$  следующее выражение:

$$\xi_k = ((-1)^k \frac{U_c}{U_T} \cos \frac{\pi}{4m} \sin \frac{\pi(2k-1)}{4m} + k - \frac{1+(-1)^k}{2}) \frac{\pi}{2m} \tag{9}$$

На рис. 2 а) представлены прямоугольные импульсы, удовлетворяющие условию:

$$\begin{aligned}
 &U_T(x) < U_c \sin x, \\
 &U_{II}(x) = \begin{cases} U_0, & x \in \bigcup_{k=1}^m [\xi_{2k}, \xi_{2k+1}] \\ 0, & x \notin \bigcup_{k=1}^m [\xi_{2k}, \xi_{2k+1}] \end{cases} \\
 &U_{cp}^- = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_{II}(x) dx, \\
 &U_{cp}^- = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^m \int_{\xi_{2k}}^{\xi_{2k+1}} U_0 dx, \\
 &U_{cp}^- = U_0 \left(1 - \frac{U_c}{mU_T} \cos^2\left(\frac{\pi}{4m}\right) \frac{\cos \frac{\pi}{2m}}{\sin \frac{\pi}{2m}}\right). \tag{10}
 \end{aligned}$$

При  $m \gg 1$ :  $\cos \frac{\pi}{4m} \rightarrow \cos 0 = 1$ ;  $\cos \frac{\pi}{2m} \rightarrow \cos 0 = 1$ , а  $\sin \frac{\pi}{2m} \sim \frac{\pi}{2m}$ , так как  $\frac{\pi}{2m} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} 0$ .

Получаем следующее значение среднего напряжения  $U_{cp}^-$  на нагрузке:

$$U_{cp}^- \cong U_0 \left(1 - \frac{U_c}{mU_T \pi}\right) = U_0 \left(1 - \frac{2U_c}{\pi U_T}\right) \tag{11}$$

На рис. 2 б) представлены прямоугольные импульсы, удовлетворяющие условию:

$$\begin{aligned}
 &U_T(x) > U_c \sin x, \\
 &U_{II}(x) = \begin{cases} U_0, & x \in \bigcup_{k=1}^m [\xi_{2k} - 1, \xi_{2k}] \\ 0, & x \notin \bigcup_{k=1}^m [\xi_{2k} - 1, \xi_{2k}] \end{cases}
 \end{aligned}$$

Получаем следующее значение среднего напряжения  $U_{cp}^+$  на нагрузке:

$$U_{cp}^+ \cong U_0 \frac{2U_c}{\pi U_T} \tag{12}$$

На рис. 3 представлены регулировочные характеристики преобразователя, полученные в результате применения данного метода регулирования. Согласно представленным регулировочным характеристикам, настоящий метод позволяет осуществлять регулирование выходного напряжения преобразователей DC-DC линейно во всем диапазоне от 0 до 1.

### Заключение

На сегодняшний день, существующие системы автономного электроснабжения комплексов связи СН, характеризуются недостаточной эффективностью функционирования. Внедрение предложенного интеллектуального подхода, заключающегося в применении метода ШИМ с применением базы правил, позволит получить линейную регулировочную характеристику преобразователей постоянного напряжения, а также производить регулирование напряжения от нулевых значений до максимальных. При этом, осуществляется распределение (оптимизация) ресурсов микропроцессорной техники и их использование в процессах производства и функционирования регуляторов напряжения. Результаты по разработанному алгоритму работы управляющего устройства методом ШИМ могут найти широкое применение в САЭ комплексов связи СН.

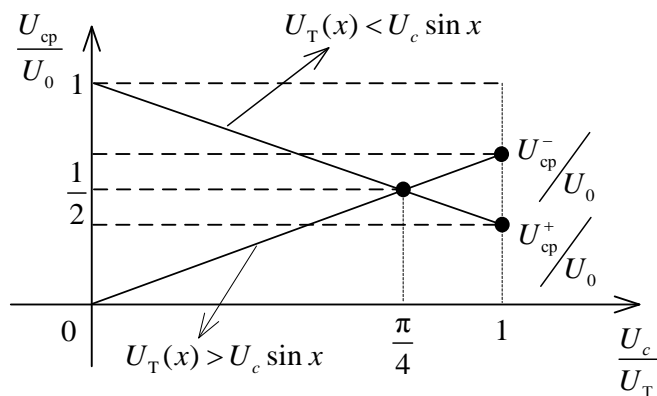


Рис. 3. Регулировочные характеристики преобразователя

### Литература

1. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: учебник для вузов / под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 320 с.
2. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. М.: Солон-Пресс, 2011. 416 с.
3. Розанов Ю.Г. Основы силовой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1992. 296 с.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Academia, 2006. 265 с.
5. Роташ Э.М., Дробович Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н. Высокочастотные транзисторные преобразователи. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.
6. Будко П.А., Бурьянов О.Н., Винограденко А.М., Веселовский А.П. Особенности систем управления вентильных преобразователей / Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: труды II межвузовской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, Военная академия связи, 2017). Санкт-Петербург, 2017. – С. 150-154.
7. Будко П.А., Винограденко А.М., Веселовский А.П., Косарева Л.И. Реализация способа преобразования переменного напряжения // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: труды III межвузовской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, Военная академия связи, 2018). Санкт-Петербург, 2018. – С. 168-172.
8. Будко П.А., Веселовский А.П., Винограденко А.М., Косарева Л.И. Регулирование напряжения в преобразователях высокочастотными импульсами с изменяющейся скважностью // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. № 8 (19). С. 516-522. doi: 10.17587/mau.19.516-522.
9. Винограденко А.М., Веселовский А.П., Вжесневский С.В., Гальвас А.В. Способ и устройство синхронизации систем управления преобразователей напряжения // Практическая силовая электроника. 2018. № 2 (70). С. 53-55.
10. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Плотников И.А. Силовые преобразователи в электроснабжении: учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2014. 150 с.
11. Гельман М.В., Гельман М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника: учебное пособие. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2009. 425 с.
12. Кулик В.Д. Силовая электроника: учебное пособие. СПб.: Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2010. 91 с.
13. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учебное пособие. М.: Юрайт, 2012. 671 с.
14. Abraham L., Neumann K., Koppelman F. Wechselrichter für Drehzahlsteuerung von Kfz-Motoren. AEG-Mitt. 1964. № 2. P. 89-106.
15. Volkov A.G. Mathematical model of AC-AC converter without passive elements in DC-link. Source of the Document International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014). 2014. P. 403-407.
16. Веселовский А.П., Винограденко А.М., Косарева Л.И. Импульсный метод регулирования напряжения / Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: труды IV межвузовской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, Военная академия связи, 2019). – Санкт-Петербург, 2019. – С. 190-194.
17. Веселовский А.П., Винограденко А.М., Дорошенко Г.П. Импульсные устройства в выпрямителях / Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: труды IV



межвузовской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, Военная академия связи, 2019). – Санкт-Петербург, 2019. – С. 187-189.

18. Баринов М.А., Будко П.А., Винограденко А.М., Морозов Р.В., Бурлаков А.А. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: учебник для курсантов вузов связи, обучающихся по специальностям «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи» и «Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения» / под ред. А.В. Мякотина. СПб.: Военная академия связи, 2015. 470 с.

#### References

1. Gorbachov G.N., Chaplyigin E.E. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial electronics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 320 p. (in Russian).

2. Semenov B.Y. *Silovaya elektronika: professional'nie resheniya* [Power electronics: professional solutions]. Moscow, Solon-Press Publ., 2011. 416 p. (in Russian).

3. Rozanov Y.G. *Osnovy silovoy elektroniki* [Bases of power electronics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 296 p. (in Russian).

4. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnim regulirovaniem* [AC electric drives with frequency control]. Moscow, ACADEMA Publ., 2006. 265 p. (in Russian).

5. Rotash E.M., Drobovich U.I., Yurchenko N.N., Shevchenko P.N. *Vysokochastotnie tranzistornie preobrazovately* [High-frequency transistor converters]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988. 288 p. (in Russian).

6. Veselovskiy A.P., Budko P.A., Bur'yanov O.N., Vinogradenko A.M. Osobennosti system upravleniya ventil'nykh preobrazovateley [Features of valve converter control systems]. *Trudi mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy tehnikeskogo obespecheniya voysk v sovremennih usloviyah"* [Materials of reports of the scientific and practical conference "Main problems and prospects for development of autonomous power supply systems"]. St. Petersburg, Military Academy of communications Publ., 2017, pp. 150-154 (in Russian).

7. Veselovskiy A.P., Budko P.A., Vinogradenko A.M., Kosareva L.I. Realizatsiya sposoba preobrazovaniya peremennogo napryazheniya [Implementation of AC voltage conversion method]. *Trudi mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy tehnikeskogo obespecheniya voysk v sovremennih usloviyah"* [Materials of reports of the scientific and practical conference "Main problems and prospects for development of autonomous power supply systems"]. St. Petersburg, Military Academy of communications Publ., 2018, pp. 168-172 (in Russian).

8. Veselovskiy A.P., Budko P.A., Vinogradenko A.M., Kosareva L.I. Regulirovanie napryazheniya v preobrazovatelyah visokochastotnymi impul'sami s izmenyayutsheysya skvazhnost'yu [Voltage control in converters with high frequency pulses with varying duty cycle]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2018, no. 8 (19), pp. 516-522. doi: 10.17587/mau.19.516-522 (in Russian).

9. Vinogradenko A.M., Veselovskiy A.P., Vzhesnevskiy S.V., Gal'vas A.V. Spособ i ustroystvo sinhronizatsii system upravleniya preobrazovateley napryazheniya [Method and device for synchronizing control systems of voltage converters]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2018, no. 2 (70), pp. 53-55. (in Russian).

10. Lukutin B.V., Obuhov S.G., Plotnikov I.A. *Silovie preobrazovateli v elektrosnabzheniy* [Power converters in the power supply]. Tomsk, Tomsk's politechnical University Publ., 2014. 150 p. (in Russian).

11. Gel'man M.V., Gel'man M.M., Preobrazhenskiy K.A. *Preobrazovatel'naya tehnika* [Converting equipment]. Chelyabinsk, South-Ural'skiy state University Publ., 2009. 425 p. (in Russian).

12. Kulik V.D. *Sylovaya elektronika* [Power electronics]. St. Petersburg, Saint Petersburg state University of plant polymers Publ., 2010, 91 p. (in Russian).

13. Zinov'ev G.S. *Sylovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurayt Publ., 2012, 671 p. (in Russian).

14. Abraham L., Heumann K., Koppelman F. Wechselrichter fur Dzehzahlsteuerung von Kafiglaufmotoren. *AEG-Mitt.*, 1964, no. 2, pp. 89-106.

15. Volkov A.G. Mathematical model of AC-AC converter without passive elements in DC-link [Source of the Document International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014)]. 2014, pp. 403-407.

16. Veselovskiy A.P., Vinogradenko A.M., Kosareva L.I. Impul'sniy method regulirovaniya napryazheniya [Pulse voltage control method]. *Materiali dokladov 4 mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy tehnikeskogo obespecheniya voysk v sovremennih usloviyah"* [Works of the 4-th inter-university scientific and practical conference "Main problems and prospects for development of autonomous power supply systems"]. St. Petersburg, Military Academy of communications Publ., 2019, pp. 190-194 (in Russian).

17. Veselovskiy A.P., Vinogradenko A.M., Doroshenko G.P. Impul'snie ustroystva v vipryamatelyah [Pulse devices in rectifiers] *Materiali dokladov 4 mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy*

*tehnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennih usloviyah*” [Works of the 4-th inter-university scientific and practical conference “Main problems and prospects for development of autonomous power supply systems”]. St. Petersburg, Military Academy of communications Publ., 2019, pp. 187-189 (in Russian).

18. Barinov M.A., Budko P.A., Vinogradenko A.M., Morozov R.V., Burlakov A.A. *Elektropitanie ustroystv i sistem telekommunikatsiy* [Power supply of telecommunication devices and systems]. St. Petersburg, Military Academy of communications Publ., 2015. 470 p. (in Russian).

Статья поступила 25 марта 2020 г.

### Информация об авторах

Абрамкин Роман Викторович – Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, адъюнкт. Адрес: Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, д. 3. E-mail: avg62rus@rambler.ru.

Веселовский Анатолий Платонович – Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, доцент, к.т.н., доцент. Адрес: Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, д. 3. E-mail: A\_Veselovskiy@mail.ru.

Винограденко Алексей Михайлович – Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, докторант, к.т.н., доцент. Адрес: Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т д. 3. E-mail: vinogradenko.a@inbox.ru.

Косарева Лидия Ивановна – Военный институт (инженерно-технический). Адрес: Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 22. E-mail: kosareval52@mail.ru.

### Intellectualization of autonomous power supply systems for special-purpose communication complexes

R.V. Abramkin, A.P. Veselovskiy, A.M. Vinogradenko, L.I. Kosareva

**Annotation.** *The materials of the article propose and justify an intellectual approach aimed at improving the performance of special-purpose communication complexes. The proposed approach is based on the most dynamically developing direction of power electronics, related to the solution of the problem of intelligent voltage regulation in DC converters of Autonomous power supply systems of communication complexes. Linear adjustment characteristic is obtained in the whole control range from zero to maximum values. Formula of adjustment characteristic of output voltage is obtained based on mathematical model of pulse width control method with varying width of pulses.*

**Keywords:** *communication complexes; voltage control; DC-DC static voltage converters; pulse width modulation, adjustment characteristic.*

### Information about Authors

Abramkin Roman Viktorovich – Graduated in a Military Academy of Communication named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: intellectual control of information and telecommunication systems. E-mail: avg62rus@rambler.ru.

Veselovskiy Anatoliy Platonovich – PhD, Docent. Docent Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: intellectual control of information and telecommunication systems. E-mail: a\_veselovskiy@mail.ru.

Vinogradenko Alexey Mikhailovich – PhD, Docent, Doctoral Candidate. Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: intellectual control of information and telecommunication systems. E-mail: vinogradenko.a@inbox.ru.

Address: 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretsky pr., 3.

Kosareva Lidiya Ivanovna – PhD, Docent. Docent Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulyov. Research interests: power electronics. E-mail: kosareval52@mail.ru. Address: 121123, Russia, St. Petersburg, Zahar’evskaya st., 22.

**Для цитирования:** Абрамкин Р.В., Веселовский А.П., Винограденко А.М., Косарева Л.И. Интеллектуализация систем автономного электроснабжения комплексов связи специального назначения // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С.18-25.

**For citation:** Abramkin R.V., Veselovskiy A.P., Vinogradenko A.M., Kosareva L.I. Intellectualization of autonomous power supply systems for special-purpose communication complexes. Means of communication equipment. 2020. No. 2 (150). P.18-25 (in Russian).

## ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 621.396.2:861.5.037

**Экспертная система оценки помехозащищенности декаметровых радиоканалов Военно-Морского Флота**

Мирошников В.И., Кулешов И.А., Талагаев В.И.

***Аннотация.** Сформулированы принципы построения экспертной системы оценки помехозащищенности декаметровых радиоканалов Военно-Морского Флота. Приведен пример ответа экспертной системы на запрос о помехозащищенности некоторых декаметровых радиоканалов Военно-Морского Флота в виде зависимостей вероятности доставки сообщений от отношения сигнал/помеха на входе приемника. Экспертная система может найти практическое применение в пакете программных средств автоматизированного рабочего места исследователей и разработчиков декаметровых радиоканалов, должностных лиц службы связи Военно-Морского Флота при планировании и оперативном управлении связью.*

***Ключевые слова:** проблемно-ориентированная экспертная система; декаметровый радиоканал; помехозащищенность радиоканала; рабочие характеристики радиоканала; вероятность доставки сообщений.*

В силу физических особенностей среды распространения сигналов и технических принципов их приема и обработки, различные типы используемых в системе связи Военно-Морского Флота (ВМФ) радиоканалов (РК) декаметрового (ДКМ) диапазона при одних и тех же энергетических параметрах, скорости передачи, и отношении сигнал/помеха в точке приема обеспечивают разное качество доставки сообщений в условиях естественных и преднамеренных помех. Кроме этого, вероятность доставки сообщения фиксированного объема за заданное время по одному и тому же РК зависит от вида действующей на нее помехи, поскольку различные виды помех оказывают разное влияние на качество его функционирования [1, 2].

Зависимости вероятности доставки формализованных сообщений за заданное для данного типа РК время от отношения сигнал/помеха на входе приемника при различных видах помех, обычно, называются рабочими характеристиками РК. Их получение аналитическим путем для различных типов РК и видов помех затруднено в связи с необходимостью учета множества факторов, которые зависят от выбранных в РК: объема сообщения, скорости передачи, способов модуляции/демодуляции, методов кодирования/декодирования, энергетических и технических характеристик передающих и приемных радиосредств и др. Затруднения усиливаются еще и тем, что некоторые из параметров и характеристик РК детерминированы, но априорно не известны, другие же носят случайный характер также с неизвестными законами распределения. Поэтому определение зависимости сигнал/помеха на входе приемника РК относится к классу трудно формализуемых задач, не имеющих алгоритмического решения.

Разрозненные и неполные сведения о качестве функционирования отдельных типов ДКМ РК в условиях различных видов помех существуют в виде результатов аналитической оценки помехозащищенности (вероятности доставки сообщений, вероятности ошибки в приеме сигнала или символа, вероятности правильного опознавания знаков и др.), а также в виде результатов экспериментальных испытаний (статистических данных помехозащищенности РК) и опыта эксплуатации (знаний операторов об особенностях и качестве функционирования РК в условиях различных видов помех). Неопределенность знаний о помехозащищенности РК дополняется неопределенностью сведений о параметрах

РК и помехах, с учетом которых делаются выводы о их помехозащищенности. Кроме этого, и сам механизм выводов о помехозащищенности РК не до конца ясен. В связи с этим, для получения рабочих характеристик ДКМ РК целесообразно использовать проблемно-ориентированные экспертные системы (ЭС), способные усвоить, обобщить (редуцировать) имеющиеся у экспертов (проектировщиков, испытателей и операторов связи) расчетные, экспериментальные и опытные данные, способы их получения, а также сделать заключение по запросу пользователя о помехозащищенности РК при воздействии помех того, или иного вида [3, 4, 5]. Применение ЭС освобождает от необходимости поиска и разработки мощных универсальных и формализованных методов решения этой задачи. ЭС наиболее эффективна в тех областях, где требуется оперировать большим запасом знаний, что характерно для области помехозащищенности радиосвязи [6].

Технической базой ЭС служат персональные электронно-вычислительные машины (ПЭВМ), обладающие широкими возможностями хранения, обработки и отображения информации. Достоинство ПЭВМ – диалоговый способ общения с пользователем (исследователем, экспертом), что важно при создании ЭС. ПЭВМ представляет комфортную среду для передачи знаний опытного специалиста массовому пользователю. Способ, посредством которого ЭС получает и выдает информацию (факты и правила) от эксперта к пользователю определяет ее доступность, т. е. структуру интерфейса. Ввиду сложности построения лингвистического процессора, обеспечивающего общение с ЭС на естественном языке, для быстрого прототипа ЭС в качестве способа общения применим регламентированный диалог в виде меню. К языку программирования в ЭС предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, язык должен быть мощным для описания сложной области помехозащищенности, с другой – должен быть простым для обеспечения общения эксперта и пользователя с ЭС. В качестве языка программирования, в большей степени отвечающего этим требованиям, подходит язык высокого уровня СИ++, использующийся для написания системных программ. Выбор инструментального языка СИ++ определяется наличием специалистов, владеющих этим языком в группе разработчиков и его возможностями по структурному программированию, необходимыми для построения ЭС [7, 8].

Учитывая трудности формализации задач численной оценки помехозащищенности РК, эволюционирующее развитие теории ЭС и необходимость модификации принципов построения в ходе проектирования ЭС на первом этапе ее создания нецелесообразно использовать концепцию так называемого «быстрого прототипа». В общем виде структура «быстрого прототипа» ЭС оценки помехозащищенности ДКМ РК представляет собой набор программ, включающий следующие основные функциональные блоки (рис. 1):

диалоговый процессор, осуществляющий интерфейс с пользователем и экспертом на естественном для них языке (естественный язык, меню, графика);

базу знаний, предназначенную для хранения предметных эмпирических и логических декларативных знаний (фактов, сведений, данных) и процедурных знаний (продукций и правил, управляющих знаниями) из области помехозащищенности РК;

управляющую систему (планировщик, интерпретатор), осуществляющую организацию применения предметных знаний (порядок использования фактов, проверки правил и действий ЭС);

решатель задачи, предназначенный для обработки имеющихся в базе сведений и базе правил путем проверки и принятия решений;

систему объяснений, информирующую пользователя о действиях (рассуждениях) ЭС на этапах принятия решений и отвечающую на вопросы пользователя.

Применительно к оценке помехозащищенности РК, ЭС – это программно-реализованная на ПЭВМ система обобщения неточных знаний экспертов о качестве функционирования РК в условиях преднамеренных помех, а именно, система обработки

неточных сведений и выработки точных решений о помехозащищенности РК с ее количественной оценкой в виде рабочих характеристик.

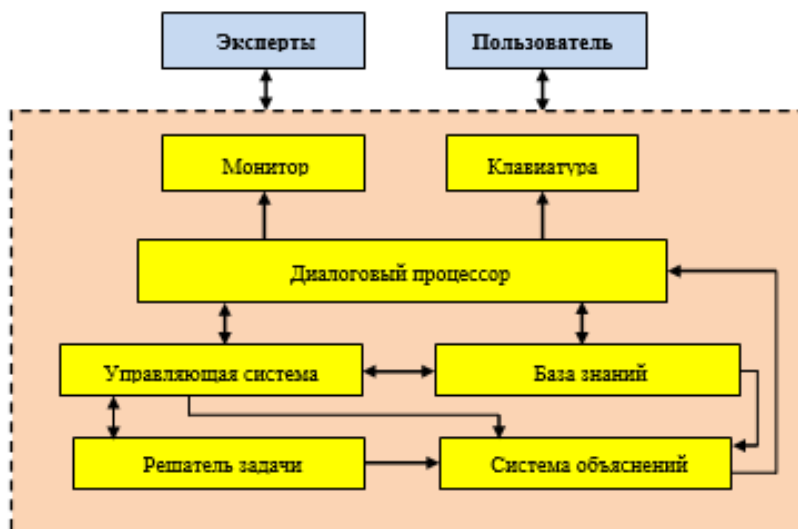


Рис. 1. Структура «быстрого прототипа» ЭС оценки помехозащищенности РК

Основным источником мощности ЭС являются разнотипные неформализованные предметные декларативные и процедурные знания экспертов (результаты расчетов и испытаний, опыт эксплуатации, логические правила и способы принятия решений, методы обобщения, здравый смысл и интуитивные знания). Поэтому ЭС оценки помехозащищенности РК должна иметь специальную форму получения и накопления предметных знаний о помехозащищенности РК и способах ее оценки в виде базы знаний, обеспечивающую их сбор от экспертов (исследователей, испытателей, операторов связи), а также технологию их обработки и использования в процессе решения задачи. ЭС работает в двух режимах: в режиме приобретения предметных знаний (совокупности формальных и эвристических сведений) и в режиме оценки помехозащищенности, заданной РК.

Приобретение предметных знаний – наиболее трудоемкий процесс при создании ЭС, в ходе которого решаются две задачи: выявление знаний у источников (функция инженера по знаниям) и организация (представление, структурирование, агрегирование) знаний для удобства их использования при решении задачи (функции эксперта и разработчика ЭС). В качестве предметной (проблемной) для разрабатываемой ЭС является область помехозащищенности радиосвязи. Ясно, что для определения конкретной области необходимо задать состав РК, их характеристики и параметры (декларативные сведения) и отношения (процедуры), существующие между РК и видами преднамеренных помех. Организация знаний о помехах, РК и их помехозащищенности может вестись по уровням представления и детальности. Знания, помещенные и хранящиеся в базе, могут быть интерпретируемыми (факты, сведения, данные, логические и интуитивные правила) и не интерпретируемыми (знания о представлении, управляющие знания, структура диалога, вспомогательные, объясняющие, поддерживающие, технологические и семантические знания). В базе знаний не существует различий между декларативными и процедурными знаниями. И то, и другое может храниться в общей базе и вырабатываться из нее управляющей системой в процессе проверки правил в решателе задач, т. е. в процессе решения задачи. В явном виде предметные знания (полное и единообразное описание предметной области) для ЭС необязательны. Содержанием базы знаний могут быть теоретические расчеты и результаты экспериментов, либо эмпирические знания, такие как простейшие правила из боевого применения и опыта эксплуатации. Смесь различных типов знаний обрабатывается в рамках одной и той же управляющей структуры с помощью теории логики и нечетных множеств, а также путем введения дополнительной численной

компоненты, выражающей степень взаимосвязи. При заполнении базы разнотипными сведениями о помехозащищенности РК различных типов и правилами их обработки, следует сообщить оценку их достоверности, которая должна учитываться при решении задачи. Процедурные знания в виде правил, содержащиеся в базе, эквивалентны некоторым прикладным программам (программному модулю) и дают возможность на основе входных данных о РК и помехах вывести отличительные особенности класса, анализируемого РК и оценить с помощью решателя задачи его помехозащищенность по значению вероятности доставки сообщений при заданном виде помех.

Отсутствие регулярных методов формирования знаний определило выбор методики анкетирования в качестве способа сбора предметных знаний в области помехозащищенности РК. В силу природы запоминаемых знаний последовательность вопросов, задаваемых эксперту ЭС при сборе знаний, определяет форму анкет. В свою очередь, способ построения анкет формирует метод структурирования знаний. При построении анкет пространство сведений о помехозащищенности разделяется на уровни (по типам РК) по действиям над ними (подавление различными видами помех). Эти данные являются константами или переменными. Причем переменные могут трактоваться как характеристики, а константы как значения соответствующих характеристик (параметров). Все знания организуются в базе вокруг объектов, а именно РК одного диапазона и типа сигналов. Это приводит к появлению в рабочей памяти объектов со списками свойств, содержащих имена характеристик и их значения. По мере того, как становятся известными новые данные, ЭС позволяет расширение, или корректировку базы знаний, что снижает неопределенность ее ответов при решении задачи. Добавление новых знаний связано с модификацией базы, новые знания по отношению к уже имеющимся в базе должны быть не противоречивыми и избыточными.

Знания о способах решения задач, т. е. о порядке использования изменяющихся в базе сведений и правил – главное в составе знаний ЭС. Поэтому, наряду с базой знаний неотъемлемым атрибутом ЭС является управляющая система (интерпретатор), осуществляющая последовательность проверки правил решателем задач. Основной проблемой при работе с базой является поиск знаний релевантных решаемой задаче – оценке помехозащищенности РК. Один из употребительных методов – метод явных ссылок (прямого доступа), заключающийся в нахождении по заданному описанию исследуемого в базе знаний аналога, удовлетворяющего этому описанию, т. е. в идентификации анализируемого РК некоторому аналогу, имеющемуся в базе.

Неформализованность решаемых ЭС задач приводит к тому, что процесс решения не удастся представить в виде детерминированной последовательности программных модулей, проверяющих правила. В ЭС не существует информации, позволяющей предпочесть одно правило другому. Задача управляющей компоненты состоит в обеспечении работы ЭС в условиях неопределенности проверки правил, т. е. в том, чтобы на основании текущего состояния рабочей памяти определить какой модуль, проверяющий данное правило в решателе задач, будет работать и с какими сведениями в базе знаний в данный момент времени. На каждом очередном цикле работы ЭС, управляющая система вырабатывает управляющее и информационное взаимодействие модулей, проверяющих правила. После окончания работы текущего модуля интерпретатор проверяет условия окончания решения задачи и, если они не удовлетворены, выполняется очередной цикл. Для облегчения поиска модулей управляющей системой в базе знаний каждый модуль снабжается образцом, т. е. описанием, указывающим, при выполнении каких условий этот модуль может приступить к работе в решателе задач. При большом количестве правил управление их выполнением в решателе становится сложным. В связи с этим, в ЭС наиболее употребительна простая управляющая структура, заключающаяся в последовательной проверке правил по степени их достоверности.

Для нахождения рабочих характеристик анализируемого РК обработка знаний, хранящихся в базе, производится решателем задач, использующим логику и эвристику (опытные и практические приемы, методы обобщения) в виде эмпирических правил и методов объединения. Наиболее употребительно правило продукции типа «если» (условие), «то» (действие), причем «то» может представлять решение, выводы, утверждение, указание. Например, «если на входе приемника  $i$ -го диапазона РК  $j$ -го типа присутствует преднамеренная помеха  $l$ -го вида и по РК передается сообщение с известным способом кодирования/модуляции, а в приемнике по известному алгоритму осуществляется демодуляция/декодирование сигналов, можно предположить, что вероятность приема данного сообщения равна ... Надежность такого заключения составляет ...». Или другое правило продукции: «если на входе приемника РК  $j$ -го типа  $i$ -го диапазона (в точке приема) имеется известное отношение сигнал/помеха, и при этом прием ведется в условиях помех  $l$ -го вида, можно предположить, что вероятность доставки формализованных сообщений, передаваемых в РК за штатное время равна ...». Связанное с этим правилом условие определяет, является ли то, или иное правило потенциально справедливым по отношению к текущему содержанию базы знаний. Правило продукции разрешает производить действие, если все заданные для него условия удовлетворяются.

Механизм принятия решений о помехозащищенности РК состоит в последовательном выполнении трех операций. Первая из них – ограничение пространства решений (источников). Для этого, учитывая ограниченность предметной области, целесообразно применить метод поиска в одном пространстве, заключающийся в выборе по входным данным РК и помех правдоподобного источника (сигнала), или множества их в базе знаний. Степень правдоподобия аналога определяется количеством общих с анализируемой РК признаков и достоверностью источника знаний об аналоге. Вторая операция – нахождение в базе сведений о помехозащищенности аналогов путем проверки правил (получения ответов). И третья операция – компиляция ответов по источникам с учетом их достоверности. Автоматизация в решателе задач ЭС компиляции результатов расчетов, испытаний и опыта эксплуатации получается путем логического объединения. В случае, если суждения о помехозащищенности аналогов не являются строго истинными, или логичными, а будут иметь некоторую обобщенную вероятность, для их объединения могут применяться методы теории нечетких множеств. Компиляция знаний, как процесс преобразования одного способа представления знаний в другой (использование компиляции вместо интерполяции), наиболее применим в данной ЭС. ЭС должна принимать и объяснять решение (способ получения результата), поэтому важным составным элементом ЭС является система объяснений, тесно связанная с управляющей системой и решателем задач. Система объяснений выполняет две функции: объяснения на этапах принятия решений (выдачи ответов) и ответы на вопросы пользователя. Первую функцию выполняет программа «контролер рассуждений», основанная на системе продукций, приводящих к тем или иным решениям (шкалам в поисках решения) и находящаяся в решателе задач. Цель объяснений – локализация ошибок путем анализа рассуждений и повышение доверия пользователя к ЭС путем объяснения способа получения результата.

Реализация первой функции упрощается, благодаря применению архитектуры, построенной на основе правил, и определяется полнотой правил продукций. Вторая функция – ответы на вопросы (информирование) пользователя, базируется на сведениях о помехозащищенности, хранящихся в базе знаний. При организации диалога между пользователем и ЭС возникают две проблемы: проблема восприятия, вводимого в ЭС текста, и проблема его понимания. Можно считать, что ЭС понимает вопросы (текст) в том случае, если она может ответить на все прямые вопросы по тексту с учетом представлений о ситуациях, соответствующих введенному в нее тексту. Понимание ЭС вопросов требует обширной базы знаний о действительности и развитых системах манипуляции этими

знаниями. Наиболее просто проблема общения решается в режиме регламентированного диалога, например, широко распространенного языка типа «меню» [9]. Кроме этого целесообразно применение простой техники общения, основанной на регламентировании вопросов и ответов с последующей их заменой в ПЭВМ на терминальные слова, указывающие значения некоторых атрибутов, списков, таблиц, данных. Каждому типу вопросов в системе объяснений соответствует несколько возможных шаблонов для ответа. Синтез ответа на вопрос осуществляется путем выбора уместного (соответствующего) шаблона, или их всех сразу, на естественном языке. В этом режиме возможности, системы объяснений зависят от того, насколько разработчики ЭС смогли предусмотреть все типы вопросов, которые может задать пользователь. После написания программ системы управления и решателя задач с каждой их частью, выполняющей отдельную функцию, связываются тексты, объясняющие действия соответствующей части. В некоторый момент времени пользователь задает вопросы о том «почему», «как» получен результат, и ему выдается последовательность текстов, связанных с частями программ, участвующих в формировании результата. При ответе на вопрос «почему» пользователю выдается цель, которую преследовала ЭС при поиске решений (факты из базы знаний), а при ответе на вопрос «как» должны быть выданы правила продукции из базы, которые привели к получению данного решения. В ходе решения ЭС может задавать пользователю вопросы. Компактной и понятной формой выдачи объяснений пользователю является графическая форма, сохраняющая в явном виде представления о взаимосвязях целей и правил, рассматриваемых в текущем объяснении.

Таким образом, ЭС оценки помехозащищенности ДКМ РК – это программно-реализованная на ПЭВМ система принятия решений о вероятности доставки формализованных сообщений за штатное время в условиях преднамеренных помех на основании знаний экспертов, хранящихся в базе знаний. Работу ЭС можно свести к следующему. Предметные знания в виде набора фактов (сведений, данных, результатов испытаний, опыта эксплуатации), аналитических и эвристических приемов (правил) оценки помехозащищенности вводятся в ПЭВМ экспертами (исследователями, испытателями, операторами связи) с помощью инженера по знаниям в режиме регламентированного диалога. Специальная программа (управляющая система) определяет порядок применения фактов и правил в решателе задач для выработки решений (ответов пользователю), логический ход рассуждений объясняется пользователю по его требованию с помощью заранее подготовленных текстов (шаблонов) на естественном языке. Задача ЭС – поиск некоторого обобщенного значения вероятности доставки (или рабочих характеристик) по сочетанию признаков РК и виду помех путем проверки правил, в решателе задачи, пока одно из них не сработает, или путем объединения (компиляции) оценок (характеристик) с учетом правдоподобия аналогов РК и достоверности источников знаний. В результате ввода исходных данных о РК и помехах, ЭС порождает модель РК. Модели идентифицируются с имеющимися в базе аналогами, т. е. производится их выявление и сопоставление, в результате которого определяется степень соответствия (правдоподобия) РК выявленным аналогам. На основе объединения знаний о помехозащищенности аналогов, с учетом степени их соответствия, определяется вероятность доставки сообщений (рабочие характеристики) анализируемого РК. Точность и достоверность окончательной оценки зависит от числа базовых моделей, достоверности источников и точности анализируемой модели РК, сформированной по исходным данным. Оценка качества принимаемых решений может производиться путем сравнения с мнением специалистов по связи при отладке прототипа ЭС. При этом, эксперты проводят испытания ЭС на контрольных примерах с оценкой решений и путем объединения оценок.

Рассмотренные принципы использованы при создании «быстрого прототипа» ЭС на ПЭВМ *IBM PC/AT*. Для заполнения базы знаний прототипа ЭС, сведения о



помехозащищенности РК были получены у представительной группы экспертов, а также из монографий, статей и протоколов испытаний. Наиболее распространенными на практике видами преднамеренных помех, как показал анализ этих сведений, являются сосредоточенные по полосе и времени помехи: шумовая (близкая по спектру флуктуационному шуму), гармоническая (монокроматическое колебание) и структурная (близка по параметрам полезному сигналу) [2]. Поэтому, определение рабочих характеристик РК различных типов с использованием прототипа ЭС представляет интерес, именно для этих видов помех. Пример ответа прототипа ЭС на запрос о помехозащищенности ДКМ РК в виде зависимостей вероятности доставки сообщений за штатное время  $P_{\text{дост}} = F(E_c/E_{\text{п}})$  при воздействии шумовых, гармонических и структурных помех приведен на рис. 2.

$P_{\text{дост}} = F(E_c/E_{\text{п}})$ , где  $P_{\text{дост}}$  – вероятность доставки формализованного сообщения за

штатное время при однократной передаче;  $E_c$ ,  $E_{\text{п}}$  – напряженности поля, создаваемые полезным и помеховым излучателями в точке приема.

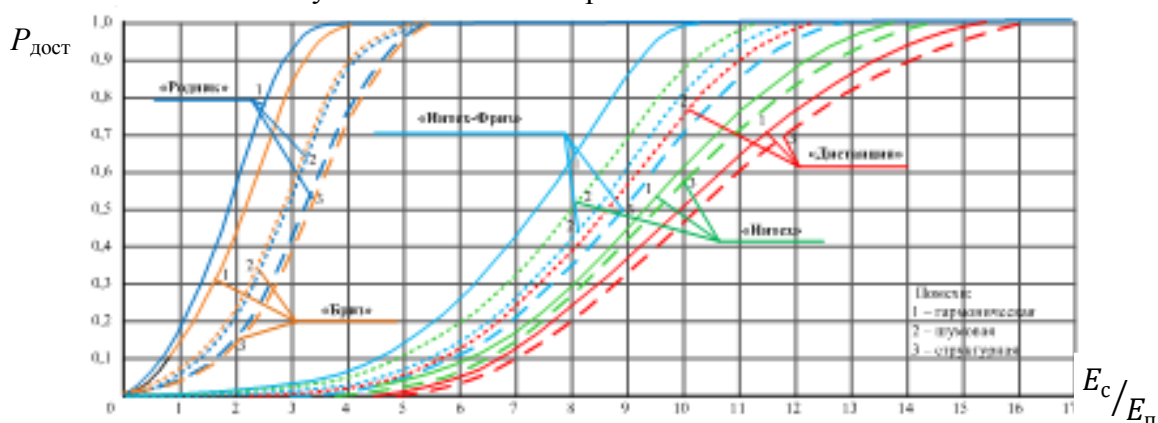


Рис. 2. Зависимость вероятности доставки сообщений по ДКМ РК при воздействии различных помех

Дальнейшие шаги по совершенствованию ЭС связаны с расширением базы знаний и ее отладкой с привлечением широкого круга экспертов в области помехозащищенности ДКМ радиосвязи. ЭС может служить средством интеллектуальной поддержки пользователя для определения вероятностей доставки сообщений по существующим и разрабатываемым РК, функционирующим в различных оперативно-тактических и помеховых условиях. Применение ЭС освобождает от необходимости поиска и разработки мощных универсальных и формализованных методов решения этой задачи.

#### Литература

1. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Вузовская книга, 2013. – 359 с.
2. Талагаев В.И. Влияние преднамеренных помех на качество функционирования радиолиний. Сборник 34 НИИ ВМФ, вып. 2 (95), 1985.
3. Поспелов Т.С., Поспелов Д.А. Искусственный интеллект – прикладные системы. – М.: Знание, 1985. – 48 с.
4. Попов Э.В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
5. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. – М.: Мир, 1989. – 388 с.
6. Джексон П. Введение в экспертные системы. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 624 с.
7. Кауфман В.Ш. Языки программирования. Концепции и принципы. 2-е издание. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 464 с.
8. Производительность языков программирования [Электронный ресурс]: сайт. URL: <http://www.ibm.com> (дата обращения 23.01.2006).

9. Голицина О.Л., Партыка Т.Л., Попов И.И. Языки программирования – М.: Форум, 2008.

#### References

1. Kupriyanov A.I. Electronic warfare. - М.: University Book, 2013. – 359 s. (in Russian).
2. Talagaev V.I. *Vliyanie prednamerennykh pomekh na kachestvo funkcionirovaniya radiolinij* [The influence of deliberate interference on the quality of radio lines]. Collection 34 of the Navy Research Institute, issue 2 (95), 1985. – 359 s. (in Russian).
3. Pospelov T.S., Pospelov D.A. *Iskusstvennyj intellekt - prikladnye sistemy* [Artificial intelligence - applied systems]. - М.: Knowledge, 1985. – 48 s. (in Russian).
4. Popov E.V. Expert systems. - М.: Science, 1987. – 288 s. (in Russian).
5. Watermen D. Guide to Expert Systems. - М.: World, 1989. – 388 s. (in Russian).
6. Jackson P. Introduction to expert systems. – М.: Williams, 2001. – 624 s. (in Russian).
7. Kaufman V.Sh. Programming languages. Concepts and principles. The 2nd edition. - М.: DMK Press, 2011. – 464 s. (in Russian).
8. Performance of programming languages [Electronic resource]: site. UPL: <http://www.ibm.com> (circulation date 23.01.2006).
9. Golitsina O.L., Partyka T.L., Popov I.I. Programming languages - М.: Forum, 2008 (in Russian).

Статья поступила 2 марта 2020 г.

#### Информация об авторах

Мирошников Валентин Иванович – Генеральный конструктор ПАО «Интелтех», доктор технических наук, профессор.

Кулешов Игорь Александрович – Первый заместитель генерального директора ПАО «Интелтех» по научной работе. Доктор технических наук, доцент.

Талагаев Владимир Иванович – Ведущий научный сотрудник ПАО «Интелтех», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор АВН. Адрес: 197342, Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д. 8. Тел.+7(812)295-50-69. E- mail: @ inteltech.ru.

#### Expert system for assessing the noise immunity of the decameter Navy radio channels

V.I. Miroshnikov, I.A. Kuleshov, V.I. Talagaev

**Annotation.** *The principles of building an expert system for assessing the noise immunity of decameter radio channels of the Navy are formulated. An example of the response of the expert system to the request for interference immunity of some decameter radio channels of the Navy in the form of dependencies of the probability of message delivery is given. The expert system can find practical application in the software package of the automated workplace of researchers and developers of decameter radio channels of officials of the communications service of the Navy in the planning and operational management of communications.*

**Keywords:** *problem-oriented expert system; decameter radio channel; noise immunity of a radio channel; performance characteristics of the radio channel; probability of message delivery; deliberate hindrances.*

#### Information about Authors

Miroshnikov Valentin Ivanovich - General Designer of PJSC «Inteltech», Doctor of Technical Sciences, Professor.

Kuleshov Igor Alexandrovich - First Deputy General Director of PJSC «Inteltech» for scientific work. Doctor of Engineering, Associate Professor.

Talagaev Vladimir Ivanovich - Leading Researcher at PJSC «Inteltech», Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of AVN. Tel. +7(812)295-50-69. E-mail: intelteh@inteltech.ru. Address: 197342, St. Petersburg, Kantemirovskaya St., 8.

**Для цитирования:** Мирошников В.И., Кулешов И.А., Талагаев В.И. Экспертная система оценки помехозащищенности ДКМ радиоканалов ВМФ // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 26-33.

**For citation:** Miroshnikov V.I., Kuleshov I.A., Talagaev V.I. Expert system for assessing the noise immunity of the decameter Navy radio channels. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 26-33 (in Russian).

УДК 621.375.026

## Оценка фазовой компенсации нелинейных искажений на выходе реального усилителя мощности

Гук И.И.

**Аннотация.** *Постановка задачи.* Статья основывается на результатах предыдущего исследования и посвящена рассмотрению практических аспектов построения усилителей мощности с фазовой компенсацией нелинейных искажений, позволяющих обеспечить широкополосную работу во всём частотном диапазоне без переключения октавных фильтров. **Целью работы** является расчёт фазовых соотношений по амплитудной характеристике реального усилителя мощности, которые минимизируют нелинейные искажения. **Используемые методы:** теоретические расчёты и модели, рассмотренные в предыдущей части, а также численные методы моделирования и расчёта в интегрированной среде Matlab. **Новизна** состоит в том, что моделирование проводится на основе амплитудной характеристики, полученной в результате исследования параметров реального усилителя мощности. **Результат** заключается в том, что предлагается методика получения оптимальных фазовых соотношений для построения усилителя мощности по схеме с фазовой компенсацией нелинейных искажений. **Практическая значимость** заключается в том, что по реальной амплитудной характеристике рассчитаны оптимальные фазовые соотношения для получения минимальных нелинейных искажений на выходе усилителя мощности, и дана оценка наиболее вероятных уровней гармоник при заданной погрешности фазы.

**Ключевые слова:** усилитель мощности; амплитудная характеристика; нелинейные искажения; уровень гармоник.

### Введение

В предыдущей работе [1] был рассмотрен вариант построения усилителя мощности (УМ) с фазовой компенсацией нелинейных искажений (ФКНИ). Функциональная схема такого УМ представлена на рис. 1.

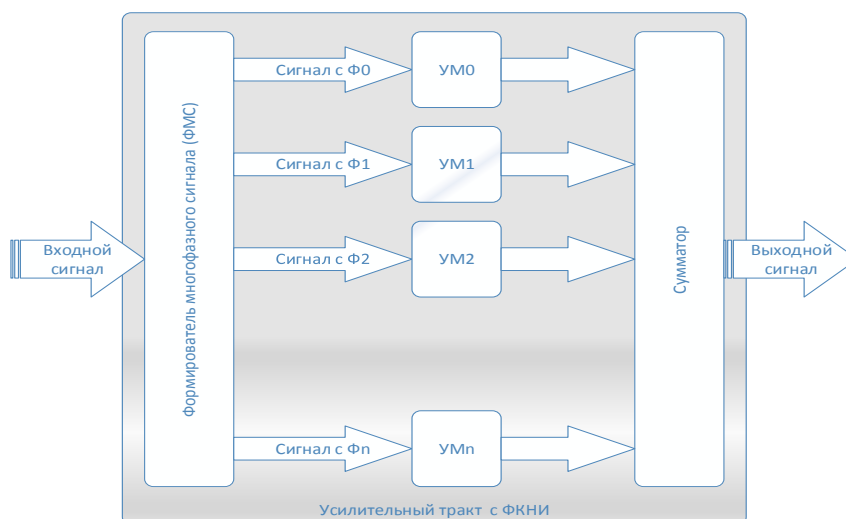


Рис. 1. Функциональная схема усилительного тракта с ФКНИ

Формирователь многофазного сигнала (ФМС) преобразует входной сигнал в несколько его копий, отличающихся начальной фазой. Эти копии поступают на единичные усилительные блоки ( $УМ_i$ ), которые являются однотипными и нелинейными устройствами, а затем суммируются на сумматоре. За счёт того, что фазы гармоник не совпадают, происходит их векторное сложение и уменьшение уровня. При правильном выборе количества ветвей усиления и начальных фаз, компенсация первой гармоники (т. е. самого сигнала) происходит частично и в меньшей степени, чем гармоник высших порядков. При

этом предполагается, что усилительные элементы имеют достаточно близкие параметры и построены по балансной схеме, т. е. в спектре выходного сигнала отсутствуют чётные гармоники.

В [1] рассматривалось четыре возможных варианта выбора начальных фаз: фиксированный, равномерный, произвольный и комбинированный. В данной статье будут взяты только два: фиксированное и равномерное распределение начальной фазы. Они выбраны как наиболее показательные, с точки зрения возможности фазовой компенсации нелинейных искажений.

**В1. Фиксированное распределение начальных фаз**

Фиксированное распределение позволяет полностью (теоретически) компенсировать отдельные гармоники выходного сигнала. В табл. 1 представлены некоторые значения начальных фаз для двух ветвей усиления, которые позволяют полностью компенсировать отдельные гармоники выходного суммарного сигнала.

Таблица 1 – Значения начальных фаз двух сигналов для полной компенсации гармоник

№ п/п	Разность начальных фаз (в градусах)	Номера компенсируемых гармоник						Обобщённое выражение, $k = 1, 3, 5, 7 \dots$
1	60	3	9	15	21	27	...	$n = 3 \cdot k$
2	36	5	15	25	35	45	...	$n = 5 \cdot k$
3	25.71	7	21	35	49	63	...	$n = 7 \cdot k$

Попарно комбинируя значения начальных фаз, можно компенсировать любое количество гармоник. Например, для получения линейного режима работы УМ в коротковолновом (КВ) диапазоне (от 3 до 30 МГц) достаточно компенсировать 10 первых гармоник, т. е. 3-ю, 5-ю, 7-ю и 9-ю гармоники, т. к. единичные УМ не имеют чётных гармоник в выходном спектре. В этом случае, усилительный тракт с ФКНИ будет включать 8 нелинейных единичных УМ, при этом необходимо установить следующие начальные фазы: [0; 60; 36; 96; 25.71; 85.71; 61.71; 121.71]. Более наглядно формирование требуемого соотношения фаз показано на рис. 2.

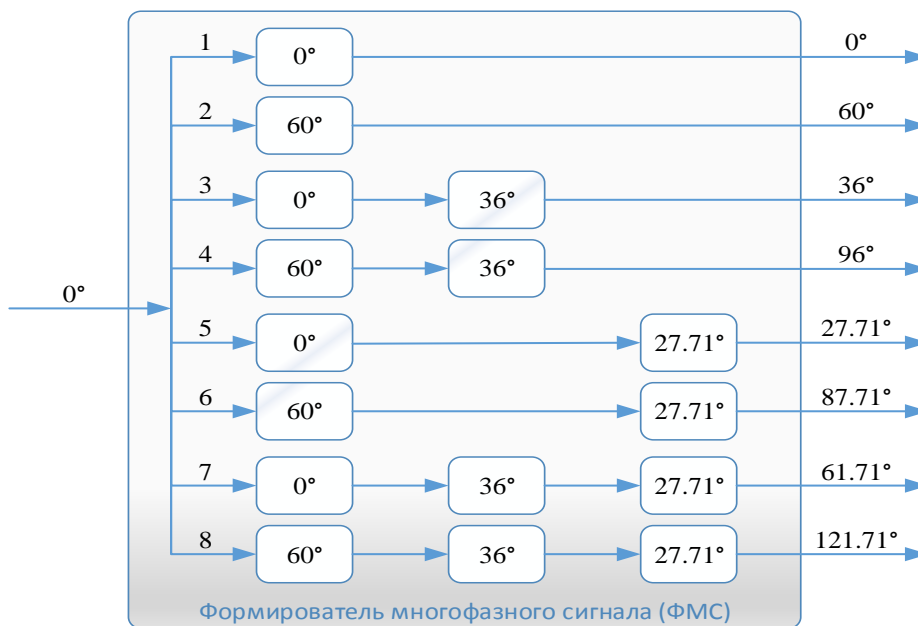


Рис. 2. Функциональная схема формирования вектора начальных фаз при их фиксированном распределении

**В2. Равномерное распределение начальных фаз**

В случае равномерного распределения начальных фаз, их значение рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\varphi_k = k \cdot \alpha, \tag{1}$$

где  $\alpha = \frac{2\pi}{k}$ ,  $\alpha_{max}$  – фазовый сдвиг между входными сигналами (см. рис. 3, где  $\alpha = 30^\circ$ )  
 $\alpha_{max}$  – максимальное значение фазового сдвига, зависящее от количества фазовых ветвей в усилительном тракте с ФКНИ (см. табл. 2).

Таблица 2 – Допустимые значения максимального фазового сдвига

Количество «фазовых» ветвей	2	3	4	5	6	7	8
Максимальный фазовый сдвиг $\alpha_{max}$	180°	120°	90°	72°	60°	51.43°	45°

Пример равномерного распределения начальных фаз

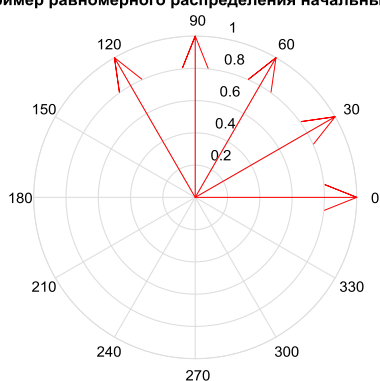


Рис. 3. Равномерное распределение начальных фаз

**В3. Кусочно-ломаная модель амплитудной характеристики**

При анализе характера нелинейности единичного УМ использовалась модель кусочно-ломаной аппроксимации, которая представлена на рис. 4.

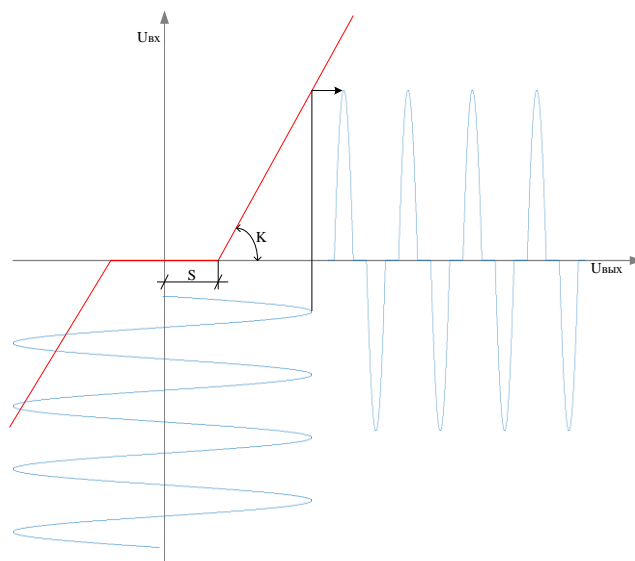


Рис. 4. Графическое представление модели нелинейности усилителя мощности

Выходной амплитудный спектр УМ, нелинейность которого описывается моделью на рис. 4, показан на рис. 5.

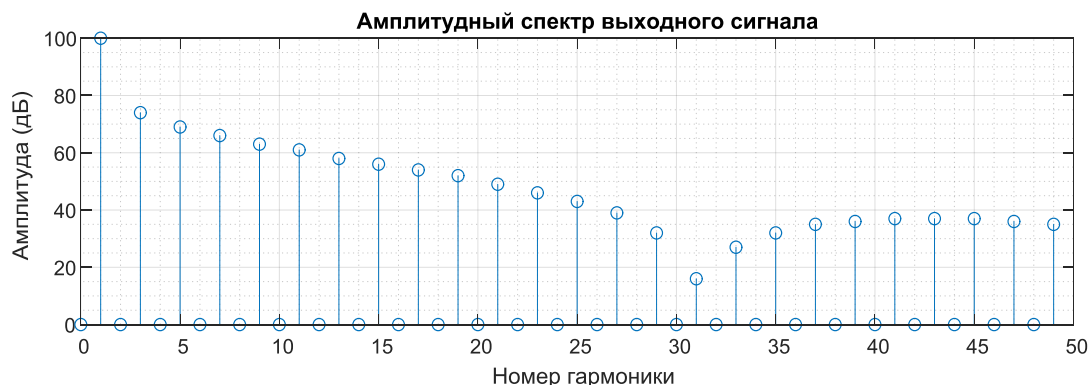


Рис. 5. Спектры амплитуды на выходе единичного усилителя мощности

Для оценки эффективности компенсации нелинейных искажений используются коэффициент гармонических искажений (КГИ) и коэффициент потери мощности (КПМ).

КГИ рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{ги}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{N/2} U_i^2}{U_1^2}} \cdot 100, \tag{2}$$

где:  $U_i$  – амплитуды гармоник искажённого сигнала;  $N$  – количество точек ДПФ; 100 – коэффициент перевода результата в %.

КПМ рассматривается, как отношение квадрата амплитуды первой гармоники суммарного сигнала при текущем сдвиге начальных фаз к квадрату амплитуды первой гармоники суммарного сигнала при нулевом сдвиге начальных фаз, при прочих равных условиях:

$$K_{\text{пм}} = \frac{((\sum_{i=0}^{K-1} \cos(\alpha_i))^2 + (\sum_{i=0}^{K-1} \sin(\alpha_i))^2)}{K} \cdot 100, \tag{3}$$

где:  $K$  – количество ветвей усиления,  $\alpha_i$  – начальная фаза  $i$ -го входного сигнала, 100 – коэффициент перевода результата в %.

Эти параметры находятся в некотором противоречии: уменьшение КГИ приводит к увеличению КПМ.

Рассмотрим, как влияет амплитудная характеристика (АХ) реального УМ на расчёты и моделирования, выполненные в первой части.

### 1. Модель амплитудной характеристики реального УМ

В процессе работы был исследован единичный усилительный блок (УМ). Была снята его АХ. Её отчёты представлены в табл. 3.

На рис. 6 представлена графическая модель АХ, построенная на основе полученных отчётов и используемая при дальнейшем исследовании. При этом, для построения графика АХ данные из табл. 3 были доопределены, в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} U_{\text{inp}} &= [(-1):\text{fliplr}(U_{\text{inp}}) 0 U_{\text{inp}}] \\ U_{\text{out}} &= [(-1):\text{fliplr}(U_{\text{out}}) 0 U_{\text{out}}], \end{aligned} \tag{4}$$

где:  $\text{fliplr}()$  – функция, которая «переворачивает» вектор: первый элемент становится последним, а последний первым,  $U_{\text{inp}}$  и  $U_{\text{out}}$  – значения из табл. 3.

Для получения значений АХ в произвольной точке использовалось два метода: интерполяция и аппроксимация. В качестве функций, реализующих их, использовались встроенные решения среды Матлаб:

- $\text{spline}()$  – процедура интерполяции,
- $\text{polyval}()$  – процедура аппроксимации.

Таблица 3 – Отсчёты амплитудных характеристик реального усилителя мощности

№ п/п	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$
1	0.2	2.56
2	0.4	4.85
3	0.6	8.12
4	0.8	11.22
5	1	12.38
6	1.2	15.43
7	1.4	18.41
8	1.6	22.09
9	1.8	25.87
10	2	29.38
11	2.2	33.96
12	2.4	38.37
13	2.6	43.54
14	2.8	47.35
15	3	50.92
16	3.2	57.01
17	3.4	62.09
18	3.6	66.57
19	3.8	72.32
20	4	75.57
21	4.2	82.78
22	4.4	87.70
23	4.6	92.90
24	4.8	97.35
25	5	102.59
26	5.2	108.89
27	5.4	116.06
28	5.6	122.32
29	5.8	128.65
30	6	135.01
31	6.2	142.00
32	6.4	149.74
33	6.6	155.62
34	6.8	162.46
35	7	166.93
36	8	196.25
37	9	226.31
38	10	258.74
39	11	281.86
40	12	304.56
41	12.5	317.52

Напомним, что при интерполяции в итоговую модель включаются базовые точки (из табл. 3), а при интерполяции график получается более «гладким» и проходит максимально близко к этим точкам.

Метод построения модели АХ, в первую очередь, влияет на форму выходного сигнала. Для примера, на рис. 7 показаны формы выходного сигнала при разных типах модели АХ. Необходимо отметить, что амплитуды на данном рисунке являются условными и не отражают реальный коэффициент усиления исследуемого УМ.

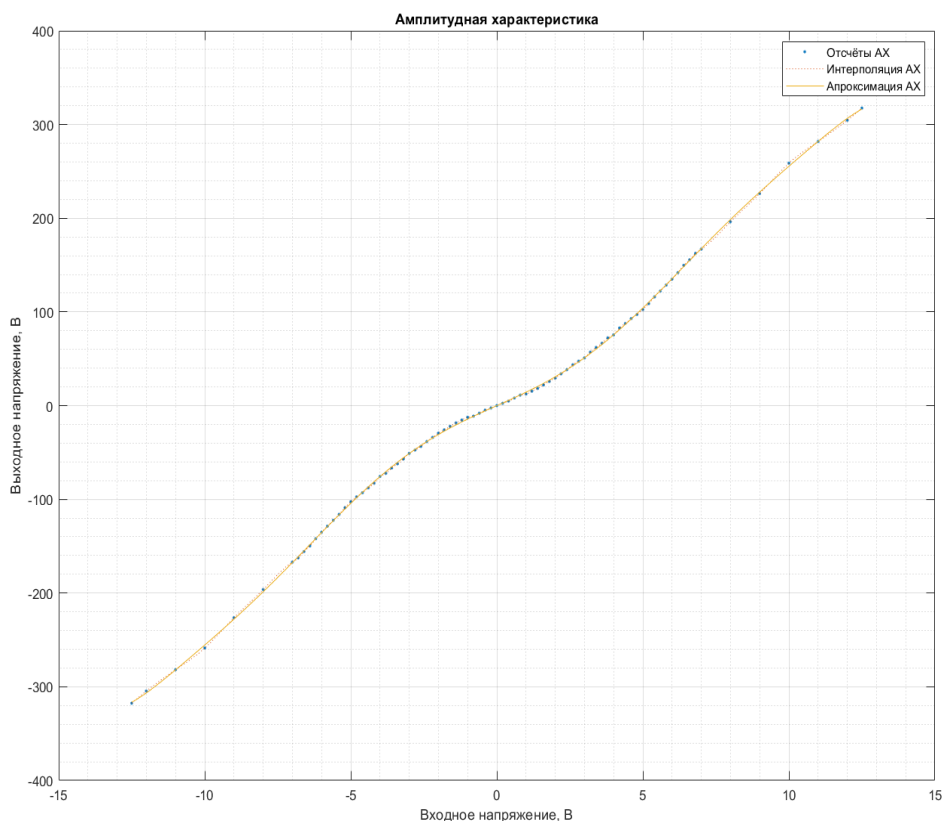


Рис. 6. Графическая модель амплитудных характеристик реального усилительного блока

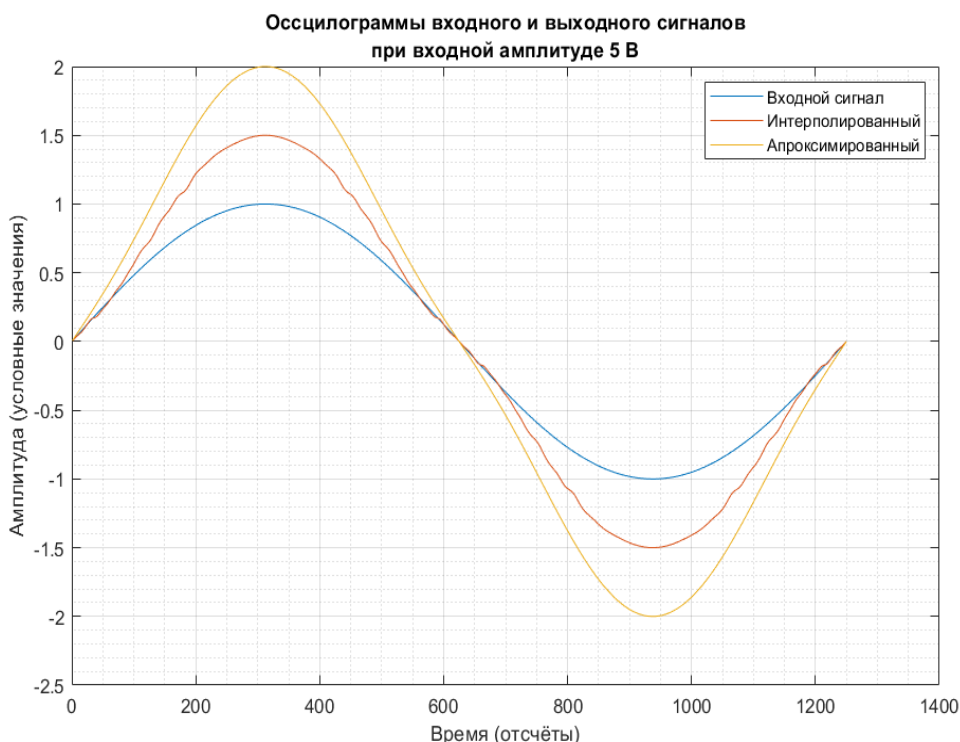


Рис. 7. Сравнение формы выходного сигнала для разных моделей АХ

Из анализа результатов моделирования следует, во-первых, что при интерполяции выходной сигнал имеет «ломанный» вид, что приводит к спектру, у которого уровень высших гармоник больше, чем в случае использования аппроксимации (см. рис. 8). Особенно это заметно при малых уровнях входного сигнала (см. рис. 9).



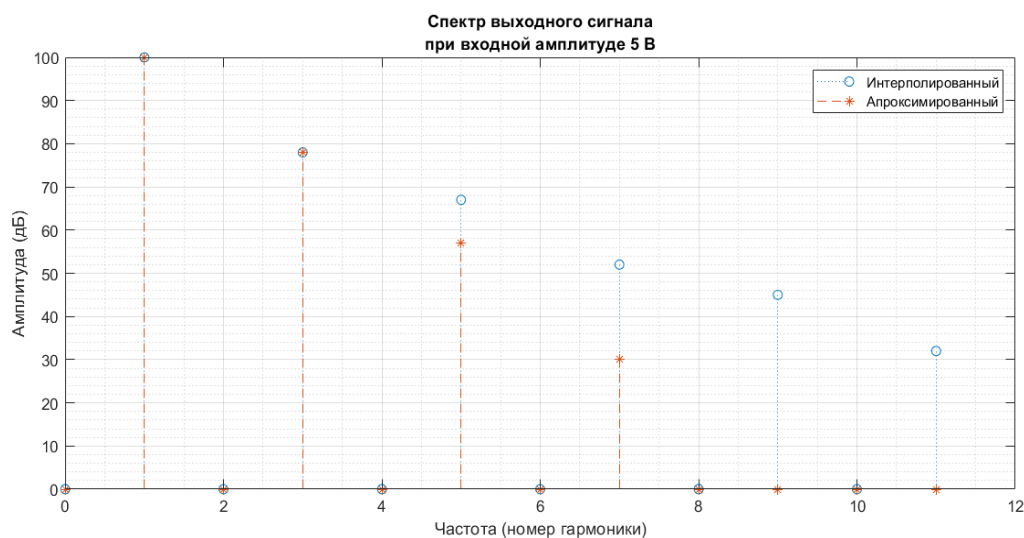


Рис. 8. Сравнение спектров выходного сигнала для разных моделей АХ

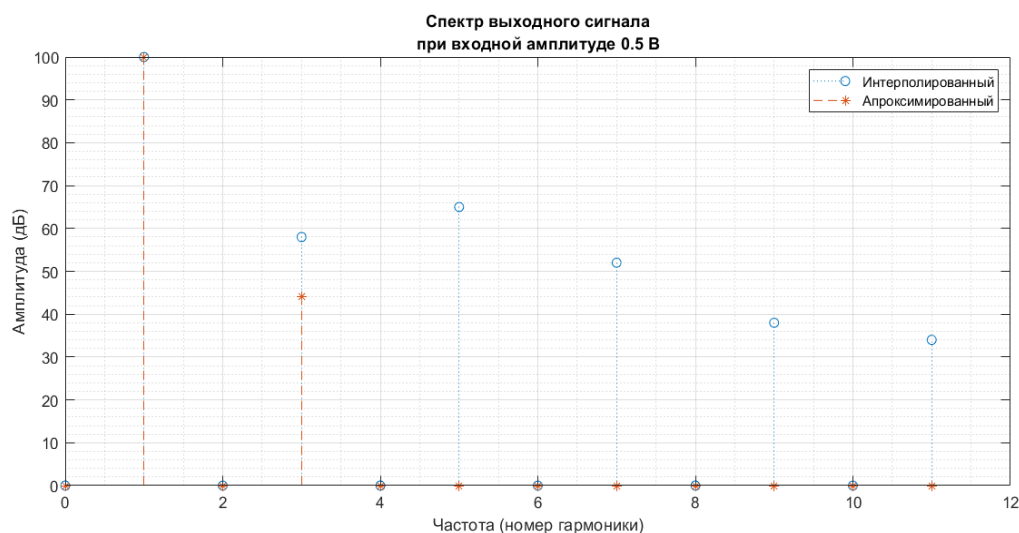


Рис. 9. Сравнение спектров выходного сигнала при малых уровнях входного сигнала

При больших уровнях разница между типами модели АХ становится значительно меньше (см. рис. 10). Во-вторых, наблюдается рост уровня старших гармоник с ростом амплитуды входного сигнала (для аппроксимации эта зависимость более ярко выражена).

Дальнейшее исследование связано с анализом способов формирования начальных фаз, рассмотренных в предыдущей статье [1], при этом вводятся следующие начальные условия:

- величина входного напряжения 6.2 В,
- количество «фазовых» ветвей усилительного тракта – 8,
- рабочий диапазон частот – 3÷30 МГц.

Входное напряжение и рабочий диапазон были выбраны из технического задания на разработку усилительного тракта КВ диапазона.

Количество ветвей выбрано из расчёта подавления 10-ти первых гармоник при использовании фиксированного способа формирования начальных фаз (нечётные будут подавлены за счёт фазовой компенсации, а чётные отсутствуют в силу центральной симметрии модели АХ). Подавление первых 10-и гармоник гарантирует их отсутствие во всём рабочем диапазоне, гармоники более высоких порядков могут быть отфильтрованы достаточно простым ФНЧ с постоянными параметрами.

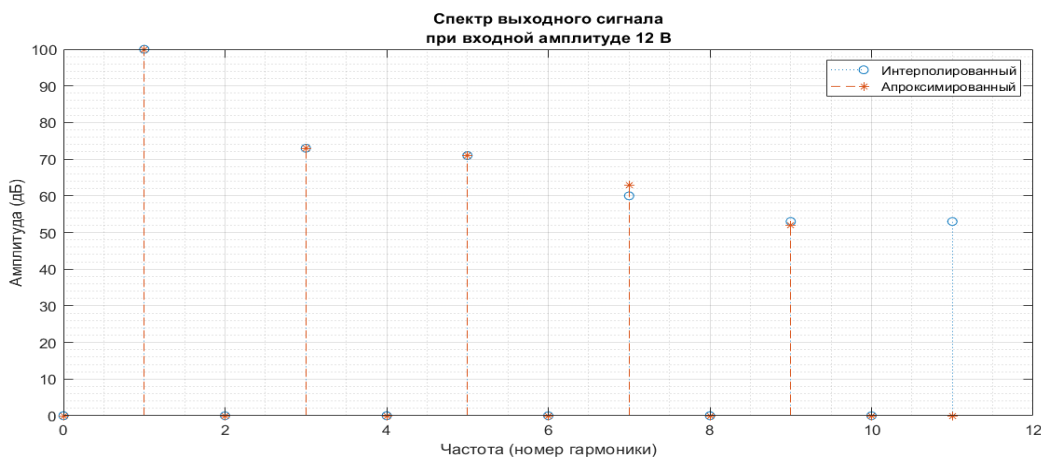


Рис. 10. Сравнение спектров выходного сигнала при больших уровнях входного сигнала

### 2. Фиксированный способ формирования начальной фазы

При фиксированном способе формирования фаз, их номинальные значения выбираются из условия полного (теоретически) подавления гармонических искажений. Как указано во введении, для подавления первых 10-и гармоник необходимо использовать следующий вектор значений фазы:  $[0^\circ \ 60^\circ \ 36^\circ \ 96^\circ \ 25.714^\circ \ 85.714^\circ \ 61.714^\circ \ 121.714]$ . Результат моделирования представлен в табл. 4.

Таблица 4 – Результат моделирования при нулевой погрешности и фиксированном способе формирования вектора начальных фаз

№ п/п	Параметр	Аппроксимация АХ	Интерполяция АХ
1	КГИ единичного сигнала, %	9.03	8.97
2	КГИ суммарного сигнала, %	0.00	0.00
3	КПМ суммарного сигнала, %	35.52	35.52
4	Уровень 3-й гармоники, дБ	- 337.42	- 336.99
5	Уровень 5-й гармоники, дБ	- 338.30	- 341.20
6	Уровень 7-й гармоники, дБ	- 185.72	- 165.86
7	Уровень 9-й гармоники, дБ	- 344.66	- 345.20

На рис. 11 показан амплитудный спектр единичного и суммарного выходных сигналов для идеального (нулевая погрешность фазы) случая при различных видах модели АХ.

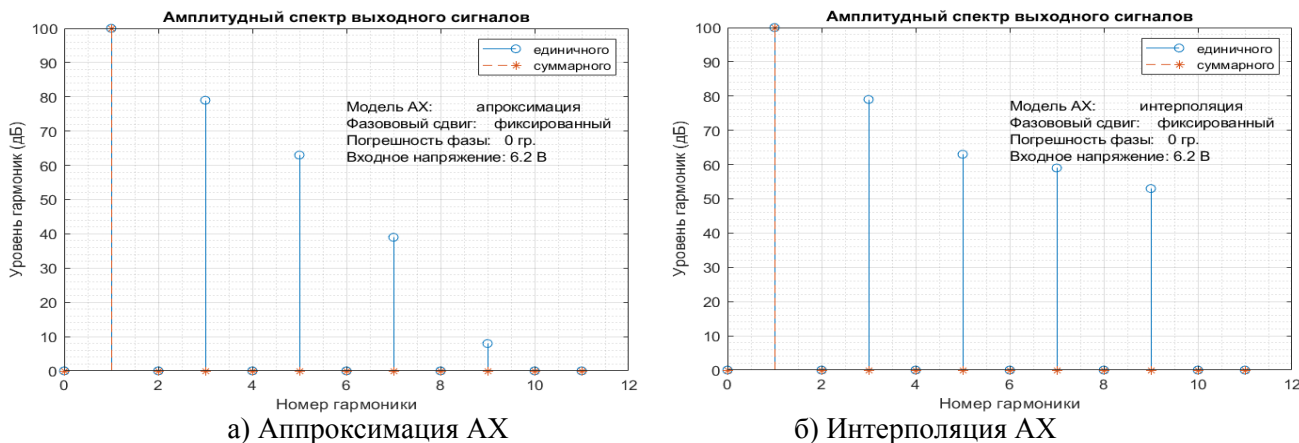


Рис. 11. Сравнение амплитудных спектров для разных моделей АХ при фиксированном способе формирования фазы

При использовании фиксированного распределения фаз для восьми ветвей усиления и для аппроксимации, и для интерполяции имеет место (теоретически) полное подавление первых 10-ти гармоник. КПМ одинаков и составляет 35.52 %. Отличие заключается в амплитудном спектре выходного сигнала для единичного УМ: в табл. 5 приведены значения уровней гармоник в выходном спектре относительно уровня первой гармоники, т. е. самого сигнала. Стоит заметить, что для уровня входного сигнала 6.2 В, выбор модели АХ не привёл к существенному изменению КГИ – он, практически, остался прежним.

Таблица 5 – Уровень гармоник в выходном спектре единичного УМ (дБ)

Модель АХ	Номер гармоники			
	3	5	7	9
Аппроксимация	- 20.98	- 37.36	- 60.58	- 92.09
Интерполяция	- 21.12	- 36.58	- 40.68	- 46.69

Рассмотрим, как повлияет точность установления фаз в ветвях усиления на степень подавления гармоник. На рис. 12 представлены вероятности того, что уровень подавления гармоник будет не хуже, чем значения, отложенные по оси абсцисс. Показано два случая: для аппроксимации и интерполяции АХ.

В табл. 6 представлены численные значения гарантированного с вероятностью 0.99 подавления гармоник. Величина подавления отсчитывается от уровня первой гармоники, т. е. самого сигнала.

Таблица 6 – Гарантированное с вероятностью 0.99 подавление гармоник (дБ) при фиксированном способе формирования фаз

Погрешность фазы	Модель АХ	Номер гармоники			
		3	5	7	9
0°	Аппроксимация	- 337.42	- 338.30	- 185.72	- 344.66
	Интерполяция	- 336.99	- 341.20	- 165.86	- 345.20
0.1°	Аппроксимация	- 78.00	- 89.50	- 110.30	- 138.60
	Интерполяция	- 78.10	- 88.80	- 90.20	- 93.40
0.5°	Аппроксимация	- 64.00	- 75.60	- 96.20	- 124.70
	Интерполяция	- 64.40	- 75.00	- 76.40	- 79.20
1.0°	Аппроксимация	- 58.10	- 69.60	- 90.20	- 118.90
	Интерполяция	- 58.30	- 68.70	- 70.40	- 73.30

Полученные результаты моделирования показаны на рис. 13 в виде выходных амплитудных спектров для единичного и суммарного сигналов при различных значениях погрешности фаз и моделях АХ. Представленные графики построены на основании данных из табл. 4, 5 и 6.

Величины подавления, указанные в табл. 6, учитывают не только выигрыш за счёт компенсации нелинейных искажений при векторном сложении различных ветвей усиления, но и существующее распределение уровней гармоник в спектре единичного УМ. В табл. 7 представлены гарантированные с вероятностью 0.99 уровни подавления гармоник только за счёт способа формирования фаз, в данном случае – фиксированного. Это, по сути, значения табл. 6 за вычетом значений табл. 5.

Очевидно, что эффективность фазовой компенсации нелинейных искажений при погрешности установления начальных фаз снижается, во-первых, с ростом погрешности, а, во-вторых, с ростом номера гармоник. Следует отметить, что вид модели АХ не влияет на степень подавления гармоник.

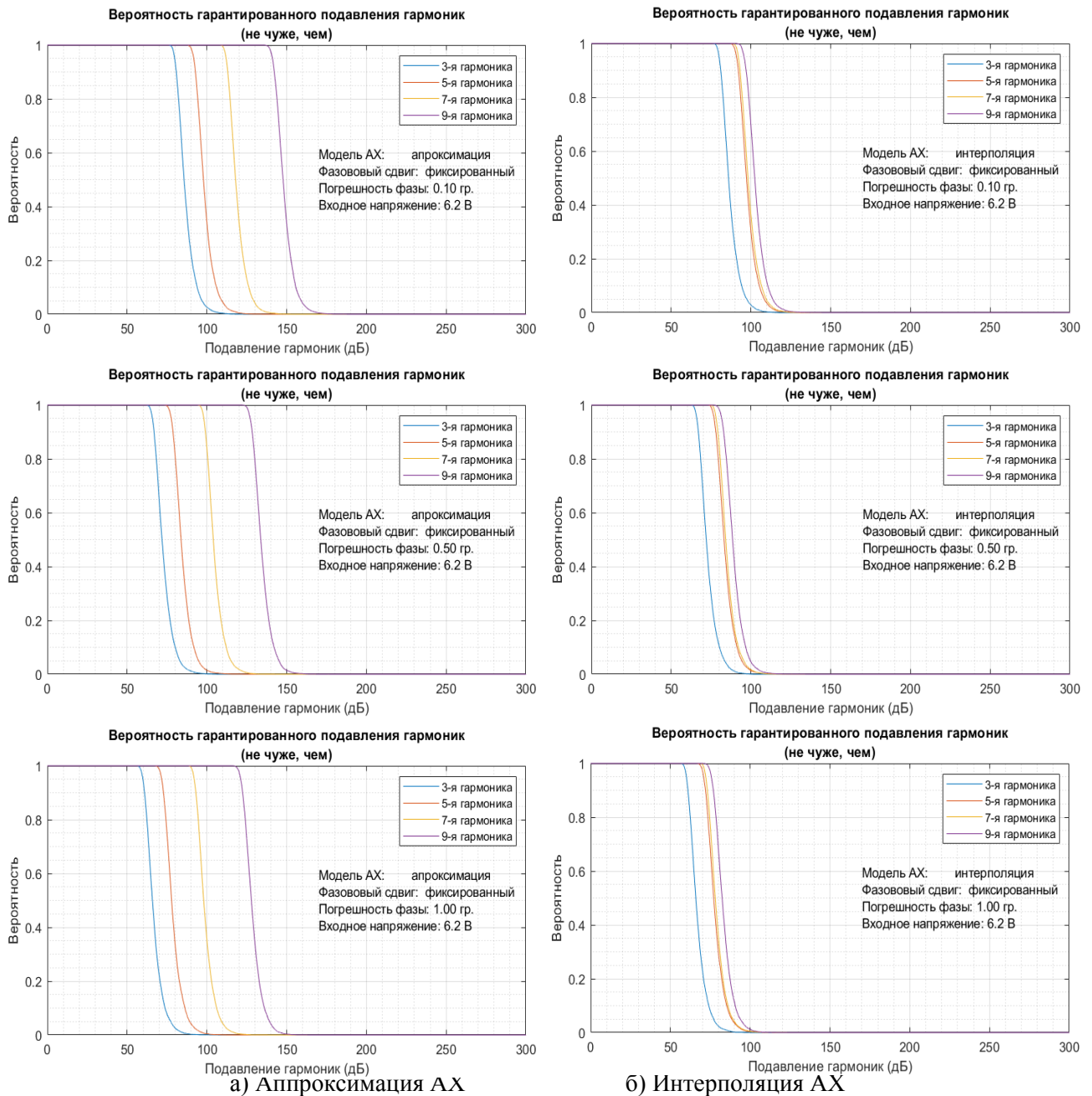


Рис. 12. Вероятность гарантированного подавления гармоник при неточной установке фазы и фиксированном способе её формирования

Таблица 7 – Гарантированное с вероятностью 0.99 подавление гармоник (дБ) только за счёт фиксированного способа формирования фаз

Погрешность фазы	Модель АХ	Номер гармоники			
		3	5	7	9
0°	Аппроксимация	- 316.44	- 300.94	- 125.14	- 252.57
	Интерполяция	- 315.87	- 304.62	- 125.18	- 298.51
0.1°	Аппроксимация	- 57.02	- 52.14	- 49.72	- 46.51
	Интерполяция	- 56.9	- 52.22	- 49.52	- 46.71
0.5°	Аппроксимация	- 43.02	- 38.24	- 35.62	- 32.61
	Интерполяция	- 43.28	- 38.42	- 35.72	- 32.51
1.0°	Аппроксимация	- 37.12	- 32.24	- 29.62	- 26.81
	Интерполяция	- 37.18	- 32.12	- 29.72	- 26.61

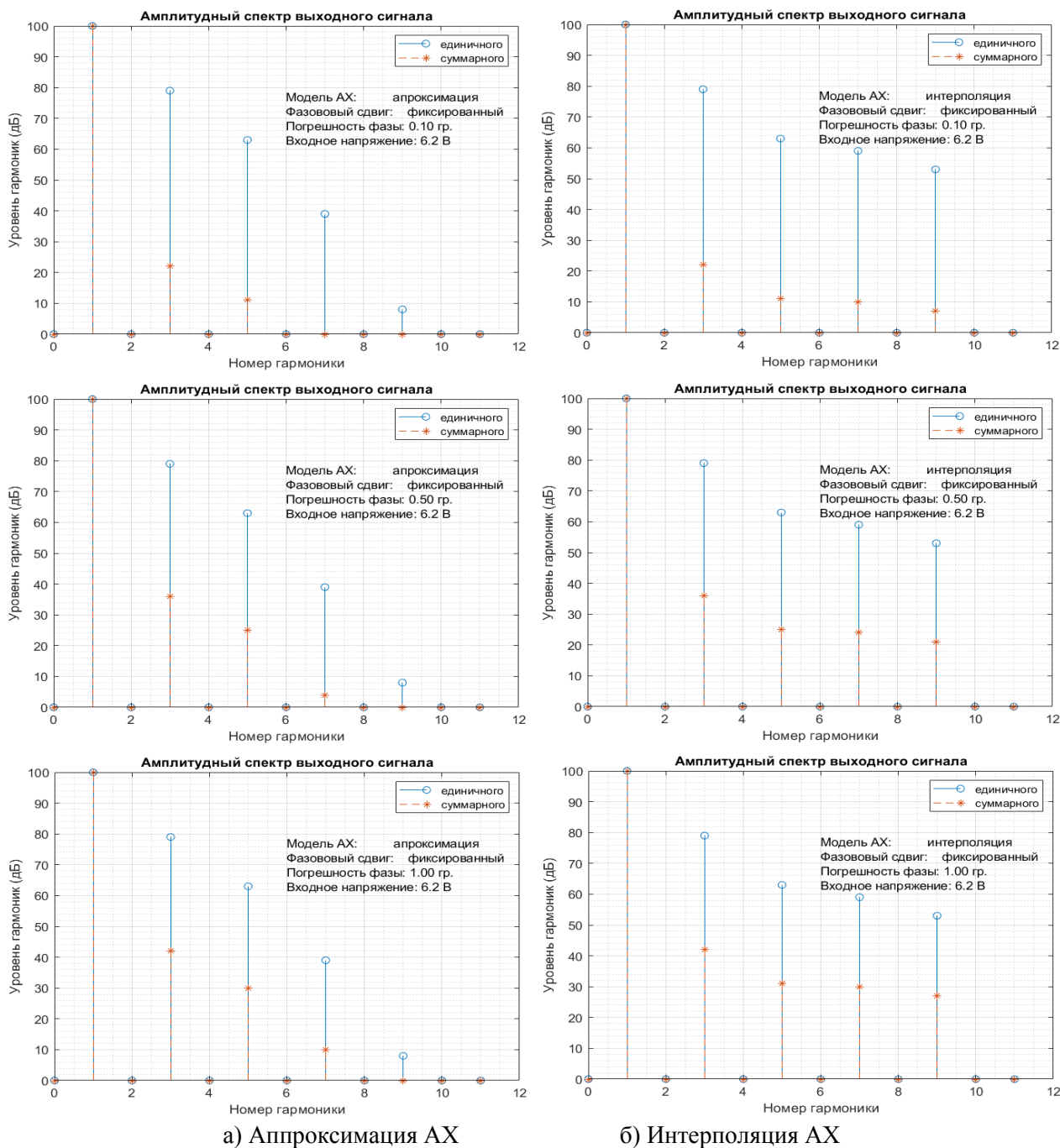


Рис. 13. Амплитудные спектры выходного сигнала усилительного тракта с ФКНИ при неточной установке фазы и фиксированном способе её формирования

### 3. Равномерный способ формирования начальной фазы

Вектор начальных фаз при равномерном способе формируется в соответствии с выражением (1). При этом гармонические искажения компенсируются лишь частично. На рис. 14 показаны зависимости КНИ и КПМ от величины начальной фазы.

На графике КГИ существует две точки экстремума: в районе 15° и 30°. Этим точкам соответствуют значения КПМ, примерно, 30 % и 84 %. Выбираем значение начальной фазы, соответствующее меньшему КПМ – это 15°. Следовательно, при проведении математического моделирования в данном случае вектор значений фазы имеет вид: [0° 15° 30° 45° 60° 75° 90° 105°]. Результат моделирования представлен в табл. 8.

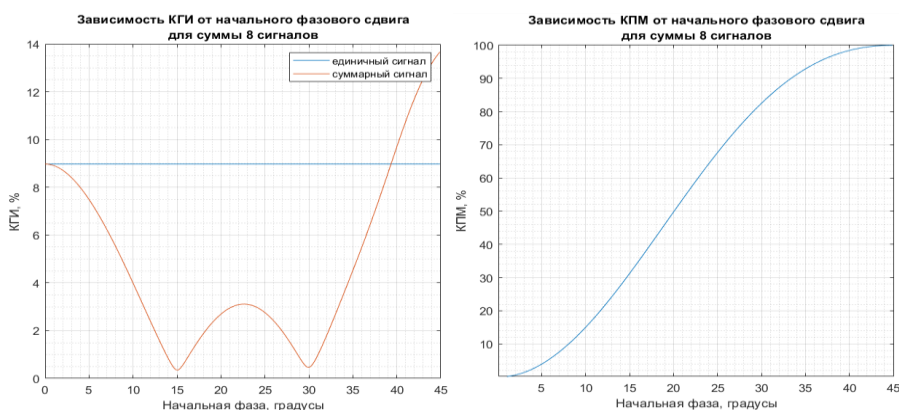


Рис. 14. Зависимость КНИ и КПМ от величины начальной фазы при равномерном способе формирования фазы

Таблица 8 – Результат моделирования при нулевой погрешности и равномерном способе формирования вектора начальных фаз

№ п/п	Параметр	Аппроксимация АХ	Интерполяция АХ
1	КГИ единичного сигнала, %	9.03	8.97
2	КГИ суммарного сигнала, %	0.29	0.35
3	КПМ суммарного сигнала, %	31.22	31.22
4	Уровень 3-й гармоники, дБ	- 337.00	- 336.62
5	Уровень 5-й гармоники, дБ	- 50.74	- 49.96
6	Уровень 7-й гармоники, дБ	- 76.25	- 56.36
7	Уровень 9-й гармоники, дБ	- 351.76	- 343.85

На рис. 15 показан амплитудный спектр единичного и суммарного выходных сигналов для идеального (нулевая погрешность фазы) случая при различных видах модели АХ.

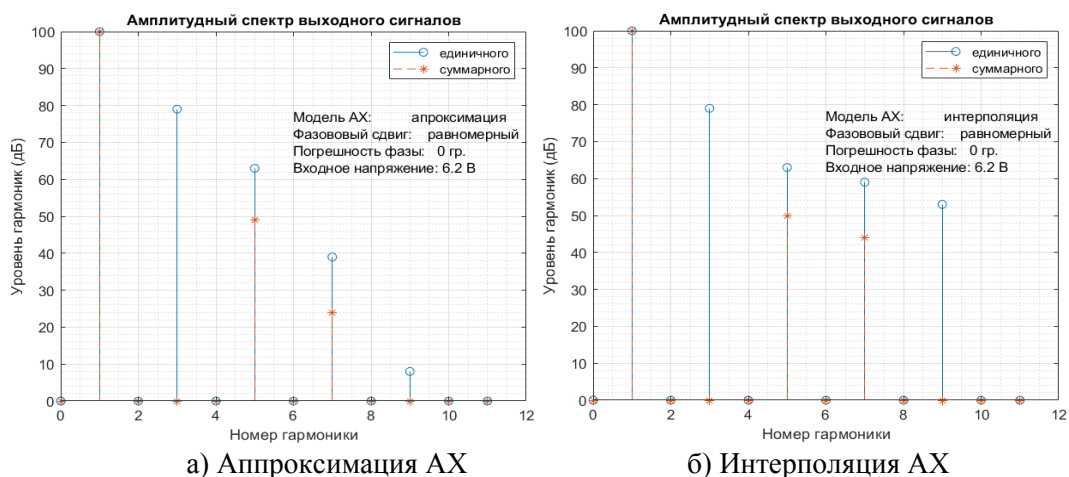
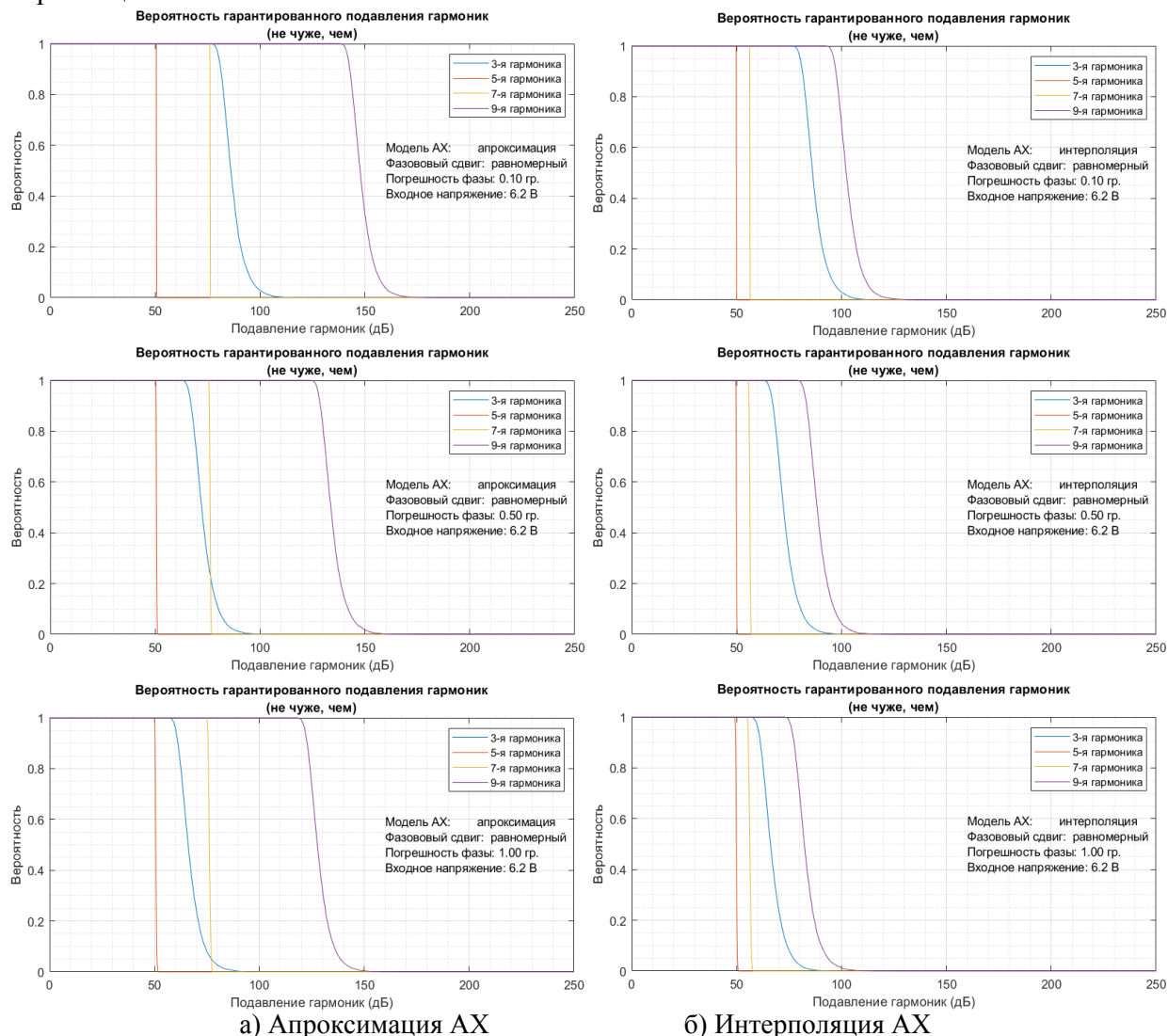


Рис. 15. Сравнение амплитудных спектров для разных моделей АХ при равномерном способе формирования фазы

Равномерное распределение фаз для восьми ветвей усиления при выборе любой модели АХ позволяет (теоретически) обеспечить полное подавление третьей и девятой, а также частичное пятой и седьмой гармоник, при этом КПМ составляет 31.22 %. Отличие, как уже отмечалось в предыдущем параграфе, заключается в амплитудном спектре выходного сигнала для единичного УМ (табл. 5). При заданном уровне входного сигнала (6.2 В) и равномерном способе определения начальных фаз, КГИ при интерполяции АХ больше, чем при аппроксимации.

На рис. 16 показаны вероятности того, что уровень подавления гармоник будет не хуже, чем значения, отложенные по оси абсцисс. Рассмотрено два варианта – аппроксимация и интерполяция АХ.



а) Аппроксимация АХ

б) Интерполяция АХ

Рис. 16. Вероятность гарантированного подавления гармоник при неточной установке фазы и фиксированном способе её формирования

В табл. 9 представлены численные значения гарантированного с вероятностью 0.99 подавления гармоник.

Таблица 9 – Гарантированное с вероятностью 0.99 подавление гармоник (дБ) при фиксированном способе формирования фаз

Погрешность	Модель АХ	Номер гармоники			
		3	5	7	9
0°	Аппроксимация	- 337.00	- 50.74	- 76.25	- 351.76
	Интерполяция	- 336.62	- 49.96	- 56.36	- 343.85
0.1°	Аппроксимация	- 78.30	- 50.90	- 76.30	- 140.00
	Интерполяция	- 78.60	- 50.10	- 56.40	- 94.60
0.5°	Аппроксимация	- 64.50	- 50.50	- 75.80	- 125.80
	Интерполяция	- 64.60	- 49.80	- 55.90	- 80.60
1.0°	Аппроксимация	- 58.40	- 50.20	- 75.20	- 119.80
	Интерполяция	- 58.40	- 49.40	- 55.30	- 74.60

Результаты из табл. 5, 8 и 9 показаны на рис. 17 в виде выходных амплитудных спектров единичного и суммарного сигналов при различных значениях погрешности фаз и моделях АХ. Представленные графики построены на основании данных из табл. 4, 5 и 6.

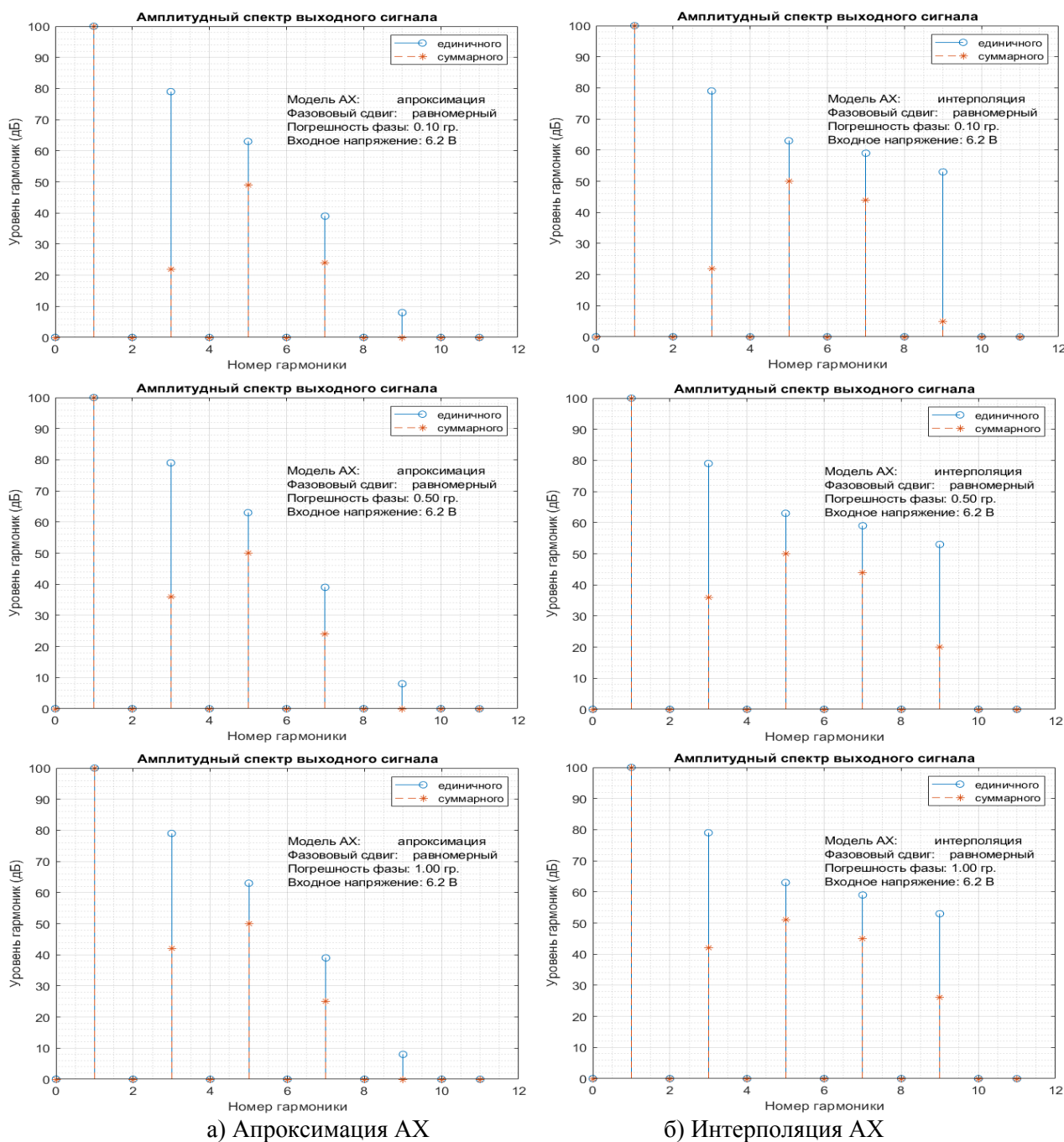


Рис. 17. Амплитудные спектры выходного сигнала усилительного тракта с ФКНИ при неточной установке фазы и равномерном способе её формирования

В табл. 10 представлены гарантированные с вероятностью 0.99 уровни подавления гармоник только за счёт способа формирования фаз (аналог табл. 7 из прошлого параграфа).

Результат, приведенный в табл. 10, согласуется с результатом для фиксированного распределения фаз: вид модели АХ не влияет на степень подавления и эффективность компенсации нелинейных искажений снижается с ростом погрешности. КПМ для равномерного распределения фаз ниже, чем при фиксированного.



Таблица 10 – Гарантированное с вероятностью 0.99 подавление гармоник (дБ) только за счёт равномерного способа формирования фаз

Погрешность	Модель АХ	Номер гармоники			
		3	5	7	9
0°	Аппроксимация	- 316.02	- 13.38	- 15.67	- 259.67
	Интерполяция	- 315.50	- 13.38	- 15.68	- 297.16
0.1°	Аппроксимация	- 57.32	- 13.54	- 15.72	- 47.91
	Интерполяция	- 57.48	- 13.52	- 15.72	- 47.91
0.5°	Аппроксимация	- 43.52	- 13.14	- 15.22	- 33.71
	Интерполяция	- 43.48	- 13.22	- 15.22	- 33.91
1.0°	Аппроксимация	- 37.42	- 12.84	- 14.62	- 27.71
	Интерполяция	- 37.28	- 12.82	- 14.62	- 27.91

**4. Анализ влияния несимметричности АХ на компенсацию нелинейных искажений**

Реальный УМ не всегда обладает идеальной АХ с точки зрения её симметричности относительно нуля (см. рис. 6). Добиться требуемой степени симметричности достаточно трудно и, что немаловажно, дорого. Поэтому рассмотрим влияние несимметричности АХ на степень подавления гармонических искажений в усилительных трактах с фазовой компенсацией нелинейности. Для этого изменим выражение (4) и сформируем модель АХ следующим образом:

$$U_{inp} = [(-1) \cdot \text{fliplr}(U_{inp}) \ 0 \ U_{inp}]$$

$$U_{out} = [(-K_{gain}) \cdot \text{fliplr}(U_{out}) \ 0 \ U_{out}], \tag{5}$$

где *fliplr()* – функция, которая «переворачивает» вектор: первый элемент становится последним, а последний первым, *K<sub>gain</sub>* – коэффициент усиления для сигналов отрицательной полярности, *U<sub>inp</sub>* и *U<sub>out</sub>* – значения из табл.3.

Меняя значение коэффициента *K<sub>gain</sub>*, можно влиять на симметричность АХ.

Степень симметричности будем оценивать коэффициентом асимметричности (КАС), измеряемым в %:

$$K_{as} = 100 * |1 - K_{gain}| \tag{6}$$

В табл. 11 даны отсчёты амплитудного спектра при асимметричности 0.5 % для двух моделей АХ. При этом получен КГИ для аппроксимации равный 9.04 %, а для интерполяции – 8.98 %. Для наглядности, данные спектры представлены на рис. 18 при различных способах формирования фазы и моделях АХ.

Таблица 11 – Уровень гармоник в выходном спектре единичного УМ (дБ) при асимметричности АХ 0.5 %

Модель АХ	Номер гармоники										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Аппроксимация	- 50.22	0.00	- 57.98	- 20.98	- 79.27	- 37.36	- 101.77	- 60.58	- 131.69	- 92.09	- 335.43
Интерполяция	- 50.26	0.00	- 58.11	- 21.12	- 78.01	- 36.58	- 85.00	- 40.68	- 93.12	- 46.69	- 103.68

Для качественного анализа степени влияния асимметричности АХ на нелинейность усилительного тракта с ФКНИ достаточно рассмотреть только одну модель АХ при различных способах формирования фаз. В табл. 12 представлены значения коэффициента гармонических искажений, полученный при условии нулевой погрешности установления начальной фазы для двух способов формирования вектора начальных фаз.

Из табл. 12 видно, что при заданных ограничениях, во-первых, эффективность подавления гармонических искажений для фиксированного способа формирования фаз падает с ростом КАС, во-вторых, при КАС = 1 % эффективность подавления и у фиксированного способа, и у равномерного становятся, примерно, одинакова, в-третьих, с увеличением КАС степень подавления гармоник резко падает (при КАС = 1 % она больше 10 раз, а при КАС = 19 % равна, примерно, 1.5).

Таблица 12 – Коэффициент гармонических искажений (%) для единичного и суммарного выходных сигналов при нулевой погрешности установления начальной фазы

№ п/п	Способ формирования начального вектора фаз		Коэффициент асимметричности (%)			
			0.5	1	5	10
1	Фиксированный	единичный	9.04	9.06	9.60	11.05
		суммарный	0.39	0.77	3.80	7.41
2	Равномерный	единичный	9.04	9.06	9.60	11.05
		суммарный	0.48	0.81	3.68	7.09

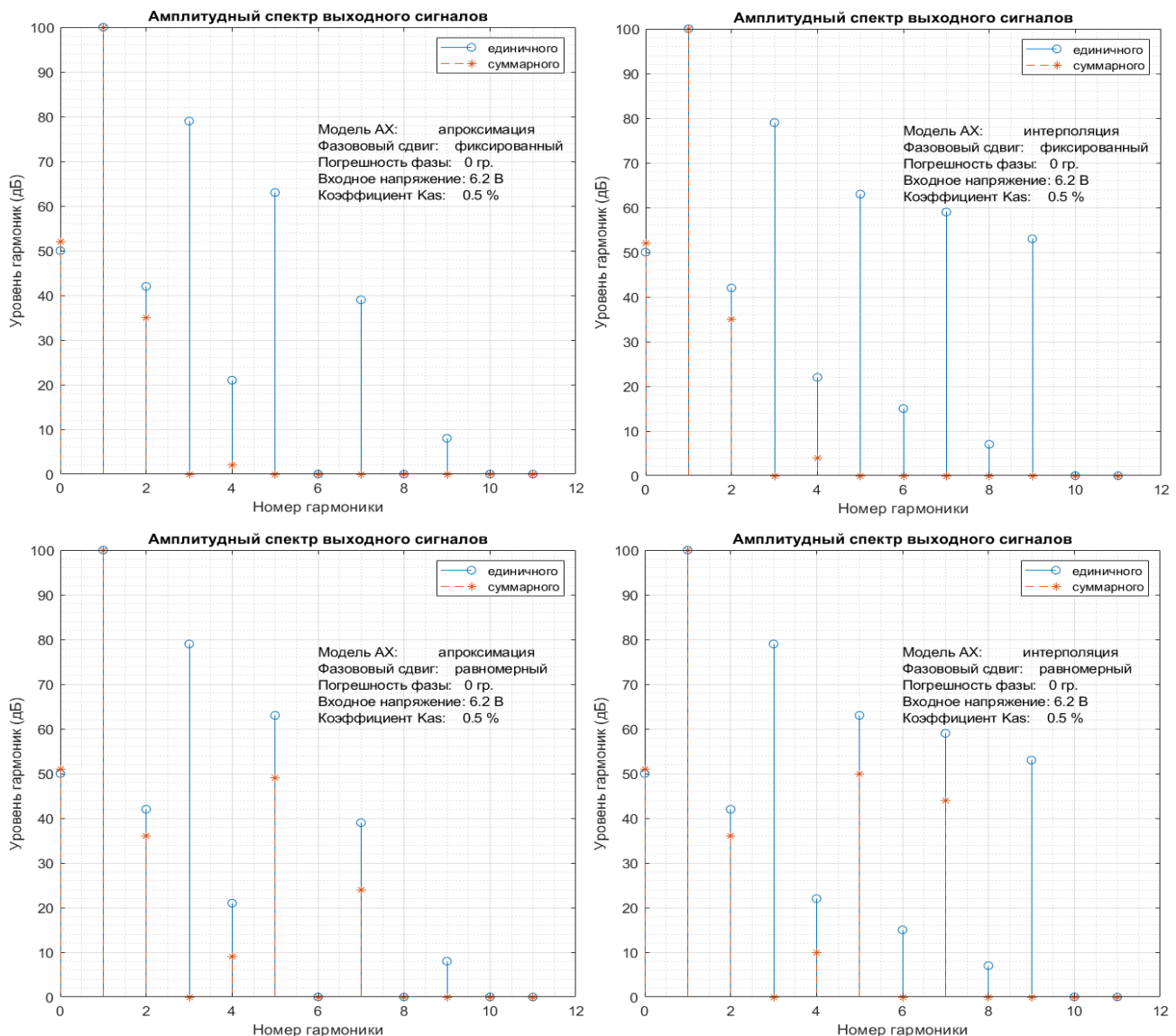


Рис. 18. Амплитудные спектры выходного сигнала при асимметричной АХ

На рис. 19 показаны амплитудные спектры для фиксированного и равномерного способов формирования начальной фазы при различной степени асимметричной АХ и нулевой фазовой погрешности.

Из анализа амплитудных спектров, представленных на рис. 19, следует, что при асимметричной АХ появляется постоянная составляющая. Это не приводит к дополнительным гармоническим искажениям, но ведёт к снижению КПД усилительного тракта, в целом.

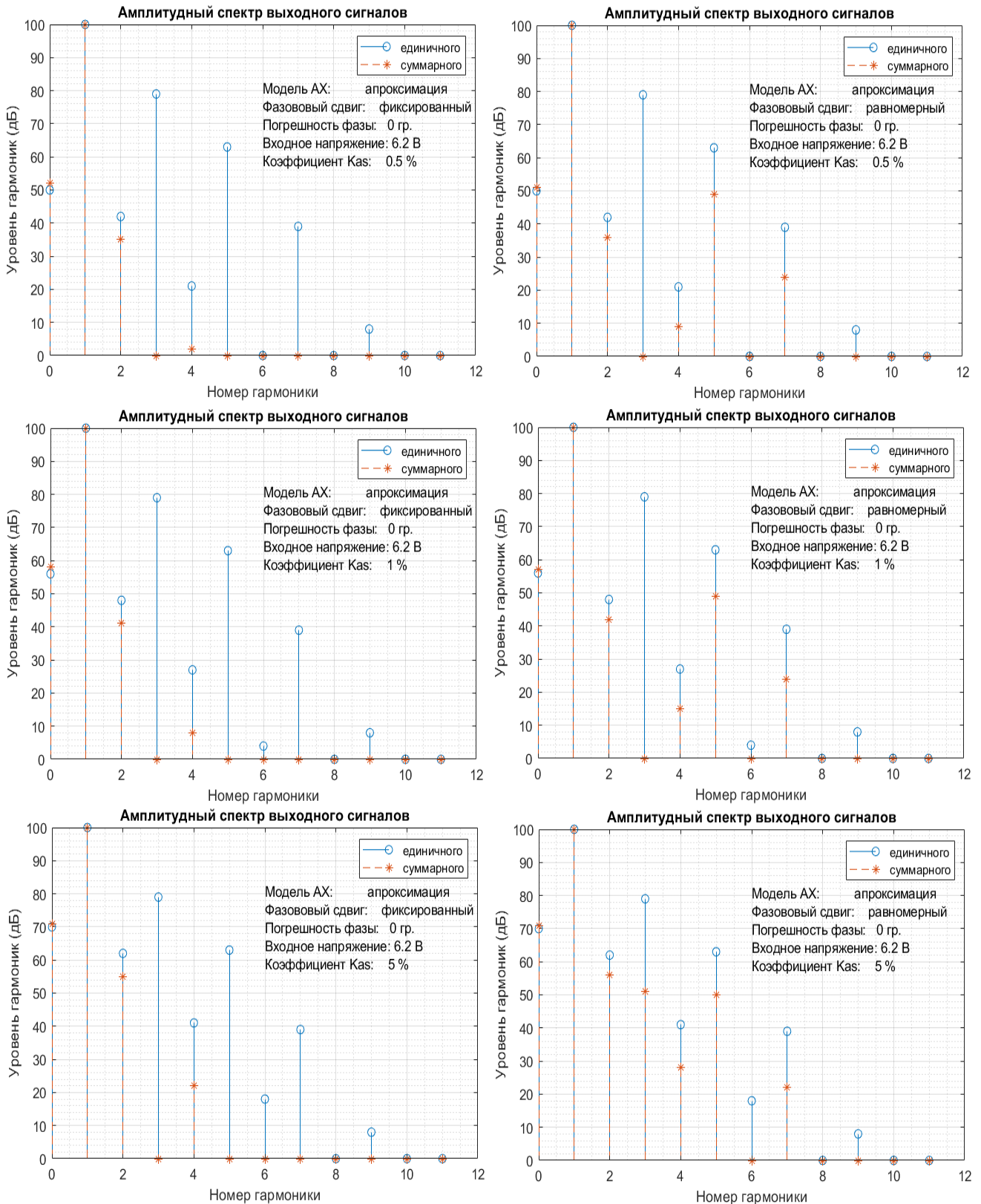


Рис. 19. Амплитудные спектры выходного сигнала при различной степени асимметрии АХ

Теперь рассмотрим, как влияет неточность установления начальной фазы при асимметрии АХ. При моделировании, зафиксируем значение асимметрии на уровне КАС = 0.5 %. Получаемые амплитудные спектры представлены на рис. 20.

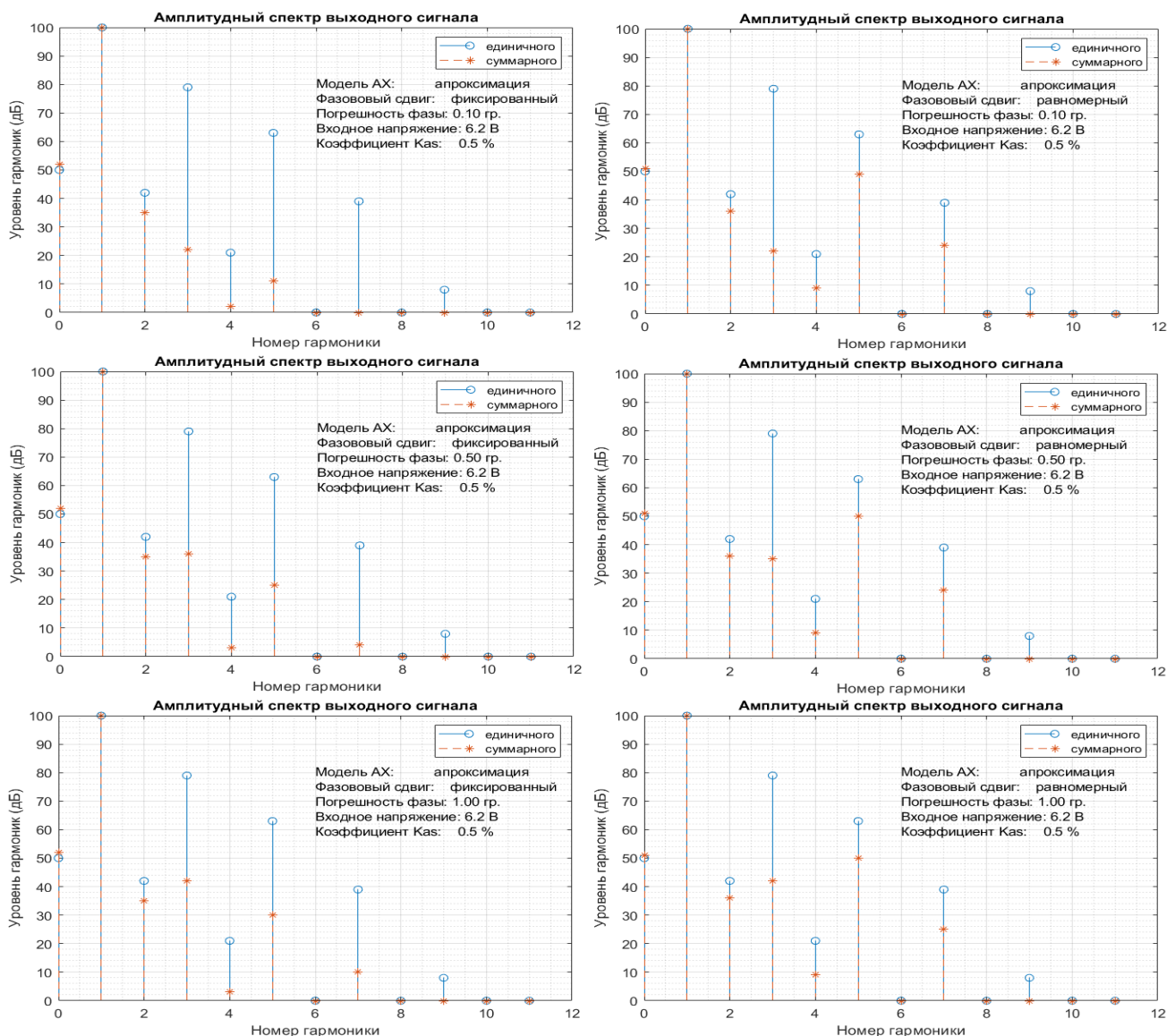


Рис. 20. Амплитудные спектры выходного сигнала при КАС = 0.5 % для фиксированного и равномерного формирования фазы с погрешностью

В табл. 13 представлены относительные (отсчитываемые от уровня сигнала) уровни гарантированного с вероятностью 0.99 подавления гармоник при КАС = 0.5 % для различных способов формирования начальной фазы и значений её погрешности. Для большей наглядности, этот же результат моделирования представлен в виде графических зависимостей на рис. 21.

Необходимо отметить, что приведенные данные включают не только эффект от фазовой компенсации нелинейности, но и распределения уровня гармоник в исходном спектре единичного УМ. В табл. 14 представлены уровни гарантированного с вероятностью 0.99 подавления гармоник только за счёт алгоритма фазовой компенсации.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

- 1) При асимметричности АХ в выходном спектре появляется постоянная составляющая, которая имеет тенденцию к увеличению (небольшую) при фазовых алгоритмах компенсации нелинейности.
- 2) В полученном результате моделирования при заданных ограничениях наблюдается ухудшение подавления 10-й гармоники.
- 3) Спектр чётных гармоник резко убывает с ростом номера гармоники.

4) Степень подавления чётных гармоник значительно хуже подавления нечётных гармоник, но менее зависима от погрешности фазы.

Таблица 13 – Гарантированное с вероятностью 0.99 подавление гармоник (дБ) при КАС = 0.5 %

Погрешность	Способ	Номер гармоники										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1°	Фиксированный	-48.30	0.00	-64.80	-77.90	-97.60	-89.50	-123.00	-110.00	-150.50	-138.50	-332.00
	Равномерный	-48.60	0.00	-63.90	-78.10	-90.90	-50.70	-153.00	-76.10	-147.90	-139.80	-332.50
0.5°	Фиксированный	-48.30	0.00	-64.80	-63.90	-97.10	-75.40	-122.50	-96.10	-149.60	-124.70	-331.90
	Равномерный	-48.60	0.00	-63.90	-64.20	-90.70	-50.30	-139.00	-75.60	-147.30	-125.70	-332.50
1.0°	Фиксированный	-48.30	0.00	-64.70	-57.90	-96.60	-69.50	-121.90	-90.20	-148.70	-118.60	-332.00
	Равномерный	-48.60	0.00	-63.80	-58.20	-90.50	-50.00	-133.00	-75.00	-146.50	-119.70	-332.60

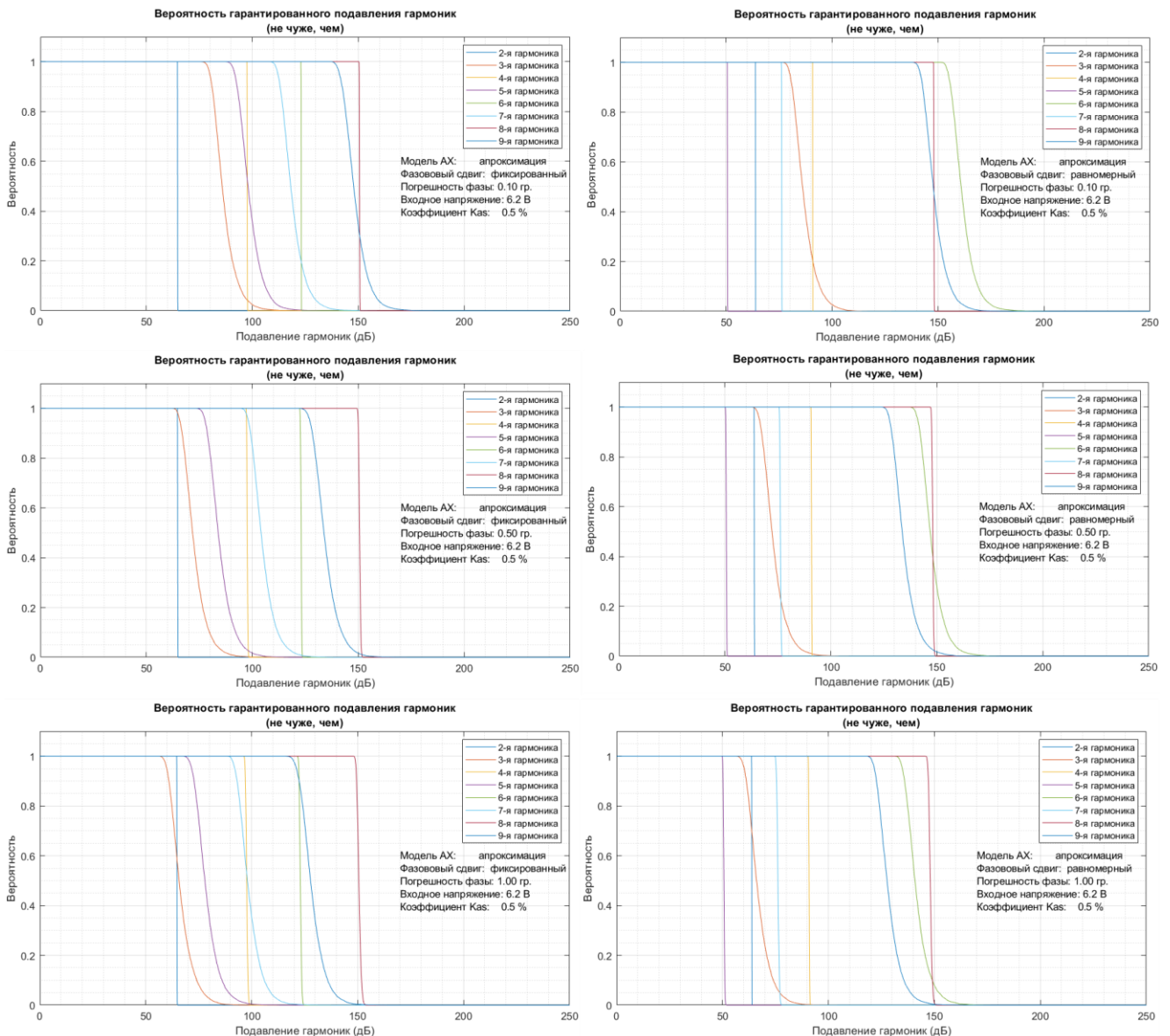


Рис. 21. Гарантированная вероятность подавления при КАС = 0.5 %

Таблица 14 – Гарантированное с вероятностью 0.99 подавление гармоник только за счёт фазовой компенсации нелинейности

Погрешность	Способ	Номер гармоники										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1°	Фиксированный	1.52	0.00	- 6.82	- 56.92	- 18.33	- 52.14	- 21.23	- 49.42	- 18.81	- 46.41	3.03
	Равномерный	1.22	0.00	- 5.92	- 57.12	- 11.63	- 13.34	- 51.23	- 15.52	- 16.21	- 47.71	2.53
0.5°	Фиксированный	1.52	0.00	- 6.82	- 42.82	- 17.83	- 37.94	- 20.73	- 35.42	- 17.91	- 32.51	3.13
	Равномерный	1.22	0.00	- 5.92	- 43.22	- 11.43	- 12.94	- 37.23	- 15.02	- 15.61	- 33.61	2.53
1.0°	Фиксированный	1.52	0.00	- 6.72	- 36.92	- 17.33	- 32.14	- 20.13	- 29.62	- 17.01	- 26.51	3.03
	Равномерный	1.42	- 0.20	- 6.02	- 37.42	- 11.43	- 12.84	- 31.43	- 14.62	- 15.01	- 27.81	2.63

### Выводы

Рассматривая две модели АХ: аппроксимацию и интерполяцию, можно выделить несколько аспектов. Во-первых, при интерполяции спектр имеет высокий уровень гармоник высшего порядка, их уровень снижается медленнее, чем у спектра аппроксимационной модели. Во-вторых, при аппроксимации АХ ярко выражена зависимость уровня гармоник от уровня входного сигнала: при небольшой амплитуде входного сигнала в спектре присутствуют, в основном, гармоники невысокого порядка, уровень гармоник резко убывает с увеличением их номера, с ростом входной амплитуды соотношение меняется – растёт уровень гармоник высокого порядка. Такое поведение спектра полностью соответствует физической сущности протекающих процессов: при небольшом уровне входного сигнала АХ имеет квадратичный характер, что и обуславливает минимальный уровень гармоник высших порядков, а с ростом входной амплитуды, АХ начинает «изгибаться», что и приводит к росту уровня высокочастотных гармонических составляющих спектра. Необходимо учитывать, что реальная АХ не такая «гладкая», как при аппроксимации, и не такая «ломаная», как при интерполяции. Поэтому, интерполяцию и аппроксимацию АХ нужно рассматривать как оценки сверху и снизу реальной АХ, соответственно.

При выборе способа формирования вектора начальных фаз следует учитывать, что:

- фиксированный способ позволяет компенсировать гармоники полностью, но только теоретически, на практике нельзя точно установить фазы, что приводит к снижению эффективности компенсации;
- равномерный способ формирования не даёт, даже теоретически, гарантии полной компенсации гармоник, но он менее чувствителен к погрешности начальных фаз, кроме того, обеспечивает более низкий коэффициент потери мощности.

Следовательно, выбор способа компенсации во многом зависит от нелинейных свойств единичного УМ, а также возможностей по формированию начальных фаз. Если имеется хороший возбудитель, обеспечивающий формирование нескольких копий входного сигнала с фазовым сдвигом требуемой точности, то можно значительно снизить требования по нелинейности единичного УМ, и, в итоге, получить усилительный тракт с ФКНИ требуемого качества. И, наоборот, если точность установления фазы невелика, то для получения усилительного тракта с ФКНИ требуемого качества необходимо ужесточить требования к нелинейным свойствам единичного УМ.

Ещё одно замечание касается необходимого количества фазовых ветвей в усилительном тракте. Он зависит от полосы частот, которую требуется очистить от гармоник. В рассматриваемом примере нужно подавить первые 10 гармоник. Но это, если

работа ведётся на нижней частоте КВ диапазоне – 3 МГц. А если рабочая частота 10 МГц, то уже при подавлении 3-й гармоники требование по очистке спектра выполняется. Отсюда напрашивается вывод о необходимости динамического регулирования начальных фазовых соотношений в зависимости от выбранной рабочей частоты. Это позволит уменьшить КПМ при работе на частотах выше 3 МГц. Так, например, при условии отсутствия чётных гармоник в спектре единичного УМ и наличия ФНЧ, который ограничивает спектр выходного сигнала 30 МГц, при работе на частотах больше 4 МГц требуется подавить только первые 7 гармоник, при частотах больше 5 МГц – уже только 5, при 7 МГц – 3, а при частотах больше 11 МГц можно вообще отказаться от фазовой компенсации.

Наличие асимметричности АХ приводит к появлению чётных гармоник в спектре единичного усилителя. Эффективность борьбы с ними при фазовой компенсации невысока, поэтому рекомендуется использовать единичные УМ с асимметричностью АХ, не превышающей 0.5 %.

#### Литература

1. Гук И.И. Фазовая компенсация нелинейных искажений на выходе усилителя мощности // Техника средств связи. № 2 (146), 2019. С. 90 – 105.

#### References

1. Guk I.I. *Fazovaya kompensaciya nelinejnyh iskazhenij na vyhode usilitelya moshchnosti* [Phase compensation of nonlinear distortions at the output of the power amplifier]. Means of communication equipment. No. 2 (146), 2019. Pp. 90 – 105. (in Russian).

Статья поступила 18 марта 2020 г.

#### Информация об авторах

Гук Игорь Иосифович – Ведущий инженер ПАО «Интелтех», кандидат технических наук. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, радиосвязь в декаметровом диапазоне. Тел.: +79111704935. E-mail: [gook\\_igor@mail.ru](mailto:gook_igor@mail.ru). Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, Кантемировская, 8.

#### Phase compensation of nonlinear distortions at the output of the power amplifier

I.I. Guk

**Annotation. Problem statement.** The article is based on the results of the previous article and is devoted to the consideration of practical aspects of building power amplifiers with phase compensation of nonlinear distortions that allow for broadband operation over the entire frequency range without switching octave filters. **The purpose of this work** is to calculate phase ratios based on the amplitude characteristic of a real power amplifier that minimize nonlinear distortions. **Methods used:** theoretical calculations and models discussed in the previous part, as well as numerical methods of modeling and calculation in the Matlab integrated environment. **The novelty** is that the simulation is based on the amplitude characteristic obtained as a result of studying the parameters of a real power amplifier. **The result** is that we propose a method for obtaining optimal phase ratios for constructing a power amplifier using a scheme with phase compensation for nonlinear distortions. **The practical significance** lies in the fact that the optimal phase relations for obtaining minimal nonlinear distortions at the output of the power amplifier are calculated based on the actual amplitude characteristic, and the most probable harmonic levels are estimated for a given phase error.

**Keywords:** power amplifier; amplitude characteristic; nonlinear distortions; harmonic level.

#### Information about Authors

Guk Igor Iosifovich – Leading engineer of PJSC "IntelTech", Ph. D. Research interests: Digital signal processing, radio communication in the decameter range. Tel: +79111704935. E-mail: [gook\\_igor@mail.ru](mailto:gook_igor@mail.ru). Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya, 8.

**Для цитирования:** Гук И.И. Оценка фазовой компенсации нелинейных искажений на выходе реального усилителя мощности // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 34-54.

**For citation:** Guk I.I. Phase compensation of nonlinear distortions at the output of the power amplifier. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 34-54 (in Russian).

УДК 621.396.93

### Статистический выбор рабочих частот в декаметровом диапазоне волн для различных видов радиосигналов

Солозобов С.А., Шевченко В.В., Щукин А.Н.

**Аннотация.** *Цель статьи* – показать, как в условиях сложной помеховой обстановки найти частоты для конкретного вида радиосигнала, на которых условия распространения радиоволн и помеховая обстановка обеспечат требуемое качество связи. Приведен порядок выбора частоты, позволяющий определить её пригодность для передачи информации заданным видом радиосигнала в декаметровом радиоканале при связи пространственной волной. Проведено имитационное моделирование нормально-распределенных случайных процессов, характеризующих закон изменения уровней сигнала с учетом статистических данных о среднеквадратическом отклонении от среднего (медианного) значения радиосигнала и помех, действующих в канале радиосвязи декаметрового диапазона волн. Определена вероятность связи с требуемой достоверностью на частотах для сигналов с частотной и относительной фазовой манипуляцией для различных скоростей передачи информации. В качестве критерия пригодности частот, для заданного вида радиосигнала выбрана вероятность связи с требуемой достоверностью передачи сообщения, превышающая на них значение 0,9. **Представлены результаты** имитационного моделирования процесса поиска пригодных для связи с требуемой достоверностью частот при передаче информации различными видами радиосигналов. Результаты работы могут быть реализованы при создании адаптивных радиолиний, основу которых будут составлять SDR-радиоприемники, быстро перестраиваемые радиопередатчики декаметрового диапазона волн и аппаратура управления ею, имеющая информацию о виде радиосигнала и помехах, на предполагаемых для использования частотах. Они также могут быть использованы в аппаратных частотно-диспетчерской службы узлов связи, с целью выбора частот для радиолиний, используемых на различных направлениях связи.

**Ключевые слова:** декаметровый диапазон; условия распространения радиоволн; помеховая обстановка; вероятность связи с требуемой достоверностью; SDR-радиоприемник.

#### Введение

Сложная помеховая обстановка и условия распространения радиоволн в декаметровом диапазоне волн требует более качественного подхода к выбору частот для радиосвязи в различных направлениях связи. Радиосигналы, используемые для связи в радиолиниях декаметрового диапазона волн, имеют разную структуру распределения мощности в спектре сигнала и помехоустойчивость. Различие по помехоустойчивости радиосигналов и неравномерность загрузки декаметрового диапазона волн позволяет с большой вероятностью выбрать полосу частот, соизмеримую с шириной спектра радиосигнала, в пределах которой имеется низкий уровень помех и приемлемый для качественного приема уровень сигнала.

Качество приема информации, передаваемой различными видами радиосигналов, определяется соотношением уровней сигнала и помех в точке приема. Вероятность связи с требуемой достоверностью приема сообщения в радиолинии определяет процент времени, в течение которого качество приема информации будет удовлетворять требуемому ее значению.

Выбирая конкретный вид радиосигнала и вычисляя вероятность связи с требуемой достоверностью приема сообщения в радиолинии, определяется та частота, на которой эта вероятность будет максимальна. Эта частота будет выдана радиолинии для передачи информации на заданную протяженность трассы.

Современные радиоприемные устройства, построенные по SDR технологии [1], обеспечивают быструю его перестройку по диапазону частот и измерение уровней помех в полосе, учитывающей вид радиосигнала и ширину его спектра. Это позволяет использовать SDR-радиоприемники не только для приема радиосигналов, но и для измерения уровней помех в полосе частот, в которой обеспечивается линейность его динамических характеристик.



### 1. Выбор рабочей частоты для различных видов радиосигналов при связи пространственной волной в декаметровом диапазоне волн

Радиосвязи в декаметровом диапазоне волн характерны глубокие замирания сигнала и высокий уровень помех от радиопередатчиков посторонних радиостанций. При этом уровни как сигналов, так и помех на входе радиоприемника изменяются по случайному закону. Вероятность связи в радиолинии декаметрового диапазона волн зависит от параметров радиопередающих, радиоприемных и антенных устройств, сигнально-помеховой обстановки в точке приема, видом радиосигнала, используемого для передачи информации и способом его обработки. Вероятность связи на разных частотах будет случайной величиной, так как по случайному закону изменяются параметры сигнала и помех в точке приема.

Выбор рабочей частоты для различных видов радиосигналов осуществим в следующем порядке.

- 1) Определяем вероятность связи в радиолинии на  $i$ -частоте.

$$P_{сви} = f(y_i, x_i, z_{доп}) \quad (1)$$

где:  $y_i$  – уровень сигнала в точке приема на  $i$ -частоте с среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{y_i}$  (берется из статистических данных);  $x_i$  – уровень помех в точке приема на  $i$ -частоте с среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{x_i}$  (определяется по результатам измерения);  $z_{доп}$  – допустимое превышение уровня сигнала над уровнем помех при котором обеспечивается требуемое качество приема информации.

- 2) Определяем уровень сигнала в точке приема на  $i$ -частоте.

В соответствии с методом [2] определяем медианное значение уровня сигнала в точке приема на  $i$ -частоте, расположенной в диапазоне частот от наименьшей применимой частоты (НПЧ) до максимальной применимой частоты (МПЧ), в соответствии с методами, изложенными в [3, 4].

Медианное значение уровня сигнала на входе приемника корреспондента, осуществляющего выбор частоты, имеет вид:

$$y_i = 29,4 + Pt_i + Gt_i + Gr_i - Lb_i, \quad (2)$$

где:  $Pt_i$  – мощность передатчика корреспондента, с которым предполагается установление радиосвязи на  $i$ -частоте, дБкВт;  $Gt_i$  – коэффициент усиления передающей антенны на  $i$ -й частоте для требуемого азимута и угла места ( $\Delta$ ) по отношению к изотропной антенне, дБ;  $Gr_i$  – коэффициент усиления приемной антенны на  $i$ -й частоте для требуемого азимута и угла места ( $\Delta$ ) по отношению к изотропной антенне, дБ;  $Lb_i$  – затухание радиосигнала на трассе распространения на  $i$ -й частоте, определяемое как:

$$Lb_i = 32,45 + 20\lg f_i + 20\lg p_i + L_i + Lm_i + Lg_i + Lh_i + Lz_i, \quad (3)$$

где:  $f_i$  – частота передачи, МГц;  $p_i$  – виртуальная наклонная дальность, км;  $L_i$  – затухание за счет поглощения в слое предыдущее слою отражения, дБ;  $Lm_i$  – затухание выше основной МПЧ;  $Lg_i$  – суммарное затухание при отражении от земли в промежуточных точках отражения при многоскачковой распространении волн;  $Lh_i$  – коэффициент, учитывающий геомагнитную широту (к северу или югу от экватора), местное время и другие потери сигнала;  $Lz_i$  – член уравнения, учитывающий эффекты распространения пространственной волны, не включенные в этот метод каким-либо другим образом. В настоящем документе рекомендуется значение 8,72 дБ.

Полученное медианное значение уровня сигнала используется как среднее значение для моделирования случайного процесса распределенного по нормальному закону, имитирующего сигнал на входе радиоприемника. Значение среднеквадратического отклонения этого случайного процесса определяется статистическими данными, полученными по результатам исследований радиоканала декаметровой связи.

- 3) Определяем уровень помех в точке приема.

Для определения уровня помех необходимо учитывать ширину спектра радиосигнала, используемого для передачи информации.

Полоса пропускания приемника, измеряющего уровень помех на  $i$ -частоте должна быть

$$\Delta F_i \geq \Delta F_{pc_i} + 2\Delta f_{прmi}, \quad (4)$$

где:  $\Delta F_{pc_i}$  – ширина спектра радиосигнала на  $i$ -й частоте;  $\Delta f_{прmi}$  – абсолютная нестабильность радиоприемника на  $i$ -й частоте.

Измеренный уровень помех SDR-радиоприемником на  $i$ -й частоте будет равен

$$x_i = x_{изmi}. \quad (5)$$

4) Качество связи в радиолинии декаметрового диапазона определяется вероятностью ошибки двоичного элемента ( $p_{ош}$ ), которая зависит от отношения сигнал/шум (С/Ш) на входе демодулятора приемника. В декаметровом диапазоне волн при связи пространственной волной вероятность ошибки зависит от отношения сигнал/шум+помеха на входе демодулятора радиоприемника (С/Ш+П).

$$z_{доп} = 10 \lg(h_{доп}) = f(p_{ош доп}), \quad (6)$$

где:  $p_{ош доп}$  – допустимая вероятность ошибки, при которой обеспечивается требуемое качество приема информации в точке приема.

При невозможности получения аналитического выражения для  $h_{доп}$  из формулы для вероятности ошибки для заданного вида радиосигнала, эта величина определяется по графикам зависимости  $p_{ош} = f(h)$ . При использовании кодирования  $p_{ош доп}$  определяется, исходя из требуемой вероятности ошибки кодового слова. При поиске частот для связи с использованием аналоговых радиосигналов  $h_{доп}$  определяется требованиями оконечной аппаратуры к отношению сигнал/шум на своем входе, при котором обеспечивается требуемое качество принимаемого сообщения.

5) Используя выражение (1) определяем вероятность связи.

Вычисленная вероятность связи, при нормальном законе распределения уровней сигнала и помех, для требуемого вида радиосигнала на каждой частоте принадлежит множеству случайных величин.

$$P_{сви} \in \{P_i(z_i \geq z_{доп}), \dots, P_Q(z_Q \geq z_{доп})\} \quad (7)$$

где:  $P_i(z_i \geq z_{доп})$  – вероятность связи с требуемой достоверностью на  $i$ -й частоте;  $z_i$  – отношение С/Ш+П на  $i$ -частоте, дБ;  $z_Q$  – отношение С/Ш+П на  $Q$ -й частоте, дБ;  $Q$  – количество частот выделенных для радиолинии.

Параметры нормального закона распределения определяются для:

- уровня сигнала среднее значение – медианным значением, рассчитанным по выражению (2), а среднеквадратическое отклонение статистическими данными;
- уровня помех среднее значение и среднеквадратическое отклонение – измеренными на заданной частоте помехами.

Среднеквадратическое отклонение превышения уровня сигнала над уровнем помех определяется с учетом параметров реальной помеховой обстановки и смоделированного процесса изменения уровня сигнала на анализируемой частоте, так как медианное значение уровня сигнала и его статистические данные среднеквадратического отклонения определяются на длительном интервале времени, а поиск частот осуществляется на короткие интервалы времени, соизмеримые с длительностью передачи сообщения.

Задавшись величиной вероятности связи с требуемой достоверностью для конкретной радиолинии, из выражения (7) выбираем частоту на которой вероятность связи для требуемого вида радиосигнала удовлетворяет требуемому значению для данной радиолинии.

Таким образом, в качестве критерия определения пригодности частоты для заданного вида радиосигнала выбрана вероятность связи с требуемой достоверностью [5].

## 2. Имитационное моделирование процесса поиска частот для различных видов радиосигналов

Проведем имитационное моделирование процесса поиска частот для двух видов радиосигналов с частотной (ЧМ) и относительно-фазовой манипуляцией (ОФМ).

Используя выражение (4), находим полосу частот, в пределах которой определяются уровни сигнала и помех, для радиосигналов ЧМ и ОФМ [5].

Для радиосигнала ЧМ  $\Delta F_{pc_i} = \Delta f_{сдв} + 2V$ .

Для радиосигнала ОФМ  $\Delta F_{pc_i} = 3V$ .

Абсолютная нестабильность частоты радиоприемника  $\Delta f_{прми} = f_i * \delta$ .

где:  $\Delta f_{сдв}$  – частотный сдвиг радиосигнала ЧМ;  $V$  – скорость передачи информации радиосигналами ЧМ и ОФМ;  $\delta$  – относительная нестабильность частоты радиоприемника на анализируемой частоте.

Для примера выберем трассу протяженностью 2000 км, в которой для связи используются эти виды радиосигналов.

Согласно [2], для трассы протяженностью до 2000 км радиоволна придет в точку приема отразившись один раз от слоя F2 ионосферы. Уровень сигнала в точке приема на разных частотах будет изменяться по случайному закону.

Согласно статистическим данным [6], распределение уровней сигналов и помех в декаметровом диапазоне волн подчиняется нормальному закону распределения. Сумма нормальных законов распределения также подчиняется нормальному закону распределения. В этом случае, аналитическое выражение для расчета вероятности связи с требуемой достоверностью имеет вид [5]:

$$P_{сви} = P_i (p_{оши} \leq p_{оши доп}) = P (z_i \geq z_{доп}) = F(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt, \quad (8)$$

где:  $\xi = (\bar{z}_i - z_{доп})/\sigma_{z_i}$  – некоторый расчетный параметр;  $\bar{z}_i = (\bar{y}_i - \bar{x}_i)$  – среднее значение превышения уровня сигнала над уровнем помех, дБ;  $z_{доп}$  – допустимое превышение уровня сигнала над помехой в точке приема, дБ;  $\sigma_{z_i}$  – среднеквадратическое отклонение превышения уровня сигнала над уровнем помех от её среднего значения, дБ;  $p_{оши доп}$  – допустимая вероятность ошибки, зависящая от типа оконечной аппаратуры и задаваемая нормативными документами.

Качество приёма радиосигналов любого вида определяется вероятностью ошибки.

Для радиосигнала ЧМ вероятность ошибки при связи пространственной волной определяется выражением

$$p_{оши ЧМ} = \frac{1}{2+h^2}, \quad (9)$$

Для радиосигнала ОФМ вероятность ошибки при связи пространственной волной определяется выражением

$$p_{оши ОФМ} = \frac{1}{2+2*h^2}, \quad (10)$$

где:  $h$  – отношения сигнал/шум+помеха на входе демодулятора радиоприемника.

Для оценки состояния загрузки декаметрового диапазона волн, с целью выбора частоты для требуемого вида радиосигнала формировался случайный процесс характеризующий помеху, изменяемую по нормальному закону.

Медианный (средний) уровень сигнала определялся в соответствии с выражением (1) и используется для моделирования нормального случайного процесса, отражающего закон изменения уровня сигнала в точке приема.

Из выражений (9) и (10) определяем  $z_{доп}$ :

для ЧМ радиосигнала

$$z_{доп} = 10 \lg ((1-2p_{оши доп})/ p_{оши доп}), \quad (11)$$

для ОФМ радиосигнала:

$$z_{доп} = 10 \lg ((1-2p_{оши доп})/ 2p_{оши доп}). \quad (12)$$

По формуле (8) определяется вероятность связи на каждой из частот, на которых предполагается использовать сигналы ЧМ и ОФМ для заданного значения  $p_{оши доп} = 10^{-3}$ . Затем строится гистограмма и подсчитывалось количество превышений порогового значения (при моделировании  $P_i (\bar{z}_i \geq z_{доп}) \geq 0.9$ ) вероятности связи.

Результаты моделирования, выполненные в среде *Matlab*, показаны на рисунках 1÷4.

На рис. 1, 2 представлены результаты моделирования, показывающие процесс поиска частот пригодных для связи радиосигналами ЧМ и ОФМ днем.

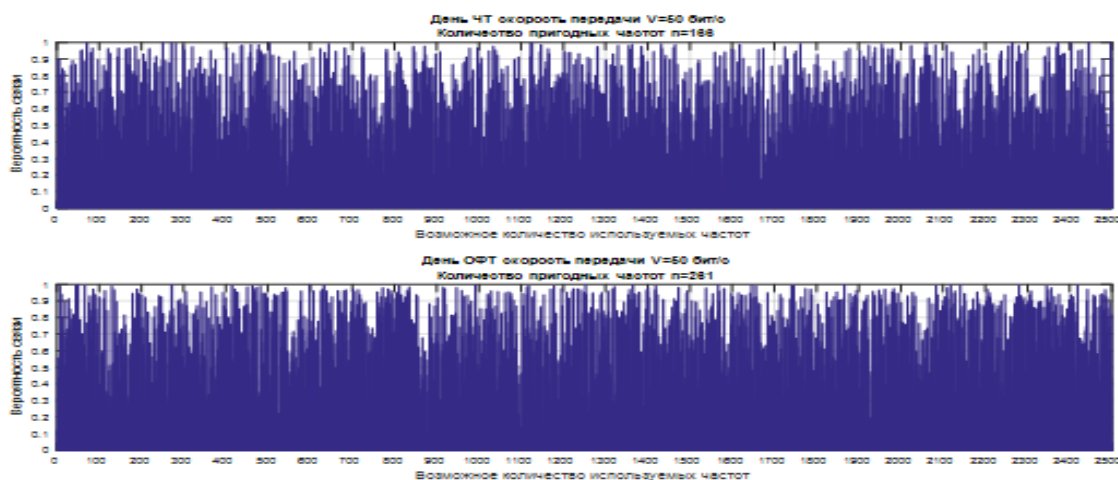


Рис. 1. Зависимость вероятности связи на возможном количестве используемых частот при использовании радиосигналов ЧМ и ОФМ днем со скоростью передачи  $V = 50$  бит/с

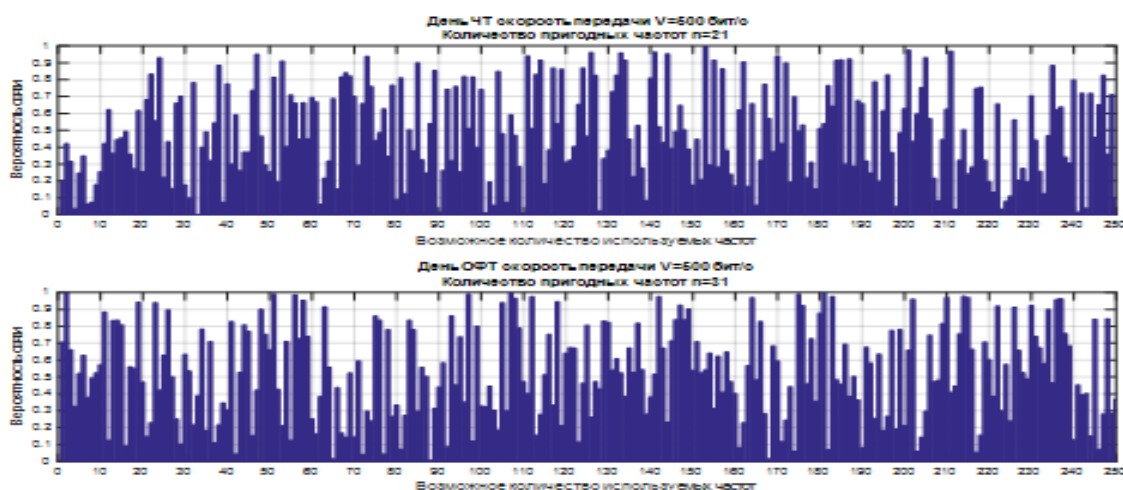


Рис. 2. Зависимость вероятности связи на возможном количестве используемых частот при использовании радиосигналов ЧМ и ОФМ днем со скоростью передачи  $V = 500$  бит/с

На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования, показывающие результаты процесса поиска частот пригодных для связи радиосигналами ЧМ и ОФМ – ночью.

Из результатов имитационного моделирования, представленных на рис. 1 видно, что для связи днем при использовании радиосигналов ЧМ и ОФМ и скорости передачи 50 бит/с, количество частот, на которых вероятность связи с требуемой достоверностью превышает пороговое значение 0,9, будет равно, соответственно, 166 и 261 частотам из 2500. Это свидетельствует о том, что при использовании радиосигнала ОФМ, для передачи информации со скоростью 50 бит/с, степень свободы в выборе частот значительно выше чем при использовании для передачи информации радиосигнала ЧМ.

Из результатов имитационного моделирования, представленных на рис. 2 видно, что для связи днем при использовании радиосигнала ОФМ и скорости передачи 500 бит/с, количество частот, на которых вероятность связи с требуемой достоверностью превышает пороговое значение 0,9, будет равно, соответственно, 21 и 31 частотам из 250. Уменьшение количества частот обусловлено увеличением спектра радиосигналов и изменением уровня помех в полосе приема.

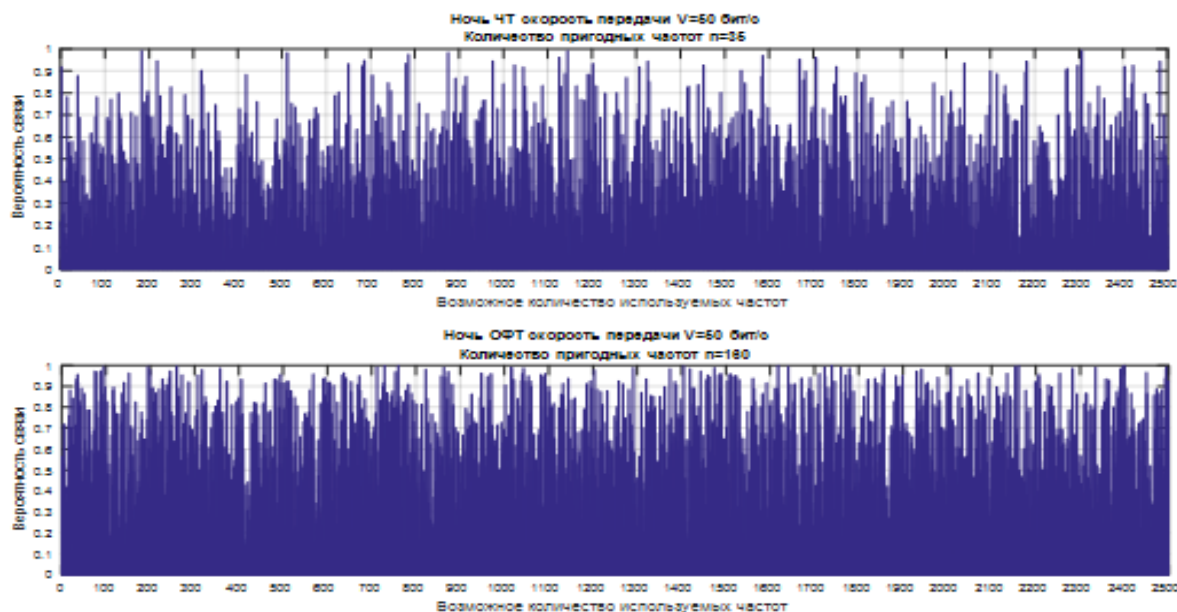


Рис. 3. Зависимость вероятности связи на возможном количестве используемых частот при использовании радиосигналов ЧМ и ОФМ ночью со скоростью передачи  $V = 50$  бит/с

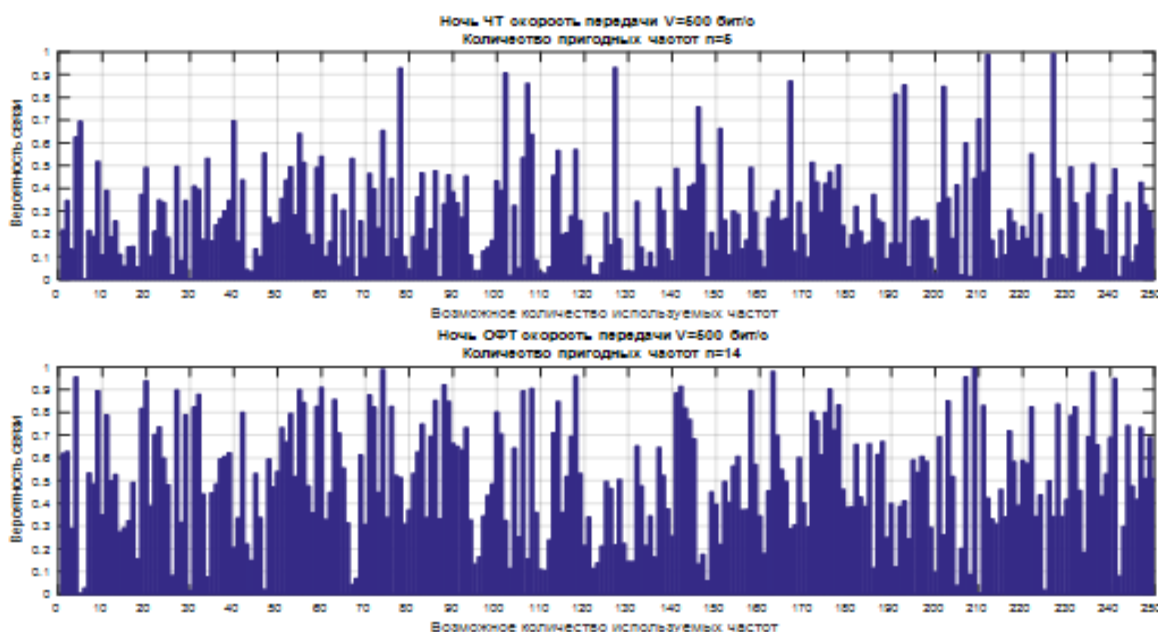


Рис. 4. Зависимость вероятности связи на возможном количестве используемых частот при использовании радиосигналов ЧМ и ОФМ ночью со скоростью передачи  $V = 500$  бит/с

Из результатов имитационного моделирования, приведенных на рис. 3, видно, что для связи ночью при использовании радиосигнала ОФМ и скорости передачи 50 бит/с, количество частот, на которых вероятность связи с требуемой достоверностью превышает пороговое значение 0,9, будет равно, соответственно, 35 и 160 частотам из 2500. Уменьшение количества частот ночью обусловлено ростом дисперсии уровней радиосигнала и помех в полосе приема.

Из результатов имитационного моделирования, приведенных на рис. 4 видно, что для связи ночью при использовании радиосигнала ОФМ и скорости передачи 500 бит/с, количество частот, на которых вероятность связи с требуемой достоверностью превышает пороговое значение 0,9, будет равно, соответственно, 5 и 14 частотам из 250. Уменьшение количества частот обусловлено ростом спектра радиосигналов и изменением уровня помех в полосе приема.

Из рисунков также видно, что вероятность связи с требуемой достоверностью на выделенных частотах является случайной величиной изменяющейся в пределах от 0 (белые просветы на гистограмме) до 1, что обусловлено случайным характером изменения уровней радиосигнала и помех в декаметровом диапазоне волн.

Результаты моделирования показывают, что, чем выше помехоустойчивость радиосигнала тем больше свободы в выборе частоты для установления связи с требуемым видом радиосигнала. Ночью увеличиваются дисперсия сигнала и помех, поэтому количество частот с вероятностью связи более 0,9 уменьшается.

Увеличения разности дисперсий сигнала и помех ночью приводит также к тому, что соотношение частот, пригодных для передачи информации радиосигналами ОФМ и ЧМ ночью увеличивается и составляет больше 3. В то время как днем это соотношение уменьшается и составляет меньше 2. Это свидетельствует о том, что вероятность поиска частоты, пригодной для связи с требуемой достоверностью радиосигналами ЧМ и ОФМ днем выше, чем ночью.

### Выводы

1) Представленный порядок выбора частот позволяет осуществлять поиск частот для передачи информации радиосигналами, реализованными в радиопередающих и радиоприемных устройствах декаметрового диапазона волн, при связи пространственной волной.

2) С увеличением скорости передачи информации количество частот, пригодных для связи с требуемым видом радиосигнала в декаметровом диапазоне пространственной волной, при одинаковой сигнально-помеховой обстановке в точке приема, уменьшается.

3) Ночью, когда полоса частот, пригодная для радиосвязи на заданной протяженности трассы, сужается, увеличивается уровень помех. Поэтому, количество частот, пригодных для радиосвязи с требуемой достоверностью, уменьшается.

4) Реализация представленного порядка выбора в аппаратуре управления адаптивной радиолинией и аппаратной частотно-диспетчерской службы обеспечит целенаправленный поиск частот, пригодных для использования на трассах заданной протяженности, для передачи информации радиосигналом, обеспечивающим требуемое качество приема сообщения.

### Литература

1. Николашин Ю.Л., Кулешов И.А., Будко П.А., Жуков Г.А. SDR радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне волн // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. № 1. С. 20-30.
2. Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий, разработанные МСЭ-R, Рекомендация МСЭ-R P.533-13, 2015. 28 с.
3. Методы прогнозирования основной МПЧ, рабочей МПЧ и траектории луча, разработанные МСЭ-R, Рекомендация МСЭ-R P.1240-2, 2015. 7 с.
4. Эталонные характеристики ионосферы, разработанные МСЭ-R, Рекомендация МСЭ-R P.1239-3, 2012. 30 с.
5. Прохоров В.К., Шаров А.Н. Расчет показателей эффективности радиосвязи. Л.: ВАС, 1982. 132 с.
6. Игнатов В.В., Бабков В.Ю. Обоснование основных технических параметров техники радиосвязи. Л.: ВАС, 1990. 112 с.

### References

1. Nikolashin Yu. L., Kuleshov I. A., Budko P. A., Zhukov G. A. SDR radio devices and cognitive radio communication in the decameter wave range. Science-Intensive technologies in space research of the Earth, no. 1, 2015. P. 20-30 (in Russian).
2. A method for predicting the performance of RF lines developed by ITU-R, recommendation ITU-R P. 533-13, 2015. 28 p. (in Russian).
3. Methods for predicting the main MPH, working MPH, and beam path developed by ITU-R, recommendation ITU-R P. 1240-2, 2015 (in Russian).

4. Reference characteristics of the ionosphere developed by ITU-R, ITU-R recommendation P. 1239-3, 2012. 30 p. (in Russian).
5. Prokhorov V.K., Sharov A.N. Calculation of radio communication efficiency indicators. L.: VAS, 1982. 132 p. (in Russian).
6. Ignatov V.V., Babkov V.Yu. Justification of the main technical parameters of radio communication technology. L.: VAS, 1990. 112 p. (in Russian).

Статья поступила 20 марта 2020 г.

#### Информация об авторах

Солозобов Сергей Анатольевич – Начальник НИО ПАО «Интелтех», кандидат технических наук, доцент. Тел. (812)295-40-54. E-mail: solozobob@inteltech.ru.

Шевченко Василий Васильевич – Начальник лаборатории ПАО «Интелтех», кандидат военных наук, доцент. Тел. (812)448-95-94. E-mail: ShevchekoVV@inteltech.ru.

Щукин Анатолий Николаевич – Главный специалист ПАО «Интелтех», кандидат технических наук. Тел. (812)448-95-94. E-mail: ShchukinAN@inteltech.ru.

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

#### Statistical selection of operating frequencies in decameter mode wave range for various types of radio signals

S.A. Solozobov, V.V. Shevchenko, A.N. Shchukin

**Annotation.** *The purpose of the article is to show how to find frequencies for a specific type of radio signal in a complex interference environment, at which the conditions of radio wave propagation and the interference environment will provide the required communication quality. The order of frequency selection is given, which makes it possible to determine the suitability of the frequency for transmitting information by a given type of radio signal in a decameter radio channel when communicating with a spatial wave. Simulation of normally distributed random processes characterizing the law of signal level change is carried out, taking into account statistical data on the mean square deviation from the average (median) value of the radio signal calculated by the method and interference in the radio communication channel of the decameter wave range. The probability of communication with the required confidence at frequencies for signals with frequency and relative phase manipulation for different information transfer rates is determined. As a criterion of suitability for radio communication of frequencies, for a given type of radio signal, the probability of communication with the required reliability of message transmission, exceeding the value of 0.9, was selected. The results of simulation modeling of the process of searching for frequencies suitable for communication with the required reliability for transmitting information by various types of radio signals are presented. The results can be implemented to create adaptive radio links, the core of which will be SDR-radios, fast tunable transmitters decameter range of waves and instrument management with information about the signal and interference, on assumed to use the frequencies. They can also be used in the hardware frequency-dispatching service of the communication node in order to select frequencies for radio lines used in various communication directions.*

**Keywords:** *method; selection; radio signals; decameter range; radio wave propagation conditions; interference situation; probability of communication with the required reliability; SDR radio receiver.*

#### Information about Authors

Sergey Anatolyevich Solozobov – The postgraduate shof of the Department of PJSC "IntelTech", Doctoral. Tel.: +78122954054. E-mail: solozobob@inteltech.ru.

Vasily Vasilievich Shevchenko – The postgraduate shof of the Department of PJSC "IntelTech", Doctoral. Tel.: +78124489594. E-mail: ShevchekoVV@inteltech.ru.

Anatoliy Anatolievich Shchukin – The postgraduate engienier of the Department of PJSC "IntelTech", Doctoral. Tel.: +78124489594. E-mail: ShchukinAN @inteltech.ru.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

**Для цитирования:** Солозобов С.А., Шевченко В.В., Щукин А.Н. Статистический выбор рабочих частот в декаметровом диапазоне волн для различных видов радиосигналов // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 55-62.

**For citation:** Solozobov S.A., Shevchenko V.V., Shchukin A.N. Statistical selection of operating frequencies in decameter mode wave range for various types of radio signals. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 55-62 (in Russian).

УДК 004.722

### Реализации сетевой синхронизации в автоматизированной сети радиосвязи декаметрового диапазона

Хвостунов Ю.С.

**Аннотация.** В статье рассматривается одна из задач, решаемых при разработке систем декаметровой связи, работающих в режиме перестройки рабочей частоты по псевдослучайному закону, для которых ключевым аспектом является обеспечение синхронного переключения рабочих частот станций автоматизированной радиосети. Существующие методы поддержания синхронизма не обеспечивают необходимую точность, не функционируют без внешних систем единого времени. **Целью работы** является разработка способа реализации сетевой синхронизации, обеспечивающей требуемую точность и автономную работу сети декаметровой связи. **Используемые методы:** теоретический и практический заделы в области цифровой передачи данных по декаметровому каналу связи. **Новизна:** состоит в том, что предлагается метод автоматического установления и поддержания сетевой синхронизации. **Результат:** заключается в том, что предложен способ установления и поддержания сетевой синхронизации, обеспечивающий требуемую точность и автономную работу сети декаметровой связи на базе используемых технических решений аппаратуры передачи данных нового поколения. **Практическая значимость:** заключается в том, что предлагаемый способ позволяет обеспечить автоматизацию установления сетевой синхронизации, её поддержание без использования внешних источников времени, сократить до минимума потери, связанные с неточностью переключения рабочих частот станций сети.

**Ключевые слова:** декаметровая радиосвязь; псевдослучайная перестройка рабочей частоты; сигнальная конструкция; сетевая синхронизация; аппаратура передачи данных; автоматизированный стационарный радиоцентр.

#### Введение

Одним из режимов передачи цифровой информации декаметровой радиосети является режим перестройки рабочих частот по псевдослучайному закону (ППРЧ) во всем используемом радиодиапазоне. Требуемая надежность и предельная пропускная способность при установленной энергетике радиотрассы обеспечивается разработанной процедурой постоянной оценки качества канала во время сеанса связи и технологией динамического выбора рабочих частот *DFS (Dynamic Frequency Selection)* [1].

Одним из условий достижения предельных характеристик при данном порядке организации радиосвязи является обеспечение сетевой синхронизации, т. е. синхронного переключения рабочих частот (РЧ) всеми участниками организуемой сети связи как при введении сеанса связи, так и при установлении соединения из режима радиомолчания. В существующих системах декаметровой связи установка и поддержание синхронного переключения рабочих частот обеспечивается взаимодействием с глобальной навигационной спутниковой системой (ГЛОНАС) или системой единого времени (ЕВ). Недостатком данного решения является то, что при определенных условиях эксплуатации отсутствует возможность использования ГЛОНАС или системы ЕВ и точность получаемых корректирующих сигналов недостаточна для обеспечения штатной работы системы декаметровой связи с ППРЧ.

В статье рассматривается способ реализации подсистемы сетевой синхронизации (ПСС) системы декаметровой связи с ППРЧ на отдельном примере реализации аппаратуры передачи данных (АПД) автоматизированного стационарного радиоцентра (АСРЦ).

#### Сигнальная конструкция модема АПД

Функционирование ПСС основывается на возможностях АПД и является её составной частью. ПСС обеспечивает начальную установку «внутренних» часов АСРЦ при введении



его в эксплуатацию, не требует использования системы ГЛОНАС или других систем единого времени [2, 3]. ПСС позволяет обеспечить требуемую точность «внутренних» часов АСРЦ, автоматическое её поддержание, высокую помехоустойчивость и независимость от других систем единого времени.

В модеме АПД применяется следующая сигнальная конструкция [4, 5]:

- система ортогональных сигналов с интервалом ортогональности  $T_0 = 10$  мс;
- защитный интервал  $T_{\text{защ}} = 2,5$  мс.;
- длительность модемной посылки  $T_{\text{п}} = 12,5$  мс;
- расстояние между частотными подканалами  $\Delta F = 100$  Гц;
- используемые полосы канала связи 3.1, 4.5, 9.0, 40 КГц;
- количество частотных подканалов (определяется используемой полосой пропускания канала связи) – 29, 44, 89, 398;
- используется относительная фазовая модуляция первой, второй и третьей кратности, а также амплитудно-фазовая модуляция;
- время работы на одной РЧ определяется техническими характеристиками используемых радиосредств: постоянно на фиксированной рабочей частоте (1-й режим); 200 мс, ППРЧ (2-й режим); 50 мс, ППРЧ (3-й режим).

Необходимость трех режимов объясняется возможностью обеспечения работы с корреспондентами как работающими на фиксированной РЧ (режим 1), так и с корреспондентами, позволяющими обеспечить автоматическое установление соединения как в режиме ППРЧ, так и при работе на фиксированной РЧ с выбором наилучшей из предоставленных рабочих частот (режимы 2 и 3).

Режим 2 используется с радиосредствами, обеспечивающими время переключения рабочей частоты в пределах  $50 \div 70$  мс, режим 3 используется с радиосредствами с временем перехода на новую рабочую частоту не более  $3 \div 5$  мс.

Процедура сетевой синхронизации обеспечивается АПД, работающей во втором режиме ППРЧ в полосе канала 3,1 КГц при использовании двукратной относительной фазовой модуляции. Установленная сетевая синхронизация будет достаточной и при использовании в АСРЦ отдельных (или всех) каналов, работающих в режиме 3.

### Использование двухканального радиоприемника

Важной особенностью является то, что для достижения максимальной пропускной способности для режимов 2 и 3 каждый канал приема комплектуется двухканальным радиоприемником [2].

Необходимость двух каналов приема обусловлена возможностью работы с перекрытием, при котором в каждом канале радиоприемника переключение радиочастот происходит в два раза реже, по сравнению с передатчиком (см. пример использования 6-ти рабочих частот, рис. 1).

Из рис. 1 видно, что один из радиоприемников обслуживает нечетные интервалы времени, а другой – четные.

Это позволяет:

- исключить потери информации ввиду разности хода лучей на различных радиочастотах;
- уменьшить время и повысить вероятность установления сетевой синхронизации при вводе АСРЦ в эксплуатацию;
- уменьшить время установления соединения (в силу возможной рассинхронизации корреспондентов из-за нестабильности опорных генераторов, а также с отличным для разных групп корреспондентов временем распространения сигнала в канале связи).

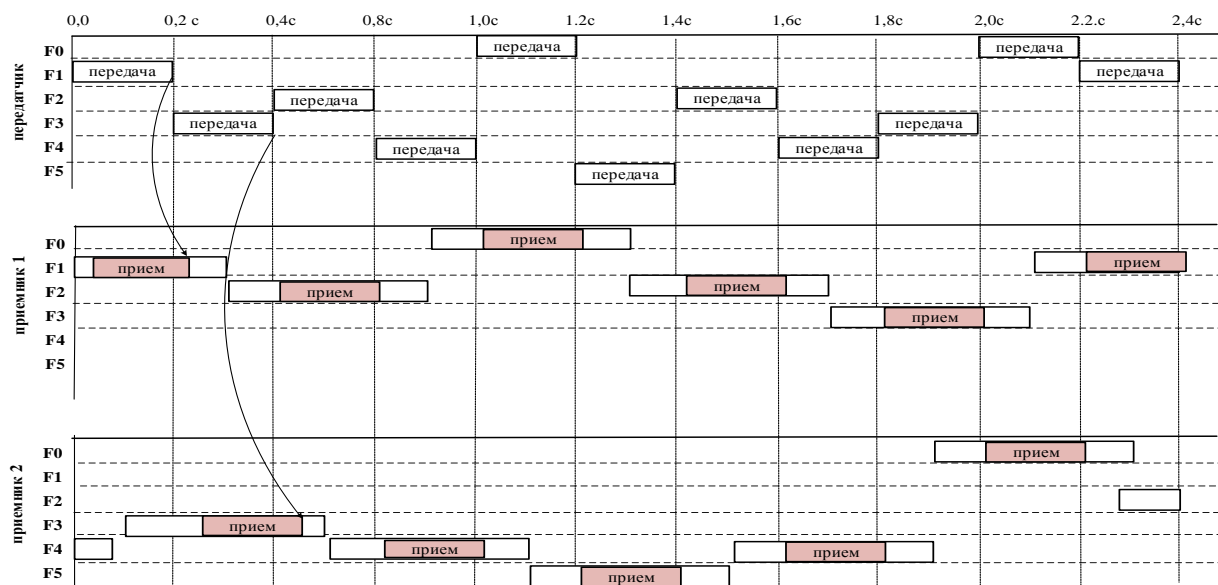


Рис. 1. Временные диаграммы переключения радиопередатчика и двух приемников

**Кодограммы обмена АПД при установлении сетевой синхронизации**

ПСС базируется на процедуре обмена станциями участников сети сообщениями, содержащими информацию о состоянии их внутренних часов (счетчика времени), что позволяет учесть время распространения сигнала в канале связи. Размер сообщения соответствует одному информационному кадру, а структура кадра выбрана таким образом, чтобы отдельный кадр полностью передавался за время передачи его на одной рабочей частоте (один слот). Из 200 мс работа на одной рабочей частоте режима 2, половина (100 мс) отводится на перестройку радиосредств, остальные 100 мс являются информационными. Демодуляция принимаемого из канала связи сигнала выполняется без затрат времени на частотную, тактовую и кодовую синхронизацию [6, 7, 8]. Используемая сигнальная конструкция позволяет разместить 406 информационных бит. В табл. 1 показано кодирование информационных полей кодограмм запроса и выдачи сетевой синхронизации. Последовательность кодирования полей начинается с первого, выданного на передачу.

Таблица 1 – Кодирование информационных полей кодограмм запроса и выдачи сетевой синхронизации

№ бита	Длина,бит	Название поля	Примечание
0÷2	3	Тип кодограммы: 2 – запрос сетевой синхронизации, 3 – выдача сетевой синхронизации	Всего служебных бит 173
3÷66	64	Синхропакет имитовставки	
67÷76	10	Номер кодограммы	
77÷108	32	Имитовставка	
109÷124	16	Сетевой адрес получателя (или группы получателей) с указанием номера сети	
125 ÷172	48	Состояние собственного счетчика времени	
173÷405	233	Код	

Для обеспечения помехоустойчивого кодирования в АПД программно-аппаратного комплекса (ПАК) установления и ведения связи (УВС) используется код Рида-Соломона [3]. При этом выделяются следующие критерии: согласованность кратности модуляции с внутренними символами корректирующего кода; согласованность длины кода с количеством бит на рабочей частоте. В кодограммах запроса и выдачи сетевой синхронизации на код выделяется 233 бит, скорость кода 0,426.

**Условия обеспечения сетевой синхронизации**

Для обеспечения обмена сообщениями между станциями необходимо обеспечить совпадение рабочих частот передающей и приемной сторонами. Для вновь вводимой станции данное условие выполняется частично. На рис. 2 показано (выделено красным), что при передаче кодограммы запроса сетевой синхронизации при переключении РЧ будут лишь случайные совпадения по времени РЧ передающей и принимающей станций, но это совпадение, при условии прохождения сигнала с удовлетворительным качеством, позволит правильно принять кодограмму запроса и декодировать её поля.

Оценим вероятность случайного совпадения РЧ взаимодействующих станций. Вероятность совпадения определяется как  $P_{совп} = 1/N_{рч}$ . Так, для количества РЧ в пакете переключения  $N_{рч} = 32$  эта вероятность равна  $P_{совп} = 3 \cdot 10^{-2}$ . Тогда, с учетом коэффициента готовности канала связи:

– вероятность приема кодограммы сетевой синхронизации на одном слоте, при совпадении РЧ приемника и передатчика будет равна  $P_{совп} = P_k/N_{рч}$ , где  $P_k$  – вероятность превышения требуемого отношения сигнал/шум на частотах рабочего пакета;

–  $(1 - P_k/N_{рч})$  – вероятность того, что в данном слоте или РЧ у приемника и передатчика не совпадают, или будет неудовлетворительное качество сигнала на выбранном слоте (вероятность неприема кодограммы сетевой синхронизации);

–  $P_{дов} = 1 - (1 - P_k/N_{рч})^s$  – вероятность того, что в данном слоте РЧ у приемника и передатчика совпадут за  $s$  слотов, и качество сигнала будет удовлетворительное.

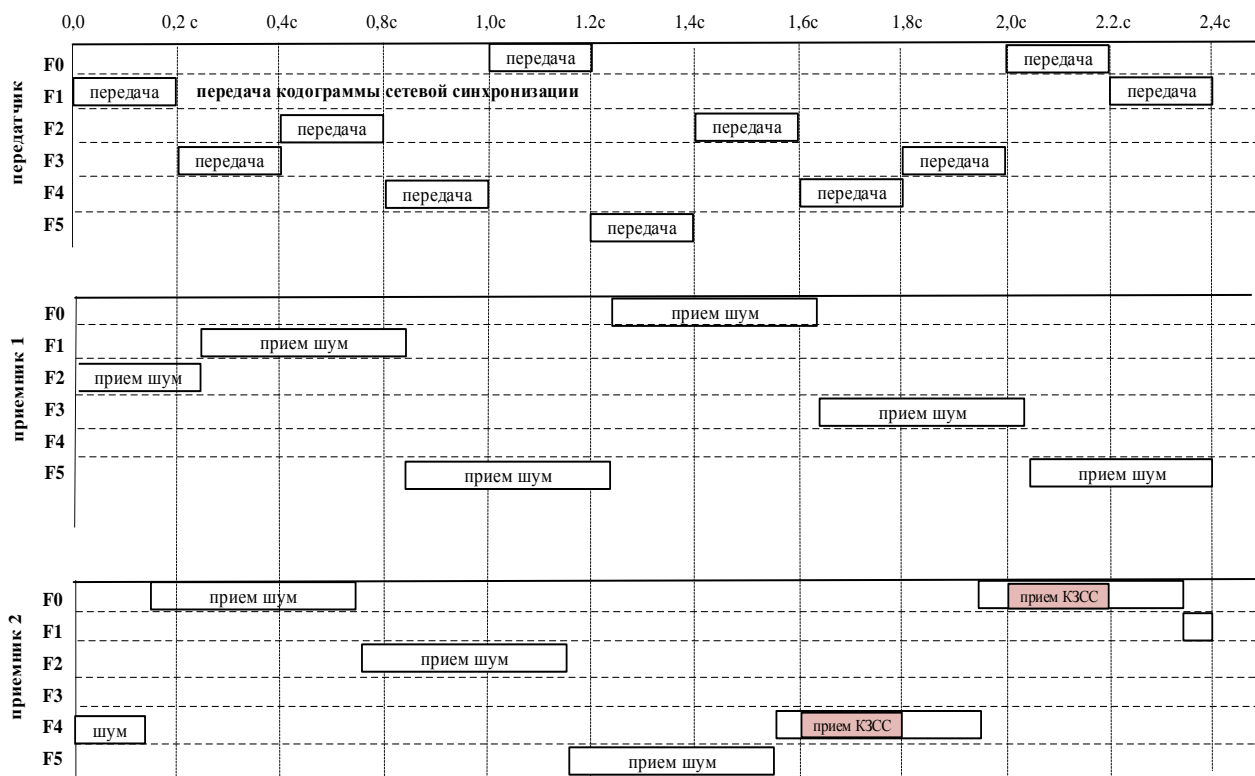


Рис. 2. Организация запроса кодограммы сетевой синхронизации на примере 6-ти РЧ

В табл. 2 представлены вероятности приема кодограммы запроса сетевой синхронизации для различных возможных значений  $P_{дов}$ ,  $N_{рч}$ ,  $P_k$ ,  $s$  и времени её доведения  $T_{дов}$ .

Из табл. 2 следует, что для обеспечения требуемой вероятности обмена кодограммами установления сетевой синхронизации, с учетом прогнозируемого качества канала связи на частотах рабочего пакета, выбирается продолжительность выдачи кодограмм установления сетевой синхронизации.

Таблица 2 – Вероятностно-временные характеристики приема кодограммы запроса сетевой синхронизации

№ п/п	Режим	$P_{\text{дов}}$	$N_{\text{рч}}$	$P_{\text{к}}$	$s$	$T_{\text{дов}}, \text{с}$	
1.	2	0,85	16	0,3	100	20	
2.		0,98		0,3	200	40	
3.		0,96		0,5	100	20	
4.		0,61	32	0,3	100	20	
5.		0,85		0,3	200	40	
6.		0,79		0,5	100	20	
7.		0,96		0,5	200	40	
8.	3 для полосы 4,5 КГц	0,85	16	0,3	100	5	
9.		0,98		0,3	200	10	
10.		0,998	32	0,5	200	10	
11.		0,85		0,3	200	10	
12.		0,98		0,3	400	20	
13.		0,96		0,5	200	10	
14.							
15.		0,998		0,5	400	20	

**Примечание:** Данные по режиму 3 приведены справочно. Из них видно, что переход всех корреспондентов сети на режим 3 существенно улучшит динамические характеристики установления сетевой синхронизации.

### Алгоритм сетевой синхронизации

При положительном результате проверки имитовставки и адреса запрашиваемой АСРЦ, одна из действующих станций сети (назначенная или младшая по номеру, или другим способом определяемая) выдает последовательно на выделенных рабочих частотах адресные кодограммы выдачи сетевой синхронизации. Как и при передаче кодограммы запроса сетевой синхронизации, будет случайное совпадения по времени РЧ передающей и принимающей станций, что позволит принять кодограмму выдачи сетевой синхронизации, правильно декодировать и, при положительных проверках имитовставки и адреса станции сети, установить текущий код фазы «внутренних» часов сети. Вероятностно-временные характеристики получения кодограммы выдачи сетевой синхронизации аналогичны указанным в табл. 2.

Рассмотрим более детально процедуру установления сетевой синхронизации. Допустим, что необходимо обеспечить сетевой синхронизм АСРЦ 1. Пусть АСРЦ 2, находится в сети (т. е. в сетевом синхронизме со всеми АСРЦ сети). «Внутренние» часы АСРЦ 1 и АСРЦ 2 отличаются друг от друга на какую-то величину  $\Delta T_0$ . Для синхронизации времен необходимо эту величину определить и откорректировать время АСРЦ 1. Время на АСРЦ 2 обозначим за  $T$ , а время на АСРЦ 1 соответственно  $T + \Delta T_0$ .

Алгоритм синхронизации заключается в следующем (рис. 3). АПД АСРЦ 1 по команде оператора посылает с адресом АСРЦ 2 кадр запроса сетевой синхронизации (КЗСС), в нем содержится информация о его собственном времени (т. е. о состоянии счетчика внутренних часов). Также АПД АСРЦ 1 запоминает, в какой момент времени по своим часам был выслан запрос АСРЦ 2 на сетевую синхронизацию. Информация до АСРЦ 2 дойдет с задержкой  $\Delta T_1$ . АПД АСРЦ 2, приняв информацию от АСРЦ 1, запоминает, в какой момент времени это произошло, и от времени АСРЦ 1 отнимает свое текущее время:

$$(T + \Delta T_0) - (T + \Delta T_1) = \Delta T_0 - \Delta T_1; \tag{1}$$

Результат вычитания удваивается, затем ПАПД АСРЦ 2 вычитает от результата предыдущих действий время от получения запроса от АСРЦ 1 до момента отправки ответа  $\Delta T_3$ , и посылает с адресом АСРЦ 1 ответную кодограмму установления сетевой синхронизации (КУСС) со значением собственного счетчика времени равным:

$$2(\Delta T_0 - \Delta T_1) - \Delta T_3 = 2\Delta T_0 - (2\Delta T_1 + \Delta T_3) = 2\Delta T_0 - \Delta T_2; \tag{2}$$

АПД АСРЦ 1 запоминает время, когда в ответ он получил КУСС от АСРЦ 2, вычитывает время от передачи посылки кадра КЗСС до получения ответной информации  $\Delta T_2$ . Сложим (2) и  $\Delta T_2$ :

$$X = 2\Delta T_0 - \Delta T_2 + \Delta T_2 = 2\Delta T_0; \quad (3)$$

Таким образом, можем вычислить временную расстройку между АСРЦ С1 и АСРЦ С2 как

$$\Delta T_0 = X/2. \quad (4)$$

Теперь АПД АСРЦ 1 вносит полученную поправку  $\Delta T_0$  в свое время, тем самым синхронизует его со временем АПД АСРЦ 2. В результате, время на АСРЦ 1 и АСРЦ 2 одинаково и все переключения несущих частот (в том числе, в режиме радиомолчания) происходят одновременно. Учет времени распространения сигнала между станциями позволяет достигнуть точности установки сетевого времени для приведенной сигнально-кодовой конструкции до  $\pm 0,15$  мс. С учетом нестабильности опорного генератора АПД, не превышающей  $10^{-7}$  синхронное переключение рабочих частот, в режиме радиомолчания поддерживается в течение нескольких месяцев. Выход в эфир любой станции сети в течение этого времени позволяет остальным станциям провести коррекцию «внутренних» часов и продолжить период радиомолчания в штатном режиме.

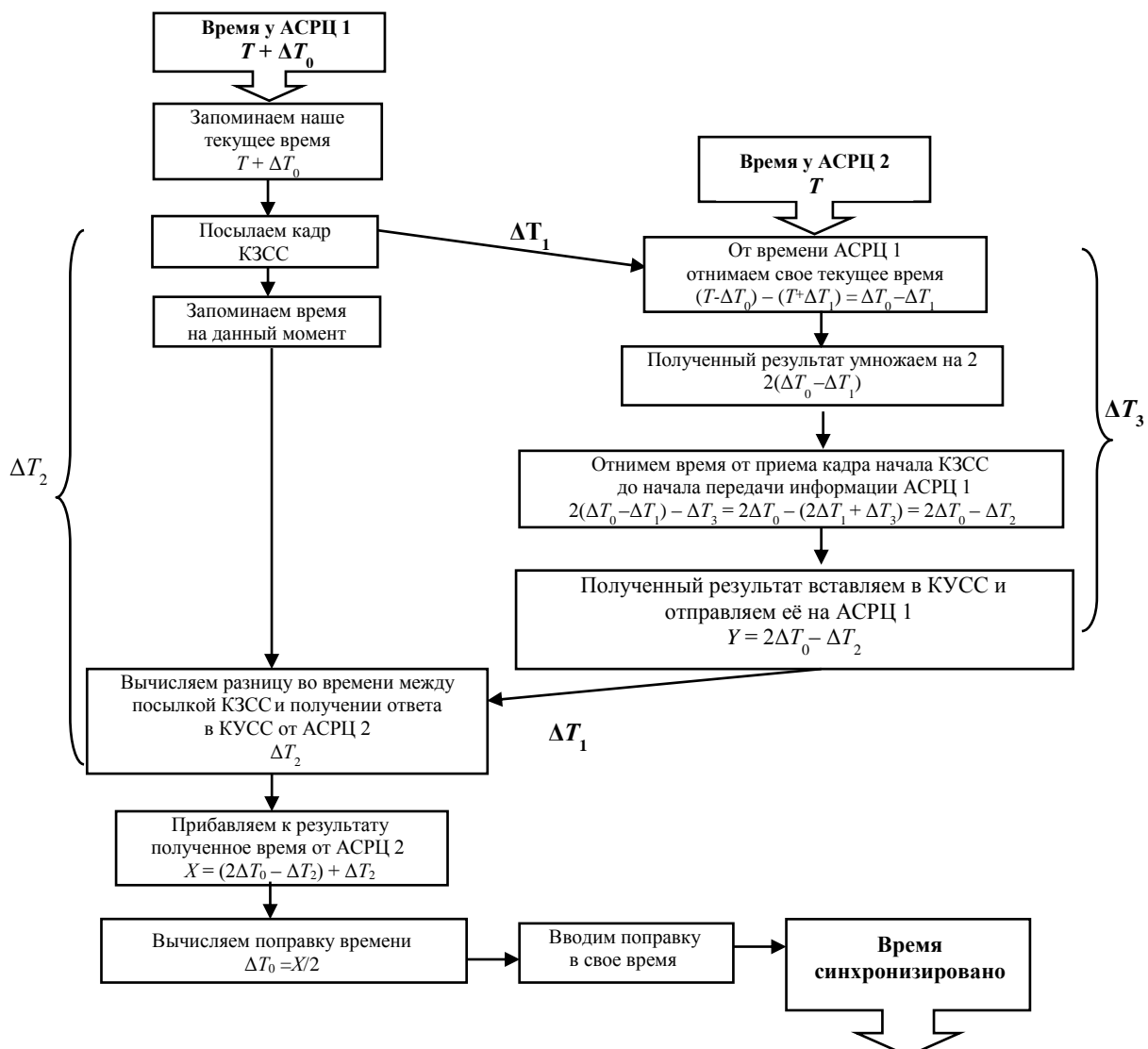


Рис. 3. Алгоритм синхронизации времени между АСРЦ С1 и С2

Необходимо отметить, что в системе может использоваться пассивная синхронизация станций сети (без запроса сетевой синхронизации станций сети). В пассивном режиме ведущий (синхронизирующий) АСРЦ сети с определенной периодичностью выдает в эфир кадры выдачи сетевой синхронизации. Если АСРЦ потерял по какой-либо причине сетевую синхронизацию, то несмотря на это, на отдельных рабочих частотах данный АСРЦ с вероятностью  $0,85 \div 0,96$  (табл. 2) с первого раза ( $0,97 \div 0,998$  со второго раза) корректно примет кадр выдачи сетевой синхронизации, что позволит восстановить штатную работу внутренних часов АСРЦ. Данный режим также позволяет контролировать исправность приемных трактов всех станций сети.

### Заключение

Рассмотренная система сетевой синхронизации прошла в полном объеме лабораторные и трассовые испытания на декаметровых радиоканалах различного качества в условиях естественных и преднамеренных помех и показала свою эффективность. Было проведено несколько сотен сеансов установления сетевой синхронизации, за время испытаний не зафиксировано ни одного случая не установления сетевой синхронизации, синхронизация поддерживалась в течение длительного времени, что позволяло сразу же из режима радиомолчания в автоматическом режиме устанавливать соединение и принимать сообщения без каких-либо задержек [4].

### Литература

1. Хвостунов Ю.С. Оперативность адаптации комбинированной радиосети к помеховой обстановке / Труды VI Российской научно-технической конференции. – Калуга, 2007.
2. Путилин А.Н., Хвостунов Ю.С. Концепция телекоммуникационной технологии сети дальней радиосвязи / Материалы XI Санкт-Петербургской Международной конференции «Региональная информатика «РИ-2010». – С-Пб, 2010.
3. Хвостунов Ю.С. Использование частотного ресурса при применении адаптивной системы декаметровой радиосвязи с полнодиапазонной ППРЧ АПС «ЛАДОГА» / Материалы VII Санкт-Петербургской Межрегиональной конференции «Региональная информатика «РИ-2012». – С-Пб, 2012.
4. Гук И.И., Путилин А.Н., Сиротинин И.В., Хвостунов Ю.С. Адаптивная система декаметровой радиосвязи с полнодиапазонной псевдослучайной перестройкой рабочей частотой. Предварительные результаты трассовых испытаний ее фрагмента / Материалы VI Санкт-Петербургской Межрегиональной конференции «Региональная информатика «РИ-2011». – С-Пб, 2011.
5. Хвостунов Ю.С., Турилов В.А. Система адаптивной радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты совмещенного метрового – декаметрового диапазонов / Труды IX Российской научно-технической конференции. – Калуга, 2010.
6. Патент № 2460219 – Способ совместной тактовой и кодовой синхронизации. Хвостунов Ю.С., Сиротинин И.В., Хромов В.В., 2012.
7. Патент №2469488 – Способ демодуляции радиосигналов с фазоразностной модуляцией. Сиротинин И.В., Хвостунов Ю.С., Хромов В.В., 2012.
8. Патент №2562435 – Способ кодирования-декодирования в системах передачи данных. Сараджишвили С.Э., Хвостунов Ю.С., Хромов В.В., 2015.

### References

1. Khvostunov Y.S. *Operativnost adaptatsii kombinirovannoy radioseti k pomekhovoy obstanovke* [The speed of complexes adaptation processes of the combined radio network to noise conditions]. Proceedings of the VI scientific and technological conference. Kaluga, 2007 (in Russian).
2. Putilin A.N., Khvostunov Y.S. *Kontseptsiya telekommunikatsionnoy tekhnologii seti dalney radiosvyazi* [The concept of telecommunication technology of long-distance communication network]. Materials of the XI St. Petersburg international conference. Regional informatics. RI-2010. St. Petersburg, 2010 (in Russian).
3. Khvostunov Y.S. *Ispolzovaniye chastotnogo resursa pri primenenii adaptivnoy sistemy dekametrovoy radiosvyazi s polnodiapazonnoy PPRCh APS «LADOGA»* [The use of the frequency resource when using an

adaptive HF communication system full-range FHSS APS “LADOGA”]. Materials of the XII St. Petersburg international conference. Regional informatics. RI-2012. St. Petersburg, 2010 (in Russian).

4. Guk I.I., Putilin A.N., Sirotinin I.V., Khvostunov Y.S. *Adaptivnaya sistema dekametrovoy radiosvyazi s polnodiapazonnoy psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty. Predvaritelnyye rezultaty trassovykh ispytaniy eye fragmenta* [The adaptive HF communication system full-range FHSS. Preliminary results of track tests of its fragment]. Materials of the VI St. Petersburg international conference. Regional informatics. RI-2011. St. Petersburg, 2011 (in Russian).

5. Khvostunov Y.S., Turilov V.A. *Sistema adaptivnoy radiosvyazi s psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty sovmeshchennogo metrovogo - dekametrovogo diapazonov* [Combined HF-VHF band adaptive FHSS radio communication system]. Proceedings of the VI scientific and technological conference. Kaluga, 2010 (in Russian).

6. Patent № 2460219 Method for joint clock and code synchronization. Khvostunov Y.S., Sirotinin I.V., Khromov V.V., 2012.

7. Patent № 24469488 Method for demodulating radio signals. Sirotinin I.V., Khvostunov Y.S., Khromov V.V., 2012.

8. Patent № 2562435 Method of coding-decoding in data transmission systems. Saradjishvili., Khvostunov Y.S., Khromov V.V., 2015.

Статья поступила 06 мая 2020 г.

#### Информация об авторе

Хвостунов Юрий Сергеевич – Заместитель директора научно-исследовательского центра ПАО «Интелтех», кандидат технических наук. Область научных интересов: адаптивные помехоустойчивые системы декаметрового радиосвязи. Тел.: +7(812)448-96-30. E-mail: Khvostunov@mail.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

#### Implementation of network synchronization in an automated radio network of HF range

Y.S. Khvostunov

**Annotation.** *The article deals with one of the problems, solved in the development of HF communication systems, working in the mode FHSS, is to provide synchronous switching of operating frequencies of stations of the automated radio network. Existing methods of maintaining synchronism do not provide the necessary accuracy and do not function without external time systems (GLONAS, EV etc.). The purpose of this work is to develop a method for implementing network synchronization, providing the required accuracy and autonomous operation of the HF communication network. Methods used: Theoretical and practical background in the field of digital data transmission over a HF communication channel. Novelty: the proposed method for automatically establishing and maintaining network synchronization. The result: a method for establishing and maintaining network synchronization is proposed that provides the required accuracy and Autonomous operation of the decameter communication network based on the used technical solutions of the new generation data transmission equipment. Practical significance: the proposed method makes it possible to automate the establishment of network synchronization, maintain it without using external time sources, and minimize the losses associated with inaccuracy of switching the operating frequencies of network stations.*

**Keywords:** HF radio communication; pseudo-random adjustment of the operating frequency; signal design; network synchronization; data transmission equipment; automated stationary radio center.

#### Information about Authors

Khvostunov Yuri Sergeevich – Deputy Director of Research Center of PJSC «Intelteh». Ph.D., Area of scientific interest: adaptive noise-immune systems of decameter radio communication. Tel.: +7(812)448-96-30. E-mail: Khvostunov@mail.ru. Address: 197342, Russia, St. Petersburg, ul. Kantemirovskaya, 8.

**Для цитирования:** Хвостунов Ю.С. Реализации сетевой синхронизации в автоматизированной сети радиосвязи декаметрового диапазона // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 63-70.

**For citation:** Khvostunov Y.S. Implementation of network synchronization in an automated radio network of HF range. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 63-70 (in Russian).

УДК 621.396.4, 519.876.5

## Модель фрагмента сети цифровой радиосвязи

Шаптала В.С., Солнцев Д.В.

**Аннотация.** В статье ставится задача продемонстрировать результаты эволюционного развития модели цифровой сети радиосвязи в распределенной вычислительной среде. Целью работы является моделирование опытного района сети цифровой радиосвязи в коротковолновом диапазоне. При моделировании используются методы кроссплатформенного программирования и цифровой обработки сигналов. Новизна решения состоит в создании набора приложений, которые могут использоваться для тестирования и демонстрации возможностей целевого комплекта программ. К результатам работы следует отнести моделирование опытного района, оценку выигрыша по производительности при переходе к многопоточному приложению и графическое представление доступности абонентов сети радиосвязи. Практическая значимость работы заключается в возможности демонстрации работы опытного района без использования специального оборудования – требуется только вычислительная среда (Intel или ARM, Windows, Linux или Android). В демонстрации используется специальное программное обеспечение. Графическое приложение в системе технических расчетов Matlab позволяет представить доступность абонентов сети радиосвязи.

**Ключевые слова:** распределенные вычисления; цифровая обработка сигналов; архитектура программного обеспечения.

### Введение

В статье рассматривается построение модели опытного района цифровой сети радиосвязи, с использованием рабочих станций или серверов начального уровня на платформе Intel (подробнее см. в [1, 2]). В исследовании представлено решение следующих задач: тестирование работы опытного района радиосвязи, оценка использования вычислительных ресурсов, сравнение работы однопоточной и многопоточной реализации целевого программного обеспечения и оценка алгоритмов взаимодействия с терминальным оборудованием. Приложения и компоненты используют кроссплатформенный фреймворк Qt 5.13.1, 64-разрядный компилятор (MinGW 7.3 для Windows и GCC5 для Linux) и собираются в интегрированной среде разработки QtCreator 4.11.2. Все результаты получены для сборки приложений и компонент в режиме «Release». Также использовались некоторые дополнительные библиотеки и модули Qt: libfftw (реализация быстрого преобразования Фурье – БПФ), qcustomplot, qdatavisualization (2-D, 3-D графика).

### Структура программного обеспечения

Программное обеспечение для проведения моделирования строится из различных компонент (см. табл. 1), а их комбинации образуют приложения (applications). Компоненты, в свою очередь, состоят из трех слоёв: примитивы интерфейса пользователя (widgets), системные библиотеки (systems) и цифровая обработка сигналов (signals). Компоненты уровня цифровой обработки сигналов написаны на языке C, а остальные уровни на языке C++.

В табл. 1 представлены только те компоненты и приложения, которые необходимы для моделирования опытного района, в действительности их больше. Количество абонентов опытного района не должно превышать логическую емкость сети. В рамках этой статьи под абонентом понимается приложение fhss-dte (DTE, data terminal equipment), а в качестве аппаратуры передачи данных (АПД) выступает fhss-dce (DCE, data communication equipment). Приложение fhss-multichannel – это многоканальная модель радиоканала, которая имитирует совместную работу радиосредств.



Таблица 1 – Матрица программного обеспечения

Applications		<i>fhss-dce</i>	<i>fhss-dte</i>	<i>fhss-multichannel</i>
Widgets	<i>qt-channel-panel</i>			X
	<i>qt-channel-plot</i>			X
	<i>qt-dce-panel</i>	X		
	<i>qt-dce-plot</i>	X		
	<i>qt-3dSurfaceWidget</i>			X
	<i>qt-customplot</i>	X		X
Systems	<i>fhss-protocols</i>	X	X	X
Signals	<i>fhss-modem</i>	X		
	<i>fhss-channel</i>			X
	<i>eml</i>	X		X

### Модель опытного района

Опытный район состоит из 5 центров радиосвязи, которые связаны между собой, в соответствии с рис. 1.

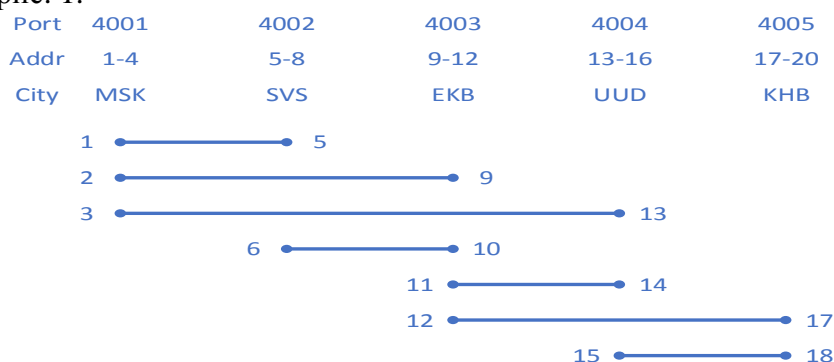


Рис. 1. Графическое представление опытного района

Выбор разных портов допускает моделирование работы радиосети на одной рабочей станции или сервере, и служит признаком территориальной принадлежности. Пул адресов равномерно распределен между пятью центрами только для визуального удобства. В действительности, номера могут быть любыми – главное, чтобы они не повторялись.

### Описание тестового окружения

Запуск системы производился на рабочей станции под управлением ОС *Windows 10* со следующими основными характеристиками: *CPU Intel Core i5 3450 @ 3.1 GHz*, *8 Gb DDR3 RAM*. Его дисковая подсистема не имеет большого значения, поскольку в рамках тестирования системы она практически не используется.

Модель запускалась на одной рабочей станции, обмен производился посредством интерфейса *localhost*. Для целей настоящей работы также использовались сторонние средства: диспетчер задач *Windows* для оценки использования ресурсов *CPU* и оперативной памяти, а также программа *Wireshark v.3.2.3* для оценки трафика между программами сервера и клиента системы.

### Принцип моделирования опытного района

Моделирование может происходить в двух режимах:

- с использованием системного времени в приложении *fhss-multichannel*, что пока возможно только на высокопроизводительных рабочих станциях (режим *real time*). После оптимизации программного обеспечения, которое включает полную поддержку многозадачности, этот режим не будет требовать высокой производительности;

- без использования таймера в приложении *fhss-multichannel*, что допускает использование любых рабочих станций (режим *virtual time*). В этом случае, моделирование

может происходить или с опережением реального времени, если быстродействие распределенной вычислительной системы велико, или медленнее, в случае недостаточного быстродействия системы.

Для взаимодействия *fhss-dce* и *fhss-multichannel* используются два протокола *RTSP* [3, 4] и *RTP* [5]. Взаимодействие *fhss-dte* и *fhss-dce* происходит с использованием проприетарного транспортного протокола, в который инкапсулирован текстовый протокол *JSON*.

Основной принцип работы приложения можно пояснить упрощенным алгоритмом:

- 1) *fhss-multichannel* запускается и начинает моделировать искажения по заданному количеству рабочих частот;
- 2) *fhss-dce* подключается по протоколу *RTSP* и сообщает свой абонентский адрес;
- 3) *fhss-multichannel*, зная количество подключенных клиентов, запрашивает у всех данные на передачу по протоколу *RTSP* и получает комплексный сигнал по протоколу *RTP*;
- 4) в *fhss-multichannel* происходит искажение сигналов для всех рабочих частот, а не только для тех на которых в данный момент работают *fhss-dce*;
- 5) после этого *fhss-multichannel* возвращает искаженный сигнал каждому *fhss-dce* по протоколу *RTP* и цикл (3-5) повторяется снова. Длительность этого цикла определим как  $T$  в мс.

Цикл 3-5 в реальной аппаратуре должен выполняться за 50 мс. Интегральным показателем эффективности работы системы можно считать коэффициент ускорения, т. е. величину, которая определяет, как происходит работа распределенного приложения – быстрее или медленнее реального времени, поэтому допустимо определить данный коэффициент следующим образом:  $k = 50/T$ . Коэффициент ускорения доступен в приложении *fhss-multichannel*. Если он превышает 1 хотя бы на 30%, то допускается переход в режим работы *real time*. Приложение *fhss-dce* может работать как самостоятельно, так и управляться приложением *fhss-dte*. В этом случае происходит не только моделирование взаимодействия между сервером (*fhss-multichannel*) и клиентом (*fhss-dce*), но и моделирование работы и взаимодействия терминального оборудования (*fhss-dte*) с аппаратурой передачи данных. Важно понимать, что приложение *fhss-multichannel* – это сервер по отношению к клиенту *fhss-dce*, а он, в свою очередь, сервер по отношению к клиенту *fhss-dte*.

### Тестирование производительности распределенного приложения

В этом разделе распределенное приложение состоит только из сервера (*fhss-multichannel*, всегда используется только один поток) и клиента (*fhss-dce*). В рамках данной работы были подготовлены и протестированы две версии клиента:

– все добавляемые модемы работают в одном потоке. В таком случае, все модемы работают в *GUI* потоке программы, а все обмены с сервером осуществляются последовательно со стороны клиента, хотя и в случайном порядке;

– при добавлении модема создается отдельный вычислительный поток, с которым взаимодействует только данный модем. В таком случае, все модемы работают независимо как друг от друга, так и от *GUI* потока программы, а все обмены с сервером осуществляются параллельно со стороны клиента и в случайном порядке.

Многопоточность в рамках приложения клиента была реализована в соответствии с рекомендациями разработчиков фреймворка и с дополнительными замечаниями на профильных порталах. На рис. 2 показаны результаты сравнений двух версий клиента по коэффициенту ускорения, в зависимости от количества модемов. Можно заметить, что коэффициент ускорения для обеих версий клиента практически не отличается в случае, если создан и работает только 1 модем. При увеличении количества созданных модемов в версии клиента с использованием многопоточности коэффициент ускорения падает не так сильно, как в однопоточной версии.

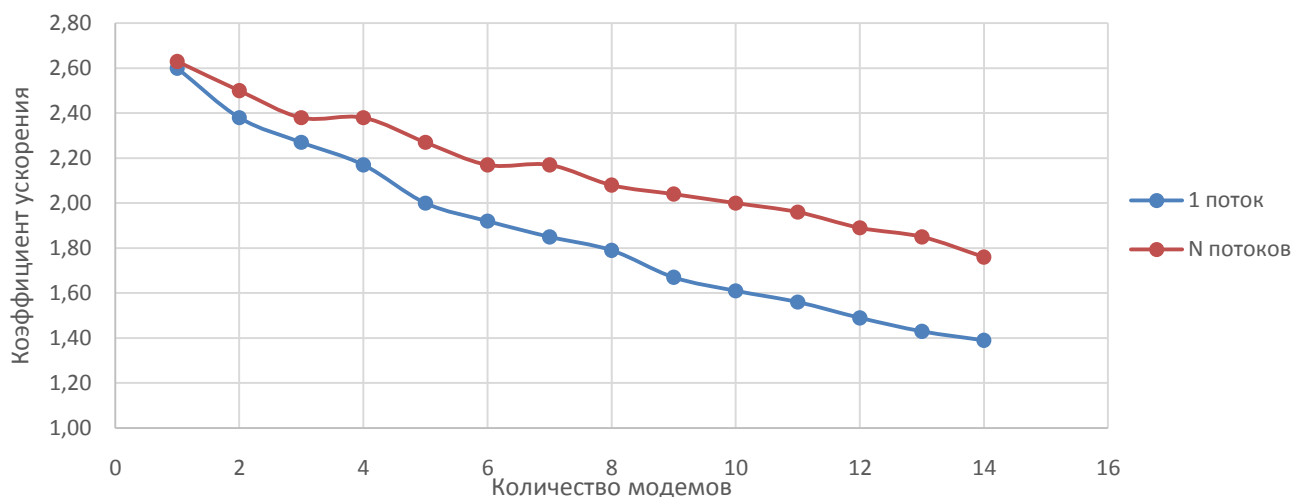


Рис. 2. Коэффициент ускорения в зависимости от количества модемов

Рассмотрим далее эффективность использования *CPU* тестового стенда. На рис. 3 показан процент загрузки *CPU* для однопоточной версии клиента, на рис. 4 – процент загрузки *CPU* для многопоточной версии клиента. Справочно приведены также загрузки *CPU* для программы сервера тестируемой системы.

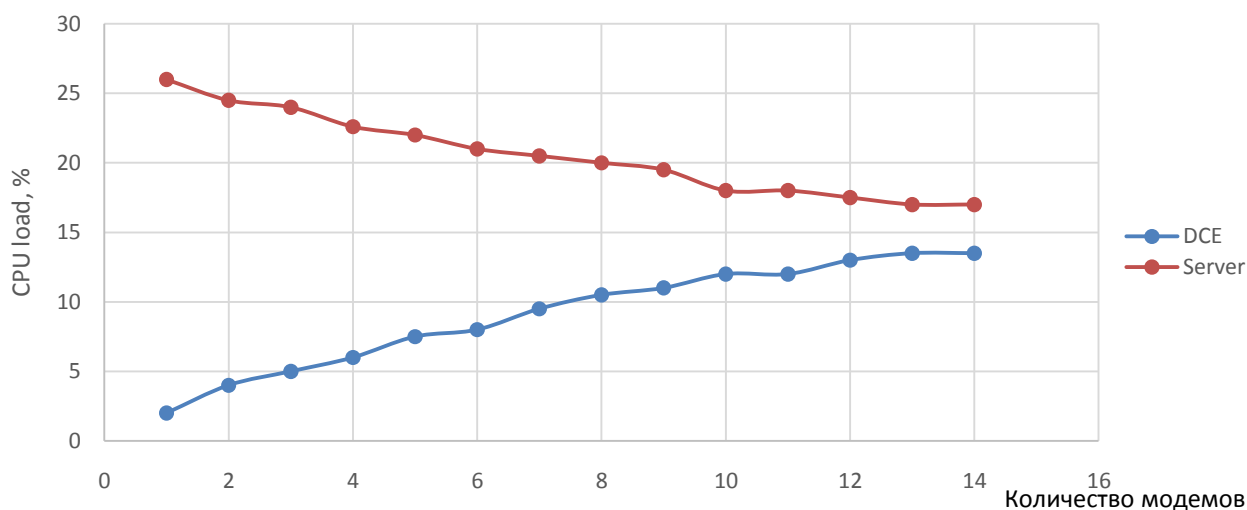


Рис. 3. Загрузка процессора при использовании однопоточной версии клиента

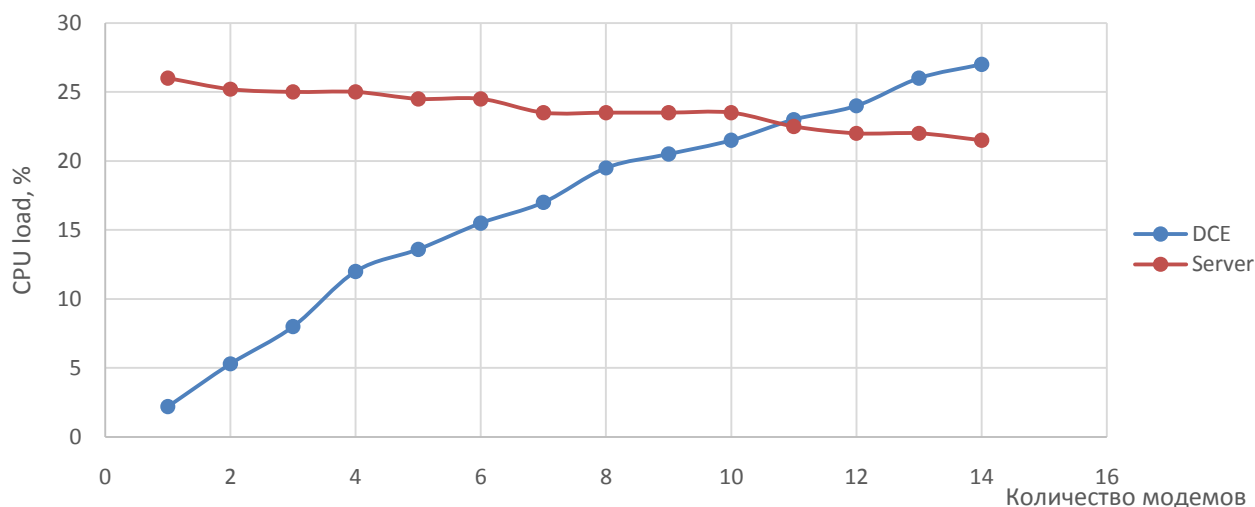


Рис. 4. Загрузка процессора при использовании многопоточной версии клиента

Обе версии демонстрируют схожее поведение – с ростом числа модемов загрузка *CPU* программой клиента растет, а загрузка *CPU* программой сервера падает. При этом, в случае однопоточной версии зависимость между данными величинами практически обратно пропорциональная, в то время как в случае версии с многопоточностью она выражена не так явно. Так же следует отметить, что версия с многопоточным клиентом загружает *CPU* более равномерно при увеличении количества модемов.

Далее рассмотрим влияние работы различных версий клиента на размер занимаемой памяти приложения клиента, в целом, и эффективность использования сетевых ресурсов. Для оценки используемой памяти используется диспетчер задач *Windows*, а для оценки нагрузки на сетевой интерфейс, – встроенный в программу *Wireshark* инструмент график ввода/вывода. В табл. 2 приведена статистика для однопоточной версии клиента, в табл. 3 – для многопоточной.

Таблица 2 – Статистика работы однопоточной версии клиента

Количество модемов	Использование памяти DCE, мБ	Сетевая нагрузка общая		Сетевая нагрузка полезная	
		pkts/sec	kbytes/sec	pkts/sec	kbytes/sec
0	5,60	-	-	-	-
1	8,20	400	420	200	400
2	9,50	740	790	370	740
3	10,60	1050	1130	525	1060
4	11,70	1330	1410	660	1340
5	12,90	1560	1660	780	1570
6	14,10	1775	1890	890	1770
7	15,40	1980	2100	990	1990
8	16,50	2225	2360	1100	2240
9	17,70	2400	2525	1200	2400
10	19,00	2525	2700	1270	2550
11	20,10	2675	2850	1350	2700
12	21,30	2825	3000	1400	2825
13	22,40	2950	3125	1475	2975
14	23,50	3025	3250	1525	3075

Таблица 3 – Статистика работы многопоточной версии клиента

Количество модемов	Использование памяти DCE, мБ	Сетевая нагрузка общая		Сетевая нагрузка полезная	
		pkts/sec	kbytes/sec	pkts/sec	kbytes/sec
0	5,60	-	-	-	-
1	8,20	400	430	200	410
2	9,60	780	850	385	805
3	10,80	1125	1190	560	1125
4	12,10	1440	1540	720	1460
5	13,30	1800	1870	900	1775
6	14,70	2100	2200	1050	2075
7	15,90	2400	2500	1200	2360
8	17,20	2650	2770	1325	2630
9	18,50	2900	3030	1450	2870
10	19,80	3200	3300	1600	3120
11	21,00	3400	3550	1700	3400
12	22,10	3600	3720	1800	3540
13	23,60	3800	3900	1900	3700
14	24,60	3900	4100	1950	3920

Исходя из полученных результатов, можно отметить, что использование памяти программой клиента практически не зависит от версии клиента. Как в случае с однопоточной версией, так и с многопоточной версией клиента потребление памяти увеличивается равномерно на одинаковую величину.

Из приведенной выше статистики также следует, что система с многопоточной версией клиента более эффективно использует сетевой интерфейс, нагружая его в большей степени, чем система с однопоточной версией клиента. При увеличении количества модемов

однопоточный клиент, в отличие от многопоточного, вынужден тратить все больше вычислительных ресурсов на свои внутренние нужды (последовательную модуляцию и демодуляцию сигналов), следовательно, меньше нагружая сетевой интерфейс.

### Моделирование информационного взаимодействия в опытном районе

В соответствии со схемой на рис. 1, на рабочей станции запускается один экземпляр приложения *fhss-multichannel* и по пять экземпляров приложений *fhss-dce* и *fhss-dte*. Используя *DTE*, на каждом центре создается заданное количество *DCE* для образования 7 радиолиний. Перед информационным обменом необходимо провести процедуру синхронизации времени от выбранного *DCE*. Его номер может быть любым, но желательно, чтобы все синхронизировались от него для предотвращения увеличения погрешности. Допускается последовательная синхронизация, когда, например, 2 синхронизируется от 1, а 3 от 2, но желательно этого избегать. После чего можно моделировать установление соединения или широковещательную передачу, поскольку эти процедуры возможны только тогда, когда вся сеть функционирует в рамках единого времени. Модель терминального оборудования позволяет, в ограниченном объеме, проверять служебное и информационное взаимодействие с аппаратурой передачи данных. Модель радиоканала работает на 128 частотах, а каждое *DCE* использует 32 частоты. Доступны проверки адаптации по рабочим частотам и скорости передачи.

### Моделирование доступности центров радиосети в опытном районе

Используя разработанное программное обеспечение АПД и модель радиоканала, которая позволяет моделировать различное отношение сигнал/шум и замирания сигнала и результаты моделирования состояния ионосферы в системе инженерных расчетов *Matlab* была реализована утилита (см. рис. 5), которая позволяет визуально представить доступность между центрами радиосвязи для указанной даты и времени в интервале года. Эта утилита позволяет построить диаграмму доступности, в двумерном или трехмерном виде, между центрами радиосвязи по разным критериям: отношение сигнал/шум, доступная скорость передачи, вероятность ошибки и вероятность доставки пакета с использованием метода повышения достоверности без решающей обратной связи.

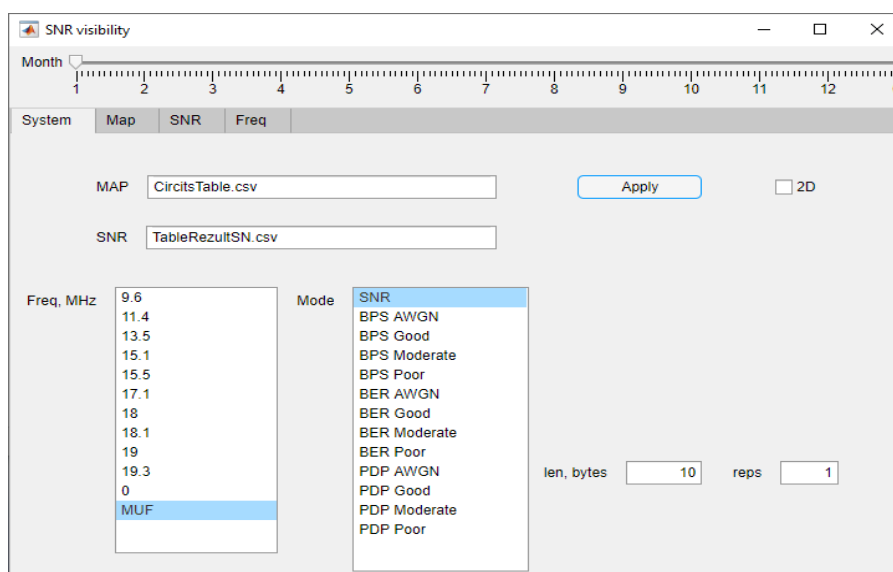


Рис. 5. Утилита в системе *Matlab*

Примеры представлены на рис. 6-8. Графики соответствуют 12 января 2019 года и радиоканалу со средними замираниями.

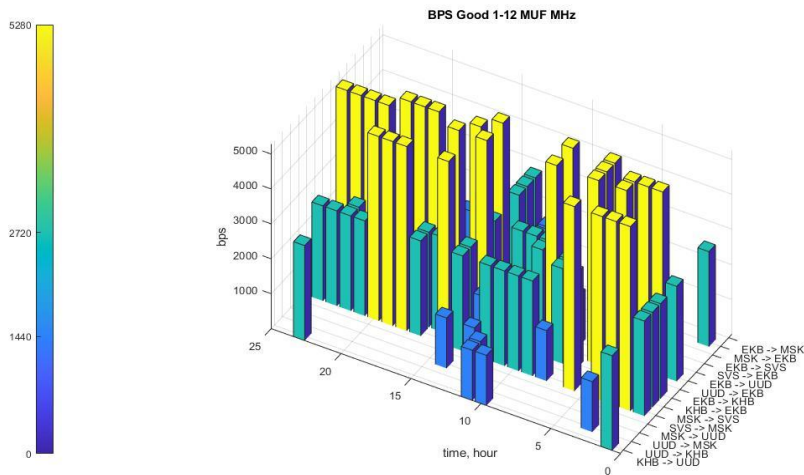


Рис. 6. Доступная скорость передачи, 3D представление

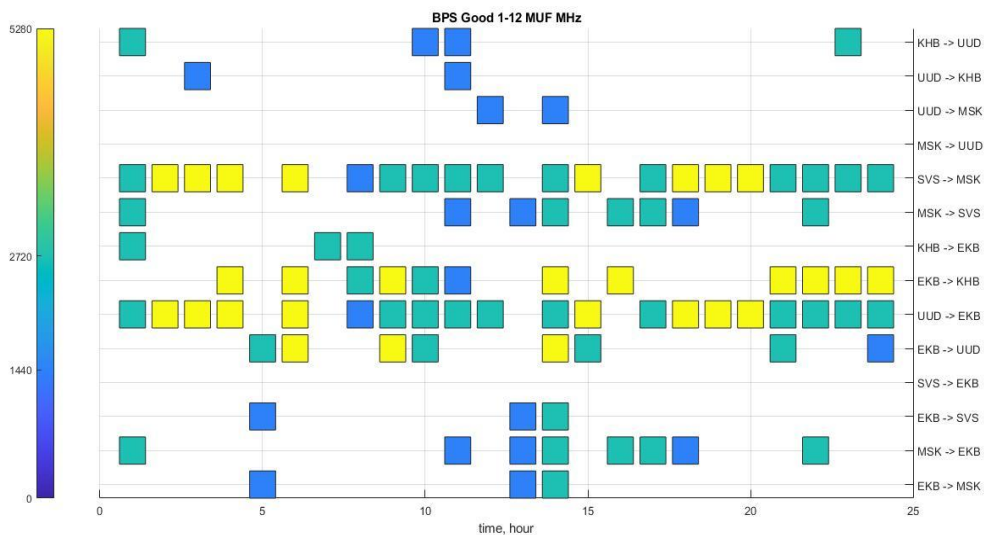


Рис. 7. Доступная скорость передачи, 2D представление

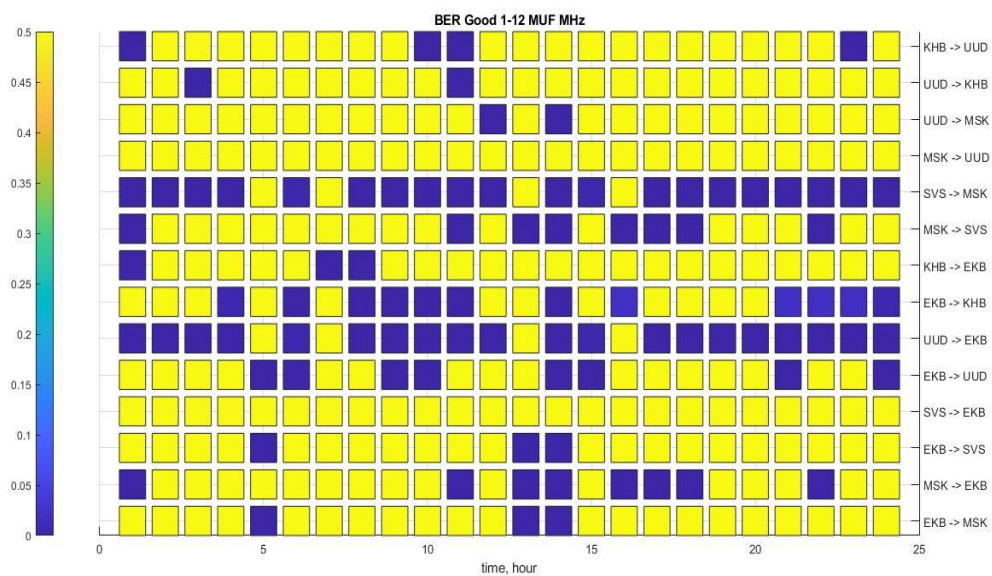


Рис. 8. Вероятность ошибки, 2D представление

### Выводы

Разработанный набор компонент позволяет моделировать работу цифровой сети радиосвязи таким образом, что тестируется целевое программное обеспечение *fhss-dce*. Используя эти компоненты, разработчик получает широкие возможности по тестированию и разработке терминального и телекоммуникационного оборудования. Результаты работы могут быть использованы при проведении предварительных и государственных испытаний для демонстрации работоспособности цифровой радиосети без радиосредств и, как следствие, без необходимости заказа рабочих частот на период их проведения. Использование только программной вычислительной среды позволяет вести разработку и построение стендов с минимальными финансовыми затратами.

### Литература

1. Шаптала В.С. Моделирование системы цифровой коротковолновой радиосвязи // Техника средств связи. 2019. № 2 (146). С. 154-156.
2. Шаптала В.С. Модель цифровой сети радиосвязи в распределенной вычислительной среде // Техника средств связи. 2019. № 3 (147). С. 70-76.
3. RFC 2326 URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2326.txt> (дата обращения 12.05.2019).
4. RFC 7826 URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7826> (дата обращения 12.05.2019).
5. RFC 3550 RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3550> (дата обращения 12.05.2019).
6. Java Script Object Notation. URL: <https://www.json.org> (дата обращения 12.05.2019).
7. RFC 8259 URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc8259> (дата обращения 12.05.2019).
8. ECMA-404. The JSON Data Interchange Syntax URL: <https://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-404.htm> (дата обращения 12.05.2019).
9. Multithreading Technologies in Qt URL: <https://doc.qt.io/qt-5/threads-technologies.html> (дата обращения 12.05.2019).
10. QThreads general usage URL: [https://wiki.qt.io/QThreads\\_general\\_usage](https://wiki.qt.io/QThreads_general_usage) (дата обращения 12.05.2019).
11. The correct way to exit a thread in Qt with finished signal and make clean\_up URL: <https://stackoverflow.com/questions/23268331/the-correct-way-to-exit-a-thread-in-qt-with-finished-signal-and-make-clean-up> (дата обращения 12.05.2019).
12. When or how to delete QThread in Qt URL: <https://stackoverflow.com/questions/27190364/when-or-how-to-delete-qthread-in-qt?rq=1> (дата обращения 12.05.2019).
13. Дорогов А.Ю. Моделирующий комплекс для радиосетей КВ диапазона / III Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (CTS'2019). Сборник докладов. Санкт-Петербург. 30 октября – 1 ноября 2019 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 163-166.

### References

1. Shaptala V.S. Modelirovanie sistemy cifrovoj korotkovolnovej radiosvyazi. Tekhnika sredstv svyazi [Building a digital short-wave radio system. Means of communication equipment]. 2019. No. 2 (146). Pp. 154-156 (in Russian).
2. Shaptala V.S. Model' cifrovoj seti radiosvyazi v raspredelennoj vychislitel'noj srede. Tekhnika sredstv svyazi [Model of digital radio network in distributed computing system. Means of communication equipment]. 2019. No. 3 (147). Pp. 70-76 (in Russian).
3. RFC 2326 URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2326.txt>.
4. RFC 7826 URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7826>.
5. RFC 3550 RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3550>.
6. Java Script Object Notation. URL: <https://www.json.org>.
7. RFC 8259 URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc8259>.
8. ECMA-404. The JSON Data Interchange Syntax URL: <https://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-404.htm>.

9. Multithreading Technologies in Qt URL: <https://doc.qt.io/qt-5/threads-technologies.html>.

10. QThreads general usage URL: [https://wiki.qt.io/QThreads\\_general\\_usage](https://wiki.qt.io/QThreads_general_usage).

11. The correct way to exit a thread in Qt with finished signal and make clean\_up URL: <https://stackoverflow.com/questions/23268331/the-correct-way-to-exit-a-thread-in-qt-with-finished-signal-and-make-clean-up>.

12. When or how to delete QThread in Qt URL: <https://stackoverflow.com/questions/27190364/when-or-how-to-delete-qthread-in-qt?rq=1>.

13. Dorogov A.Yu. Modeling complex for HF radio networks. III International Conference on Control in Technical Systems CTS'2019. October 30 – November 1, 2019 at Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia. Pp. 163-166 (in Russian).

Статья поступила 15 мая 2020 г.

#### Информация об авторах

Шаптала Василий Сергеевич – Начальник лаборатории ПАО «Интелтех». Кандидат техн. наук.

Солнцев Денис Викторович – Инженер-программист ПАО «Интелтех». Тел. 8 (812) 448-19-09. E-mail: [shaptalavs@inteltech.ru](mailto:shaptalavs@inteltech.ru). Адрес: 197342, г. Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д.8.

#### Model of pilot area of digital radio network

V.S. Shaptala, D.V. Solntsev

**Abstract.** *This paper aims at demonstrating the results of evolutionary development of digital communication system model in distributed computational environment. The main goal of this paper is creating and testing the model of pilot area of digital radio network in shortwave radio spectrum. For modelling purposes, we make use of cross platform development techniques and digital signal processing algorithms. The novelty of discussed solution is in creating a number of software applications, that can be used for testing and demonstration the capabilities of target set of programs. The results of this paper include modelling the work of the pilot area, estimation of performance gain as we transition to multithreaded application and graphical representation of available subscribers in radio network. Practical significance of this paper consists in ability to demonstrate the work of digital radio network in pilot area without the need of using special equipment – only computational environment is required (Intel or ARM, Windows, Linux or Android). Special software packages were used for demonstration purposes. Graphical application built in Matlab allows us to demonstrate availability of subscribers in radio network.*

**Keywords:** *distributed computing; digital signal processing; software architecture.*

#### Information about Authors

Shaptala Vasilij Sergeevich – Head of laboratory PJSC “Inteltech”. Ph.D. in communications.

Solntsev Denis Viktorovich – Software engineer of PJSC “Inteltech”.

Tel. 8(812)448-19-01 (12-15). E-mail: [shaptalavs@inteltech.ru](mailto:shaptalavs@inteltech.ru).

Address: Russia, 197342, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya street 8.

**Для цитирования:** Шаптала В.С., Солнцев Д.В. Модель фрагмента сети цифровой радиосвязи // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 71-79.

**For citation:** Shaptala V.S., Solntsev D.V. Model of pilot area of digital radio network. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 71-79 (in Russian).



**ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.396.6

**Моделирование эволюции области неопределенности контролируемых систем  
на основе интеллектуального подхода**

Винограденко А.М., Федоренко В.В., Будко Н.П.

***Аннотация.** Оценка технического состояния радиоэлектронного оборудования проводится на различных этапах жизненного цикла оборудования (испытание, эксплуатация, восстановление и др.) и сводится к выбору того или иного метода параметрического синтеза. Техническое состояние радиоэлектронного оборудования, определяется нахождением характерных для конкретного типа оборудования параметров в пределах допусков. Как правило, техническое состояние радиоэлектронного оборудования характеризуется не одним параметром, а целой группой параметров. Для учета корреляции параметров, и, как следствие, повышения достоверности контроля, предлагается рассматривать область в пространстве параметров, в которой с заданной вероятностью находятся значения контролируемых параметров. Поэтому при оценке технического состояния радиоэлектронного оборудования, определении его класса технического состояния предлагается использовать не интервал, а область неопределенности, размерность которой определяется количеством выходных параметров, характеризующих техническое состояние радиоэлектронного оборудования в целом. Недостаток, низкая достоверность измерительной информации, влияние внешних возмущений, точные свойства которых неизвестны и не могут быть описаны простыми соотношениями, накладывает отпечаток на область неопределенности, размывая ее границы. В связи с этим, значения контролируемых параметров радиоэлектронного оборудования всегда определяют с конечной погрешностью. В связи с этим, целью данной работы является моделирование эволюции (траектории изменения) области параметрической неопределенности радиоэлектронного оборудования, позволяющее определять (прогнозировать) деградацию технического состояния радиоэлектронного оборудования в условиях недостатка измерительной информации и влияний внешних возмущений. Показана целесообразность эллипсоидальной аппроксимации области неопределенности состояния радиоэлектронного оборудования, в которой с заданной вероятностью находятся значения измеряемых выходных параметров. Эволюция технического состояния радиоэлектронного оборудования вследствие ухода контролируемых параметров за пределы установленных допусков, при изменении класса технического состояния представлена в виде аффинного преобразования эллипсоида в пространстве параметров. Показана математическая модель эволюции технического состояния радиоэлектронного оборудования при изменении класса технического состояния с использованием аналитического описания процесса перемещения области неопределенности в пространстве параметров. Проведено моделирование эволюции областей параметрической неопределенности технического состояния радиоэлектронного оборудования на основе интеллектуального подхода при ограниченном объеме измерительной информации, в условиях ограниченной выборки реализаций параметра.*

***Ключевые слова:** техническое состояние; радиоэлектронное оборудование; контролируемые параметры; область параметрической неопределенности; энтропийный потенциал.*

**Введение**

Решение задач поддержания средств управления и связи в постоянной готовности к применению по назначению сопряжено с постоянным процессом оценки технического состояния (ТС) вооружения, военной и специальной техники. В системах информационного обеспечения испытаний и управления радиоэлектронными системами (РЭС) широко используются средства автоматизации обработки и анализа измерительной информации (ИИ), которые позволяют обрабатывать полные потоки подобной информации в реальном масштабе времени, обобщать показатели функционирования радиоэлектронного оборудования (РЭО) для оценки (контроля) его ТС и выдавать лицу, принимающему решения [1].

В целом, оценка ТС РЭС проводится на различных этапах жизненного цикла оборудования (испытание, эксплуатация, восстановление и др.) и сводится к выбору того или иного метода параметрического синтеза [2, 3]. При этом РЭС рассматривается как сложная (многомерная) динамическая система, а РЭО – как динамический объект (ДО).

Техническое состояние РЭО, определяется нахождением характерных для конкретного типа оборудования параметров в пределах допусков. Для осуществления детального представления информации о ТС РЭО в работе [4] рассмотрены классы ТС оборудования, представленные как финальные вероятности нахождения объекта контроля в одном из возможных состояний. Логика переходов из одного класса ТС в другой определена математическим вариационным рядом предпочтений.

Как правило, ТС РЭО характеризуется не одним параметром, а целой группой параметров. Существующий в настоящее время метод назначения независимых интервалов на каждый параметр в отдельности не позволяет учитывать корреляцию параметров РЭС. Для учета корреляции параметров, и, как следствие, повышения достоверности контроля, предлагается рассматривать область в пространстве параметров, в которой с заданной вероятностью находятся значения контролируемых параметров. Поэтому при оценке ТС РЭО, определении его класса ТС предлагается использовать не интервал, а область неопределенности, размерность которой определяется количеством выходных параметров, характеризующих ТС РЭС в целом [5].

Недостаток, низкая достоверность ИИ, влияние внешних возмущений, точные свойства которых неизвестны и не могут быть описаны простыми соотношениями, накладывает отпечаток на область неопределенности, размывая ее границы. В связи с этим, значения контролируемых параметров РЭО всегда определяют с конечной погрешностью.

В связи с этим, *целью* данной статьи является моделирование эволюции (траектории изменения) области параметрической неопределенности РЭО, позволяющее определять (прогнозировать) деградацию ТС РЭО в условиях недостатка ИИ и влияний внешних возмущений.

### **Эллипсоидальная аппроксимация области неопределенности**

Известные методы параметрического синтеза сложных технических систем [3] предусматривают точное знание либо значений параметров, характеризующих состояние системы, либо вероятностных характеристик внешних возмущений (дестабилизирующих факторов), приводящих к различным флуктуациям параметров систем [6].

Самым распространенным подходом к исследованию неопределенных величин является вероятностный (стохастический) метод. В нем каждому вектору сопоставляется некоторое распределение вероятностей с заданной плотностью. Отметим, что вероятностный подход требует знания статистических характеристик исходных неопределенных факторов, что не всегда доступно на практике.

В задачах поиска оптимальной области параметрической неопределенности РЭО как ДО замена единичного значения контролируемого параметра (терминальной точки) множеством его возможных значений (терминальным множеством) в таких задачах обусловлена конечной точностью определения положения технической системы в практических задачах, а также фактическими последствиями разного рода допущениями, позволяющими упростить математическую модель реальной системы [7, 8].

Графическое отображение формирования области неопределенности возможно как для двумерного пространства параметров, располагающихся на плоскости, так и для трехмерного пространства.

Использование эллипсоидов в качестве аппроксимации области неопределенности (канонических множеств) было предложено в [7-13]. Метод был развит в [14-19] и многих других работах. Например, его можно использовать для нелинейных систем [20, 21] и др.

Реальные неопределенности крайне редко носят чисто случайных характер или чисто игровой характер. Следовательно, приходится выбирать между гарантированным и вероятностным подходами. Для этого гарантированный способ должен быть «близок» к вероятностному, а последний, как правило, опирается на гауссовы распределения неопределенных величин. Следовательно, метод эллипсоидов наиболее применим для решения задач обработки неточных измерений величин контролируемых параметров РЭС как динамической системы с неопределенностями.

Исходная оценка состояния РЭО, соотнесенной определенному классу ТС, характеризуется некоторой областью неопределенности  $\Theta_n$  в пространстве параметров. Размеры этой области определяются погрешностью проведенных измерений. В общем случае начальный вектор параметров, характеризующих состояние системы  $\theta(\omega_0)$ , не фиксирован и принадлежит заданному начальному множеству (области неопределенности) в  $m$ -мерном пространстве:  $\theta(\omega_0) \in \Theta_n$ .

Целесообразность эллипсоидальной аппроксимации области неопределенности состояния РЭО, в которой с заданной вероятностью находятся значения измеряемых выходных параметров, объясняется рядом причин [22, 23]:

при линейных преобразованиях эллипсоиды остаются эллипсоидами;

эллипсоид  $E(\theta_z^{(s)}, Q_s)$ , как и гауссовская случайная величина, характеризуется

вектором центра  $\theta_z^{(s)}$  и матрицей рассеивания  $Q_s$  размером  $m \times m$ ;

для выпуклых областей с помощью эллипсоидов можно получить удовлетворительную аппроксимацию;

минимизация объема результирующего эллипсоида соответствует методу наименьших квадратов или методу максимума правдоподобия в теории вероятностей.

### Модель аффинного преобразования области неопределенности

Область неопределенности  $\Theta_n$  представляет собой начальное множество возможных значений  $n$ -мерного оцениваемого вектора выходных параметров  $\bar{Y}$ . Данный вектор характеризует ТС системы и может принимать произвольные значения из эллипсоида:

$$\bar{Y} \in E(A, Q) = \{Y | (Q^{-1}(Y - A), (Y - A)) \leq 1\} = \Theta_n, \quad (1)$$

где  $A$  –  $n$ -мерный вектор центра эллипсоида,  $Q$  – симметричная положительно определенная матрица размерности  $n \times n$ , характеризующая погрешность измерения; скобки  $(,)$  обозначают скалярное произведение векторов.

Примером построения области неопределенности является ТС РЭО, оцениваемое двумя выходными параметрами (рис. 1). В этом случае определению подлежат оценки пяти параметров: координат центра рассеивания  $m_{y_{i-1}}, m_{y_i}$ , угла  $\alpha$  между осями симметрии области неопределенности и осями параметров (для коррелированных параметров), а также суммарные погрешности результатов измерений  $\Delta_{\Sigma\eta}, \Delta_{\Sigma\xi}$ .

Прогнозирование изменения ТС РЭО осуществляется за счет использования дискретно-делимого информационно-вычислительного (статистического) ресурса, оптимальное распределение которого позволяет сформировать порядок действий по предупреждению аварийной ситуации (например, своевременного резервирования) [24-26].

Векторы параметров РЭО, характеризующие ее состояние при нахождении (на каждом этапе деградации ТС) в каждом  $s$ -ом классе ТС, определены для дискретных объемов выделенного ресурса  $\omega_s, s = 0, 1, \dots$ . При этом после каждого класса ТС ресурс уменьшается.

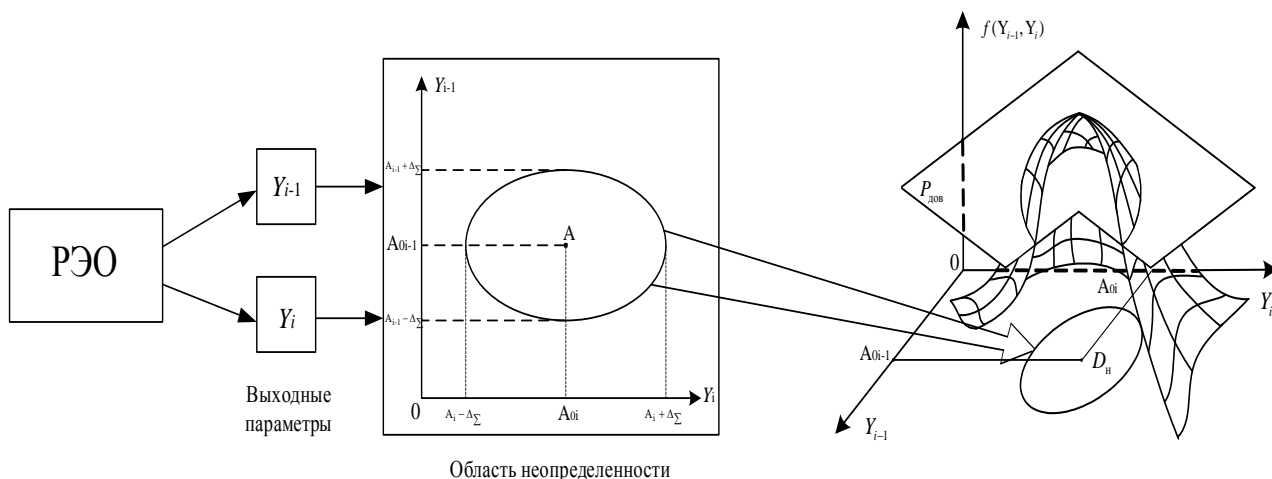


Рис. 1. Формирование области неопределенности при оценке ТС РЭО двумя выходными параметрами

При реализации части информационного ресурса  $\Delta\omega_1 = \omega_0 - \omega_1$  вектор параметров в первом классе ТС РЭО определяется выражением:

$$Y(\omega_1) = C_1 Y(\omega_0) + \Delta A_1, \tag{2}$$

где  $\Delta A_1$  –  $m$ -мерный вектор сдвига;  $C_1$  – неособенная матрица размерности  $m \times m$ , определяющая изменение ориентации и масштаба области неопределенности состояния РЭО при его переходе к очередному классу ТС относительно исходного эллипсоида.

Из формулы (2) находим выражение для исходного вектора состояний  $Y(\omega_0) = C_1^{-1}(Y(\omega_1) - \Delta A_1)$ , которое подставим в неравенство (1) и проведем следующие преобразования:

$$\begin{aligned} & (Q_0^{-1}(C_1^{-1}(Y(\omega_1) - \Delta A_1) - A_0), (C_1^{-1}(Y(\omega_1) - \Delta A_1) - A_0)) = \tag{3} \\ & = ((C_1^T)^{-1} Q_0^{-1} C_1^{-1} (Y(\omega_1) - C_1 A_0 - \Delta A_1), (Y(\omega_1) - C_1 A_0 - \Delta A_1)) = \\ & = ((C_1 Q_0 C_1^T)^{-1} (Y(\omega_1) - (C_1 A_0 + \Delta A_1)), (Y(\omega_1) - (C_1 A_0 + \Delta A_1))) \leq 1. \end{aligned}$$

Здесь индекс « $T$ » обозначает транспонирование матрицы  $C_1$ . Из выражения (3) следует, что вектор  $Y(\omega_1)$  принадлежит эллипсоиду (рис. 2) с центром в точке  $A_1 = C_1 A_0 + \Delta A_1$  и с матрицей  $C_1 Q_0 C_1^T$ , т. е.

$$\begin{aligned} Y(\omega_1) = C_1 Y(\omega_0) + \Delta A_1 \in E(C_1 A_0 + \Delta A_1, C_1 Q_0 C_1^{-1}), \\ Y(\omega_0) \in E(A_0, Q_0), \end{aligned} \tag{4}$$

а, следовательно, процесс оценки ТС представляет собой аффинное преобразование эллипсоидов в пространстве параметров, при этом любой эллипсоид преобразуется снова в эллипсоид [27].

Используя функции множеств соотношения (4) можно записать в виде равенства множеств

$$C_1 E(A_0, Q_0) + \Delta A_1 = E(C_1 A_0 + \Delta A_1, C_1 Q_0 C_1^T). \tag{5}$$

Если матрица  $C_1 Q_0 C_1^T = D$ , где  $D$  – диагональная матрица, то главные оси полученного эллипсоида будут параллельны осям координат (параметров объекта).

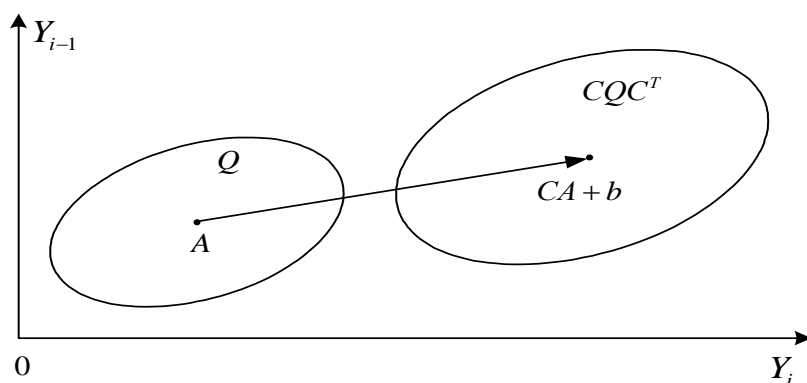


Рис. 2. Изменение класса ТС РЭО

В общем случае на  $s$ -ом классе ТС РЭО вектор выходных параметров  $Y(\omega_s)$  принадлежит эллипсоиду с центром в точке  $A_s = C_s A_{s-1} + \Delta A_s$  и с матрицей  $C_s Q_{s-1} C_s^T$ , т. е.

$$Y(\omega_s) = C_s Y(\omega_{s-1}) + \Delta A_s \in E(C_s A_{s-1} + \Delta A_s, C_s Q_{s-1} C_s^T), \quad (6)$$

где  $Y(\omega_{s-1}) \in E(C_{s-1} A_{s-2} + \Delta A_{s-1}, Q_{s-1})$ ;  $Q_{s-1} = C_{s-1} Q_{s-2} C_{s-1}^T$ .

Траектория эволюции области неопределенности, характеризующей ТС РЭО в пространстве параметров, при переходе из одного класса ТС в другой представлена на рис. 3.

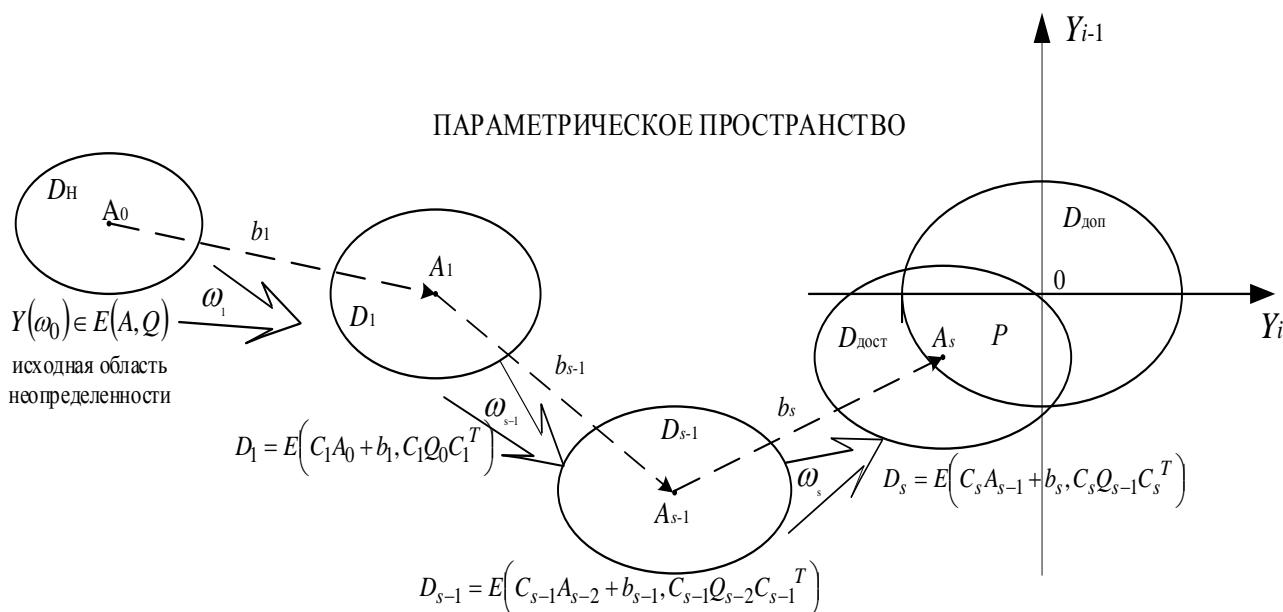


Рис. 3. Траектория эволюции области неопределенности в пространстве параметров

Таким образом, математическая модель эволюции ТС РЭО при изменении класса ТС, определяемая выражением (6), разработана с использованием аналитического описания процесса перемещения области неопределенности в пространстве параметров.

### Модель эволюции области неопределенности на основе интеллектуального подхода

Необходимо отметить, что если исходные области неопределенности в начальный момент времени имели геометрическую форму, требующую небольшого числа параметров для обработки и хранения, то в результате аффинных преобразований, сложения и пересечения областей могут получаться многообразия сложной, трудно предсказуемой формы.

Одним из перспективных для исследования вариативных свойств технологических параметров объектов в условиях неопределенности является интеллектуальный подход,

основанный на положениях теории энтропийных потенциалов (ТЭП) [28], возможности которой позволяют проводить исследования эволюции областей параметрической неопределенности ТС РЭС при ограниченном объеме ИИ, в условиях ограниченной выборки реализаций параметра.

В ТЭП предложен набор понятий энтропийных потенциалов:  $\Delta_e$  – энтропийный потенциал (ЭП),  $L_{\Delta}$  – комплексный ЭП (КЭП),  $La_z$  – многомерный КЭП (МКЭП) в различных вариантах ( $z=1,2,\dots,n$ ). Эти понятия взаимосвязаны на основе принципа вложения: понятия более высокого уровня выражается через величины ЭП предыдущих уровней с введением дополнительных характеристик анализируемых параметров. Взаимосвязь понятий описывается следующим образом

$$La_z = \left( \sum_{i=1}^m (c_i |L_{\Delta_i}|)^z \right)^{\frac{1}{z}} = \left( \sum_{i=1}^m \left( c_i \frac{\Delta_{ei}}{|X_{mi}|} \right)^z \right)^{\frac{1}{z}} = \left( \sum_{i=1}^m \left( c_i \frac{1}{2} \frac{e^{H_i}}{|X_{mi}|} \right)^z \right)^{\frac{1}{z}} = \left( \sum_{i=1}^m \left( c_i \frac{K_e \sigma_i}{|X_{mi}|} \right)^z \right)^{\frac{1}{z}} \quad (7)$$

где  $X_{mi}$  – величина базового значения, на фоне которого рассматриваются вариации  $i$ -го параметра;  $c_i$  – весовые коэффициенты, характеризующие значимость каждого  $i$ -го параметра ( $i=1,2,\dots,m$ ) при исследовании многопараметрической РЭС,  $c_i \geq 0$ ,  $(\sum_{(i)} c_i = 1)$ ,

$z$  – вариант критерия ( $z=1,2,\dots$ ),  $\sigma$  – величина среднеквадратического отклонения (СКО);  $K_e$  – энтропийный коэффициент, характеризующий «вариативные» свойства закона распределения параметра [29],  $H_i$  – величина энтропии  $i$ -го параметра.

Для проведения исследований РЭС в пространстве энтропийных потенциалов необходимо наличие методов и методик для получения в различных ситуациях оценок характеристик  $X_n$ ,  $\sigma$ ,  $K_e$  и  $m_x$  [30]. Наиболее характерными являются следующие ситуации:

1. Имеются возможности проведения измерений в требуемых объемах (при исследовании эволюций областей неопределенности электрических и технологических параметров РЭС), значения которых достаточно просто и оперативно могут быть преобразованы в электрические сигналы.

В таких случаях затраты на организацию и проведение соответствующих измерений могут оказаться относительно небольшими. При этом, решение поставленной задачи может быть осуществлено классическим путем. Сначала формируется выборка исходных результатов измерений параметра(ов), необходимая для построения гистограммы распределения вероятностей и последующего определения значений величины энтропии. Затем определяется значение величины  $\Delta_e$  в соответствии с (7):  $\Delta_e = \frac{1}{2} e^{H_x}$ . Также на

основании исходной выборки наблюдений однозначно определяются значения характеристик  $\sigma$ ,  $m_x$  и  $X_n$ . Далее, в соответствии с (7), находятся значения величин  $K_e$  и  $L_{\Delta}$ .

2. Характерной ситуацией при эксплуатации РЭС является наличие вышеуказанной априорной неопределенности, обусловленной недостатком исходной ИИ.

Путь решения стоящей задачи основан на определении характеристики  $K_e$ ,  $\sigma$ ,  $m_x$  и  $X_n$ , с использованием которых находятся величины энтропийных потенциалов различных уровней (7). Для получения представительных оценок этих характеристик требуется меньший объем ИИ, чем для получения оценки величины энтропии, а для более подробного исследования – разработанные для этих целей методы и методики [31, 32], основными из которых являются:

2.1. Метод определения результирующего значения энтропийного коэффициента для композиции некоррелированных параметров по значениям  $K_e$  отдельных параметров и отдельным весам каждой из дисперсий в суммарной дисперсии.

2.2. Значение величины  $K_e$  может быть определено исходя из анализа физических явлений, лежащих в основе работы контролируемого РЭО, аналогий с подобными объектами (эталоном, «матрицей правдоподобия» [5]).

2.3. Метод робастного оценивания, который может быть использован для любого закона распределения параметра и ограниченного объема измерений:  $n \geq 2$ .

2.4. Методики определения значений энтропийного коэффициента и СКО на основе характеристик входных воздействий и динамических свойств контролируемого РЭО. Эти методики основаны на использовании известных зависимостей функции спектральной плотности выходного параметра  $S_x(\omega)$  от спектральных плотностей и амплитудно-частотных характеристик  $A(\omega)$  объекта по каналам прохождения этих воздействий для линейных систем. Далее величина СКО определяется на основании  $S_x(\omega)$  по известным зависимостям. Для нелинейных объектов зависимость между величинами СКО на входе и выходе объекта выражается с помощью коэффициента статистической линеаризации для централизованной составляющей входного воздействия.

Таким образом, ТС РЭО может быть охарактеризовано положением области неопределенности в пространстве параметров вышеуказанных характеристик. Изменение ТС РЭО, обусловленное, например, эволюционными процессами (деградацией ТС) или реализацией процессов управления, приведет к перемещению области неопределенности, которая будет описывать некоторую «параметрическую» траекторию. Эта траектория является весьма информативной – совокупность таких траекторий соответствует различным режимам функционирования РЭО (РЭС).

### Заключение

ТС контролируемого РЭО определяется  $n$ -мерным вектором выходных параметров по результатам их измерений. Наличие погрешностей измерения вносит некоторую неопределенность в результаты контроля оборудования. Если погрешности измерений подчинены гауссовскому закону распределения, то для представления области неопределенности в пространстве параметров используется эллипсоидальная аппроксимация.

Эволюция ТС РЭО, вследствие ухода контролируемых параметров за пределы установленных допусков, может быть представлена в виде аффинного преобразования эллипсоида в пространстве параметров. Аналитическое описание процесса перемещения области неопределенности в пространстве параметров, позволило получить математическую модель эволюции ТС РЭО в процессе его контроля. На основе ТЭП разработана модель эволюции области параметрической неопределенности ТС РЭО, позволяющая получить траекторию деградации ТС РЭО, если погрешности измерений подчинены различным законам распределения, при низкой достоверности и недостатке ИИ.

### Литература

1. Винограденко А.М., Ладонкин О.В., Юров А.С. Система мониторинга технического состояния подвижных объектов военного назначения с использованием беспроводных технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 1. С. 51-55.
2. Abramov O.V., Dimitrov B.N. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach. Reliability: Theory&Application. 2017. Vol. 12. No. 4 (47). pp. 39-48.
3. Abramov O.V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. Automation and Remote Control. 2016. Vol.77. No. 4. pp. 594-603.

4. Будко П.А., Будко Н.П., Винограденко А.М., Литвинов А.И. Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8 (162). С. 37-44.
5. Будко П.А., Винограденко А.М., Гойденко В.К., Кузнецов С.В. Реализация метода многоуровневого комплексного контроля технического состояния морского робототехнического комплекса // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 4. С. 71-101.
6. Borgonovo E. A new uncertainty importance measure. *Reliability Engineering & System Safety*. 2007. Vol. 6 (92). pp. 771-784.
7. Акуленко Л.Д., Шматков А.М. Оптимальное по быстродействию приведение динамического объекта на поверхность эллипсоида в многомерном пространстве // ДАН. 2017. Т. 477. № 1. С. 29-33.
8. Abramov O., Nazarov D. Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*. 2016. pp. 91-94.
9. Федоренко В.В., Винограденко А.М., Самойленко В.В., Самойленко И.В., Шарипов И.К. Минимизация области параметрической неопределенности для ремонтируемой системы / Материалы XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018), СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. С. 35-38.
10. Федоренко В.В., Винограденко А.М. Оптимизация области параметрической неопределенности контролируемого радиоэлектронного оборудования // Мягкие измерения и вычисления. 2018. № 2 (3). С. 10-18.
11. Винограденко А.М. Эллипсоидальная аппроксимация областей параметрической неопределенности технического состояния РТК // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 3 (20). С. 53-60.
12. Bertsekas D.P., Rhodes J.B. Recursive state estimation for a setmembership description of uncertainty. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1971. V. AC-16. No. 2. pp. 117-128.
13. Федоренко В.В. Оптимизация восстановления технической системы управления в условиях неопределенности ее состояния // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2001. № 4. С. 56-58.
14. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977. 392 с.
15. Овсеевич А.И., Тарабанько Ю.В. Явные формулы для эллипсоидов, аппроксимирующих области достижимости // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2007. № 2. С. 33-34.
16. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988. 320 с.
17. Chernousko F.L. State estimation for dynamic systems. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1994. 304 p.
18. Filippov A.F. Ellipsoidal estimates for a solution of a system of differential equations. *Interval Computations*. 1992. V. 4. No. 2. pp. 6-17.
19. Kurzanski A.B., Varaiya P. On ellipsoidal techniques for reachability analysis. Part I: External approximations. *Optimiz. Methods&Software*. 2002. Vol. 17. No. 2. pp. 177-206.
20. Филиппова Т.Ф. Дифференциальные уравнения эллипсоидальных оценок множеств достижимости нелинейной динамической управляемой системы // Труды Института математики и механики Уральского отд. РАН. 2010. Т. 16. № 1. С. 223-232.
21. Filippova T.F., Berezina E.V. On state estimation approaches for uncertain dynamical systems with quadratic nonlinearity: theory and computer simulations. *Lecture Notes in Computer Science*. 2008. V. 4818. pp. 326-333.
22. Polyak B.T., Nazin S.A., Durieu C., Walter E. Ellipsoidal parameter or state estimation under model uncertainty. *Automatica*. 2004. No. 40 (7). pp. 1171-1179. DOI: 10.1016/j.automatica.2004.02.014.
23. Chernousko F.L. State Estimation for Dynamic Systems. Boca Raton: CRC Press, 1994. 304 p.
24. Будко П.А., Винограденко А.М., Бурьянов О.Н., Веселовский А.П. Модель автоматизированной системы контроля технического состояния наземных робототехнических комплексов / Материалы II научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». СПб.: ВАС. 2017. С. 145-149.
25. Винограденко А.М., Веселовский А.П., Бурьянов О.Н. Оперативный контроль технического состояния подвижных электротехнических объектов / Современные проблемы создания и эксплуатации ВВСТ. III Всероссийская НПК. ВКА им. А.Ф. Можайского. СПб. 2016. С. 178-184.
26. Будко П.А., Винограденко А.М., Гойденко В.К., Тимошенко Л.И. Метод многомерного статистического контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования на основе комплексирования показаний нескольких типов датчиков // Датчики и системы. 2018. № 3 (223). С. 3-11.



27. Lluís Ros, Assumpta Sabater, Federico Thomas. An ellipsoidal calculus based on propagation and fusion. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics – part b: cybernetics*. 2002. Vol. 32. No. 4. pp. 430-442.

28. Лазарев В.Л. Исследование вариаций параметров на основе значений энтропийного коэффициента / Материалы XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», С. 7-10.

29. Лазарев В.Л. Теория энтропийных потенциалов. С-Пб.: Изд-во Политехн-го ун-та, 2012. 127 с.

30. Лазарев В.Л., Иванов В.Л., Жданова О.Л. Нахождение оценок энтропийных потенциалов в условиях неопределенности // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. 2017. С. 105-108.

31. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. Электрические измерения неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1975. 576 с.

32. Lazarev V.L. Representiv information models for monitoring and control in the conditions of uncertainty. *Proceedings of the 18th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015*. Saint Petersburg, Russia Publisher: IEEE. Pp. 54-57. DOI:10.1109/SCM.2015.7190408.

### References

1. Vinogradenko A.M., Ladonkin O.V., Yurov A.S. The system of monitoring of technical condition of military mobile objects with use of wireless technologies. *T-Comm: Telecommunications and transport*. 2015. No. 1, Pp. 51-55 (in Russian).

2. Abramov O.V., Dimitrov B.N. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach. *Reliability: Theory&Application*. 2017. Vol. 12. No. 4 (47), Pp. 39-48.

3. Abramov O.V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devises and Systems. *Automation and Remote Control*. 2016. Vol. 77. No 4, Pp. 594-603.

4. Budko P.A., Budko N.P., Vinogradenko A.M., Litvinov A.I. Realization of a kinetic control method and diagnostics of technical means. *Mechatronics, automation, control*. 2014. No. 8(162), Pp. 37-44 (in Russian).

5. 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*. No. 4, Pp. 71-101. Available at: <http://sccc.intelgr.com/archive/2017-04/04-Budko.pdf> (in Russian).

6. Borgonovo E. A new uncertainty importance measure. *Reliability Engineering & System Safety*. 2007. Vol. 6 (92). Pp. 771-784.

7. Akulenko L.D., Shmatkov A.M. Reduction of a dynamic object, optimum on speed, on an ellipsoid surface in multidimensional space. *DAN*. 2017. Vol. 477. No 1. Pp. 29-33. (in Russian).

8. Abramov O., Nazarov D. Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*. 2016. Pp. 91-94.

9. Fedorenko V.V., Vinogradenko A.M., Samoilenko V.V., Samoilenko I.V., Sharipov I.K. Minimization of the parametric uncertainty region for a system under repair. *Proceedings of the 21st International Conference on Soft Measurements and Computing*. 2018. Pp. 35-38 (in Russian).

10. Fedorenko V.V., Vinogradenko A.M. Optimization of area of parametrical uncertainty of the controlled radio-electronic equipment. *Soft Measurements and Computing*. 2018. Vol. 3. No. 2. Pp. 10-18 (in Russian).

11. Vinogradenko A.M. Ellipsoidal approximation of areas parametrical uncertainty of technical conditions of a robotic complex. *Robotics and technical cybernetics*. 2018. Vol. 20. No. 3. Pp. 53-60 (in Russian).

12. Bertsekas D.P., Rhodes J.B. Recursive state estimation for a setmembership description of uncertainty. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1971.V. AC-16. No. 2, Pp. 117-128.

13. Fedorenko V.V. Optimization of restoration of a technical control system in the conditions of uncertainty of her state. *Management information systems on railway transport*. 2001. No. 4. Pp. 56-58. (in Russian).

14. Kurzhansky A.B. Management and observation in the conditions of uncertainty. M.: Science. 1977. 392 p. (in Russian).

15. Ovseevich A.I., Taraban'ko Y.V. Obvious formulas for the ellipsoids approximating areas of approachability. *News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 2007. No 2, Pp. 33-34 (in Russian).

16. Chernousko F.L. Estimation of a phase condition of dynamic systems. M.: Science. 1988. 320 p. (in Russian).

17. Chernousko F.L. State estimation for dynamic systems. Boca Raton, Florida: CRC Press. 1994. 304 p.

18. Filippov A.F. Ellipsoidal estimates for a solution of a system of differential aequations. *Interval Computations*. 1992. Vol. 4. No 2. Pp. 6-17.

19. Kurzhanski A.B., Varaiya P. On ellipsoidal techniques for reachability analysis. Part I: External approximations. *Optimiz. Methods&Software*. 2002. Vol. 17. No. 2. Pp. 177-206.
20. Filippova T.F. The differential equations of ellipsoidal estimates of sets of approachability of the nonlinear dynamic operated system. *Works of Matamatiki Mekhaniki Institute of the Ural Office of the Russian Academy of Sciences*. 2010. Vol. 16. No 1. Pp. 223-232 (in Russian).
21. Filippova T.F., Berezina E.V. On state estimation approaches for uncertain dynamical systems with quadratic nonlinearity: theory and computer simulations. *Lecture Notes in Computer Science*. 2008. Vol. 4818. Pp. 326-333.
22. Polyak B.T., Nazin S.A., Durieu C., Walter E. Ellipsoidal parameter or state estimation under model uncertainty. *Automatica*. 2004. Vol. 7. No 40, Pp. 1171-1179. DOI:10.1016/j.automatica.2004.02.014.
23. Chernousko F. L. *State Estimation for Dynamic Systems*. Boca Raton: CRC Press. 1994. 304 p.
24. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Veselovsky A.P., Bur'yanov O.N. Model of the automated control system of technical condition of land robotic complexes. *Proceedings of the 2 scientific and practical conference «Problems of technical providing troops in modern conditions»*. 2017. Pp.145-149 (in Russian).
25. Vinogradenko A.M., Veselovsky A.P., Bur'yanov O.N. Operating control of technical condition of mobile electrotechnical objects. *Modern problems of creation and operation of Arms of the Military and Special Equipment. III-rd All-Russian scientific and practical conference. MSA*. 2016. Pp. 178-184 (in Russian).
26. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Goydenko V.K., Timoshenko L.I. Method of multidimensional statistical control of technical condition of the radio-electronic equipment on the basis of the integration of indications of several types of sensors. *Sensors & systems*. 2018. Vol. 223. No. 3. Pp. 3-11 (in Russian).
27. Lluís Ros, Assumpta Sabater, Federico Thomas. An ellipsoidal calculus based on propagation and fusion. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics – part b: cybernetics*. 2002. Vol. 32. No. 4. Pp. 430-442.
28. Lazarev V.L. The study of variations of parameters based on the values of entropy coefficient. *Materials of the XXI International conference Soft Measurements and Computing (SCM-2018)*. 2018. Pp. 7-10 (in Russian).
29. Lazarev V.L. *Theory of entropy potentials*. Saint-Petersburg. 2012. 127 p. (in Russian).
30. Lazarev V.L., Ivanov V.L., Zhdanova O.L. Finding estimates of the entropic potential in the context of uncertainty. *Low-temperature and food technologies in the XXI century*. 2017. P. 105-108 (in Russian).
31. Turchin A.M., Novitskiy P.V., Levshina E.S. *Electrical measurements of non-electrical quantities*. Leningrad. 1975. 576 p. (in Russian).
32. Lazarev V.L. Representiv information models for monitoring and control in the conditions of uncertainty. *Proceedings of the 18th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015*. Saint Petersburg, Russia Publisher: IEEE. Pp. 54-57. DOI:10.1109/SCM.2015.7190408.

**Статья поступила 15 мая 2020 г.**

### **Информация об авторах**

Винограденко Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент. Докторант кафедры Технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Тел. 8(981)833-92-31. E-mail: Vinogradenko.a@inbox.ru.

Адрес: 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 22, корп. 1, кв. 588.

Федоренко Владимир Васильевич – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры Прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского Федерального университета. Тел. 8(962)446-37-73. E-mail: fovin\_25@mail.ru.

Адрес: 355018, Россия, г. Ставрополь, ул. Кавалерийская, д. 31 б.

Будко Никита Павлович – инженер Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Тел. 8(911)010-92-64. E-mail: budko62@mail.ru.

Адрес: 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Бутлерова, д. 9, корп. 3, кв. 252.

## Modeling the evolution of the uncertainty domain of controlled systems based on an intelligent approach

A.M. Vinogradenko, V.V. Fedorenko, N.P. Budko

**Annotation.** Evaluation of the technical condition of electronic equipment is carried out at different stages of the equipment life cycle (testing, operation, restoration, etc.) and is reduced to the choice of a method of parametric synthesis. The technical condition of electronic equipment is determined by finding the characteristic parameters for a particular type of equipment within tolerances. As a rule, the technical condition of electronic equipment is characterized not by one parameter, but by a whole group of parameters. To take into account the correlation of parameters, and, as a consequence, to increase the reliability of the control, it is proposed to consider the area in the parameter space, in which the values of the controlled parameters are with a given probability. Therefore, when assessing the technical condition of radio-electronic equipment, determining its class of technical condition, it is proposed to use not an interval, but an area of uncertainty, the dimension of which is determined by the number of output parameters characterizing the technical condition of radio-electronic equipment as a whole. The lack, low reliability of the measuring information, the influence of external disturbances, the exact properties of which are unknown and can not be described by simple relations, leaves an imprint on the uncertainty region, blurring its boundaries. In this regard, the values of the controlled parameters of electronic equipment are always determined with a final error. In this regard, the aim of this work is to simulate the evolution (trajectory) of the field of parametric uncertainty of electronic equipment, which allows to determine (predict) the degradation of the technical condition of electronic equipment in the conditions of lack of measurement information and the effects of external disturbances. The expediency of ellipsoidal approximation of the uncertainty region of the state of radio-electronic equipment, in which the values of the measured output parameters are found with a given probability, is shown. The evolution of the technical condition of radio electronic equipment due to the departure of the controlled parameters beyond the established tolerances, when changing the class of technical condition is presented in the form of an affine transformation of an ellipsoid in the parameter space. A mathematical model of the evolution of the technical condition of electronic equipment when changing the class of technical condition using an analytical description of the process of moving the uncertainty in the parameter space is shown. A simulation of the evolution of parametric uncertainty areas of the technical condition of radio-electronic equipment based on an intelligent approach with a limited amount of measurement information, in a limited sample of parameter implementations.

**Keywords:** technical condition; electronic equipment; control parameters; area of parametric uncertainty; the entropy potential.

### Information about authors

Vinogradenko Aleksey Mihaylovich – PhD, Docent. Associate Professor at the department of technical ensuring communication and automation. Military academy of communication. Tel. 8(981)833-92-31. E-mail: Vinogradenko.a@inbox.ru.

Address: 195220, Russia, Saint-Petersburg, Gzhatskaya St., 22/1, ap. 588.

Fedorenko Vladimir Vasil'evich – PhD, Full Professor. Full Professor Department of Applied mathematics and mathematical modeling, North-Caucasus Federal University. Tel. 8(962)446-37-73. E-mail: fovin\_25@mail.ru.

Address: 355018, Russia, Stavropol, Kavaleriyskaya St, 31 B.

Budko Nikita Pavlovich – Engineer of Military academy of communication. Tel. 8(911)010-92-64. E-mail: budko62@mail.ru.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Butlerova St., 9/3, ap. 125.

**Для цитирования:** Винограденко А.М., Федоренко В.В., Будко Н.П. Моделирование эволюции области неопределенности контролируемых систем на основе интеллектуального подхода // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 80-90.

**For citation:** Vinogradenko A.M., Fedorenko V.V., Budko N.P. Modeling the evolution of the uncertainty domain of controlled systems based on an intelligent approach. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 80-90 (in Russian).

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 623.832

### Организация работ в условиях единичного производства печатных плат

Михайлюк П.П., Малаева Е.А.

**Аннотация. Постановка задачи:** проблема изготовления и монтажа печатных плат малой серийности для государственного заказа в интересах ВМФ. **Целью работы** является обоснование необходимости развития линий поверхностного монтажа печатных плат в том числе с технической и экономической эффективностью, что в свою очередь приведет к увеличению объема продаж конкурентоспособных изделий и модулей в условиях единичного производства. **Новизна:** состоит в описании процесса изготовления и монтажа печатных плат для единичного производства при решении приоритетных задач выполнения государственного контракта экономически и технически эффективным способом. **Результат:** описание методики организации производства печатных плат, которое приводит к увеличению объема продаж печатных плат, снижению брака при изготовлении. **Практическая значимость:** описание организации процесса производства печатных плат, которое можно использовать при написании технико-экономических обоснований. Упор в описании сделан на рассмотрение большей частью вопросов качества, технологии изготовления и организации процесса, которые косвенно влияют на экономическую и репутационную составляющую выполнения заказа.

**Ключевые слова:** организация производства, единичное производство, печатные платы, поверхностный монтаж, брак, серийность, металлизация.

#### Актуальность

В данный момент в России большинство заказов плат печатного монтажа имеет единичный или мелкосерийный характер. При этом платы сложные с большим количеством слоев и высокими требованиями к качеству. В данной статье описаны эффективные способы повышения качества выпускаемой продукции [1] в условиях ее единичного выпуска.

#### Постановка задачи

Печатные платы широко используются при разработке и постановке на серийное, единичное производство изделий радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). При этом для предприятий в большей степени характерна широкая номенклатура изделий при малой программе выпуска. В табл. 1 представлена характеристика типов производства.

Таблица 1 – Характеристика типов производства

Фактор	Единичное	Серийное
Номенклатура	Неограниченная	Ограниченная сериями
Повторяемость выпуска	Не повторяется	Периодическая повторяемость
Применяемость оборудования	Универсальное	Универсальное, частично специальное
Расположение оборудования	Групповое	Групповое и цепное
Разработка технологического процесса	Укрупненный метод	Поддетальная
Применяемый инструмент	Универсальный, в незначительной степени специальный	Универсальный и специальный
Закрепление деталей	Специально не закреплены	Определенные операции закреплены за установками
Квалификация рабочих	Высокая	Средняя
Взаимозаменяемость	Пригонка	Неполная
Себестоимость единицы продукции	Высокая	Средняя

В соответствии с ГОСТ Р 55490 – 2013 [2], устанавливаются требования к качеству и гарантиям надежности печатных плат. На рис. 1 представлено оборудование для производства печатных плат.



Рис. 1. Оборудование для производства печатных плат серийного и единичного производства  
а) печь конвекционного оплавления; б) автомат установки компонентов

При производстве используется две формы выводного монтажа: монтаж единичных изделий или серийное производство. С экономической точки зрения серийное производство печатных плат является более эффективным. Однако специфика изготавливаемой продукции требует большой номенклатуры различных плат небольшого количества.

Одним из определяющих факторов является уровень автоматизации, используемый для производства изделий, который может варьироваться от ручного монтажа в сквозные отверстия на печатной плате до полностью автоматизированных процессов. Основными этапами технологии сборки печатных плат с выводными элементами являются установка компонентов, подготовка выводов, пайка и последующая отмывка. Затраты на оплату труда, капитальные затраты, проектирование плат и объем производства определяют основные элементы данных этапов [3].

#### **Монтаж печатных плат единичного производства**

Рассмотрим изготовление и монтаж печатных плат в условиях единичного производства. При данном виде монтажа партии печатных плат перемещают между разнотипным оборудованием на различных этапах процесса. Рабочие станции при технологии выводного монтажа не всегда находятся в непосредственной близости друг от друга.

Для операций изготовления выводного монтажа печатных плат на различных этапах могут использоваться следующие типы операций:

- ручные;
- полуавтоматические;
- полностью автоматизированные.

Например, установка компонентов на этапе сборки печатного узла может быть полностью автоматизированной, но потребовать применения нескольких автоматов для вставки различных типов компонентов. Печатные платы, как правило, загружаются и выгружаются вручную. В табл. 2 рассмотрим преимущества и недостатки выводного монтажа отдельных печатных плат или их партий. Единичный монтаж печатных плат лучше всего подходит для предприятий, использующих технологию сборки печатных плат с разнообразным ассортиментом изделий при низких объемах производства продукции (например, разработка прототипа или платы с высокой надежностью) и необходима большая гибкость производства для технологии выводного монтажа печатных плат [4].

При разработке, проектировании и изготовлении плат у сторонних производителей по кооперации возникают два вида проблем: технические и экономические. К техническим проблемам можно отнести следующие: качество поставляемой продукции, отсутствие развития компетенции персонала, защита интеллектуальной собственности, наращивание объема производства. К экономическим проблемам можно отнести следующие: более высокая стоимость изготовления, потери прибыли от изготовления (уходит контрагенту), риски при изготовлении и предъявлении продукции у головного исполнителя. Кроме того, сроки изготовления, особенно в конце года из-за высокой загрузки, зачастую бывают неприемлемыми. Отсутствие собственной производственной базы затрудняет изготовление и увеличивает его стоимость. Ориентирование предприятий ВПК на изготовление гражданской продукции так же может быть выполнено только при условии наличия собственного производства, что позволяет сокращать потери, управлять качеством, стоимостью и развивать компетенции персонала [4].

Таблица 2 – Достоинства и недостатки выводного монтажа единичных печатных плат

Достоинства	Недостатки
При отключении 1 установки не останавливается вся линия	Длительность цикла
Гибкость процесса, возможность изменения маршрута изготовления изделия	При транспортировке между станциями возможно увеличение брака
Большая пригодность монтажа смешанного ассортимента изделий, низких объемов производства, в которых необходима замена оборудования или оснастки	Трудность в прогнозировании производительности сборочной линии при участии нескольких рабочих станциях в процессе монтажа

#### Линии поверхностного монтажа для опытного производства

При оценке качества продукции на изготовление передаются опытные образцы, разработанные в рамках опытно-конструкторских работ (ОКР). При этом документация зачастую содержит ошибки разработчика, которые могут быть выявлены и устранены на этапе подготовки производства или производстве изделия. При изготовлении опытных образцов часто возникает необходимость доработки, которая не всегда может быть спрогнозирована. Жесткость договорных отношений не позволяет проводить доработку уже изготовленной продукции. При изготовлении модулей по кооперации часто невозможно определить из-за чего происходит сбой работы модуля – из-за некачественных покупных комплектующих изделий (ПКИ), ошибок при монтаже, брака печатной платы или ошибок разработки, выявляемых при настройке модулей. Так же в рамках проведения Научно-исследовательской работы (НИР) и ОКР часто отсутствует отлаженная методика настройки плат и разработчик действует исходя из своего опыта и не формализуемых знаний.

При подготовке производства необходимо отработать технологию, которая привязана к конкретному оборудованию, оснастке. При передаче конструкторской документации (КД) сторонним изготовителям возникают вопросы по адаптации его к оборудованию контрагента. При распределении работ на несколько контрагентов эти вопросы мультиплицируются. При этом так же необходимо осуществлять конструкторское и технологическое сопровождение производства на всем его протяжении, что так же является скрытыми убытками, выражающимися в излишней скрытой трудоемкости, которую невозможно обосновать заказчику [5].

При размещении плат печатного монтажа на изготовление контрагенту и передаче КД на них (особенно при организации тендеров) возникает проблема защиты интеллектуальной собственности, которой удалось бы избежать при размещении на собственном производстве.

Прибыль по госконтрактам, которую можно заложить при выполнении распределяется следующим образом: при выполнении собственных работ прибыль может быть до 20%, а при размещении по кооперации собственная прибыль не более 1%. Модули электронные – это наукоемкие и дорогостоящие изделия, потери предприятия только в прибыли при размещении их у контрагентов могут составлять существенные суммы. Кроме того, разработчики недополучают фонд оплаты труда (ФОТ), который уходит контрагенту, при этом нагрузка по конструкторско-технологическому сопровождению изготовления остается.

При размещении заказа, особенно в конце года из-за неравномерной загрузки почти всех компаний возникает риск несвоевременного выполнения контракта. При этом если при производстве серийных изделий есть возможность перенести изготовление на первую половину года, то для ОКР такой возможности, как правило, нет. Поэтому на конец года падает большое количество работы, возникает необходимость вести технические переговоры с удаленным коллективом производителей, доведение проблем и принятие решений из-за этого затягивается, размывается ответственность при принятии технических решений, не ясно как относить затраты и за чей счет проводить доработку.

Операции контроля качества готовых изделий трудоемки, проводятся при помощи специальной техники (установки с «летающими пробниками» и рентген-установок представленных на рис. 2). При этом услуги у контрагента по контролю качества платные. Из-за этого для снижения цены часто решение об их включении в договор принимается еще до процесса изготовления. А сомнения в качестве возникают во время или после изготовления. Это требует дополнительной контрактации на проверку качества изделия, чего можно избежать при проведении работ на собственном производстве [5].



Рис. 2 Установка электрического контроля с «летающими» пробниками

Технический прогресс идет в сторону усложнения и миниатюризации производимой продукции, что в конечном итоге достигается именно из-за более сложных электронных модулей. При этом все чаще используется монтаж на гибком основании либо непосредственно в корпус. Можно прогнозировать с большой долей вероятности, что в дальнейшем загрузка сложными работами на линии поверхностного монтажа будет расти. Если предприятие на данном уровне развития отстанет от производственного и технологического прогресса из-за отсутствия оборудования, то с годами догнать передовые разработки будет гораздо сложнее.

Кроме опытных и производственных работ все чаще возникают ремонтные работы, когда надо качественно демонтировать и заменить элементы на платах. Это так же требует наличия у предприятия следующего оборудования:

- ремонтного центра;
- установки отмывки плат;
- установки нанесения влагозащитного покрытия.

При проведении ремонтных работ сложных модулей необходима постоянная консультация разработчиков. При организации таких работ у контрагента разработчик отвлекается от основного процесса своей работы, остается неурегулированным вопрос оплаты его труда. При проведении работ на собственной производственной базе этих проблем не возникает. Таким образом, при размещении заказов на ремонт и восстановление по кооперации предприятие несет не только прямые потери от неполученной прибыли, но и теряет ФОТ собственного персонала.

При проведении работ по разработке наукоемких изделий часто требуется провести предварительные работы по созданию технического задела, который можно использовать при дальнейшей разработке, провести внутренние ОКР. При относительно небольших затратах можно изготавливать и в дальнейшем моделировать работу перспективных изделий на стендах предприятия. При размещении этих работ у контрагента, данная работа затрудняется необходимостью постоянного финансирования и неопределенности ее сроков, а зачастую и результатов, так как опытная работа может быть прервана или ее результаты признаны отрицательными.

Для выхода предприятия на гражданский рынок в первую очередь становится вопрос стоимости изготовления. Наличие собственного производства позволяет управлять ценообразованием и возникающими рисками. Размещение на стороне всегда дороже собственного изготовления и труднее управляется и прогнозируется. То есть к более высокой стоимости прибавляются риски качества, выполнения сроков, репутационные потери.

При изучении опыта работы аналогичных линий поверхностного монтажа, можно сделать вывод, что за смену такая линия (при условии наличия полной комплектации и проведенной подготовки производства, в том числе написанных и отлаженных программ) может выпускать до 100 разнообразных модулей в день. Однако по факту в процессе производства всегда есть задержка в комплектации, возникают вынужденные простои при зарядании барабанов ПКИ и переналадке оборудования. При этом чем меньше серия, тем выше эти потери. Таким образом, при очень большой скорости установки элементов на плату есть другие факторы, сдерживающие скорость изготовления модулей, и они не всегда технические, а чаще организационные [5].

Стоимость продукции, изготавливаемой на производстве, зависит главным образом от стоимости исходных материалов и затрат на их создание и определяется количеством технологических операций, их сложностью, объемом выпускаемой продукции, сложностью оборудования и систем управления, серийностью производства. При прочих равных условиях, решающий фактор, определяющий стоимость, — серийность производства её оборудования. Стоимость снижается при использовании нормализованных узлов, механизмов и инструментов, при централизованном изготовлении систем транспортирования и управления, сокращении длительности монтажа и наладки. Снижение стоимости расширяет экономически целесообразные области их применения, позволяет вводить в действие, необходимые для технического перевооружения промышленности.

Производительность зависит от времени, затрачиваемого на непосредственное осуществление рабочего процесса, времени на выполнение вспомогательных перемещений, времени на переналадку, наладку и восстановление работоспособности линии. Сокращение времени рабочего процесса достигается применением высокопроизводительной технологии. Уменьшение времени на вспомогательные перемещения достигается сокращением числа



холостых перемещений или увеличением их скорости, совмещением во времени холостых перемещений с рабочим процессом. Для оценки производительности важен показатель цикловой непрерывности работы, который определяется отношением времени выполнения рабочего процесса к общему времени цикла. Время на подналадку, переналадку и ремонт сокращается при использовании автоматического регулирования, повышении стабильности рабочих инструментов и своевременной их замене [6].

На производствах с большим количеством использования ручного монтажа необходимо, так же учитывать, что при внедрении автоматизированных линий произойдет необходимость уменьшения производственного персонала. Таким образом, суммарно линия поверхностного монтажа не приведет к существенному увеличению рабочих и инженеров.

### Вывод

Внедрение оборудования линии поверхностного монтажа на предприятиях ВПК с целью обеспечения полного технологического цикла изготовления печатных узлов позволит получить дополнительную прибыль за счет выполняемых работ на собственном производстве, существенно ускорить выполнение Контрактов, позволит самостоятельно управлять качеством и рисками, повысит компетентность сотрудников, привлечет квалифицированные кадры и увеличит конкурентоспособность предприятия обеспечив перспективу роста.

### Литература

1. Федеральная программа «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2013- 2020 годы. Режим доступа: <http://www.gosprog.ru/gosprog-019/>.
2. ГОСТ Р 55490 – 2013 «Платы печатные. Общие технические требования к изготовлению и приемке».
3. Елшин Ю. М. Система проектирования печатных плат ГРИФ // EDA Express. 2002. № 5. С. 28–34.
4. Тупяков В. Повышение эффективности проектов в электронной промышленности // Печатный монтаж. № 2-3 (21-22), 2009. Стр. 29-31.
5. Сускин В.В. Основы технологии поверхностного монтажа. - Рязань.: Изд-во Узорочье, 2001. – 160 с.
6. Демин С., Зенцов Д. Выбор варианта оснащения участка поверхностного монтажа // Технологии в электронной промышленности. № 1, 2005 г.

### References

1. Federal program "Development of electronic component base and radio electronics" for 2013-2020. Mode of access: <http://www.gosprog.ru/gosprog-019/>
2. GOST R 55490– 2013 "printed circuit Board. General technical requirements for manufacturing and acceptance". Galetsky F. Features of production of printed circuit boards in Russia. Electronic components. 2001. No. 5. Pp. 18-26 (in Russian).
3. Elshin Yu. M. System of design of printed circuit boards VULTURE. EDA Express. 2002. # 5. Pp. 28-34. 3. Kotar V. Integrated approach-the basis of effective technological modernization. Surface installation. No. 5 (85), October, 2010, pp. 4-7 (in Russian).
4. Tupyakov V. Increase of efficiency of projects in the electronic industry. Printed circuit. No. 2-3 (21-22), 2009, pp. 29-31 (in Russian).
5. Suskin V. V. Fundamentals of surface mounting technology. - Ryazan.: Publishing house of the Church, 2001. - 160 p. (in Russian).
6. Demin S., Zentsov D. Choice of equipment option for surface mounting section. Technologies in electronic industry. No. 1, 2005 (in Russian).

Статья поступила 8 мая 2020 г.

### Информация об авторах

Михайлюк Павел Петрович – Технический директор ПАО «Интелтех», кандидат технических наук, доцент кафедры института Фундаментальной подготовки и технологических инноваций Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов: организация производства. Тел.: +79112571665. E-mail: mihayluk@inteltech.ru.

Малаева Екатерина Александровна – Инженер-технолог 1 категории ПАО «Интелтех», аспирант Томского политехнического университета по направлению Техносферная безопасность. Область научных интересов: организация производства. Тел.: +79131107837. E-mail: Katrina.malaeva@bk.ru.

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

### Organization of work in the conditions of a single production of printed circuit boards for the state order in the Navy

P.P. Mikhaylyuk, E.A. Malaeva

**Annotation. Setting the task:** the problem of manufacturing and installing small serial printed circuit boards for state orders in the interests of the Navy. **The purpose** of the work is to justify the need to develop surface installation lines of printed circuit boards, including with technical and economic efficiency, which in turn will lead to an increase in sales of competitive products and modules in single production conditions. **Novelty:** a description of the process of manufacturing and mounting printed circuit boards for single production to solve the priority tasks of fulfilling the state contract in a cost-effective and technically efficient way. **The result** is a description of the procedure for organizing the production of printed circuit boards, which leads to an increase in sales of printed circuit boards, a decrease in scrap during manufacture. **Practical significance:** a description of the organization of the production process of printed circuit boards, which can be used in the writing of feasibility studies. The description focuses on most of the quality issues, manufacturing technology and process organization that indirectly affect the economic and reputational component of order fulfillment.

**Keywords:** organization of production; single production; printed circuit board; surface installation; scrap; seriality; metallization.

### Information about Authors

Mihailuk Pavel Petrovich – Technical Director of PJSC «Inteltech», candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Institute of Fundamental Training and Technological Innovation, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.. Research interests: organization of production. Tel.: +79112571665. E-mail: mihayluk@inteltech.ru.

Malaeva Ekaterina Aleksandrovna – 1st category industrial engineer, PJSC «Inteltech», graduate student of Tomsk Polytechnic University in the field of Technosphere safety. Research interests: production organization. Tel.: +79131107837. E-mail: Katrina.malaeva@bk.ru.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya, 8.

**Для цитирования:** Михайлюк П.П., Малаева Е.А. Организация работ в условиях единичного производства печатных плат для государственного заказа в ВМФ // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 91-97.

**For citation:** Mikhaylyuk P.P., Malaeva E.A. Organization of work in the conditions of a single production of printed circuit boards for the state order in the Navy. Means of communication equipment. 2020. No 2 (150). P. 91-97 (in Russian).

## Для авторов

### Требования к оформлению статей, представляемых в редакцию

1. Статья представляется в формате **Word 97/2000/XP** с расширением **doc**.
2. Рекомендуемый объем статьи – **до 10 страниц**. Публикацию статей большего объема необходимо согласовать с редакцией в отдельном порядке, с пояснением причины, по которым увеличен рекомендуемый объем.
3. Размер страницы – А4. Все поля (верхнее, нижнее, правое и левое) по 2 см.
4. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman, размер 12 pt, междустрочный интервал – 1.0, абзацный отступ 1,25 см, без отступов между абзацами. В основном тексте допускается курсив. Латинские буквы для обозначений набираются курсивом, греческие, русские буквы и цифровые индексы – прямым шрифтом.
5. В начале статьи индекс УДК, выровнен по левому краю. После УДК – пропуск строки.
6. Название статьи выполняется полужирным шрифтом и выравнивается по центру страницы без абзацного отступа. Оно должно точно и однозначно характеризовать содержание статьи. Не рекомендуется использовать в названии сокращения, кроме общепринятых в предметной области. Название предоставляется в редакцию на русском и английском языках. Точка после заглавия не ставится. После названия статьи следует пропуск строки.
7. Инициалы и Фамилии авторов указываются через запятую в соответствии личному вкладу в написание статьи, выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. После фамилий авторов следует пропуск строки.
8. Аннотация выполняется на русском и английском языке, размер шрифта 11 pt, курсив, абзацный отступ 1,25 см. Заголовки элементов аннотации выделяются жирным шрифтом. За аннотацией следует пропуск строки.
9. Ключевые слова оформляются так же, как и аннотация, и должны содержать основные понятия и термины, употребляемые в статье. Ключевые слова формулируются так, чтобы при семантическом поиске по ним можно было найти данную статью заинтересованным ученым. После абзаца с ключевыми словами – пропуск строки.
10. Для структуризации статьи рекомендуется основной текст разделить по частям с условными подзаголовками «Введение», «Постановка задачи», «Результаты моделирования» и пр., «Выводы», выполняемые полужирным шрифтом с выравниванием по центру без абзацного отступа. Перед подзаголовками пропуск строки.
11. Таблицы должны занимать всю ширину текстового поля. В случае малого размера таблиц, допускаются таблицы шириной меньшей, чем ширина текстового поля. Таблицы выравниваются по центру листа без абзацного отступа. Текст внутри таблиц выполняется шрифтом от 10pt до 12pt, в зависимости от степени информационной загрузки. Таблицы нумеруются по порядку упоминания, а их названия оформляются в виде «Таблица 1 – Название таблицы» и выравниваются по центру листа без абзацного отступа. Если таблица выполняется на нескольких страницах, необходимо выставлять признак заголовка для первой строки с наименованиями столбцов, либо дублировать первую строку с наименованиями на следующей странице. По тексту статьи таблица обозначается, например, как табл. 1.
12. Рисунки выполняются в виде внедренных объектов векторной графики, выполненных в формате MS Visio (**vsd**) или в форматах метафайлов Windows (**wmf** или **emf**). В случае невозможности представления рисунков в векторном виде, рисунки выполняются в растровых форматах **jpg** или **png**. Нумерация рисунков последовательная по мере упоминания в статье в виде «Рис. 1. Название рисунка». Номер и название рисунка выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. До рисунка и после его названия вставляется пропуск строки. Допускается выполнение рисунков, расположенных параллельно друг другу на одном горизонтальном уровне, при этом рисунки и их названия помещаются в таблицу с прозрачными границами. По тексту статьи рисунки обозначаются, например, как рис. 1.
13. Формулы выполняются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation 3.0. Формулы могут быть набраны в основном тексте со вставкой специальных математических символов через меню «вставка-символ». **Запрещается набирать формулы во встроенном редакторе формул Microsoft Office 2007 и выше**. Основной шрифт формул, набираемых в MathType и Microsoft Equation 3.0, 12 pt. Формулы выравниваются по центру без абзацного отступа. При необходимости переноса формул используют общепринятую математическую запись переноса. Формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи, должны быть пронумерованы. Номер формулы проставляют с правого края страницы. Не следует вставлять пропуски строки до и после формул.
14. Список используемых источников оформляется следующим образом – «Литература», который выполняется полужирным шрифтом, по центру страницы без абзацного отступа. Нумерация ссылок определяется порядком их упоминания в статье. Список литературы: от 15 до 40 наименований, из них самоцитирований должно быть не более 20%. В числе источников желательно не менее 50% иностранных (для статей на английском языке – 15% российских). Состав источников должен быть актуальным и, по возможности, содержать не менее 8 статей из научных журналов не старше 10 лет, из них 4 – не старше 3 лет. Ссылки должны быть только на статьи, патенты, книги и статьи из сборников трудов. В списках литературы не размещать ГОСТы, рекомендации, диссертации, авторефераты и другую нормативную и непериодическую документацию. Эти данные можно указывать в теле статьи в скобках или как постраничные сноски. Список литературы оформляется по ГОСТ 7.052008.
15. После подзаголовка «References» литература дублируется на английском языке. После списка литературы и References следует пропуск строки.
16. После списка References указывается дата первого представления статьи в редакцию. Данный абзац выделяется полужирным шрифтом, выравнивание по правому краю страницы.
17. В конце статьи указывается информация о каждом соавторе: фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, ученое звание, должность и полное наименование организации, телефон и e-mail.
18. Статья завершается текстовым блоком, дублирующим название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотацию статьи и ключевые слова на английском языке. Данный текстовый блок начинается с новой страницы и его элементы оформляются так же, как соответствующие элементы на русском языке в начале статьи.

## ПОЗДРАВЛЯЕМ!



Исполнилось 75 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, заместителя генерального директора ПАО «Интелтех», директора научно-технического центра «Разработки информационных и телекоммуникационных технологий и систем управления» Яшина Александра Ивановича.

Александр Иванович Яшин родился 26 июня 1945 года в Челябинске. В 1963 г. после окончания с отличием Ленинградского металлургического техникума – техник-металлург. 1964-1967 г. – служба в армии и резкая смена интересов, как выяснилось уже навсегда. Он поступает в Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ) им. В.И.Ульянова/Ленина/ на факультет «Автоматики и телемеханики», который заканчивает в 1975 г. Начинается трудовая и научная деятельность в лаборатории под руководством проф. Роберта Ивановича Юргенсона, крупнейшего специалиста в области телемеханики, заложившего основы научного направления, связанного с созданием цифровых систем обработки и передачи информации. Творческая обстановка и общение с выдающимися учеными определили направления деятельности и основные интересы от проблем помехоустойчивого кодирования, разработки имитационных моделей для управления в автоматизированных информационных системах до создания геоинформационных моделей и методов поддержки управления и темы диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук, а затем в 2002 г. – доктора технических наук. За заслуги в научной деятельности А.И. Яшину, профессору кафедры автоматизации систем обработки информации, в 2004 г. присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

И снова крутой поворот в судьбе и творческой деятельности, желание получить реальный результат приводит А.И. Яшина в ОАО (ПАО) «Интелтех», где раскрылся его талант, широкая эрудиция, стремление к постоянному расширению знаний, жажда дела, целеустремленность в достижении новых высоких целей.

В 2006 г. Александр Иванович Яшин, успешный ученый, имеющий за плечами выполненные научно-исследовательские работы для ВМФ, ГРАУ в области применения геоинформационных технологий в автоматизированных системах управления силами и средствами войск и флота. Им разработаны основы теории построения систем поддержки принятия решений в территориально-распределенных системах в условиях нечеткой, неполной и частично противоречивой исходной информации. Одним из результатов этой работы явилась разработка и внедрение ряда автоматизированных систем технического контроля пограничной службы России.

Велико участие А.И. Яшина в подготовке научных и технических кадров, подрастающего поколения студентов и научных кадров высшей квалификации – кандидатов и докторов наук, являясь профессором СПбГЭТУ «ЛЭТИ», преподает курсы «Исследование операций» и «Геоинформационные управляющие системы», является экспертом специализированного совета ВАК РФ, экспертом Минобрнауки РФ, членом двух докторских диссертационных советов.

А.И. Яшин заслуженно удостоен почетных званий «Почетный работник высшего профессионального образования РФ», «Почетный радист РФ».

Интеллигентность Александра Ивановича, его порядочность, тактичность и доброжелательность, искренняя отзывчивость в сочетании с глубокой профессиональной культурой и широтой интересов определили глубокое и искреннее уважение коллег.

Жизненный путь А.И. Яшина – яркий пример беззаветного служения науке и стране.

Редакционный совет и редколлегия журнала присоединяются к поздравлениям родных, друзей, коллег и учеников юбиляра, к добрым словам и пожеланиям здоровья и долгих лет жизни, новых творческих успехов в научной и производственной деятельности, высказанные в эти знаменательные дни в адрес Александра Ивановича Яшина.