

3(70)/2014

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

**Founder**

«Information and Control Systems», Ltd.

**Editor-in-Chief**

M. Sergeev

Dr. Sc. Tech., Professor, St.-Petersburg, Russia

**Deputy Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc. Tech., Professor, St.-Petersburg, Russia

**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Council**

L. Chubraeva

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Kozlov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

B. Meyer

PhD, Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc. Phys.-Math., Novosibirsk, Russia

V. Simakov

Dr. Sc. Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

**Editorial Board**

V. Anisimov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc. Phys.-Math., Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc. Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin

Dr. Sc. Tech., Professor, Minsk, Belarus

V. Khimenko

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Melekhin

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Z. Yuldashev

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc. Phys.-Math., Vologda, Russia

**Editor: A. Larionova****Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** A. Koleshko, M. Chernenko**Layout and composition:** N. Karavaeva**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, E-mail: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Tel.: +7 - 812 494 70 02

The Journal was registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation. Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002. Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR) due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd., JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue: № 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

© Corporate authors, 2014

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS**

**Viktorov D. S., Chislov S. G.** *Method of Correction of the Non-Linear Distortions Entered by an Analog Key in Probing Signals* 2

**Turubanov M. A., Shishlakov V. F., Shyshlakov A. V.** *Impulse Control System for Combined Solar and Wind Installation with Superconductor Equipment* 8

**Zakharova O. L., Kirsanova J. A., Kniga E. V., Zharinov I. O.** *Algorithms and Software of Testing Onboard Digital Computer Systems Integrated Modular Avionics* 19

**SYSTEM AND PROCESS MODELING**

**Kuchmin A. Yu.** *Modeling of Equivalent Stiffness of Adaptive Platforms with the Parallel Structure Executive Mechanism* 30

**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES**

**Balonin N. A., Marley V. E., Sergeev M. B.** *New Opportunities of the Mathematical Network for Collaborative Research and Modeling in the Internet* 40

**Marakhovsky V. B.** *CMOS Implementation of the Trainee's Threshold Logical Element. Part I. Design and Training Diagram* 47

**Kolchin I. V., Filippov S. N.** *The Architecture of Bare-Metal Real-Time Microhypervisor and Automated Measurement of Time Response* 57

**Shoshmina I. V.** *A Methodology of Eliciting Context Requirements to Program Logic Control Systems* 68

**INFORMATION SECURITY**

**Bezzateev S. V., Voloshina N. V., Sankin P. S.** *Safety Analysis Methodology of Complex Systems Taking Into Account the Threats to Information Security* 78

**Boyko A. A., Djakova A. V.** *Method of Developing Test Remote Information-Technical Impacts on Spatially Distributed Systems of Information-Technical Tools* 84

**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION**

**Cheprukov Yu. V., Socolov M. A.** *Correlation Characteristics and Application of Some Binary Codes* 93

**Alekseev M. O.** *On the Detection of Algebraic Manipulations by Means of Multiplication Operation* 103

**INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS**

**Allakhverdiyeva N. R.** *Development of a Method for Improving the Accuracy of the Measuring Channel* 109

**INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION**

**D'yachuk P. P., Loginov D. A., Karabalykov S. A.** *Synergetic Approach to Management of Educational Activity in Verbal Problem Environments* 118

**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS**

**Tichonov E. P.** *Adaptive Filtering Algorithms Electrocardiogram High Time Resolution Part I. Background Information and Analysis Approach to Solving the Problem* 125

**CHRONICLES AND INFORMATION**

**IV International Forum «TELECOM NETWORKS 2.0. Sharing, Engineering, Outsourcing, Development & Metering»** 132

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

134

Submitted for publication 07.04.14. Passed for printing 17.06.14. Format 60×84/8. Offset paper. Phototype SchoolBookC. Offset printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI.  
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia  
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI.  
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Учредитель  
ООО «Информационно-управляющие системы»

Главный редактор  
М. Б. Сергеев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора  
Е. А. Крук,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный секретарь  
О. В. Муравцова

Редакционный совет:  
Председатель А. А. Оводенко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Н. Васильев,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Н. Козлов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
К. Кристоделу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США  
Б. Мейер,  
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария  
Ю. Ф. Подоплекин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. В. Симаков,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ  
Л. Фортуна,  
д-р наук, проф., Катания, Италия  
А. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Л. И. Чубраева,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ  
Ю. И. Шокин,  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ  
Р. М. Юсупов,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:  
В. Г. Анисимов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Б. П. Безручко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ  
Н. Блаунштейн,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль  
А. Н. Дудин,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь  
А. И. Зейфман,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ  
Г. Н. Мальцев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Ф. Мелехин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. И. Хименко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. А. Шалыто,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. П. Шепета,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
З. М. Юлдашев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова  
Корректор: Т. В. Звертановская  
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко  
Компьютерная верстка: Н. Н. Караваева

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.  
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2014

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ**

**Викторов Д. С., Числов С. Г.** Метод коррекции нелинейных искажений, вносимых аналоговым ключом в зондирующие сигналы 2

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

**Турубанов М. А., Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В.** Импульсная система управления комбинированной солнечно- и ветроэнергетической установкой со сверхпроводниковым оборудованием 8  
**Захарова О. Л., Кирсанова Ю. А., Книга Е. В., Жаринов И. О.** Алгоритмы и программные средства тестирования бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики 19

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ**

**Кучмин А. Ю.** Моделирование эквивалентной жесткости адаптивных платформ с исполнительными механизмами параллельной структуры 30

**ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА**

**Балонин Н. А., Марлей В. Е., Сергеев М. Б.** Новые возможности математической сети для коллективных исследований и моделирования в Интернете 40  
**Мараховский В. Б.** КМОП-реализация обучаемого порогового логического элемента. Часть 1: Проектирование и схема обучения 47  
**Колчин И. В., Филиппов С. Н.** Архитектура автономного микро-гипервизора реального времени и автоматизированное измерение его временных характеристик 57  
**Шошмина И. В.** Методика составления контекстных требований к программным системам логического управления 68

**ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ**

**Беззатеев С. В., Волошина Н. В., Санкин П. С.** Методика расчета надежности сложных систем, учитывающая угрозы информационной безопасности 78  
**Бойко А. А., Дьякова А. В.** Способ разработки тестовых удаленных информационно-технических воздействий на пространственно распределенные системы информационно-технических средств 84

**КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ**

**Чепруков Ю. В., Соколов М. А.** Корреляционные характеристики и применение некоторых бинарных R3-кодов 93  
**Алексеев М. О.** Об обнаружении алгебраических манипуляций с помощью операции умножения 103

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

**Аллахвердиева Н. Р.** Разработка метода повышения точности измерительного канала 109

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ**

**Дьячук П. П., Логинов Д. А., Карабалыков С. А.** Синергетический подход к управлению учебной деятельностью в вербальных проблемных средах 118

**УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ**

**Тихонов Э. П.** Адаптивные алгоритмы фильтрации и фрагментации электрокардиограмм высокого временного разрешения. Часть 1: Исходные сведения и анализ подхода к решению проблемы 125

**ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ**

**IV Международный Форум «TELECOM NETWORKS 2.0. Sharing, Engineering, Outsourcing, Development & Metering» 132**

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

134

Сдано в набор 07.04.14. Подписано в печать 17.06.14. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,0. Уч.-изд. л. 20,1. Тираж 1000 экз. Заказ 258.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 621.39

## МЕТОД КОРРЕКЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ, ВНОСИМЫХ АНАЛОГОВЫМ КЛЮЧОМ В ЗОНДИРУЮЩИЕ СИГНАЛЫ

Д. С. Викторов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, преподаватель

С. Г. Числов<sup>а</sup>, преподаватель

<sup>а</sup>Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, Тверь, РФ

**Постановка проблемы:** реализация потенциальных характеристик любых радиолокационных станций зависит от стабильности параметров гетеродинных сигналов и методов их формирования. Для формирования зондирующих сигналов с изменяемыми параметрами широко применяются цифровые синтезаторы частот зондирующих сигналов. Однако при цифровом формировании сигналов возникают нелинейные искажения, обусловленные операциями цифро-аналогового преобразования и преобразования в аналоговом ключе, которые приводят к образованию паразитных копий сжатого сигнала при согласованной обработке зондирующих сигналов в приемнике, что, в конечном счете, ограничивает применение цифровых синтезаторов частот зондирующих сигналов в специализированных и многофункциональных радиолокационных станциях. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является разработка метода коррекции нелинейных искажений, вносимых аналоговым ключом в зондирующие сигналы. **Результаты:** исследования показали, что во временной области динамические ошибки преобразования привязаны к моментам переключения разрядов сигнала управления цифро-аналоговым преобразователем, соответственно, и к моментам переключения уровней квантования выходного сигнала. Данная характерная черта динамических ошибок позволяет осуществить коррекцию нелинейных искажений при помощи стробирования. Особенность последнего заключается в том, что в моменты переключения уровней квантования на время, равное длительности переходных процессов, цифро-аналоговый преобразователь отключается с помощью аналогового ключа. Таким образом, динамические ошибки цифро-аналогового преобразования «вырезаются» из зондирующего сигнала. Сигнал управления аналоговым ключом имеет задержку относительно тактового сигнала, равную длительности переходных процессов в цифро-аналоговом преобразователе, и длительность стробирующего импульса, не превышающую разности половины периода тактового сигнала и удвоенного значения длительности переходных процессов. В свою очередь коррекция нелинейных искажений зондирующего сигнала, вносимых аналоговым ключом, осуществляется за счет внесения предсказаний в формируемый сигнал при помощи цифрового корректора, передаточная функция которого является обратной передаточной функции аналогового ключа. Обобщенная передаточная функция последовательно соединенных корректора и аналогового ключа представляется степенным рядом с новыми результирующими коэффициентами. Удерживая конечное число членов ряда и учитывая, что условием коррекции является равенство единице результирующего коэффициента при линейном члене ряда и нулю при членах ряда с высшими степенями, получено рекуррентное соотношение для определения коэффициентов корректора. Таким образом, предложенный метод цифровой коррекции нелинейных искажений, вносимых в зондирующий сигнал аналоговым ключом, позволяет увеличить реальный динамический диапазон цифрового синтезатора частот зондирующих сигналов и повысить качество синтезируемых сигналов. **Практическая значимость:** метод может быть применен для коррекции нелинейных искажений в цифровых синтезаторах частот, используемых в радиолокации, системах связи и высокоточной измерительной технике.

**Ключевые слова** — метод цифровой коррекции, цифровой синтезатор частот, аналоговый ключ.

### Введение

На современном этапе развития радиолокационных средств требуется создание многофункциональных и специализированных радиолокационных станций, способных быстро изменять свои характеристики вслед за быстро меняющейся целевой и помеховой обстановкой. Важнейшей составной частью современных радиотехнических систем являются цифровые синтезаторы частот зондирующих сигналов (ЦСЧЗС). С их помощью формируются различные сложные сигналы, применяемые для обнаружения целей и измерения их параметров. Интерес разработчиков к использованию в создаваемых и перспективных радиолокационных станциях ЦСЧЗС обусловлен рядом объективных причин:

— ЦСЧЗС, по сравнению с аналоговыми, имеют высокую стабильность параметров формируемых сигналов и низкий уровень фазовых шумов;

— сочетание широких функциональных возможностей с высокой скоростью переключения и малым шагом перестройки по частоте (доли герц) позволяет с использованием одного и того же устройства формировать сигналы различной частоты с высокой точностью установки и скоростью переключения;

— быстродействие современной элементной базы позволяет формировать гетеродинные сигналы в широком рабочем диапазоне частот, составляющем сотни мегагерц.

Однако ЦСЧЗС свойственны нелинейные искажения, возникающие за счет статических и динамических ошибок цифро-аналогового преобразования и преобразования формируемого сигнала в аналоговом ключе (АК).

Применение АК в ЦСЧЗС обусловлено рядом причин.

Во-первых, верхняя граница рабочего диапазона современных ЦСЧЗС, не использующих

однополосную балансную модуляцию, не превышает  $1/(2T_d)$ , где  $T_d$  — период тактового сигнала. Причиной тому является существенная неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) на частотах свыше  $1/(2T_d)$  (рис. 1, а).

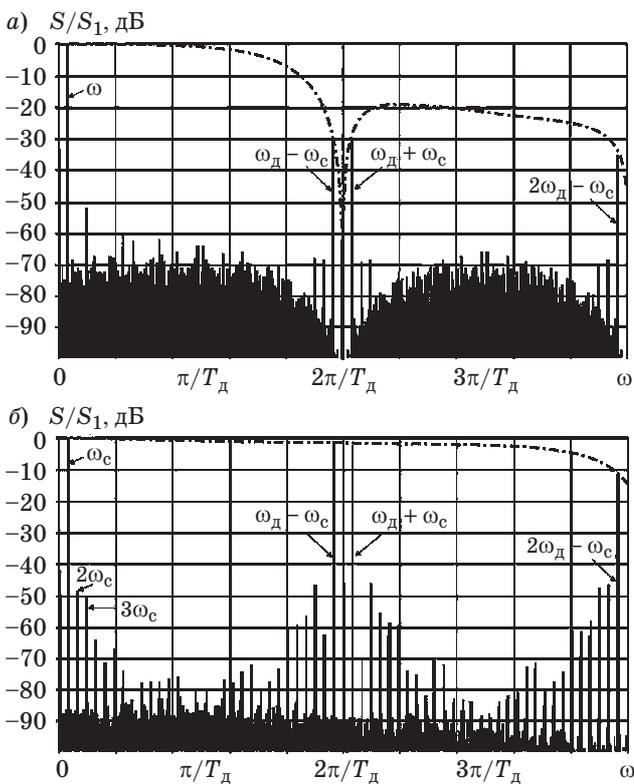
Повышение верхней границы рабочего диапазона ЦСЧЗС при помощи однополосной балансной модуляции [1] или компенсации боковых составляющих гармоник за счет вычисления выборок формируемого колебания в разные моменты времени [2] требуют наличия квадратурных каналов. К тому же наличие балансного сложения (или вычитания) на выходе не позволяет получить подавление противоположной боковой составляющей в широком диапазоне более чем на 40–50 дБ.

Стробирование формируемого сигнала в АК приводит к тому, что длительность его выборок на выходе АК ( $U_{AK}$ ) (рис. 2, а) становится больше, чем длительность его выборок на входе АК ( $U_{ЦАП}$ ) (рис. 2, в).

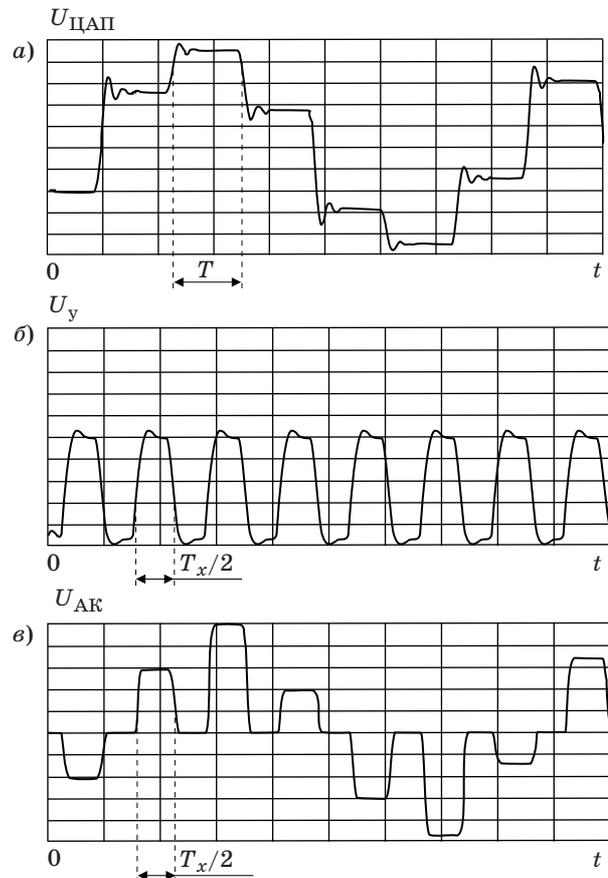
Поскольку основной лепесток АЧХ последовательно соединенных ЦАП и АК расширяется (рис. 1, б) по сравнению с АЧХ отдельно взятого

ЦАП (см. рис. 1, а), можно существенно снизить неравномерность АЧХ ЦСЧЗС в целом. С учетом дискретного характера спектра формируемого сигнала это позволяет при помощи полосового фильтра выделять его гармоники из дискретных подспектров, расположенных на частотах более высоких, чем  $1/(2T_d)$  (см. рис. 1, б), тем самым увеличивая границы рабочего диапазона ЦСЧЗС без использования квадратурных каналов.

Во-вторых, при преобразовании цифровых отсчетов синтезируемого сигнала в аналоговые при помощи ЦАП неизбежно возникают динамические ошибки цифро-аналогового преобразования, к которым относятся различия во времени включения и выключения уровней квантования ЦАП, а также проникновение управляющих сигналов ЦАП на его выход через паразитные емкостные и индуктивные связи. Динамические ошибки цифро-аналогового преобразования приводят к появлению большого количества паразитных дискретных составляющих в рабочем диапазоне частот (см. рис. 1, а). Причем уровень данных дискретных составляющих растет с увеличением соотношения синтезируемой и тактовой частоты и может достигать 55–60 дБ.



■ **Рис. 1.** АЧХ ЦАП и спектр формируемого сигнала: а — АЧХ отдельно взятого ЦАП и спектр формируемого сигнала без коррекции; б — АЧХ последовательно соединенных ЦАП и АК и спектр формируемого сигнала с коррекцией



■ **Рис. 2.** Сигналы ЦАП: а — сигнал на выходе ЦАП; б — управляющий сигнал; в — скорректированный сигнал на выходе ЦАП

Результаты исследований показали, что источником динамических ошибок является сигнал управления ЦАП [3], из чего следует, что подобные ошибки невозможно устранить известными методами коррекции.

### Цифровой метод коррекции

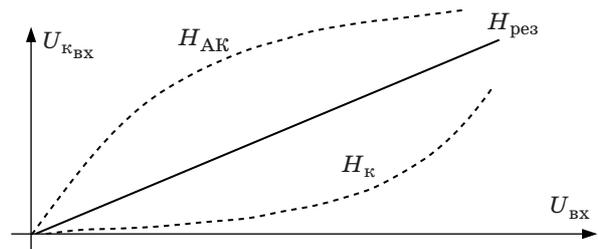
Цифровой метод коррекции предполагает внесение корректирующих поправок в цифровые отсчеты формируемого сигнала, что в свою очередь приводит к изменению сигнала управления ЦАП, которому будут соответствовать уже новые значения динамических ошибок.

Используя то свойство динамических ошибок, что во временной области они совпадают с моментами переключения ЦАП из одного квантованного значения напряжения формируемого сигнала на его выходе в другое (см. рис. 2, а), можно утверждать, что наиболее эффективным методом устранения данного вида ошибок является их стробирование, при котором под воздействием управляющего сигнала (рис. 2, б) АК на время переходных процессов закрывается и отключает выход ЦАП от выхода ЦСЧЗС (см. рис. 2, в). В результате спектр выходного сигнала очищается от динамических ошибок ЦАП (см. рис. 1, б).

В качестве элементной базы, которая в настоящее время применяется для построения АК, служат полевые транзисторы. Использование данного типа транзисторов обусловлено малым уровнем собственных шумов, соизмеримым с тепловым шумом, высоким входным сопротивлением, малыми токами утечки в цепи управления, свойством обратимости данных электронных приборов и высоким быстродействием.

В результате того, что сопротивление канала полевого транзистора нелинейно зависит от значений напряжения, действующего между стоком и истоком ( $U_{\text{ЦАП}}$ ) (см. рис. 2, а), а также между стоком и затвором ( $U_y$ ) (см. рис. 2, б) [4], передаточная функция (ПФ) АК является нелинейной. Это приводит к появлению паразитных дискретных составляющих, кратных частоте синтезируемого сигнала ( $\omega_c$ ) в рабочем диапазоне частот (см. рис. 1, б). Однако количество дискретных составляющих, требующих коррекции, при правильно выбранной амплитуде входного напряжения, а также минимального дифференциального сопротивления канала транзистора не превышает нескольких единиц.

Задача коррекции нелинейных искажений зондирующего сигнала на выходе АК сводится к тому, чтобы в схему формирования сигнала (рис. 3) был добавлен некоторый элемент (корректор), ПФ  $H_k$  которого являлась бы обратной ПФ АК  $H_{\text{АК}}$ . В таком случае результирующая ПФ  $H_{\text{рез}}$  корректора и АК будет представляться



■ Рис. 3. Графическое представление задачи коррекции нелинейных искажений сигнала на выходе АК

в виде прямой линии, что уже говорит об отсутствии продуктов нелинейных искажений сигналов на выходе такой системы.

Линеаризацию результирующей ПФ можно выполнить с помощью как аналоговых, так и цифровых корректирующих устройств [5]. Однако аналоговая коррекция обладает рядом существенных недостатков. Из них основным является невозможность осуществлять адаптивную коррекцию при изменении параметров ПФ нелинейного элемента с течением времени под воздействием внешних факторов. Использование аналоговых элементов в корректирующих цепях также требует прецизионной настройки и точного подбора параметров электронных приборов. Из-за этого аналоговые корректоры, по сути, являются уникальными устройствами для каждого из образцов ЦСЧЗС, пусть даже и однотипных, что позволяет говорить о нетехнологичности такого подхода к коррекции нелинейных искажений.

Цифровые корректоры не имеют указанных недостатков, могут быть размещены непосредственно в формирователе цифровых отсчетов ЦСЧЗС и обладать ПФ, обратной ПФ АК. В таком случае задача коррекции нелинейных искажений, вносимых АК, сводится к определению параметров ПФ корректора.

Пусть ПФ АК аппроксимируется степенным полиномом, тогда дискретные отсчеты сигнала на его выходе представляются выражением

$$\dot{U}_{\text{АК}} = \sum_{r=1}^R \dot{a}_r (\dot{U}_{\text{АКвх}})^r, \quad (1)$$

где  $\dot{U}_{\text{АКвх}}$  — отсчеты сигнала на входе АК;  $\dot{a}_r$  — коэффициенты степенного полинома, аппроксимирующего ПФ АК, идентифицировать которые можно по результатам измерения параметров продуктов нелинейных искажений [6].

Передаточная функция корректора также представляется степенным полиномом, и дискретные отсчеты сигнала на его выходе, соответственно, равны

$$\dot{U}_k = \sum_{i=1}^{\infty} \dot{b}_i (\dot{U}_{\text{квх}})^i, \quad (2)$$

где  $\dot{b}_i$  — коэффициенты степенного полинома, аппроксимирующего ПФ корректора;  $\dot{U}_{\text{Квх}}$  — отсчеты сигнала на входе корректора.

Поскольку используется цифровой метод коррекции, то корректирующее устройство размещается перед нелинейным элементом, коим является АК (рис. 4). В таком случае отсчеты формируемого сигнала на выходе АК представляются следующим выражением:

$$\dot{U}_{\text{АК}} = \sum_{r=1}^R \dot{a}_r \dot{U}_{\text{К}}^r = \sum_{r=1}^R \dot{a}_r \left[ \sum_{i=1}^m \dot{b}_i \dot{U}_{\text{Квх}}^i \right]^r. \quad (3)$$

Предполагая, что при определении параметров ПФ корректора, аппроксимируемой бесконечным, в общем случае, степенным рядом, удерживаем  $m$  первых его членов, выражение (3) с учетом формулы полинома [7] примет вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{АК}} &= \sum_{r=1}^R \dot{a}_r \left[ \sum_{i=1}^m \dot{b}_i \dot{U}_{\text{Квх}}^i \right]^r = \sum_{r=1}^R \dot{a}_r \times \\ &\times \sum_{k_1+k_2+\dots+k_m=r} C_r(k_1, k_2, \dots, k_m) (\dot{b}_1 \dot{V}^1)^{k_1} \times \\ &\times (\dot{b}_2 \dot{V}^2)^{k_2} \dots (\dot{b}_m \dot{V}^m)^{k_m}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\dot{V} = \dot{U}_{\text{Квх}}$  — отсчеты формируемого сигнала, поступающие на вход корректора.

Из выражения (4) следует, что в соответствие ему можно поставить некоторый эквивалентный степенной полином

$$\dot{U}_{\text{АК}} = \sum_{j=1}^m \dot{d}_j \dot{V}^j, \quad (5)$$

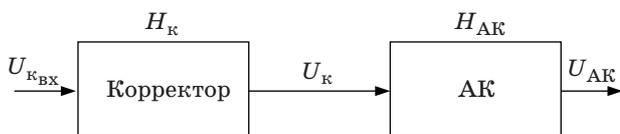
где  $\dot{d}_j$  — некоторый коэффициент степенного полинома, аппроксимирующего результирующую ПФ корректора и нелинейного элемента.

Из (5) видно, что необходимым условием коррекции является соблюдение следующих равенств:

$$\dot{d}_1 = 1; \dot{d}_j = 0 \text{ при } j = 2, \dots, m. \quad (6)$$

Это означает, что в выражении (5) результирующей коэффициент полинома при основной составляющей должен быть равен единице, а значения остальных результирующих коэффициентов должны равняться нулю.

В качестве примера предположим, что порядок полиномов, описывающих ПФ корректора и нелинейного элемента, ограничивается пятью. В таком



■ Рис. 4. Схема размещения корректирующего устройства

случае, раскрывая в (5) выражения, стоящие под знаками суммы, и приводя подобные, получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{АК}} &= \dot{a}_1 \dot{b}_1 \cdot \dot{V} + (\dot{a}_1 \dot{b}_2 + \dot{a}_2 \dot{b}_1^2) \dot{V}^2 + \\ &+ (\dot{a}_1 \dot{b}_3 + 2\dot{a}_2 \dot{b}_1 \dot{b}_2 + \dot{a}_3 \dot{b}_1^3) \dot{V}^3 + \\ &+ (\dot{a}_1 \dot{b}_4 + \dot{a}_2 (2\dot{b}_1 \dot{b}_3 + \dot{b}_2^2) + \\ &+ 3\dot{a}_3 \dot{b}_1^2 \dot{b}_2 + \dot{a}_4 \dot{b}_1^4) \dot{V}^4 + (\dot{a}_1 \dot{b}_5 + 2\dot{a}_2 (\dot{b}_1 \dot{b}_4 + \dot{b}_2 \dot{b}_3) + \\ &+ 3\dot{a}_3 (\dot{b}_1^2 \dot{b}_3 + \dot{b}_1 \dot{b}_2^2) + 4\dot{a}_4 \dot{b}_1^3 \dot{b}_2 + \dot{a}_5 \dot{b}_1^5) \dot{V}^5. \end{aligned} \quad (7)$$

Откуда, учитывая (6), т. е. приравнивая коэффициент при основной составляющей к единице, а остальные к нулю, получим, что коэффициенты корректора с первого по пятый описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{b}_1 &= \frac{1}{\dot{a}_1}; \\ \dot{b}_2 &= -\frac{1}{\dot{a}_1} (\dot{a}_2 \dot{b}_1^2); \\ \dot{b}_3 &= -\frac{1}{\dot{a}_1} (2\dot{a}_2 \dot{b}_1 \dot{b}_2 + \dot{a}_3 \dot{b}_1^3); \\ \dot{b}_4 &= -\frac{1}{\dot{a}_1} (2\dot{a}_2 \dot{b}_1 \dot{b}_3 + \dot{a}_2 \dot{b}_2^2 + 3\dot{a}_3 \dot{b}_1^2 \dot{b}_2 + \dot{a}_4 \dot{b}_1^4); \\ \dot{b}_5 &= -\frac{1}{\dot{a}_1} (2\dot{a}_2 \dot{b}_1 \dot{b}_4 + 2\dot{a}_2 \dot{b}_2 \dot{b}_3 + 3\dot{a}_3 \dot{b}_1^2 \dot{b}_3 + \\ &+ 3\dot{a}_3 \dot{b}_1 \dot{b}_2^2 + 4\dot{a}_4 \dot{b}_1^3 \dot{b}_2 + \dot{a}_5 \dot{b}_1^5). \end{aligned} \quad (8)$$

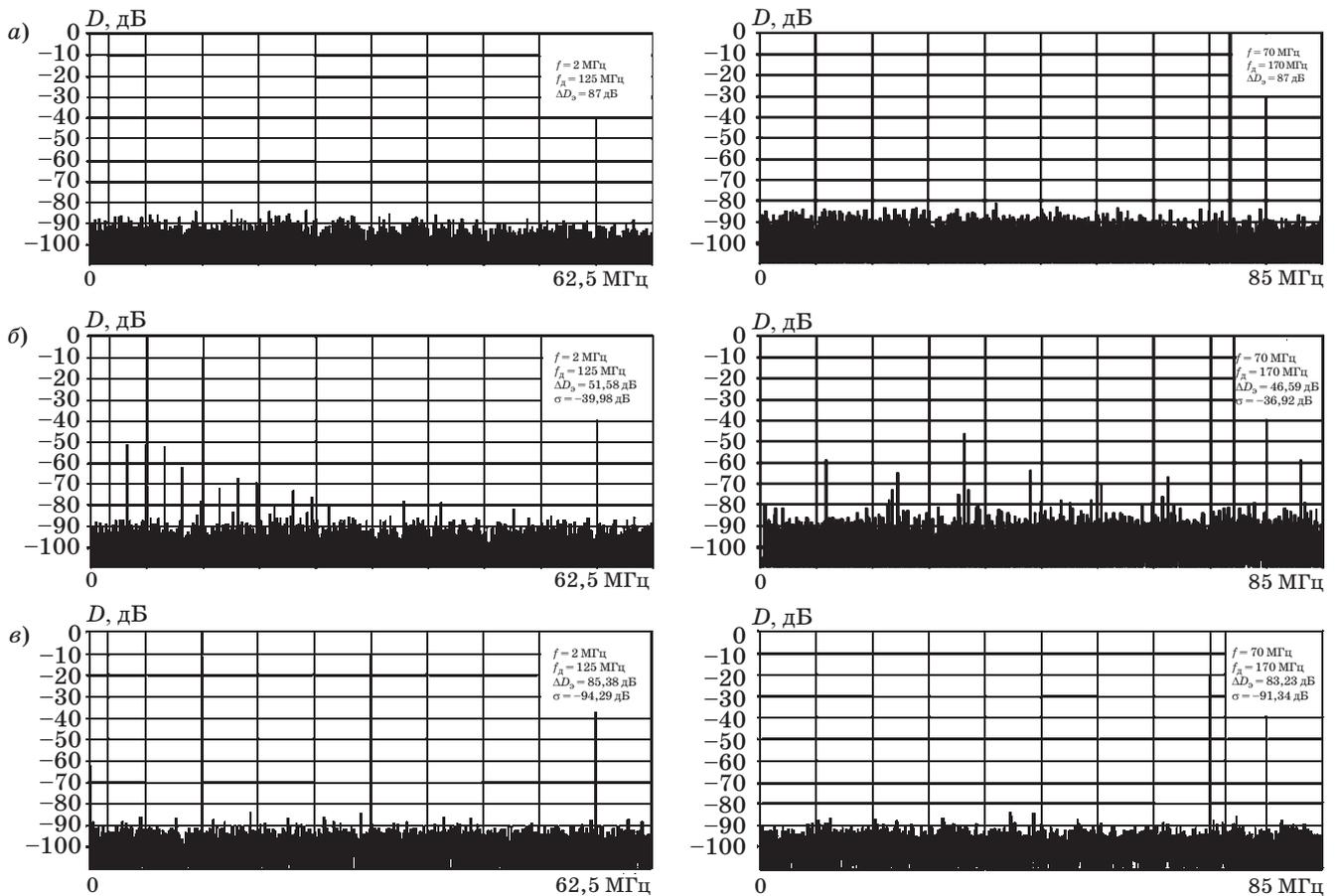
Из (8) видно, что полученные выражения, начиная со второго, можно объединить следующим рекуррентным соотношением:

$$\begin{aligned} \dot{b}_i &= -\frac{1}{\dot{a}_1} \sum_{i=2}^m \dot{a}_i C_i(k_1, k_2, \dots, k_{m-1}) \dot{b}_1^{k_1} \dot{b}_2^{k_2} \dots \dot{b}_{m-1}^{k_{m-1}}, \\ i &= \overline{2, m-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $C_i(k_1, k_2, \dots, k_{m-1}) = \frac{i!}{k_1! k_2! \dots k_{m-1}!}$  — полиномиальный коэффициент.

В общем случае выражение (9) представляет собой бесконечный ряд, однако с практической точки зрения целесообразно брать в рассмотрение ограниченное число членов ряда —  $m$ , но не менее чем количество дискретных составляющих в спектре искажений, уровень которых превышает допустимое значение.

Таким образом, обобщенная ПФ последовательно соединенных корректора и АК представляется степенным рядом с новыми результирующими коэффициентами. Удерживая конечное число членов ряда и учитывая, что условием коррекции является равенство единице результирующего коэффициента при линейном члене ряда и нулю при членах ряда с высшими степенями, мы получили рекуррентное соотношение для определения коэффициентов корректора.



■ Рис. 5. Спектры сигналов для соотношений синтезируемых и тактовых частот 0,016 (слева) и 0,41 (справа): а — спектры идеально квантованных сигналов на выходе 10-разрядного ЦАП; б — спектры синтезируемых сигналов с нелинейными искажениями на выходе АК; в — спектры синтезируемых сигналов с учетом цифровой коррекции нелинейных искажений

### Заключение

В результате математического моделирования с использованием полученных выражений были рассчитаны спектры и показатели качества формируемых сигналов.

Анализ результатов моделирования (рис. 5, а-в) показывает, что предлагаемый метод цифровой коррекции нелинейных искажений достаточно эффективен, так как позволяет:

1) уменьшить дискретные составляющие спектра нелинейных искажений, тем самым увеличить реальный динамический диапазон ЦСЧЗС ( $\Delta D$ ), доведя его практически до потенциально достижимого значения, определяемого значением динамического диапазона идеального ЦАП ( $\Delta D_0$ );

2) повысить качество синтезируемых сигналов, что выражается в уменьшении среднего квадрата ошибки формирования сигнала ( $\sigma$ ) до значения, соизмеримого с уровнем шумов квантования.

Предлагаемый метод цифровой коррекции нелинейных искажений предполагает применение корректирующего устройства, размещаемого перед АК, что позволяет увеличить реальный динамический диапазон ЦСЧЗС и повысить качество синтезируемых сигналов.

Метод может быть использован для коррекции нелинейных искажений в ЦСЧЗС, используемых в радиолокации [8, 9], системах связи и высокоточной измерительной технике.

### Литература

1. Шапиро Д. Н., Паин А. А. Основы теории синтеза частот. — М.: Радио и связь, 1981. — 246 с.

2. Тирней Дж., Рейдер К. М., Голд Б. Цифровые синтезаторы частот // Зарубежная радиоэлектроника. 1972. № 3. С. 54–74.

3. Волков Е. А. Математическая модель аналогового ключа и результаты анализа коррекции динамических ошибок цифро-аналогового преобразования: сб. науч.-метод. материалов / 2ЦНИИ МО РФ. Тверь, 2006. № 3(502). С. 74–81.
4. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1977. — 672 с.
5. Богданович Б. М. Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах. — М.: Связь, 1980. — 280 с.
6. Волков Е. А., Викторов Д. С. Идентификация параметров нелинейной передаточной функции аналогового ключа цифрового формирователя сигналов: сб. науч.-метод. материалов XXXIV ВНК/ВА ВКО. Тверь, 2005. С. 12–19.

7. Семендяев К. А., Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1986. — 544 с.
8. Филонов А. А., Васильев О. В., Богданов А. В. Методика построения динамических моделей радиальных скоростей и ускорений пары воздушных целей, летящих в сомкнутом боевом порядке // Изв. РАН. ТИСУ. 2007. № 4. С. 21–27.
9. Пат. 2419815 РФ, МПК G01S 13/52 (2006.01). Способ сопровождения воздушной цели из класса «самолет с турбореактивным двигателем» / А. В. Богданов, О. В. Васильев, И. Н. Исаков, А. Г. Ситников, А. А. Филонов (РФ); — № 2009140853/09; заявл. 03.11.2009; опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15. — 12 с.

UDC 621.39

Method of Correction of the Non-Linear Distortions Entered by an Analog Key in Probing Signals

Viktorov D. S.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Lecturer, viktorov.dmitry@yandex.ru

Chislov S. G.<sup>a</sup>, Lecturer, chislov\_sergey@mail.ru

<sup>a</sup>Г. К. Zhukov Military Academy of Aerospace Defense, 50, Zigarev St., 170022, Tver, Russian Federation

**Purpose:** Implementation of potential characteristics of any RLS depends on stability of parameters of heterodyne signals and methods of their formation. Digital synthesizers of frequencies of probing signals are widely applied to form probing signals with in-out parameters. However in case of digital formation of signals there are non-linear distortions caused by operations of digital-to-analog conversion and conversion in an analog key which lead to formation of parasitic copies of an oblate signal during coordinated processing of probing signals in a receiver that, eventually, restricts application of digital synthesizers of frequencies of probing signals in specialized and multifunctional RLS. One of the effective solutions of this problem is development of a method of correction of non-linear distortions entered by an analog key in probing signals. **Results:** Researches have shown that in a time domain dynamic errors of conversion are linked to the moments of switching discharges of a control signal by a digital-to-analog converter accordingly and by the moments of switching levels of quantization of an output signal. This characteristic feature of dynamic errors allows carrying out a correction of non-linear distortions by means of time gating. The feature is that at the moments of switching levels of quantization for a time period equal to duration of transient phenomena a digital-to-analog converter is switched off by means of an analog key. Therefore, dynamic errors of digital-to-analog conversion "enter" from a probing signal. A control signal of an analog key has a time delay of a relatively clock signal equal to duration of transient phenomena in a digital-to-analog converter and duration of a gating impulse which does not exceed differences of half a period of a clock signal and a doubled value of duration of transient phenomena. In its turn, correction of non-linear distortions of a probing signal contributed by an analog key is carried out due to introduction of pre-distortions into a created signal by means of a digital corrector which transfer function is an inverse transfer function of an analog key. A generalized transfer function of sequentially connected corrector and analog key is represented a power series with new resultant coefficients. Retaining a finite number of row members and considering equality to unit of a resultant coefficient at linear row members and to zero in case of row members with higher degrees is a condition of correction, the obtained recurrence relation for determination of corrector coefficients is received. Therefore, the proposed method of digital correction of non-linear distortions contributed to a probing signal by an analog key allows to increase real dynamic range of a digital synthesizer of frequencies of probing signals and to enhance quality of synthesizable signals. **Practical relevance:** The method can be used for correction of nonlinear distortions in digital frequency synthesizers applied in radar-location, communication systems and high-precision measuring equipment.

**Keywords** — Method of Digital Correction, Digital Frequency Synthesizer, Analog Key.

References

1. Shapiro D. N., Pain A. A. *Osnovy teorii sinteza chastot* [Bases of the Theory of Synthesis of Frequencies]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1981. 246 p. (In Russian).
2. Tirney J., Raider K. M., Gold B. Digital Synthesizers of Frequencies. *Zarubezhnaia radioelektronika*, 1972, no. 3, pp. 54–74 (In Russian).
3. Volkov E. A. The Mathematical Model of an Analog Key and Results of the Analysis of Correction of Dynamic Errors of Digital-to-Analog Transformation. *Collection of scientific and methodical materials*, Tver, 2 Central Research Institute Publ., 2006, no. 3(502), pp. 74–81 (In Russian).
4. Stepanenko I. P. *Osnovy teorii tranzistorov i tranzistornykh skhem* [Of a Basis of the Theory of Transistors and Transistor Schemes]. Moscow, Energiia Publ., 1977. 672 p. (In Russian).
5. Bogdanovich B. M. *Nelineinye iskazheniia v priemno-usilitel'nykh ustroistvakh* [Nonlinear Distortions in Reception and Intensifying Devices]. Moscow, Sviaz' Publ., 1980. 280 p. (In Russian).
6. Volkov E. A. Viktorov D. S. Identification of Parameters of Nonlinear Transfer Function of an Analog Key of the Digi-

- tal Shaper of Signals. *Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov XXXIV voenno-nauchnoi konferentsii* [Collection of scientific and methodical materials XXXIV Military and Scientific Conference]. Tver, Voennaia akademiia vozdushno-kosmicheskoi oborony Publ., 2005, pp. 12–19 (In Russian).
7. Semendyaev K. A. Bronstein I. N. *Spravochnik po matematike dlia inzhenerov i uchashchikhsia vtuzov* [The Reference Book on Mathematics for Engineers and Pupils of Technical Colleges]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 544 p. (In Russian).
8. Filonov A. A. Vasilyev O. V., Bogdanov A. V. Methodology of Creation of Dynamic Models of Radial Speeds and Accelerations of Couple of the Air Targets Flying in a Close Fighting Order. *Izvestiia RAN. Teoriia i sistemy upravleniia*, 2007, no. 4, pp. 21–27 (In Russian).
9. Bogdanov A. V., et al. *Sposob soprovozhdeniia vozdushnoi tseli iz klassa "samolet s turboreaktivnym dvigatелеm"* [Way of Maintenance of an Air Target from a Class "the Plane with a Turbojet"]. Patent Russian, no. 2009140853/09, 2011.