

На правах рукописи



Дмитриев Эдгар Михайлович

**Формирование и обработка сигналов в системах передачи информации по сетям электропитания**

Специальность 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроник» (ТУСУР)

- Научный руководитель:** **Рогожников Евгений Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ  
радиотехники ТУСУР
- Официальные оппоненты:** **Носов Владимир Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры цифрового телерадиовещания  
и систем радиосвязи ФГБОУ ВО «Сибирский госу-  
дарственный университет телекоммуникаций и ин-  
форматики»;
- Пономарев Олег Геннадьевич**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры радиофизики ФГАОУ ВО «Нацио-  
нальный исследовательский Томский государствен-  
ный университет»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Но-  
восибирский государственный технический уни-  
верситет»

Защита состоится «27» июня 2024 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и на официальном сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/v9iaa0ke>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета 24.2.415.01,  
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

На сегодняшний день радиочастота является дорогостоящим ресурсом, который требует больших финансовых затрат для использования в коммерческих целях. Выделение частотного ресурса государственными службами тщательно регламентируется, а за соблюдением правил использования установлен строгий контроль. В современную эпоху цифровизации обычная жизнь человека всё больше и больше наполняется различными устройствами, требующими подключения к сети Интернет для их функционирования. Производители бытовых устройств вынуждены использовать малочисленные диапазоны свободных частот для того, чтобы обеспечить их низкую стоимость и доступность для обычного пользователя. В связи с этим зачастую в мегаполисах многие свободные диапазоны частот оказываются перегруженными. К примеру, обилие точек доступа Wi-Fi, работающих в одном нелицензируемом диапазоне частот, значительно снижает скорость обмена данными, что ведёт к потере качества связи и, как следствие, к неудобству использования данных устройств. Однако решением данной проблемы может стать использование технологии передачи данных по цепям питания (Power Line Communication, PLC), которая уже сейчас находит своё применение для организации сети в домашних условиях. Главными её достоинствами являются легкая масштабируемость сети и отсутствие необходимости в прокладке дополнительных кабельных соединений в помещении, что делает данную технологию удобным в использовании. Также применение PLC технологии в аэрокосмической промышленности открывает перспективы для значительного улучшения эффективности систем связи и передачи данных в этой отрасли. Использование проводных линий питания для обмена информацией между модулями космического аппарата позволит сократить вес оборудования, что особенно критично в условиях космических полетов, где каждый килограмм имеет значение.

Благодаря стремительному развитию информационных технологий и растущему спросу в предоставлении услуг связи в последние десятилетия телекоммуникационный сектор является одним из наиболее быстро развивающихся рынков. В нынешнюю эпоху глобальной цифровизации сложившиеся условия как со стороны загруженности радиоэфира, так и со стороны растущих требований к обеспечиваемым характеристикам систем связи во многих случаях вынуждают использовать альтернативные решения обеспечения передачи информации. Такие условия актуализируют направление по улучшению устройств, позволяющих осуществлять передачу данных по сетям электропитания. В рамках данной диссертационной работы проведено исследование перспективных телекоммуникационных технологий, которые могут увеличить эффективность систем передачи информации по сетям электропитания.

### **Степень разработанности темы исследования**

Исследованиям технологии передачи данных по сетям электропитания посвящены работы таких отечественных и зарубежных учёных, как Галлямов А.К., Охрименко В., Сафин Р.Р., Duche D., Gogate V. Anatory, J., Kissaka M.M., Mvungi N.H., M. Koutny, P. Mlynek, O. Krajsa., M. Wang.

Однако существующие методы и алгоритмы формирования и обработки сигналов в области PLC систем могут быть улучшены за счёт новых технологий физического уровня, которые могут найти применение как в PLC системах, так и в системах беспроводной связи. Примерами таких технологий может служить методы адаптивной

модуляции, технология полнодуплексной передачи данных, ММО (англ. multiple input, multiple output) и другие.

### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являются системы передачи информации по сетям электропитания. Предметом исследования являются методы и алгоритмы формирования и обработки сигналов PLC систем.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

*Целью диссертационной работы* является исследование и разработка методов и алгоритмов формирования и обработки сигналов, позволяющих улучшить характеристики PLC систем, в частности, повысить спектральную эффективность и снизить вычислительную сложность их реализации.

В рамках данной диссертационной работы решаются следующие задачи:

1. Исследование методов адаптивной модуляции в системах передачи информации.
2. Разработка метода адаптивной модуляции, позволяющего повысить спектральную эффективность PLC систем.
3. Имитационное моделирование известных и разработанного метода адаптивной модуляции с учётом особенностей среды распространения сигнала.
4. Исследование методов, применяемых для организации полнодуплексной передачи данных без временного и частотного разделения.
5. Разработка математической модели алгоритмов формирования и обработки сигналов PLC системы.
6. Исследование влияния интерференции сигнала собственного передатчика на вероятность битовой ошибки при демодуляции полезного сигнала.
7. Разработка макета полнодуплексной PLC системы.
8. Экспериментальное исследование предлагаемого метода организации полнодуплексной связи на макете полнодуплексной PLC системы.
9. Исследование алгоритмов обнаружения широкополосного сигнала в канале линий электропередач в условиях сложной помеховой обстановки и при низких отношениях сигнал/шум, с учётом их ресурсозатратности при реализации на вычислительных устройствах.

### **Научная новизна**

1. Предложен новый метода адаптивной модуляции для PLC систем с ортогональным частотным разделением, отличающийся этапами оценки канала передачи и назначения типа модуляции, а также учётом наличия переменной составляющей в канале распространения сигнала.
2. Предложен новый метод цифро-аналоговой компенсации сигнала собственного передатчика в полнодуплексных PLC системах, отличающийся наличием операций оценки передаточной характеристики приёмо-передающего тракта и предсказания компенсационного сигнала.
3. Предложен новый алгоритм кадровой синхронизации с помощью корреляционного обнаружителя и его реализация на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), отличающийся этапом предопределения положения преамбулы за счёт знакового автокоррелятора и его последующим уточнением посредством многоканального корреляционного обнаружителя, работающего в отложенном времени,

который позволяет обеспечить сопоставимую точность с классическим корреляционным обнаружителем при меньших затратах вычислительных ресурсов.

### **Методы исследования**

Применялись такие методы исследования, как: теория вероятностей, математическая статистика, численные методы расчётов, математическое моделирование, эксперимент. Также применены методы цифровой обработки сигналов и имитационного моделирования.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов базируется на доказанных теоретических и практических положениях прикладных, фундаментальных наук, обеспечена согласованностью полученных теоретических и практических результатов с известными фундаментальными постулатами и экспериментальными данными авторитетных ученых в изучаемой отрасли знаний, а также подтверждается обсуждением итогов экспериментов на тематических научных конференциях и внедрением результатов в практике.

### **Теоретическая ценность**

1. Изучены особенности влияния канала распространения сигнала, представляющего собой разветвлённую электрическую сеть с высокой плотностью подключённых электроустройств, на эффективность методов адаптивной модуляции.

2. Сформулирована методика проведения оценки канала для систем передачи данных по сетям электропитания.

3. Сформулирована методика выбора и назначения типа модуляции для адаптивных систем с ортогональным частотным мультиплексированием.

4. Приведено качественное и количественное сравнение характеристик существующего метода адаптивной модуляции и предложенного.

5. Рассмотрена технология полнодуплексной передачи в контексте её использования в PLC системах.

6. Показана значимость проведения процедуры предсказания сигнала компенсации в полнодуплексной PLC системе.

7. Проведена модернизация подхода к реализации корреляционного обнаружителя с целью сохранения его характеристик при уменьшении вычислительных затрат и ресурсов при реализации на программируемых логических интегральных схемах.

### **Практическая значимость**

1. Разработан макет передачи данных по сетям электропитания с целью экспериментальных исследований предложенных методов и алгоритмов.

2. Внедрён предложенный метод адаптивной модуляции в устройство передачи данных по сетям электропитания совместно с НПК «Техника дела», г. Томск (Акт внедрения).

3. Представлены рекомендации по выполнению оценки канала в PLC системах с учётом особенностей распространения информационного сигнала по сетям электропитания.

4. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный алгоритм корреляционного обнаружения для программируемых логических интегральных схем, позволяющий снизить вычислительные ресурсы.

Разработанные методы и алгоритмы могут быть применимы и внедрены в продукцию предприятий отрасли.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Предложенный метод адаптивной модуляции за счёт поэтапных оценок канала передачи по пилотному сигналу с учетом значения фазы переменной составляющей электросети с последующим накоплением и усреднением, а также за счёт выбора в качестве основной метрики оценки вектора ошибок (EVM) и расчёта массива индексов модуляции на базе рекурсивного алгоритма обеспечивает спектральную эффективность в среднем до 1,2 раз большую по сравнению с известными способами при сопоставимом уровне вероятности битовой ошибки.

2. Предложенный метод цифро-аналоговой компенсации сигнала собственного передатчика в приёмном тракте в полнодуплексной системе передачи данных без временного и частотного разделения передаваемой и принимаемой информации за счёт этапа предварительного цифрового предискажения сигнала компенсации обеспечивает уровень подавления от 42 до 55 дБ, что повышает спектральную эффективность систем передачи информации по сетям электропитания в 1,14–1,57 раза.

3. Предложенный алгоритм корреляционного обнаружения сигнала за счёт двухэтапного подхода реализации, включающего предварительное знаковое автокорреляционное обнаружение и последующий многоканальный расчёт взаимной корреляции в отложенном времени, в сравнении с существующими подходами реализации позволяет сократить вычислительную сложность более чем на два порядка при уменьшении вероятности правильного обнаружения сигнала не более 3% в диапазоне ОСШ от -5 до 5 дБ и сохранении вероятности ложной тревоги при условии длительности кадра, превышающей совокупную длительность сигналов синхронизации в кадре не менее чем в 58 раз.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоит в разработке предложенных методов и алгоритмов, реализации математических моделей, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, подготовке и публикации докладов и статей. Научный руководитель оказывал консультативное содействие и осуществлял верификацию полученных результатов в ходе выполнения поставленных перед автором задач. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

### **Использование результатов исследования**

1. Разработанное техническое решение в области цифровой обработки сигналов, а именно метод адаптивной модуляции для систем связи, использующих сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием, было использовано при реализации устройства передачи данных по сетям электропитания на предприятии ООО НПК «Техника дела» (Акт внедрения).

2. Результаты диссертационной работы использованы на кафедре ТОР в учебном процессе с 2023/2024 учебного года для студентов направлений подготовки: 11.03.01 «Радиотехника», бакалавриат, профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов»; 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», бакалавриат, профиль «Системы радиосвязи и «Интернета вещей»; 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», бакалавриат, профиль «Защищённые системы и сети связи» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплине «Цифровая обработка сигналов».

### **Апробация результатов**

Основные положения данной работы докладывались и обсуждались в следующих конференциях: 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM); Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), г. Томск 2018; Информационные системы и технологии: перспективы развития, г. Новосибирск, 2017; 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), г. Томск, 2019; 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), г. Томск, 2020; International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), г. Томск, 2019; Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции, г. Томск, 2018; Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции, г. Томск, 2019.

### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 17 работ: 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 1 статья в журнале индексируемом в базах Scopus, WoS (Q2), 10 докладов в трудах международных конференций, 7 из которых проиндексированы в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 4 РИД, из которых один патент на изобретение, два на полезную модель и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и 106 наименований и пяти приложений. Общий объем диссертации составляет 158 страниц машинописного текста, в том числе 86 рисунков, 21 таблица.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цель и задачи диссертационного исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** был представлен обзор существующих на данный момент стандартов PLC систем. Рассматривались протоколы как узкополосных специализированных PLC систем (анг. narrowband power line communication, NB-PLC), например, G3-PLC, PRIME или X-10, так и протоколы широкополосных PLC систем (анг. broadband power line communication, BB-PLC): HomePlug AV2, IEEE 1901.1.

Согласно приведённому обзору в современных BB-PLC стандартах наиболее популярной технологией для передачи данных является ортогональное частотное мультиплексирование (анг. orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM). Данная технология хорошо зарекомендовала себя за счёт устойчивости к межсимвольной интерференции и многолучевому распространению сигнала, а, в следствие отсутствия Доплеровского смещения частоты в проводном канале, требования к частотной синхронизации для неё значительно уменьшаются. Поэтому данная технология была взята за основу в исследованиях диссертационной работы.

**Во втором разделе** приведены результаты исследования канала передачи данных и отмечены его особенности.

В PLC-канале присутствуют как аддитивные, так и мультипликативные помехи, воздействие которых приводит к значительным искажениям передаваемого сигнала.

Помехи генерируются большинством подключенных электрических приборов к электросети.

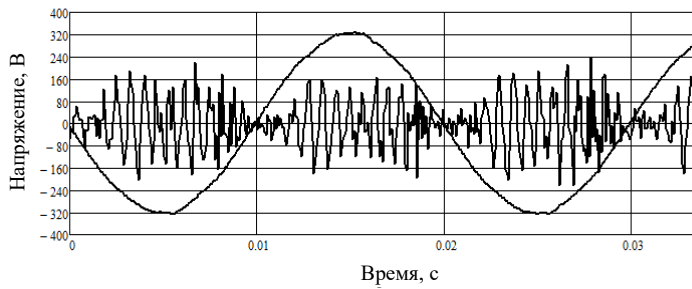
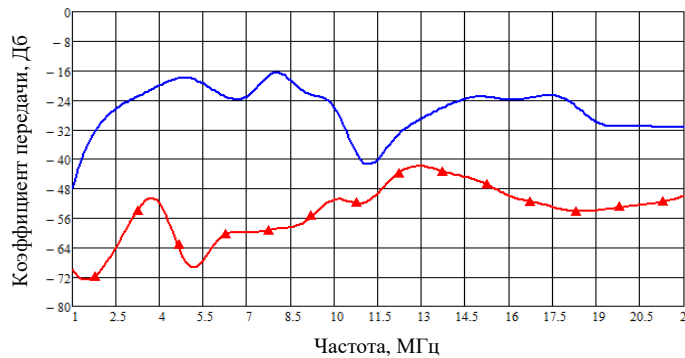


Рисунок 1 – Осциллограмма сигнала помехи из силовой сети относительно фазного напряжения



— пример передаточной характеристики 1

▲ пример передаточной характеристики 2

Рисунок 2 – Передаточная характеристика PLC-канала при различной нагрузочной обстановке вблизи подключения приёмника PLC

На рисунке 1 приведена осциллограмма сигнала помехи из силовой сети относительно фазного напряжения. Исходя из того, что в электросети присутствует синусоидальное напряжение сети, уровень помех будет зависеть от мгновенного значения напряжения. Причем при значениях фазного напряжения близком к нулю уровень помех наименьший. Участок с наименьшим уровнем помех длится 2 мс. Такая помеха имеет циклостационарный характер.

На рисунке 2 представлены амплитудно-частотные характеристики PLC-канала в полосе частот от 2 до 22 МГц при минимальном и максимальном возможном количестве подключённых зарядных устройств в соседних розетках.

**В третьем разделе** рассмотрена адаптивная модуляция в системах передачи данных по сетям электропитания, приведено описание

предлагаемого метода и представлены результаты моделирования в сравнении с известным методом (Bolinth E., Grunheid R., Rohling H. A blockwise loading algorithm for the adaptive modulation technique in OFDM systems).

Суть технологии адаптивной модуляции в динамической подстройке сигнально-кодированной конструкции передатчика к условиям в канале с целью обеспечения максимальной пропускной способности.

Функциональная схема предлагаемого метода приведена на рисунке 3, на которой обозначено: 1 – Прием отсчётов  $n$ -ого пилотного OFDM символа, 2 – Временная синхронизация 3 – Частотная синхронизация, 4 – Быстрое преобразование Фурье, 5 – Оценка канала распространения по пилотным поднесущим, 6 – Эквалайзирование, 7 – Оценка вектора ошибки для каждой поднесущей ( $e_n$ ), 8 – Группировка  $t$  подгрупп по  $l$  поднесущих спектра сигнала ( $E_n$ ), 9 – Выбор максимального значения вектора ошибки в каждой  $i$ -ой подгруппе поднесущих ( $M_n$ ), 10 – Фильтрация полученных значений на основе предыдущих измерений ( $R_n$ ), 11 – Назначение индексов модуляции по подгруппам ( $P_n$ ), 12 – Передача полученного массива индексов модуляций на передающую часть.





Рисунок 3 – Функциональная схема предлагаемого метода адаптивной модуляции

Предлагаемый метод заключается в следующем. Приемником принимается и оцифровывается кадр. Производится временная синхронизация с началом кадра по пилотному OFDM символу. Временная синхронизация может быть выполнена путем расчета взаимной корреляционной функции между принятым пилотным OFDM символом и опорным сигналом. Далее выполняется частотная синхронизация. Для перехода из временной области в частотную выполняется расчет быстрого преобразования Фурье, в результате которого получается  $k$  поднесущих. После по пилотным поднесущим осуществляется оценка канала. Полученная оценка используется для эквалайзирования спектра принятого  $n$ -ого пилотного OFDM символа. Далее на основе принятых отсчетов пилотного сигнала  $\vec{s}_{n_k}$  и отсчетов опорного сигнала  $\vec{w}_k$  в частотной области рассчитывается вектор ошибок  $\vec{e}_{n_k}$ , полученные значения группируются в  $m$  подгрупп по  $l$  поднесущих, в каждой подгруппе выбирается максимальное значение  $M_n(i)$ . Итоговая оценка получается путём сравнения текущей оценки с предыдущей. Математическое описание выполняемых операций представлено на рисунке 4.

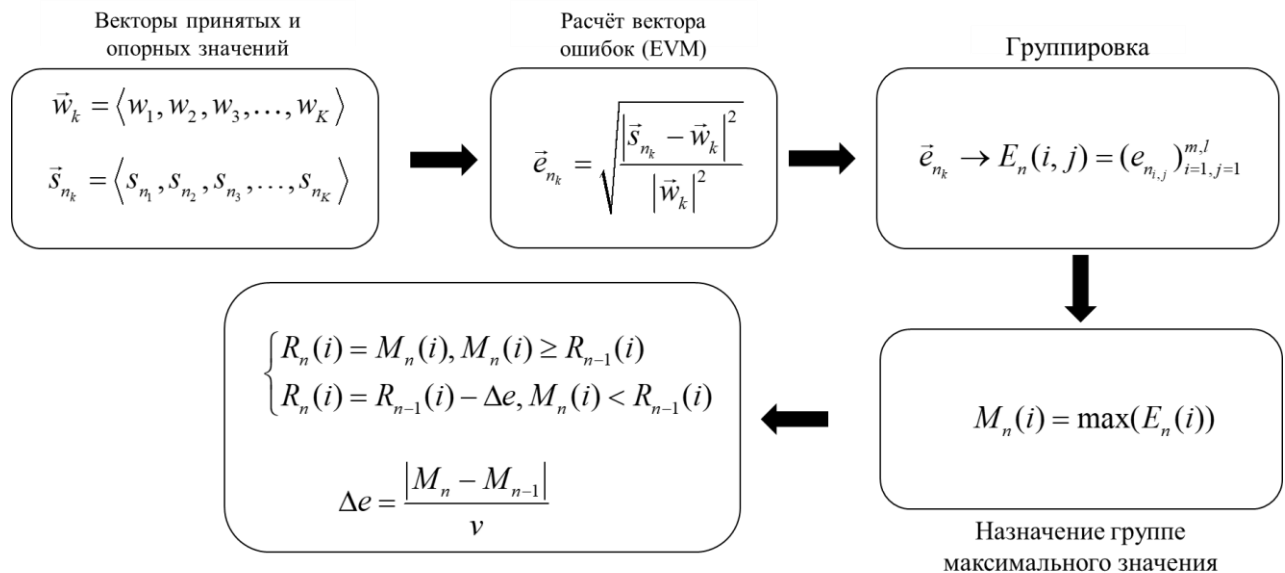


Рисунок 4 – Математическое описание выполняемых операций

Коэффициент  $\nu$  – это коэффициент коррекции оценки. Чем больше данный коэффициент, тем медленнее реакция на улучшение в канале. Значение коэффициента выбирается исходя из времени когерентности канала.

Полученный массив  $R_n(i)$ , является итоговой оценкой канала передачи на текущий момент времени и используется для назначения типов модуляции. Пороги выбираются исходя из требуемой вероятности битовой ошибки на приемном устройстве.

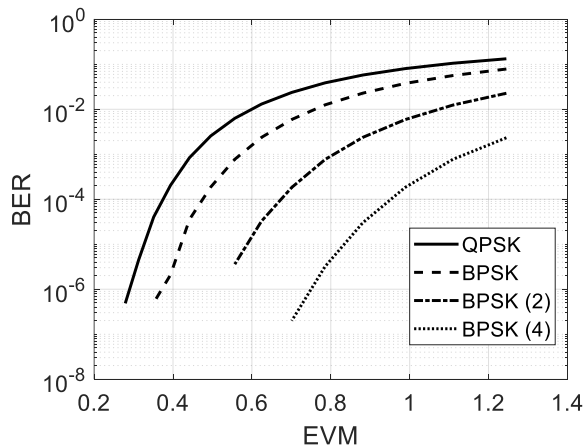


Рисунок 5 – Вероятность битовой ошибки от порогового значения

На рисунке 5 приведены зависимости вероятности битовой ошибки от значения порога в канале с АБГШ для некоторых видов модуляции, на котором обозначено: зависимость вероятности битовой ошибки от порога  $P$  для QPSK, BPSK, BPSK с расширением на две поднесущие, BPSK с расширением на четыре поднесущие.

После того, как выполнено назначение индексов модуляции, полученный массив должен быть отправлен на передающую сторону по надежному, более помехозащищенному служебному каналу передачи данных. Кроме того, данный массив

поступает в блок приема информационных данных для верной демодуляции информационных сообщений.

Моделирование предлагаемого метода адаптивной модуляции выполнялось в программном пакете MATLAB. Структурная схема модели приведена на рисунке 6.

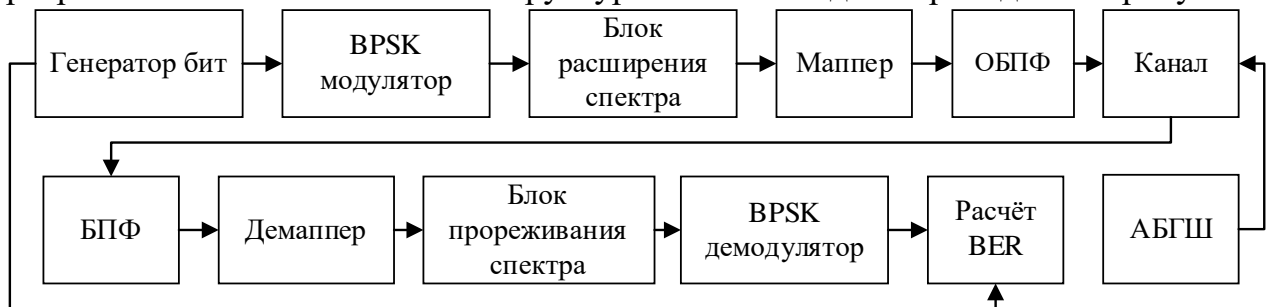


Рисунок 6 – Структурная схема модели

Входные параметры модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Входные параметры модели

Параметр	Значение
Размер преобразование Фурье	1024
Защитные интервалы	200
Шаг пилотов	7
Тип модуляции поднесущих	QPSK, BPSK, BPSK с расширением спектра (2,4)
Канал передачи	Многолучевость, АБГШ с динамически изменяющимся уровнем

Результаты моделирования для предлагаемого метода и метода Volinth представлены на рисунке 7.

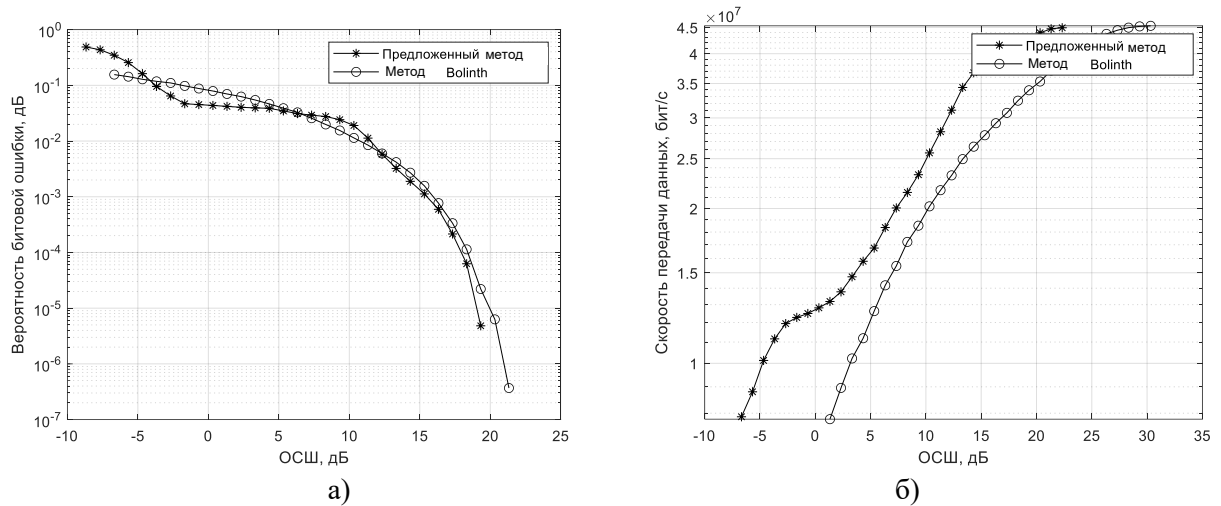


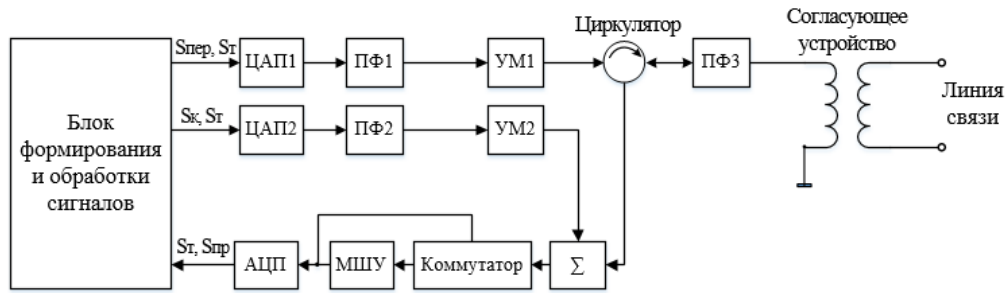
Рисунок 7 –Зависимости а) вероятности битовой ошибки от ОСШ б) скорости передачи данных от ОСШ

На рисунке 7 видно, что оба метода обеспечивают сравнительно одинаковые характеристики по вероятности битовой ошибки в диапазоне от 0 до 20 дБ. При этом скорость передачи данных, обеспечиваемая предложенным методом в диапазоне от 2 до 20 дБ в среднем в 1,2 раза больше, чем у метода Bolinith. Соответственно, можно сделать вывод, что предлагаемый метод обеспечивает в среднем до 1,2 раза большую спектральную эффективность при обеспечении равных характеристик по вероятности битовой ошибки.

**В разделе четыре** рассмотрена технология полнодуплексной передачи данных в PLC системах без временного и частотного разделения, приведены примеры существующих схем реализации, а также предложен собственный цифро-аналоговый метод компенсации сигнала собственного передатчика.

Основной проблемой технологии полного дуплекса является мощный сигнал собственного передатчика, который попадает в приёмный тракт, поэтому основная задача состоит в его подавлении. В данном разделе были приведены классические подходы к реализации аналоговой и цифро-аналоговой компенсации сигнала-помехи. Как наиболее эффективный метод был выбран именно цифро-аналоговый, так как метод аналоговой компенсации с использованием 2-х канального ЦАП оказался неработоспособен в условиях передачи информации по сетям электропитания по нескольким причинам. Во-первых, так как приёмный и передающий тракт имеют один и тот же вход-выход при подключении к линии, то они связаны сильнее между собой нежели в беспроводных системах связи. Во-вторых, сама линия передачи, подключение к которой осуществляется посредством обычной розетки, имеет своё комплексное сопротивление, причем неодинаковое даже в пределах одного помещения, это приводит к проблемам согласования приёмо-передающего тракта и линии передачи. Рассогласованность в этом случае приводит к изменению формы сигнала уже на выходе, а следовательно, и в приемном тракте, а для лучшего подавления это необходимо учитывать. В-третьих, в сети существует переменное напряжение и характер воздействия на сигнал зависит от его фазы. Поэтому с целью увеличения уровня подавления сигнала собственного передатчика был предложен и запатентован метод полнодуплексной связи с предсказанием сигнала компенсации, который включает в себя алгоритм оценки передаточной характеристики приёмопередающего тракта, а также сам алгоритм предсказания.

Аналоговая часть предлагаемого цифро-аналогового метода компенсации сигнала собственного передатчика представлена на рисунке 8.



- ЦАП1 – первый цифро-аналоговый преобразователь;
- ЦАП2 – второй цифро-аналоговый преобразователь;
- ПФ1 – первый полосовой фильтр;
- ПФ2 – второй полосовой фильтр;
- УМ1 – первый усилитель мощности;
- УМ2 – второй усилитель мощности;
- ПФ3 – третий полосовой фильтр;
- МШУ – малозумящий усилитель;
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Рисунок 8 – Функциональная схема аналого-цифровой компенсации

Как упоминалось ранее, сигнал-помеха, поступающий на вход приемной части, представляет собой искаженный влиянием электросети сигнал местного передатчика. В связи с этим необходимо учитывать эти искажения при формировании компенсирующего сигнала. Для этих целей в блоке формирования и обработки сигналов предусмотрен блок предискажений (рисунок 9).

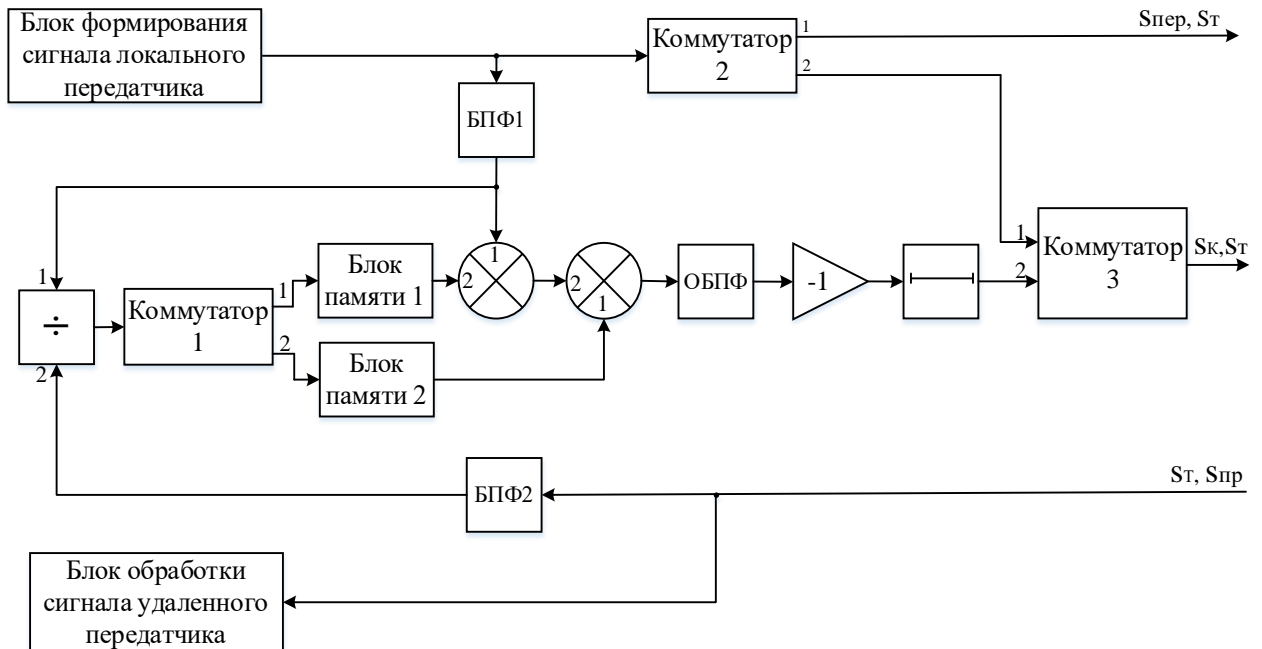


Рисунок 9 – Структурная схема блока предискажений сигнала компенсации

Моделирование предлагаемого метода было выполнено в программном пакете MATLAB. Цель данного моделирования – определить влияние некомпенсированного остатка "сигнала-помехи" на спектральную эффективность системы передачи данных без временного и частотного разделения приёма и передачи информации.

В модели на приемной стороне вводился коэффициент регулировки мощности сигнала-помехи. Диапазон изменения уровня сигнала-помехи составлял от -20 дБм до уровня шума -90 дБм. Верхний диапазон был выбран исходя из того, что около 20 дБ изначальной мощности сигнала-помехи, которая была задана равной 0 дБм, будет скомпенсирована за счёт электронного циркулятора.

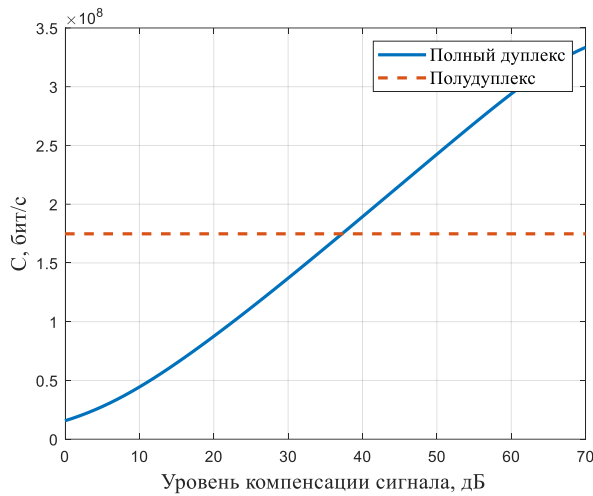


Рисунок 10 – Зависимость пропускной способности от уровня компенсации сигнала-помехи при разных уровнях полезного сигнала -50 дБм

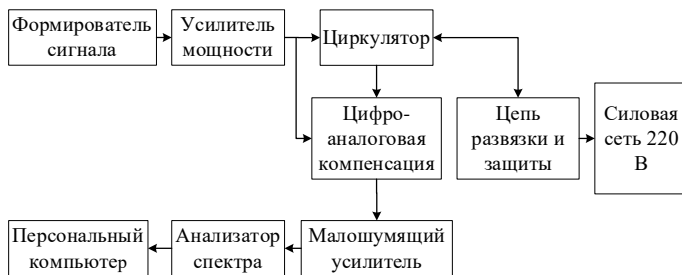


Рисунок 11 – Структурная схема макета

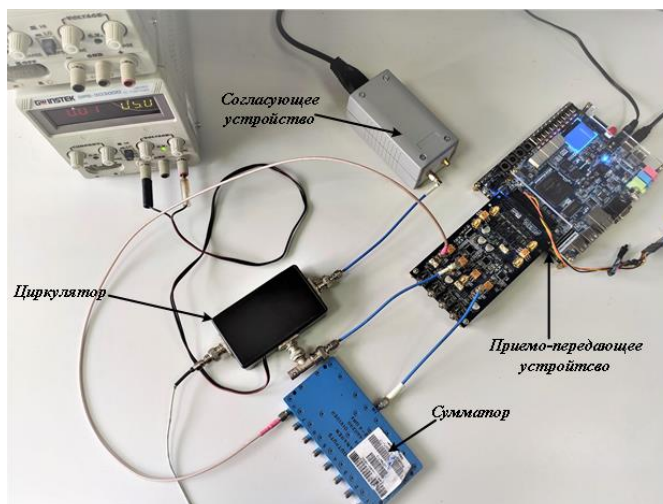


Рисунок 12 – Испытательный стенд

скомпенсирована за счёт электронного циркулятора.

Для режимов с полудуплексом дуплексом и полным дуплексом была рассчитана пропускная способность в зависимости от уровня компенсации при разных уровнях полезного сигнала (рисунок 10).

Из рисунка 10 видно, что при мощности полезного сигнала равной -50 дБм использование технологии полного дуплекса дает увеличение пропускной способности при подавлении сигнала-помехи более 38 дБ.

Для экспериментального подтверждения эффективности предлагаемого метода произведена разработка макета системы передачи данных по цепям питания, структурная схема которого представлена на рисунке 11.

На рисунке 12 представлен испытательный стенд.

Целью экспериментального исследования является проверка работы рассмотренных алгоритмов полнодуплексной системы передачи данных по цепям питания в реальных условиях.

В связи с тем, что уровень помех влияет на оценку передаточной характеристики канала, которая в свою очередь используется для получения сигнала компенсации, данный эффект сказывается на уровне компенсации. Из рисунка 13 видно, что уровень компенсации варьируется от 2 до 16 дБ.

Для определения подавления сигнала собственного передатчика в приёмном тракте посредством ПЛИС снимались отсчеты сигнала после подавления,

и вся обработка и расчёт выполнялись на персональном компьютере (ПК).

В связи с тем, что значение мгновенной фазы переменной составляющей электросети влияет на оценку передаточной характеристики канала, которая в свою очередь используется для получения сигнала компенсации, данный эффект сказывается на уровне компенсации. Из рисунка 13 видно, что, выполняя оценку один раз за полупериод, уровень компенсации варьируется от 2 до 17 дБ и имеет периодический характер.

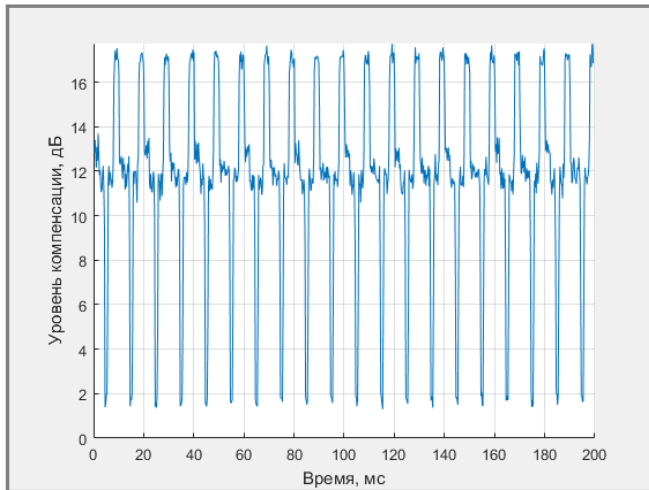


Рисунок 13 – Уровень аналоговой компенсации

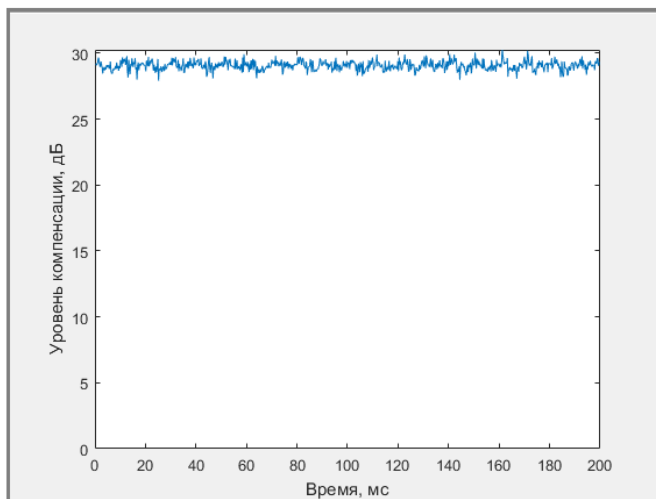


Рисунок 14 – Уровень цифро-аналоговой компенсации при ручной настройке согласования и подстройке

Также на уровень компенсации влияет согласование комплексных сопротивлений приемо-передающего устройства и сети в участке, к которому выполнено подключение макета.

Таким образом при ручной настройке согласования сопротивлений приемо-передающего устройства с сопротивлением сети и количестве оценок передаточной характеристики равном пяти за полупериод переменной составляющей уровень компенсации возрастает до 30 дБ, что можно наблюдать на рисунке 14. Ручная подстройка в этом случае выполнялась путем изменения параметров подстроечных элементов электронного циркулятора.

В ходе экспериментального исследования работы макета с разработанным методом цифро-аналоговой компенсации были получены следующие результаты: уровень цифро-аналоговой компенсации "сигнала-помехи" составил 17 дБ для случая, при котором макет подключался напрямую в сеть через розетку без согласования сопротивлений, и 30 дБ в случае ручного согласования сопротивлений выходного тракта макета и электросети.

Циркулятор обеспечил дополнительную развязку между передающим и приемным каналами в 25 дБ. Суммарно удалось скомпенсировать "сигнал-помеху" на 42 дБ и 55 дБ для двух приведенных случаев, что согласно рисунку 10 обеспечить увеличение спектральной эффективности в 1,14–1,57 раза.

**В разделе пять** рассматриваются способы обнаружения сигнала и предлагаются алгоритм реализации на программируемых логических схемах (ПЛИС). Рассмотрены

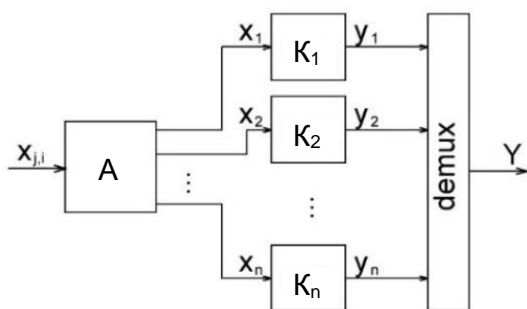


Рисунок 15 – Предлагаемый алгоритм реализации корреляционного приёмника

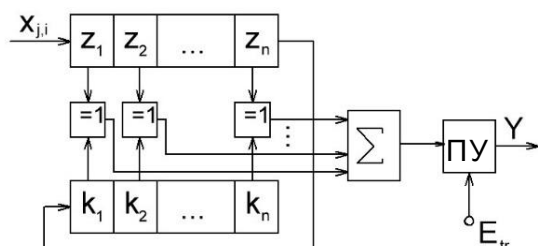


Рисунок 16 – Автокорреляционный приёмник

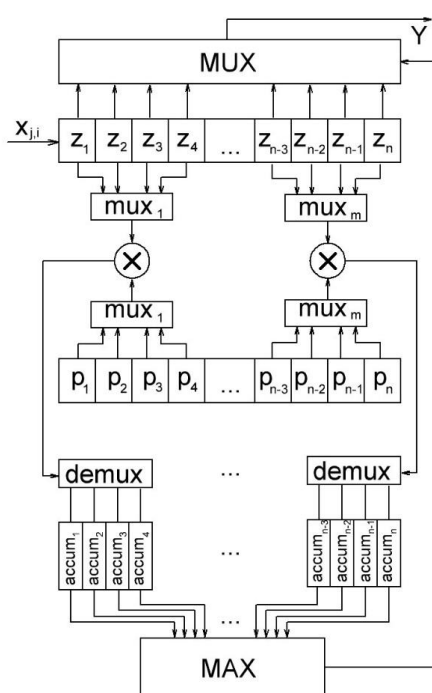


Рисунок 17 – Многоканальный корреляционный приёмник

реализации на ПЛИС классического корреляционного приёмника (ККП), знакового корреляционного приёмника (ЗКП) и предложенного варианта реализации.

Для вычисления корреляции в цифровом приёмнике, с как можно меньшими затратами по ресурсам и, в то же время, с значительно неуступающими характеристиками по точности классическому алгоритму расчета корреляции, была предложена схема многоканального корреляционного приёмника с автокорреляционным предопределением положения преамбулы (МКПАП), представленная на рисунке 15. Минимизация недостатков известных корреляционных приёмников, рассмотренных в работе, осуществляется за счет использования многоканального коррелятора (на схеме обозначенного как " $K_1, K_2, \dots, K_n$ "), обеспечивающего точность определения корреляционного пика, и автокоррелятора (на схеме обозначенного как "А"), предварительно определяющего зону расчета корреляции, за счет чего уменьшается количество используемых ресурсов.

Отличие знакового автокорреляционного приёмника от классического корреляционного заключается в том, что для расчета корреляционного пика используется не заранее известный идеальный опорный сигнал, а сигнал из канала, прошедший через среду распространения и претерпевший искажения. Для работы автокоррелятора необходимо обеспечить две одинаковые следующие друг за другом преамбулы. В результате чего, используя отсчеты первой как опорные, определяется начало второй. Схема автокоррелятора представлена на рисунке 16.

В случае, когда пороговое устройство (ПУ) срабатывает по превышению заданного порога, на выход автокоррелятора выдается сигнал о начале зоны, в которой предполагается наличие преамбулы.

Отсчеты с выхода автокоррелятора поступают на вход многоканального коррелятора (рисунок 17), который включает в себя сдвиговый регистр, умножители, мультиплексоры (на схеме – "mux"), демультимплексоры (на схеме – "demux") и аккумуля-

торы значений (на схеме – "ассум<sub>1</sub>, ассум<sub>2</sub>, ..., ассум<sub>n</sub>"). В многоканальном корреляторе имеется  $N$  отдельно взятых корреляторов. Каждый коррелятор представляет собой перемножитель, считающий на учетверенной частоте, для экономии ресурсов, и аккумулятор накапливающий значение корреляции. При наличии сигнала зоны, предсказанной автокоррелятором, поочередно запускается каждый коррелятор таким образом, что каждый из них берет разное начало из отчетов, соответствующих зоне. Когда рассчитаны корреляции относительно каждого отсчета зоны, запоминается адрес коррелятора, давшего максимальное значение в аккумуляторе (на схеме – "MAX"). По нему определяется номер отсчета во входном сдвиговом регистре, который выдается на выход и принимается как начало преамбулы.

В работе было выполнено моделирование рассмотренных и предложенного алгоритмов реализации корреляционного обнаружения преамбулы. Целью моделирования является сравнение рассмотренного алгоритма корреляционного обнаружителя в отношении вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги от отношения сигнал-шум и вычислительных затрат.

В передатчике были созданы  $N$  преамбул. Добавлялся аддитивный белый гауссовский шум. В приемнике выносились решения о наличии или отсутствии сигнала, затем данные решения сравнивались с истинными. В результате для каждого отношения сигнал шум была определена вероятность правильного обнаружения ( $P_{по}$ ) при фиксированной вероятности ложной тревоги ( $P_{лт}$ ).

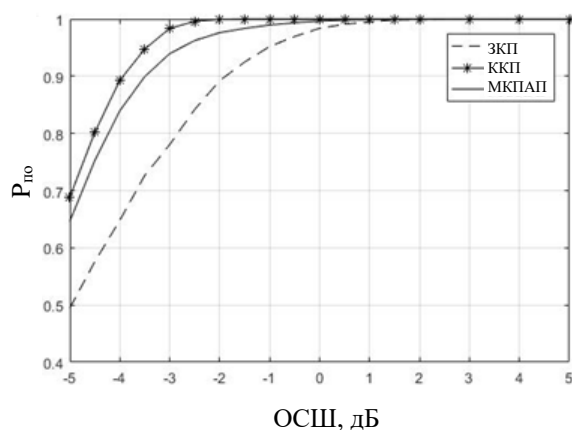


Рисунок 18 – Зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал-шум

Как показали результаты моделирования (рисунок 18), вероятность правильного обнаружения сигнала превышает 95% при отношениях сигнал-шум более 0 дБ для ЗКП, -1,5 дБ для МКПАП, -2 дБ для ККП.

Вычислительная сложность предлагаемого решения будет зависеть от отношения длительности опорной последовательности к длительности кадра. Связано это с тем, что наиболее вычислительно затратный этап алгоритма, а именно многопоточный расчёт коэффициента корреляции в отложенном времени, выполняется непосредственно после того, как наличие искомого сигнала было определено автокоррелятором. Соответственно, чем чаще встречается опорная последовательность в кадре, тем чаще алгоритм прибегает ко второму этапу, а следовательно, вычислительная сложность растет. Зависимость количества операций в секунду от длительности кадра при неизменной длительности преамбулы представлена на рисунке 19 а) и б).

полняется непосредственно после того, как наличие искомого сигнала было определено автокоррелятором. Соответственно, чем чаще встречается опорная последовательность в кадре, тем чаще алгоритм прибегает ко второму этапу, а следовательно, вычислительная сложность растет. Зависимость количества операций в секунду от длительности кадра при неизменной длительности преамбулы представлена на рисунке 19 а) и б).



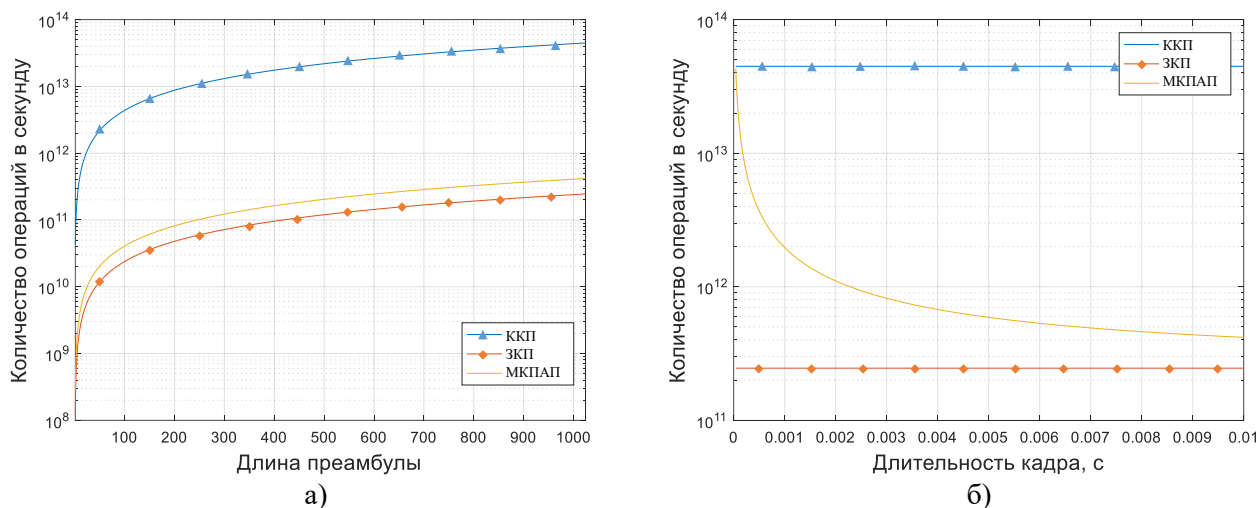


Рисунок 19 – Зависимость а) количества операций в секунду от длины преамбулы б) количества операций в секунду от длительности кадра

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведён обзор существующих PLC систем и на его основе для увеличения спектральной эффективности таких систем предложены и рассмотрены технологии адаптивной модуляции и полного дуплекса. Основными результатами, подтверждающими достижение поставленной цели, являются:

1. Предложен метод адаптивной модуляции, включающий операции расчёта оценки канала по переданной преамбуле, корректировку оценки на основе знания предыдущих её значений, группировку и распределение индексов модуляции по поднесущим.
2. Проведено моделирование предложенного метода адаптивной модуляции, в ходе которого была подтверждена его эффективность, которая в 1,2 раза больше в сравнении с уже ранее известными методами.
3. Предложен метод полнодуплексной связи в PLC системах, который за счёт блока предсказаний учитывает влияние канала передачи на форму собственного передаваемого сигнала, поступающего в тракт собственного приёмника при приёме и передаче данных без временного и частотного разделения.
4. Проведено моделирование, подтверждающее эффективность предложенного метода компенсации сигнала-помехи, которая согласно полученным результатам позволяет увеличить спектральную эффективность в 1,14–1,57 раза.
5. Разработан макет системы передачи информации по сетям электропитания.
6. Исследованы алгоритмы корреляционного обнаружения сигнала. Рассмотрены их реализации на ПЛИС.
7. Был получен патент на способ и устройства, включающий методы адаптивной модуляции, предложенные в данной работе, полезная модель № 185926, патент на изобретение № 2739940 полезная модель № 204823.
8. Результаты диссертационной работы использованы на кафедре ТОР в учебном процессе по дисциплине «Цифровая обработка сигналов».

Таким образом, в научно квалификационной работе в соответствии с сформулированной целью содержится решение всех поставленных задач.

Однако, задача увеличения спектральной эффективности PLC систем остается актуальной. В дальнейшем планируется рассмотреть цифровые методы компенсации

сигнала-помехи при реализации полнодуплексной связи. Совмещение предложенного цифро-аналогового и цифрового методов позволит дополнительно увеличить подавление сигнала собственного передатчика и тем самым улучшить отношение сигнал-помеха в приёмном тракте. Перспективным направлением исследований является объединение технологий полнодуплексной передачи данных без временного и частотного разделения с технологией пространственного мультиплексирования. Эти методы могут значительно увеличить скорость передачи данных, что открывает новые перспективы в развитии PLC систем.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Dmitriyev E. M. et al. Spread spectrum technology research and its application in power line communication systems //Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2020. – Т. 14. – №. 10. – С. 45-52.

2. Дмитриев Э. М., Рогожников Е. В., Абенов Р. Р. Полнодуплексная система передачи данных по цепям питания. Аналоговая компенсация, концепция построения и проблемы организации //Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2019. – Т. 13. – №. 8. – С. 21-27.

### **Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science**

3. Dmitriyev E. M. et al. Adaptive Modulation Method for Communication Systems Using Signals with Orthogonal Frequency Multiplexing //2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2022. – С. 246-250.

4. Dmitriyev E. M., Rogozhnikov E. V., Movchan A. K. Full-duplex power line communication system. Analog cancellation, system concept and implementation problems //2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – IEEE, 2018. – С. 1-5.

5. Dmitriyev E. M. et al. Approach to Implementation Full-duplex Communication Technology in Power Line Communication Systems //2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2020. – С. 112-117.

6. Dmitriyev E. et al. Method for Digital Cancellation of System Interference in a Full-Duplex Power Line Communication System //Electronics. – 2023. – Т. 12. – №. 10. – С. 2211.

7. Dmitriyev E. M. et al. The study of correlation receivers //2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2019. – С. 155-159.

8. Dmitriyev E. et al. Performance Comparison of FPGA-based Methods for Preamble Detection at Interference //2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2019. – С. 0152-0155.

### **Публикации в трудах конференций**

9. Дмитриев Э. М., Дуплищева Н. В., Рогожников Е. В. Цифровая компенсация полнодуплексной системы передачи данных по цепям электропитания //Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2020. – №. 1-1. – С. 7-11.

10. Дмитриев Э. М., Мовчан А. К., Рогожников Е. В. Обзор физического уровня стандарта PLC HomePlug AV 500 Mbps //Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018. – №. 1-2. – С. 305-307.

11. Дмитриев Э. М., Мовчан А. К., Рогожников Е. В. Схемотехника приемно-передающих трактов широкополосных PLC-систем связи //Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018. – №. 1-2. – С. 295-298.

12. Дмитриев Э. М., Рогожников Е. В., Мовчан А. К. Обработка и преобразование сигналов в системах передачи данных по цепям питания //Информационные системы и технологии: перспективы развития. Сборник материалов I Международной научно-практической конференции – 2017. – С. 83-87.

13. Дмитриев Э. М. и др. Обзор стандартов технологии PLC //Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – Т. 1. – №. 1-1. – С. 26-28.

#### **Патенты на изобретение**

14. Патент на изобретение № 2739940 Российская Федерация. Способ адаптивной модуляции для систем связи, использующих сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием / Е.В. Рогожников, Э. Дмитриев, А. Мовчан, Н.В. Дуплищева; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2020115789; заявл. 14.05.2020; опубл. 30.12.2020. – 11 с.

#### **Патенты на полезную модель**

15. Патент на полезную модель № 185926 Российская Федерация. Устройство передачи информации по цепям питания / Е.В. Рогожников, А.К. Мовчан, Э.М. Дмитриев; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2018119034; заявл. 23.05.2018; опубл. 25.12.2018. – 11 с.

16. Патент на полезную модель № 204823 Российская Федерация. Устройство передачи информации по цепям питания / Е.В. Рогожников, А.К. Мовчан, Э.М. Дмитриев, Н.В. Дуплищева, Д.А. Покаместов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2020132918; заявл. 07.10.2020; опубл. 16.06.2021. – 9 с.

**Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019660889 Российская Федерация. Корреляционный обнаружитель преамбулы OFDM сигнала / Е.В. Рогожников, Э. Дмитриев, К.В. Петровский; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2019619539; заявл. 31.07.2019; опубл. 14.08.2019. – 1 с.