

УДК 621.396

В.Н. Почерняев<sup>1</sup>, В.С. Повхлеб<sup>2</sup>, В.В. Зайченко<sup>2</sup><sup>1</sup> Одесская национальная академия связи имени А.С. Попова, Одесса<sup>2</sup> Киевский колледж связи, Киев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ТРОПОСФЕРНО-РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СТАНЦИЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕШАЮЩИХ СИГНАЛОВ

В данной статье рассмотрено решение задачи по повышению устойчивости системы управления мобильной многоканальной станцией СВЧ диапазона нового типа путем использования ортогональных кусочно-непрерывных функций в качестве сигналов управления. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие полученные теоретические результаты с разработкой действующего экспериментального образца пульта управления с генератором функций Уолша-Пели. Результаты эксперимента позволяют рекомендовать разработанную систему управления мобильной многоканальной станцией СВЧ диапазона для практического использования.

**Ключевые слова:** мобильная цифровая тропосферно-радиорелейная станция, устойчивость системы управления, ортогональные кусочно-непрерывные функции, генератор функций Уолша-Пели, преднамеренные и непреднамеренные помехи.

### Вступительная часть

**Постановка задачи.** В районах стихийных бедствий, техногенных катастроф, нештатных ситуаций, возникающих на сети связи, а также в зоне проведения антитеррористической операции наряду с другими мобильными радиосистемами СВЧ диапазона становится актуальным использование комбинированных средств связи.

При построении полевых транспортных сетей связи, расположение пунктов ретрансляции в которых сильно зависит от географического положения и рельефа местности, становится необходимым одновременное использование мобильных станций как радиорелейного, так и тропосферного типов.

Перспективным направлением развития радиолокационных систем (РЛС) является многопозиционные радиолокационные системы. Современная территориально-распределенная РЛС разнесены два приемных узла и передающий узел с удалением друг от друга на расстоянии 100 ... 250 км. Такая радиолокационная система существенно повышает эффективность обнаружения летательных аппаратов, в том числе изготовленных по технологии "Stealth". Незаменимыми средствами связи для данной радиолокационной системы могут быть радиосистемы СВЧ диапазона комбинированного типа, способные решать задачи по передаче информации между приемными и передающим узлами с возможностью передачи каналов на пункты управления. Поэтому, создание комбинированной цифровой тропосферно-радиорелейной станции на единой мобильной платформе, как указано выше, вполне оправдано.

**Анализ литературных источников.** Сейчас широко исследуются новые системы связи, в которых несущая колебания имеет вид функций Уолша. Так в [1] показано преимущество сигналов Уолша в качестве несущих по сравнению с гармоническими несущими при построении помехозащищенных радиосистем. Последние применения функций Уолша: анализ геофизической информации, анализ данных подводного сейсмографии, биофизика и медицина, системы кодирования голоса и изображений, устройства распознавания образов, оптическая спектроскопия, радиолокация и голография [2, 3]. Так, перспективным направлением уменьшения сложности алгоритмов вычисления апостериорных вероятностей символов блоковых кодов, является использование высокопроизводительного алгоритма быстрого спектрального преобразования в базисе Уолша-Адамара [4]. Цифровые системы передачи могут работать в условиях сильных преднамеренных помех, что выдвигает серьезные требования к помехоустойчивости их систем управления. Распространения сигналов в городских условиях сопровождается многолучевостью и замираниями. Так, ортогональная система функций Уолша нашла применение в системах сотовой связи с кодовым разделением каналов CDMA по стандарту IS-95. В данной системе связи в качестве цифровых несущих используется 64-разрядная последовательность функций Уолша – Адамара [5]. Жесткие требования по устойчивости сигналов управления, которые должны отвечать надежности, помехоустойчивости и живучести определяют задачу применения несинусоидальных сигналов [6–8]. Такими сигналами, например, являются ортогональные кусочно-непре-

рывные функции Уолша, имеющие различные формы представления. Поэтому в данной работе предлагается в качестве сигналов управления применить функции Уолша-Пели [9].

**Нерешенные вопросы.** Особенностью мобильной цифровой тропосферно-радиорелейной станции является то, что для ее реализации могут быть использованы следующие схемы построения: единая система управления для тропосферной и радиорелейной компонент; единая система управления и частотообразования; единая система управления, частотообразования и единый передающий тракт обеих компонент [10]. Новизна разработки такого

решения подтверждена государственной научно-технической экспертизой [10]. Учитывая оставшийся научно-технический потенциал Украины, производство таких станций может быть освоено отечественной промышленностью при том в нескольких конструктивных вариантах, как показано на рис. 1 и рис. 2. Например, конструктив, показанный на рис. 1, может быть реализован на базе модернизированной радиорелейной станции Р-409 и разработанной мобильной малогабаритной цифровой тропосферной станции на базе двухосного полуприцепа. Конструктив, показанный на рис. 2, разработан на общей автомобильной платформе.



Рис. 1. Мобильная цифровая тропосферно-радиорелейная станция (конструктивный вариант 1)



Рис. 2. Мобильная цифровая тропосферно-радиорелейная станция (конструктивный вариант 2)

Однако для конструктива, представленного на рис. 2, существенной является оценка ЭМС радиоизлучающих средств, расположенных на единой мобильной платформе.

Особенностью является то, что среди этих радиоизлучающих средств расположен передатчик с  $P_{\text{вых}} \geq 1$  кВт [11, 12]. Поэтому техническая реализация такого сложного телекоммуникационного ком-

плекса как мобильная цифровая тропосферно-радиорелейная станция требует научной проработки целого ряда подсистем, входящих в данный комплекс.

Работа данного телекоммуникационного комплекса может происходить в сложной обстановке под влиянием непреднамеренных и преднамеренных помех. Отсюда предъявляются повышенные требо-

вания к устойчивости системы управления станцией. Работе в таких условиях наиболее соответствуют сигналы, которые описываются ортогональными кусочно-непрерывными функциями.

Следует отметить, что современные системы связи СВЧ диапазона развиваются путем комплексного формирования команд управления при функционировании в различных сетевых конфигурациях с применением несинусоидальных функций в различных форматах. Поэтому, разработка системы управления, основанной на сигналах, описываемых кусочно-непрерывными функциями определенного класса, такого сложного телекоммуникационного комплекса, как мобильная цифровая тропосферно-радиорелейная станция, является актуальной темой исследования.

Для подтверждения предложенных теоретических результатов возникает необходимость разработки действующего экспериментального образца пульта управления с генератором функций Уолша-Пели, что позволит проверить правильность выдвинутых допущений.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является экспериментальное исследование устойчивости системы управления для нового типа мобильной телекоммуникационной системы СВЧ диапазона при воздействии различных мешающих сигналов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- создание экспериментального образца пульта управления с генератором функций Уолша-Пели, который воспроизводит формирования управляющих сигналов системы управления МЦТрРРС и их устойчивость к воздействию мешающих сигналов;
- проведение экспериментального исследования по использованию сигналов управления, основанных на ортогональных кусочно-непрерывных функциях Уолша-Пели, и разработка соответствующих рекомендаций.

### Основная часть

На рис. 3 представлена функциональная схема, иллюстрирующая организацию работы системы управления станцией МЦТрРРС.

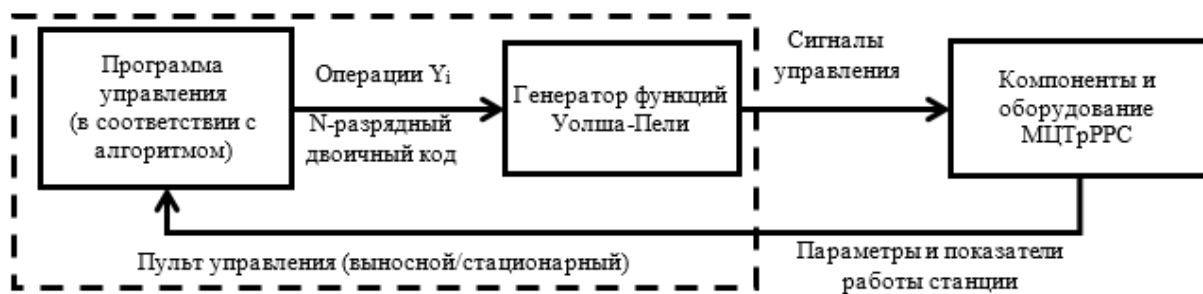


Рис. 3. Функциональная схема системы управления МЦТрРРС

Для исследования формирования функций Уолша-Пели генератором в их соответствии с двоичными кодами операций был создан демонстрационный макет, который реализует работу генератора функций Уолша-Пели внутри выносного/стационарного пульта как основного элемента системы управления. В программе системы управления, разработанной в среде LabView, которая является интерфейсом для взаимодействия оператора со станцией, в соответствии с алгоритмом функционирования [13], выдаются операции  $Y_i$ , которые должны далее формировать сигналы управления для всех компонентов МЦТрРРС [14]. Как было обосновано в [9], наиболее оптимальными, в данном случае, являются сигналы, соответствующие ансамблю функций Уолша-Пели. Для их формирования необходимо в пульт управления включить генератор функций Уолша-Пели. Варианты построения таких генераторов рассмотрены в [15]. Ключевым моментом взаимодействия программы системы управления и генератора функций Уолша-Пели является то, что каждой операции из алгоритма управления, которая представ-

лена в двоичном позиционном коде, соответствует «свой» номер функции из ансамбля системы Уолша-Пели.

Структурная схема разработанного образца пульта управления с генератором функций Уолша-Пели представлена на рис. 4. Он состоит из трех основных модулей:

- панели управления, содержащей набор необходимых регуляторов, которые позволяют имитировать приём сигналов, формируемых выносным/стационарным пультом под руководством программы управления в соответствии с алгоритмом функционирования станцией;
- генератора функций Уолша-Пели в виде микропроцессорного модуля;
- панели индикации, содержащей набор светодиодных индикаторов, которые позволяют отобразить форму функции Уолша-Пели формируемой генератором.

Основным компонентом является микропроцессорный модуль, построенный на базе микросхемы МК ATMEGA328 (Arduino Nano V.3).

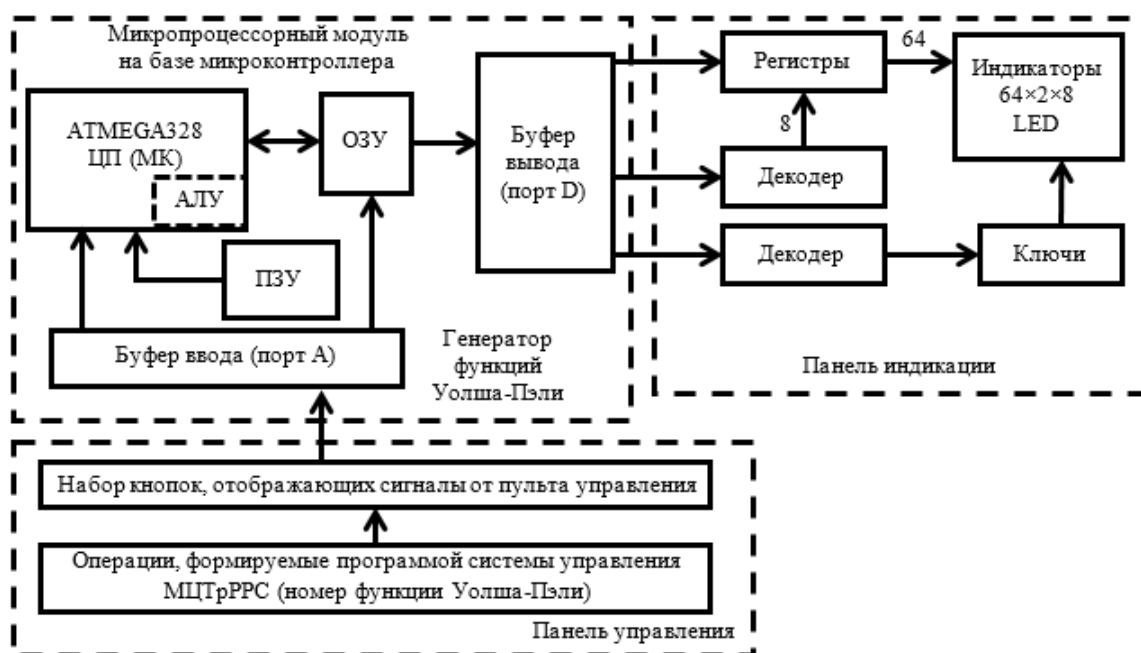


Рис. 4. Структурная схема экспериментального образца с генератором функций Уолша-Пели

Данный модуль поддерживает 2048 байт оперативной памяти и 32 кбайт памяти программ. Для управления светодиодными индикаторами разработана схема динамической индикации с помощью 8-ми разрядных параллельных регистров, так как модуль Arduino имеет 14 цифровых и 8 аналоговых входов-выходов. Каждый вывод данного микропроцессорного комплекта (МПК) может программироваться как на вход, так и на выход двоичного сигнала. Программа микроконтроллера рассчитана на индикацию кода логических единиц верхним рядом светодиодов, и на индикацию кода логических нулей нижним рядом светодиодами созданного экспериментального образца. Индикация соответствует той функции Уолша-Пели, которая в данный момент генерируется. Поэтому, в панели управления экспериментальным образцом на 16 строк предусмотрен 64-х разрядный регистр. В каждой строке имеется 64 светодиода. В данном случае более приемлемым является использование динамической индикации. Этому способствуют следующие факторы: небольшое количество выводов порта ввода/вывода МПК и уменьшенное потребление электропитания.

Внешний вид экспериментального образца пульта управления с генератором функций Уолша-Пели показан на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид

Результаты исследования были проверены экспериментально.

В ходе экспериментального исследования была смоделирована ситуация, когда на синусоидальный сигнал и сигнал на основе функций Уолша-Пели, влияли гармонических, импульсная с постоянными параметрами, импульсная случайного характера, хаотичная последовательность (рис. 6).

Гармоническая помеха может возникать в результате сложной электромагнитной обстановки на самом объекте.

Импульсная с постоянными параметрами и импульсная случайного характера могут возникать как непреднамеренные помехи природного или техногенного характера. Хаотическая последовательность моделирует преднамеренную помеху прицельного характера.

Отметим, что гармоническая и вышеназванные импульсные помехи также могут иметь преднамеренный характер. Формирование типовой электромагнитной обстановки осуществлялось в соответствии с рекомендациями МСЭ Р.372 «Радиопомехи» [16].

Для подтверждения теоретических расчетов проведено компьютерное моделирование в программной среде Electronics Workbench при различных воздействиях помех на полезные сигналы.

Полученные экспериментальные данные подтверждают необходимости применения ортогональных кусочно-непрерывных функций в качестве базовых управляющих сигналов для системы управления МЦТрРРС.

Для экспериментальных исследований разработана структурная схема, представленная на рис. 7.



Рис. 6. Схема воздействия мешающих сигналов на полезный сигнал при проведении эксперимента

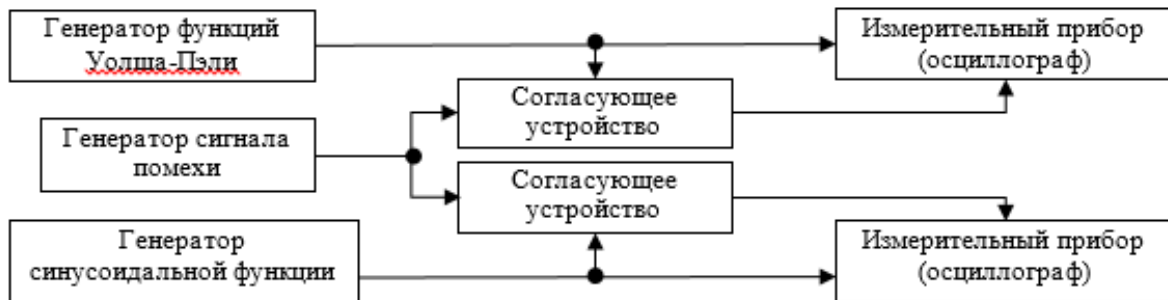


Рис. 7. Схема для исследования воздействия помех на синусоидальные сигналы и сигналы функций Уолша-Пели

Данная схема включает:  
 генератор функций Уолша-Пели;  
 генератор синусоидальных сигналов;  
 генератор сигнала помехи;  
 схему согласования исследуемых сигналов и помехи;  
 измерительные приборы для анализа полученных результатов.

В программной среде Electronics Workbench генератор функций Уолша-Пели был получен на базе генератора Радемахера (рис. 8).

В качестве формирователя функции Радемахера использовался 5-ти разрядный счетчик, на вход которого подавался тактовый сигнал. Далее с помощью элементов ИЛИ-НЕ сформированы функции по системе Уолша-Пели.

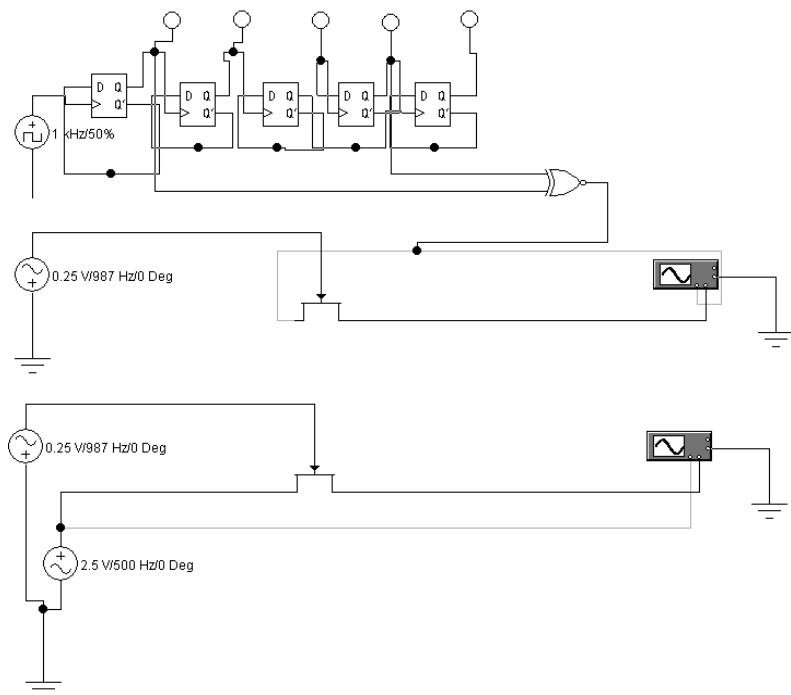


Рис. 8. Схема для проведения эксперимента

В полученных временных диаграммах для удобства представлены не все функции ансамбля, а отдельные:  $pal(5, \theta)$ ,  $pal(9, \theta)$  и  $pal(16, \theta)$ .

При этом результаты моделирования других функций Уолша-Пели являются аналогичными.

В качестве виртуальных измерительных приборов использовались два устройства:

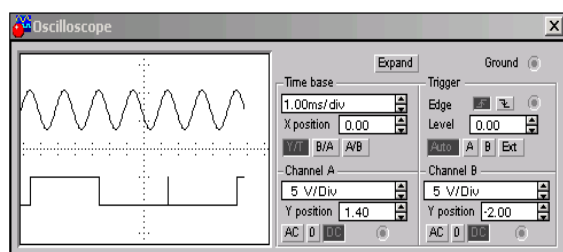
- двухлучевой осциллограф (рис. 9), который позволяет фиксировать изменения как в синусоидальных функциях, так и функциях Уолша-Пели;

- логический анализатор (рис. 10), на котором отображаются формы цифровые сигналов – исход-

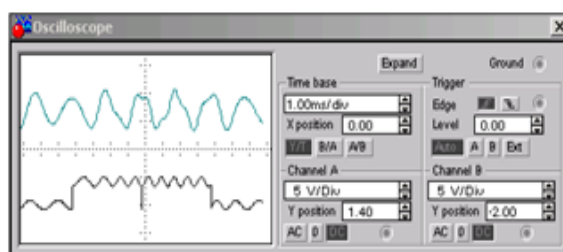
ных, искаженных и восстановленных. Экспериментальное исследование проводилось с использованием генераторов, формирующих воздействие, как синусоидальных составляющих, так и импульсных помех.

Результаты эксперимента по исследованию воздействия разнообразных помех на синусоидальные сигналы и сигналы функций Уолша-Пели приведены в табл. 1.

На их основе были определены коэффициенты искажения ( $K_{И}$ ) для обоих видов сигналов, приведенные в табл. 2.



а



б

Рис. 9. Отображение синусоидальной функции и функции Уолша-Пели  $pal(5, \theta)$  надвухлучевом осциллографе в Electronics Workbench:  
а – без воздействия помехи; б – при воздействии помехи

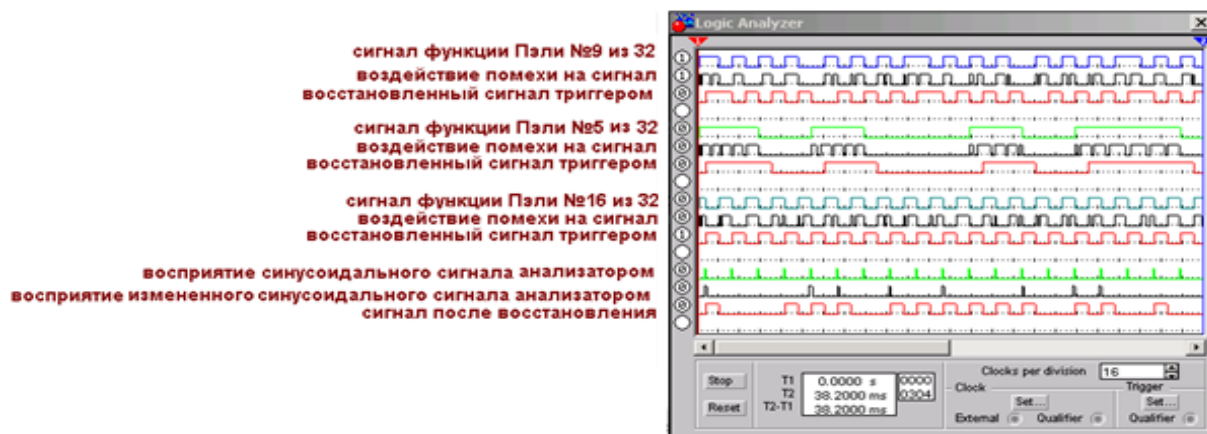


Рис. 10. Логический анализатор в программной среде Electronics Workbench

Таблица 1

Результаты экспериментов при воздействии помех на полезный сигнал

| Параметры сигналов помехи/полезных  | Форма сигналов Уолша-Пели | Форма синусоидального сигнала |
|---|---------------------------|-------------------------------|
| <b>1. Помеха гармоническая (непреднамеренная, преднамеренная)</b>                                     |                           |                               |
| $A_{П} = 0,25B$<br>$A_{sin} = 2,5B$<br>$A_{sin/П} = 2,34B$<br>$A_{pal} = 2,5B$<br>$A_{pal/П} = 2,35B$ |                           |                               |

| Параметры сигналов помехи/полезных  | Форма сигналов Уолша-Пели | Форма синусоидального сигнала |
|---|---------------------------|-------------------------------|
| <b>2. Импульсная помеха периодического характера с постоянными параметрами (непреднамеренная)</b>                                     |                           |                               |
| $A_{\Pi}=0,25B$<br>$S_{\Pi}=3,23$<br><br>$A_{sin}=2,5B$<br>$A_{sin/\Pi}=2,24B$<br><br>$A_{pal}=2,5B$<br>$A_{pal/\Pi}=2,25B$           |                           |                               |
| <b>3. Импульсная помеха с переменными параметрами случайного характера (непреднамеренная)</b>   |                           |                               |
| $A_{\Pi}=0,25B$<br>$S_{\Pi}=1,28$<br><br>$A_{sin}=2,5B$<br>$A_{sin/\Pi}=2,24B$<br><br>$A_{pal}=2,5B$<br>$A_{pal/\Pi}=2,25B$           |                           |                               |
| <b>4. Хаотическая импульсная последовательность взаимно моделированных сигналов помех с разными характеристиками (преднамеренная)</b> |                           |                               |
| $A_{\Pi}=0,25B$<br><br>$A_{sin}=2,5B$<br>$A_{sin/\Pi}=2,24B$<br><br>$A_{pal}=2,5B$<br>$A_{pal/\Pi}=2,25B$                             |                           |                               |

Таблица 2

Коэффициенты искажения сигналов по результатам эксперимента

| Тип помехи                                     | Сигнал на базе функций Уолша-Пели | Гармонический сигнал |
|--|-----------------------------------|----------------------|
| 1. Гармоническая помеха                        | 0,915                             | 0,813                |
| 2. Импульсная помеха с постоянными параметрами | 0,953                             | 0,655                |
| 3 Импульсная помеха случайного характера       | 0,965                             | 0,615                |
| 4. Хаотическая импульсная последовательность   | 0,877                             | 0,453                |

### Выводы

В работе экспериментально исследовано влияние мешающих сигналов на сигналы управления МЦТрРРС, построенные на базе функций Уолша-Пели. Для сравнения эти же мешающие сигналы воздействовали на гармонические сигналы управления. Результаты сравнительного анализа показали, что предложенный сигнал управления на базе функций Уолша-Пели устойчивый к внешним влияниям в сравнении с синусоидальными сигналами того же

уровня и при тех же уровнях внешнего воздействия. Это свидетельствует в пользу правильного выбора сигналов управления для МЦТрРРС, обладающих высокой устойчивостью к внешним воздействиям, как преднамеренного, так и непреднамеренного характера.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в применении таких сигналов управления, основанных на функциях Уолша-Пели для радиолокационных систем наземного, воздушного и морского базирования.

## Список литературы

1. Тузов Г.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г.И. Тузов. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
2. Хармут Х. Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи: Пер. с англ. / Х. Ф. Хармут – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.
3. Зимин В. В. Система цифровой связи на базе функций Уолша / В. В. Зимин // Электросвязь. – 2009. – №2. – С. 20-24.
4. Назаров Л.Е. Применение преобразования Уолша-Адамара для итеративного и оптимального посимвольного приема сигналов, соответствующих кодам-произведениям / Л.Е. Назаров // Радиотехника и электроника. – 2002. – №12. – С.1474-1483.
5. Никитин Г.И. Применение функций Уолша в сотовых системах связи с кодовым разделением каналов / Г.И. Никитин – СПб.: СПбГУАП, 2003. – 86 с.
6. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов / Л.Е. Варакин – М.: Советское радио, 1978. – 304 с.
7. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы / В.Я. Аверьянов – Минск: Техника, 1978. – 148 с.
8. Почерняев В.Н. Экспертиза технологической части проекта как путь оценки устойчивости сети связи / В.Н. Почерняев // Вестник Ундиза. – 2009. – №3. – С. 66 – 68.
9. Почерняев В.Н. Функции Уолша-Пели для системы управления мобильной цифровой тропосферно-радиорелейной станцией / В.Н. Почерняев, В.С. Повхлеб // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова. – 2016. – №2. – С. 107-113.
10. Патент 112217 Україна, С2. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція / Почерняев В.М., Повхлеб В.С. Заявник і патентовласник Почерняев В.М., Повхлеб В.С.; заявл. 12.09.2014; опубл. 10.08.2016 // Бюл. № 15.
11. Почерняев В.Н. Оценка электромагнитной совместимости радиоизлучающих средств мобильной цифровой тропосферно-радиорелейной станции / В.Н. Почерняев, В.С. Повхлеб // Современные проблемы и достижения в области радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий: VIII Межд. научно-практическая конференции, Запорожье, 21-23 сентября 2016 г.: тезисы докладов. – Запорожье: ЗНТУ, 2016. – С. 16-22.
12. Почерняев В.Н. Мобильная цифровая тропосферно-радиорелейная станция: Оценка ЭМС и устойчивость системы управления / В.Н. Почерняев, В.С. Повхлеб // Цифрові технології. – 2016. – № 19. – С. 110-116.
13. Повхлеб В.С. Алгоритм функционирования системы управления мобильной цифровой тропосферно-радиорелейной станцией / В.С. Повхлеб // Науковий журнал «Телекомунікаційні та інформаційні технології» №4(53) – Київ: Державний університет телекомунікацій, 2016. – С. 83-91.
14. Повхлеб В.С. Моделирование системы управления мобильной цифровой тропосферно-радиорелейной станцией / В.С. Повхлеб // Науковий журнал «Телекомунікаційні та інформаційні технології» №1(54) – Київ: Державний університет телекомунікацій, 2017. – С. 94-103.
15. Почерняев В.Н., Повхлеб В.С. Управление мобильной цифровой тропосферно-радиорелейной станцией / В.Н. Почерняев, В.С. Повхлеб // Научно-производственный сборник “Научные записки Украинского научно-исследовательского института связи” №6 (34). – 2014. – С. 27-32.
16. P.372-11. Радиосумы: Рекомендация МСЭ-R. – [Действует с 2013-09]. – Женева: ITU, 2014. – 78 с.

Надійшла до редколегії 11.07.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаєв, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНОЇ ЦИФРОВОЇ ТРОПОСФЕРНО-РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СТАНЦІЇ ПРИ ДІЇ РІЗНИХ СИГНАЛІВ ЗАВАД

В.М. Почерняев, В.С. Повхлеб, В.В. Зайченко

У даній статті розглянуто вирішення завдання з підвищення стійкості системи управління мобільної багатоканальної станції НВЧ діапазону нового типу шляхом використання ортогональних кусково-неперервних функцій в якості сигналів управління. Об'єктом дослідження є процес управління мобільною цифровою тропосферно-радиорелейною станцією як складною телекомунікаційною системою. Предмет дослідження становить експериментальна перевірка системи управління при впливі сигналів завад. Розроблено програмно-апаратний комплекс для експериментального дослідження системи управління мобільною цифровою тропосферно-радиорелейною станцією при впливі різних сигналів завад. Проведено експериментальні дослідження, що підтверджують отримані теоретичні результати з розробкою діючого експериментального зразка пульта управління з генератором функцій Уолша-Пелі. Результати експерименту дозволяють рекомендувати розроблену систему управління мобільної багатоканальної станції НВЧ діапазону для практичного використання.

**Ключові слова:** мобільна цифрова тропосферно-радиорелейна станція, стійкість система управління, ортогональні кусково-неперервні функції, генератор функцій Уолша-Пелі, ненавмисні та навмисні завади.

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE STABILITY OF CONTROL SYSTEM OF MOBILE DIGITAL TROPOSCATTER-RADIORELAY STATION UNDER THE INFLUENCE OF VARIOUS INTERFERENCE SIGNALS

V.N. Pochernyaev, V.S. Povhleb, V.V. Zaichenko

In this article solved the problem to improve the stability of control system for a new type of microwave multi-channel mobile station through the usage of orthogonal piecewise continuous functions as a control signals The object of research is the process of management of digital mobile troposcatter-radiorelay station as a complex telecommunications system. The subject of research is an experimental verification of the control system under the influence of interfering signals. The software and hardware complex for experimental research for the control system of a mobile digital troposcatter-radiorelay station under the influence of various interfering signals was developed. Experimental researches, which confirming obtained theoretical results, are carried. An experimental sample of control panell with generator Walsh-Paley functions is developed. The experimental results allow recommending the developed control system of mobile multichannel microwave station for practical use.

**Keywords:** mobile digital troposcatter-radiorelay station, the stability of control system, the orthogonal piecewise continuous functions, the generator of the Walsh-Paley functions, unintentional and intentional interference.