

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. О. СУХОГО»**

---

*УДК 621.315.052 : 683.517.54*

**Осипенко Игорь Васильевич**

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ  
ДЛЯ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСКОГО  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Гомель 2002

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Верига Б.А., заведующий кафедрой «Промышленная электроника» ГГТУ им. П.О. Сухого

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Ушаков Ю.С., ведущий научный сотрудник Гомельского конструкторского бюро «Луч»

кандидат технических наук, доцент Кудин В. П., заведующий кафедрой «Информационные технологии» МИТСО

Оппонирующая организация: Белорусский государственный университет транспорта

Защита состоится 22 марта 2002 г. в 11-00 на заседании совета по защите диссертаций К 02.13.01 в Учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» по адресу: 246746, г. Гомель, пр-т Октября, 48, корп. 1, ауд. 516, Учреждение «Гомельский государственный технический университет Сухого», (0232) 48-41-85.

можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

сентября 2002 г.

Е. А. Храбров

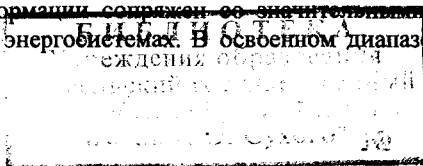
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Республиканские программы энергосбережения на 1996-2000 гг. и 2001-2005 гг. разработаны во исполнение решений Президента и Правительства Республики Беларусь в целях проведения эффективной целенаправленной энергосберегающей политики координации деятельности государственных органов по повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов. Данные программы определяют приоритетные направления реализации государственной политики в области энергосбережения. К ним относятся разработка и внедрение:

- новых энергосберегающих технологий, оборудования, материалов и средств автоматизации основных и вспомогательных процессов производства;
- автоматизированных систем управления энергоблоками, объектами и энергосистемами в целом;
- информационных систем контроля и учета энергоресурсов.

В связи с этим последние годы характеризуются процессом внедрения в сферу энергетического хозяйства современных автоматизированных систем диспетчерского управления энергетическими объектами (например, комплекс телемеханики «Сириус»), автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ). Для обеспечения своего назначения вышеперечисленные системы строятся на базе вычислительных комплексов по многоуровневой схеме. Связь между этими уровнями обеспечивается за счет каналов передачи информации, в том числе посредством высокочастотных (ВЧ) каналов передачи данных, осуществляемой по высоковольтным линиям электропередач (ВЧ связь по ЛЭП). Широкое внедрение вышеперечисленных автоматизированных систем, а также ввод в эксплуатацию новых энергетических объектов способствуют тому, что значительно возрастают объемы передаваемой информации между энергетическими объектами по сетям ВЧ каналов передачи информации. И во многих крупных энергетических объединениях сложилась ситуация, когда объемы информации, подлежащей передаче, превышают возможную пропускную способность самих каналов связи. В связи с этим растет потребность в создании новых информационных ВЧ каналов для передачи такого рода информации.

В настоящее время для целей ВЧ передачи информации по ЛЭП используется диапазон частот (20...600) кГц, который практически полностью занят уже существующими ВЧ каналами телефонной связи, телемеханики, релейной защиты и т.п. Их рабочие частоты выбраны не оптимальным образом в смысле достижения максимального количества каналов в энергосистеме, причем выбор частот для новых проектируемых каналов передачи информации сопряжен со значительными трудностями, особенно в крупных энергосистемах. В освободившемся диапазоне частот не-



возможно создать требуемое количество ВЧ каналов по двум основным причинам: вследствие недостаточной ширины его полосы и ввиду широкого разнеса соседних каналов при используемых методах модуляции.

В последнее время делаются попытки расширить и использовать для целей передачи информации по ЛЭП диапазон частот до 1000 кГц. Использование частот до 1000 кГц позволит решить сложившуюся в энергетике проблему «частотного голода», увеличить общее количество ВЧ каналов по ЛЭП для передачи статистической и управляющей информации.

Однако большая часть выпускаемого и используемого для этих целей ВЧ оборудования (ВЧ аппаратура уплотнения и передачи информации, аппаратура присоединения и обработки) в настоящее время по своим техническим характеристикам не позволяет работать в расширенном диапазоне частот. Кроме того, оно морально и физически устарело и не отвечает современным требованиям по выполняемым функциям, надежности, достоверности передачи информации и организации эксплуатации.

Необходимость существенной модернизации выпускаемого в республике ВЧ оборудования, используемого для целей передачи информации по ЛЭП, и применение для этого рабочего диапазона до 1000 кГц подтверждается крупными программами и разработками, которые выполняются ведущими отечественными организациями, работающими в сфере создания новейшего оборудования для ВЧ каналов передачи информации по заказам концерна «БЕЛЭНЕРГО»:

1. Могилевский завод «Зенит», г. Могилев, Республика Беларусь: «Разработка, выпуск каналообразующей аппаратуры уплотнения и передачи информации по ЛЭП». Приоритетным направлением разработки является расширение верхнего частотного диапазона работы аппаратуры с 600 кГц до 1000 кГц (согласно техническому заданию на аппаратуру АВК-1 ДУС2.000.007 от 01.04.99).

2. Научно-производственное объединение «Агат», г. Минск, Республика Беларусь: «Разработка нового поколения ВЧ аппаратуры уплотнения и передачи информации по ЛЭП на расширенный диапазон частот» (согласно техническому заданию на аппаратуру АВС-ВЛЗ ЕИРВ.465121.002 от 10.06.98).

Вышеперечисленное говорит о необходимости проведения исследований, направленных на совершенствование средств передачи информации по линиям электропередач, улучшение их технических и функциональных характеристик, создание новых технических устройств для целей ВЧ передачи информации по ЛЭП. Основное содержание исследований сформулировано в цели и задачах настоящей работы.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследования проводились в соответствии с заданием концерна «БЕЛЭНЕРГО» по совершенствованию и модернизации оборудования и средств автоматизации в рамках государственной научно-технической программы «Энерго-

сбережение», утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 382 от 10 июня 1996 г.

*Цель и задачи исследования.* Цель диссертационной работы заключается в разработке новых методов кодирования и сжатия информации и средств передачи ее по линиям электропередач для систем диспетчерского и технологического управления.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать новый метод кодирования информации на основе оригинальной оптимальной базисной функции;
- исследовать характеристики антенного способа присоединения для ВЧ каналов передачи информации по ЛЭП в расширенном диапазоне частот (20...1000) кГц;
- разработать и исследовать новое устройство обработки ВЧ сигнала для каналов передачи информации по ЛЭП – высокочастотный заградитель на связанных линиях;
- на основе разработанного метода кодирования информации создать структурную схему модема передачи информации, использующего оптимальную базисную функцию и провести ее компьютерное моделирование;
- разработать линейный усилитель мощности для ВЧ аппаратуры уплотнения и передачи информации по ЛЭП с улучшенными техническими характеристиками;
- изготовить опытные образцы усилителя мощности и антенных устройств присоединения, провести их промышленные испытания, внедрить в производство.

*Объект и предмет исследования.* Объектом исследования является передача информации по каналам высокочастотной связи, осуществляемая посредством проводов линии электропередач, а предметом исследования – способы передачи информации, ВЧ оборудование для каналов передачи информации по ЛЭП.

*Гипотеза.* Предполагалось, что эффективность ВЧ каналов передачи данных по линиям электропередач можно повысить за счет использования новых базисных функций при кодировании информации в каналах диспетчерской связи и телемеханики и применения новых технических решений для ВЧ оборудования передачи информации по ЛЭП.

*Методология и методы проведения исследования.* При выполнении теоретической части работы были использованы математические методы теорий функций, линейной алгебры и аналитической геометрии, физические методы теории электромагнитного поля, традиционные методы интегрального, дифференциального и операционного исчисления. Численные анализы проводились на персональных компьютерах с помощью современных математических пакетов программ. Подтверждение достоверности полученных теоретических результатов проводилось экспериментальными

исследованиями в лабораториях завода «Зенит» (г. Могилев) и Республиканского унитарного предприятия «Гомельэнерго» (г. Гомель).

Научная новизна и значимость полученных результатов. Разработан новый метод кодирования информации на основе оптимальной базисной функции. Получено аналитическое выражение для оптимальной базисной функции, обладающее рядом значительных преимуществ.

Исследованы характеристики антенного способа присоединения для ВЧ каналов передачи информации по ЛЭП в расширенном диапазоне частот (20...1000) кГц. Впервые выполнен электродинамический анализ антенного устройства на основе интегрального уравнения Поклингтона.

Предложено и исследовано новое устройство обработки ВЧ сигнала для каналов передачи информации по ЛЭП – высокочастотный заградитель на связанных линиях, который выполняет функцию заграждения высокочастотного сигнала, при этом не имеет гальванического контакта с ЛЭП и может выполнять одновременно функцию эффективного присоединителя.

Практическая и экономическая значимость полученных результатов.

Практическая значимость работы заключается в разработке модема передачи информации на основе теории оптимальной базисной функции, ограниченной во времени и имеющей минимум энергии вне заданной полосы частот, позволяющего повысить качество и увеличить объемы передаваемой информации, организовать ВЧ каналы передачи данных с плотным их расположением по частоте, тем самым увеличить общее число таких каналов в выделенной полосе частот; линейного усилителя мощности, позволяющего повысить надежность, помехозащищенность и дальность передачи служебной и телеметрической информации, расширить диапазон рабочих частот ВЧ аппаратуры уплотнения по ЛЭП; антенного устройства присоединения для ВЧ каналов передачи информации по ЛЭП и ее инженерной методики расчета.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в работе, внедрены на Могилевском заводе «Зенит» и Республиканском унитарном предприятии «Гомельэнерго» (г. Гомель) и используются при проведении лабораторных работ дисциплины «Электромагнитная совместимость и электромагнитные помехи» учебного плана студентов специальности Т 07.02.00 – «Промышленная электроника» в Гомельском государственном техническом университете имени П.О. Сухого.

Экономическая значимость заключается в существенном упрощении конструкций и повышении технико-экономических характеристик оборудования обработки и присоединения к высоковольтной линии электропередач, что позволяет почти в 30 раз уменьшить затраты по сравнению с используемым в настоящее время стандартным оборудованием обработки и присоединения при помощи конденсаторов связи и индуктивно-емкостных заградителей.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. Автором защищаются:

1. Новый метод кодирования информации на основе впервые используемой оптимальной базисной функции, разработанной автором.
2. Результаты электродинамического анализа антенного устройства присоединения на основе интегрального уравнения Поклингтона в расширенном диапазоне рабочих частот (20...1000) кГц.
3. Результаты исследования и схемные реализации нового устройства обработки ВЧ сигнала – высокочастотного заградителя на связанных линиях.
4. Структурная схема модема передачи информации, использующего оптимальную базисную функцию.
5. Принципиальная электрическая схема линейного усилителя мощности с улучшенными техническими характеристиками для ВЧ аппаратуры уплотнения и передачи информации по линиям электропередач.

Личный вклад соискателя. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем. Гипотеза, общие направления исследований были разработаны и реализованы при участии научного руководителя.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты исследований, содержащиеся в диссертации, докладывались, обсуждались и получили одобрение на:

- международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Гомель, 1998 г.; г. Гомель, 2000 г.);
- международной научно-технической конференции «Современные направления развития производственных технологий и робототехники» (г. Могилев, 1999 г.);
- первой региональной межвузовской научно-технической конференции студентов (г. Гомель, 1999 г.);
- международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов (г. Гомель, 2001 г.);
- международной научно-технической конференции «Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация» (г. Гомель, 2001 г.);
- межкафедральном семинаре «Энергетика и промышленная электроника» ГТТУ имени П.О. Сухого в 1998-2001 гг.

Опубликованность результатов. Результаты диссертации опубликованы в двух статьях журналов, пяти статьях материалов конференций, пяти тезисах докладов. Общее количество опубликованных материалов составляет 34 страницы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и 2 приложений. Общий объем работы составляет 177 страниц, в том числе 71 рисунок на 43 страницах, 27 таблиц на 11 страницах, 2 приложения на 2 страницах и список из 71 используемого источника на 5 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* сделан вывод, что в единой системе производства, передачи, распределения и эффективного использования электрической энергии информационным ВЧ каналам передачи данных принадлежит важная роль и совершенствование оборудования, используемого для этих целей, было и остается актуальной задачей.

*В общей характеристике* работы обоснована актуальность темы, ее связь с научно-исследовательскими работами Республики Беларусь, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна, практическая и экономическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

*Первая глава* посвящена изучению современного состояния и перспективам развития средств передачи информации по ЛЭП. Приведены общие сведения о ВЧ каналах передачи информации по ЛЭП, их особенности. Дан обзор тенденций современного развития ВЧ аппаратуры уплотнения и передачи информации по ЛЭП, указаны перспективные направления модернизации и совершенствования аппаратуры применительно к отечественным энергосетям. Обозначен круг существующих в настоящее время технических проблем, характерных для ВЧ каналов передачи информации по ЛЭП, которые ограничивают возможность их дальнейшего широкого развития, как основного средства связи в энергетике. К ним относятся:

- несовершенство ВЧ оборудования, используемого для целей передачи информации по ЛЭП, которое морально и физически устарело и не отвечает современным требованиям по выполняемым функциям, надежности, достоверности передачи информации и организации эксплуатации;
- невозможность создания требуемого количества каналов связи для передачи возросших потоков статистической и управляющей информации между энергетическими объектами в освоенном для целей ВЧ связи диапазоне частот, по причине того, что он практически полностью занят уже существующими ВЧ каналами телефонной связи, телемеханики, релейной защиты и т.п. (проблема «частотного голода»).

Сформулированы цель и задачи исследования, чем определены структура и общее содержание работы.

*Во второй главе* рассмотрена задача оптимального кодирования информации на основе базисных функций, ограниченных во времени и имеющих минимум энергии вне заданной полосы, которые позволяют организовать ВЧ связь с плотным расположением каналов передачи информации в выделенной полосе частот.

Первоначально было предложено записать аналитическое выражение такой базисной функции в виде



$$f(t) = \frac{\sin(N \cdot \omega_0 \cdot t)}{N \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)} \cos^p(\omega_0 \cdot t), \quad (1)$$

где  $N, p$  – параметры базисной функции  $f(t)$ ;  $\omega_0$  – граничная частота спектра базисной функции  $f(t)$ .

Затем исследовались свойства и параметры выбранного базиса и проведен сравнительный анализ параметров предложенного базиса по формуле (1) с известным оптимальным базисом и функциями, подобными оптимальному базису, в частности, с известной функцией Котельникова вида  $\sin(x)/x$ .

Установлено, что предложенный базис обладает следующими достоинствами:

- удовлетворяет основному критерию минимизации ошибок передачи информации – ортогональности;
- допускает ограничения во временном интервале и обладает при этом энергетическими параметрами, близкими к оптимальному базису;
- спектр базисной функции близок к прямоугольному и по критерию минимизации энергии в частотной области вне основной полосы частот близок к оптимальному.

Далее рассмотрена структурная схема модема передачи информации, использующего базисную функцию  $f(t)$  (рис. 1). Устройство состоит из передающего (модулятора) и приемного (демодулятора) узлов. Отличительным узлом данного устройства является схема генератора базисных функций, которая построена на основании предложенного аналитического выражения  $f(t)$ . Рассмотрен частный вид схемы при  $N = 4, p = 2$ .

Передающая часть устройства осуществляет аппроксимацию полезного сигнала последовательностью базовых функций  $f_i(t)$  и состоит из следующих схем: генератора базисных функций  $f_i(t)$ ; выборки и хранения; перемножения; сумматора. Приемная часть устройства осуществляет обратное преобразование, декодирование полезного сигнала и состоит из: генератора базисных функций; сумматора; схемы деления и перемножения; схемы суммирования; схемы фильтрации полезного сигнала.

Полезный сигнал одновременно поступает на входы устройств выборки и хранения (УВХ $i$ ). Общее количество параллельно работающих устройств УВХ составляет четыре ( $i = 1...4$ ), чем и обеспечивается необходимое количество выборок полезного сигнала за время полного развертывания базисной функции  $f_i(t)$ . Устройства УВХ работают в двух режимах: 1) режим выборки; 2) режим хранения информации. В первом режиме сигнал на выходе УВХ $i$  стремится повторить сигнал на его входе (т. е. происходит отслеживание (повторение) полезного сигнала). Режим два обеспечивает хранение мгновенных значений полезного сигнала на время полного развертывания базисной функции  $f_i(t)$ . Выбор режима осуществляется по сигналу управления  $U_{упр}$ , представляющий собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов, длительность единичной посылки которого соответствует времени выборки полезной информации.

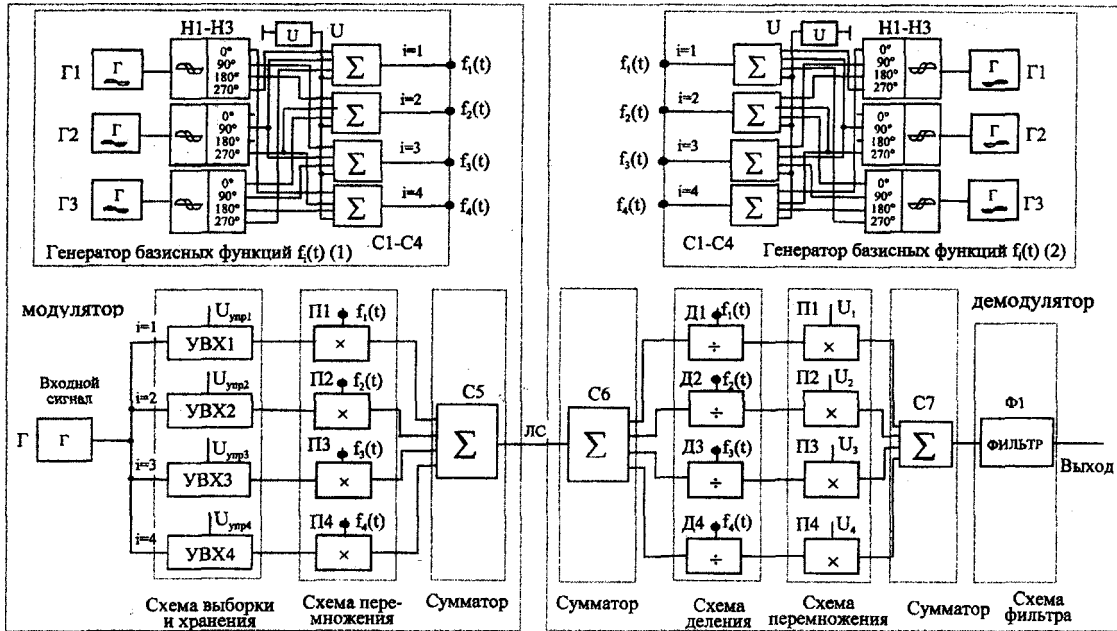


Рис. 1. Структурная схема модема передачи информации:

$\Gamma$  – генератор входного сигнала; Г1-Г3 – опорные генераторы; Н1-Н3 – цепи сдвига сигналов опорных генераторов на 0, 90, 180, 270°; УВХ1-УВХ4 – устройства выборки и хранения информации; П1-П4 – перемножители; Д1-Д4 – делители; ЛС – линия связи;  $U_{упр1}$ - $U_{упр4}$  – напряжения управления устройствами выборки и хранения;  $f_1(t)$ - $f_4(t)$  – выходы генератора базисных функций;  $U_1$ - $U_4$  – напряжения перемножения;  $U$  – источник постоянного опорного напряжения; Ф1 – фильтр; С1-С7 – сумматоры

Устройство перемножения (П) осуществляет перемножение хранимого устройством УВХи мгновенного значения полезного сигнала ( $A_i$ ) с опорным значением базисной функции  $f_i(t)$  в течении времени полного ее развертывания. В результате на выходе устройства перемножения преобразованная базисная функция  $A_i f_i(t)$  несет информацию о мгновенном значении полезного сигнала.

Необходимая последовательность импульсов базисных функций  $f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t)$  и их временной сдвиг между собой осуществляется схемой генератора базисных функций, которая состоит из трех опорных генераторов синусоидальной формы ( $\Gamma 1, \Gamma 2, \Gamma 3$ ), цепей сдвига сигналов опорных генераторов на  $0, 90, 180, 270^\circ$  ( $H1-H3$ ), источника постоянного опорного напряжения ( $U$ ) и сумматоров ( $C1-C4$ ).

Сумматор осуществляет мультиплексирование входных сигналов и передачу его в линию связи (ЛС). На приемном конце осуществляется обратное преобразование полезного сигнала.

Для подтверждения правильности разработанной схемы проведено ее компьютерное моделирование при помощи пакетов программ Matlab, Electronics Workbench. Результаты компьютерного анализа схемы приведены на рис. 2. В качестве результатов приведены временные диаграммы в контрольных точках устройства. Результаты компьютерного моделирования доказывают правильность разработанной схемы устройства передачи информации на структурном уровне.

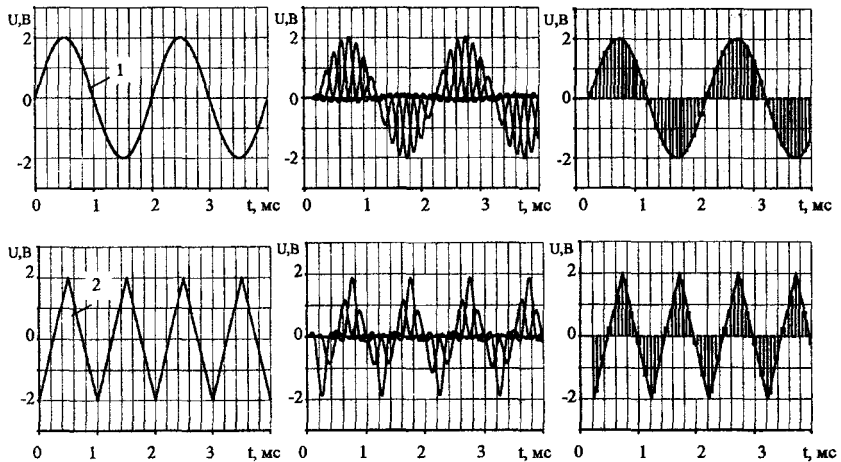


Рис. 2. Временные диаграммы устройства в контрольных точках для синусоидального (1) и пилообразного (2) сигналов:  
а) входной сигнал; б) выход модулятора; в) выходной сигнал

Третья глава посвящена исследованию антенного способа присоединения для ВЧ каналов передачи информации по линиям электропередач (рис. 3а). Основной целью являлось исследование характеристик антенного присоединения в расширенном диапазоне частот (20...1000) кГц.

Предварительно на основании теории электромагнитного поля были исследованы высокочастотные поля вокруг ЛЭП, выполнен оценочный расчет напряжений в приемной антенне. Это позволило сделать вывод о возможности использования антенного устройства в расширенном диапазоне частот и перспективность его применения в области высоких частот.

Далее выполнен строгий электродинамический анализ антенного устройства на основании интегрального уравнения Поклингтона:

$$\int_L J(x') \left[ k^2 (\vec{x} - \vec{x}') - \frac{\partial^2}{\partial x \partial x'} G(x, x') \right] \partial x' = \frac{-jk}{120\pi} (\vec{E}^{nad} \cdot \vec{x}), \quad (2)$$

где  $J(x')$  – осевой ток на антенне;  $\vec{E}^{nad}$  – поле сторонних источников;  $\vec{x}, \vec{x}'$  – координаты криволинейной антенны;  $G(x, x') = (e^{-jk|\vec{x}-\vec{x}'|}) / (4\pi|\vec{x}-\vec{x}'|)$  – функция Грина, зависящая от расстояния между точкой наблюдения  $\vec{x}$  и интегрирования  $\vec{x}'$  в криволинейных координатах  $(x, x')$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновой вектор.

Уравнение (2) решалось методом Галеркина с использованием кусочно-синусоидального базиса для аппроксимации тока (см. рис. 3б).

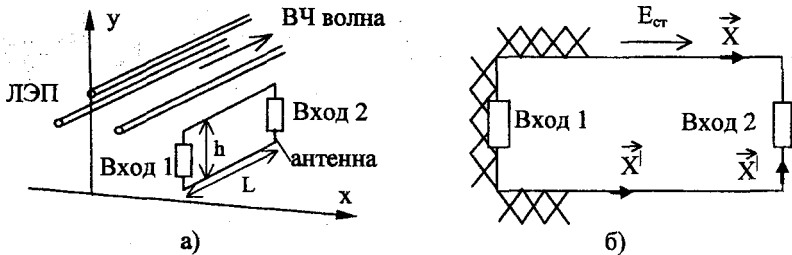


Рис. 3. Антенное присоединение:

а) расположение антенны относительно ЛЭП;

б) представление тока  $J(x)$  в кусочно-синусоидальном базисе

На рис. 4 представлены результаты решения уравнения для геометрии ЛЭП 110 кВ, антенны в виде рамки длиной  $L = 100$  м, шириной  $h = 3$  м, с характеристическим сопротивлением 900 Ом.

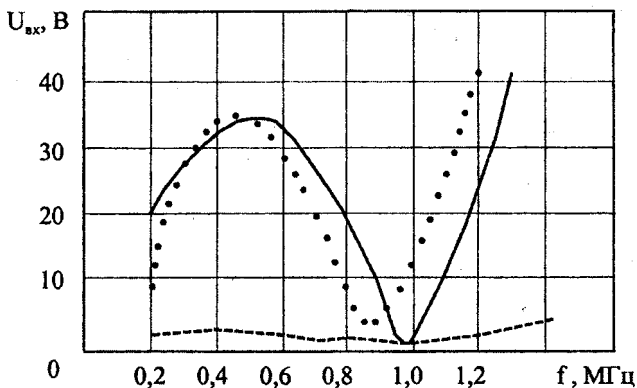


Рис. 4. Напряжения на входах антенного устройства присоединения:

- теоретическая зависимость (вход 1);
- теоретическая зависимость (вход 2);
- экспериментальная зависимость (вход 2)

Для подтверждения правильности теоретических расчетов проведены экспериментальные исследования характеристик антенного устройства присоединения на макете, выполненный в масштабе 1:100, и в реальных эксплуатационных условиях. В целом проведенное исследование антенного устройства позволило получить следующие результаты:

- теоретические и экспериментальные частотные характеристики антенного устройства присоединения в расширенном диапазоне частот (20...1000) кГц;

- при оптимальных размерах антенного устройства и места его расположения под проводами ЛЭП потери на присоединение составляют менее 10 дБ;

- антенные устройства присоединения обладают ярко выраженными направленными свойствами, что позволяет разделить сигналы различных направлений, а в передающем режиме – изменять направление посылки сигнала по ЛЭП путем коммутации входов.

Испытание антенного способа присоединения показало, что он характеризуется следующими преимуществами (по сравнению с конденсаторным):

- простотой исполнения устройства;
- высокой экономичностью присоединения (в среднем в 30 раз дешевле конденсаторного);
- безопасностью по причине отсутствия гальванического контакта с ЛЭП.

Далее рассмотрена схема нового устройства обработки – высокочастотного заградителя на связанных линиях. Используемый в настоящее время высокочастотный заградитель выполнен в виде полосозаграждающего фильтра на сосредоточенных LC элементах и монтируется непосредственно на фазных проводах высоковольтной линии. Предлагаемый ВЧ заградитель на связанных линиях выполняет функцию заграждения высокочастотного сигнала, при этом не имеет гальванического контакта с ЛЭП и может выполнять одновременно функцию эффективного присоединителя.

Структурная схема такого устройства приведена на рис. 5. По линии ЛЭП 1-2 распространяется электромагнитная волна частоты  $f$  с постоянной распространения  $\gamma_0 = \alpha_0 + j\beta_0$ , где  $\alpha_0$  – коэффициент затухания в линии,  $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  – длина волны в линии. Вторая линия 3-4 имеет электромагнитную связь величины  $\chi$  с первой на участке длиной  $l_1$  и  $\gamma_1$  – постоянная распространения волны в этой линии. Вторая линия по входам 3 и 4 замкнута дополнительной линией длины  $l_2$  с волновым сопротивлением согласованным с волновым сопротивлением линии 3-4 и постоянной распространения в этой линии –  $\gamma_2$ .

Матрица рассеяния восьмиполосника 1-2-3-4,  $[S_1]$  удовлетворяет следующим условиям:  $S_{11}=S_{22}=S_{33}=S_{44}=0$  (входы согласованы);  $S_{12} = S_{21}$ ;  $S_{34} = S_{43}$ ;  $S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42}$ ;  $S_{14} = S_{41} = S_{32} = S_{23}$  (схема симметрична).

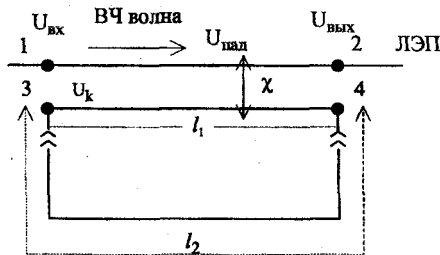


Рис. 5. Устройство ВЧ заградителя на связанных линиях

Матрица рассеяния  $[S_2]$  подключаемой линии  $l_2$  диагональна и равна

$$[S_2] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\gamma_2 l_2} \\ e^{-\gamma_2 l_2} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для суммарной матрицы

$$[S_{\Sigma}] = \begin{bmatrix} S_{11}^{\Sigma} & S_{12}^{\Sigma} \\ S_{21}^{\Sigma} & S_{22}^{\Sigma} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$S_{11}^{\Sigma} = S_{22}^{\Sigma} = \frac{2 \cdot S_{13} \cdot S_{14}}{1 - e^{-\gamma_2 l_2} \cdot S_{34}} \cdot e^{-\gamma_2 l_2}; \quad S_{12}^{\Sigma} = S_{21}^{\Sigma} = S_{12} + \frac{S_{13}^2 + S_{14}^2}{1 - e^{-\gamma_2 l_2} \cdot S_{34}} \cdot e^{-\gamma_2 l_2}. \quad (5)$$

Условие реализации ВЧ заграждения определяется из соотношения:

$$\frac{U_{ax}}{U_{bvx}} = S_{12}^{\Sigma} = 0. \quad (6)$$

Рассмотрены наиболее важные случаи реализации ВЧ заградителя:

1. Симметричный направленный ответвитель с направленностью первого рода ( $S_{13} = 0$ ;  $\gamma_0 = \gamma_1$ ;  $S_{34} = S_{12}$ ).
2. Симметричный направленный ответвитель с направленностью второго рода ( $S_{14} = 0$ ;  $S_{34} = S_{12}$ ;  $\gamma_0 = \gamma_1$ ).
3. Направленный ответвитель, не имеющий симметрии относительно обеих координатных плоскостей и осевой симметрии.

Результаты расчетов вышеуказанных случаев показывают возможность реализации функции ВЧ заграждения на направленном ответвителе с направленностью второго рода.

На рис. 6 представлены зависимости электромагнитной связи  $\chi$  от параметров линий  $l_1$  и  $l_2$ . На рис. 7 показаны заграждающие свойства ВЧ заградителя для различных значений  $\chi$ . На рис. 8 показано, что ВЧ заградитель может выполнять одновременно и функцию эффективного присоединителя.

В четвертой главе предложены технические средства повышения эффективности информационных ВЧ каналов передачи данных по ЛЭП. С этой целью был рассмотрен линейный усилитель мощности для ВЧ аппаратуры уплотнения и передачи информации по ЛЭП.

Одним из направлений совершенствования ВЧ аппаратуры уплотнения и передачи информации по ЛЭП в системах энергоснабжения является создание линейного усилителя мощности. Необходимость создания усилителя с улучшенными техническими характеристиками связана с требованием модернизации аппаратуры по следующим направлениям:

- расширение диапазона рабочих частот до 1000 кГц;
- повышение выходной мощности.

Технические характеристики выпускаемых отечественной промышленностью усилителей и нового разработанного усилителя мощности приве-

дены в табл. 1, где МУС-1 – усилитель, применяемый в аппаратуре АВС-1, АО «Нептун», Украина; МУС-2 – усилитель, применяемый в аппаратуре АВК, ПО «Зенит», Беларусь; ЛУС-3 – новый разработанный линейный усилитель мощности.

Разработанный усилитель мощности обладает следующими улучшенными техническими характеристиками (табл. 1):

- расширенным частотным диапазоном усиливаемых сигналов до 1000 кГц;

- повышенной выходной мощностью до 20 Вт на нагрузке 75 Ом;

- высоким коэффициентом полезного действия –  $\eta = 54\%$ .

К достоинствам разработанного усилителя также можно отнести:

- высокая надежность, за счет отсутствия сквозных токов и как следствия перегрева транзисторов выходного каскада усилителя;

- минимальные размеры, масса;

- использование комплектующих широкого применения (транзисторов предварительного каскада: КТ3107, КТ3102, КТ646, КТ626, оконечного каскада: КТ9180, КТ9181);

- простота схемы ее регулировки и настройки.

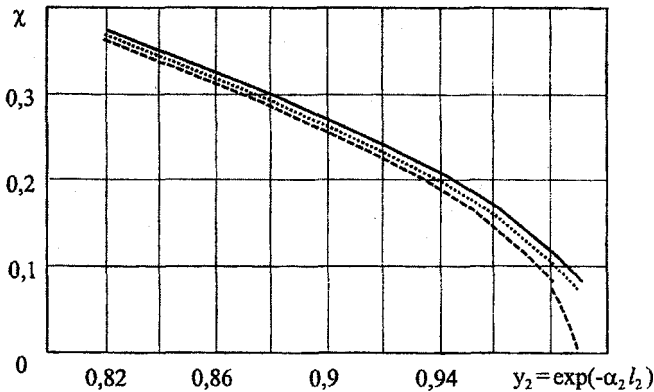


Рис. 6. Зависимость электромагнитной связи  $\chi$  от параметров линий для различных значений потерь в линии  $l_1$ :

—  $\alpha_1 l_1 = 0,002$ ;

⋯  $\alpha_1 l_1 = 0,005$ ;

— · —  $\alpha_1 l_1 = 0,01$



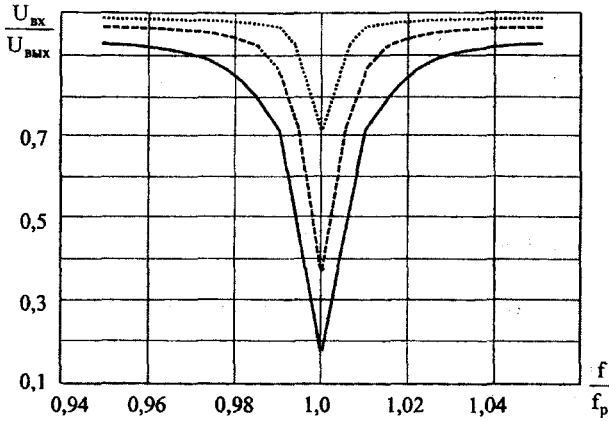


Рис. 7. Коэффициент передачи прямого тракта в режиме ВЧ заградителя при различных значениях  $\chi$ :

- .....  $\chi = 0,1$ ;
- $\chi = 0,2$ ;
- $\chi = 0,3$

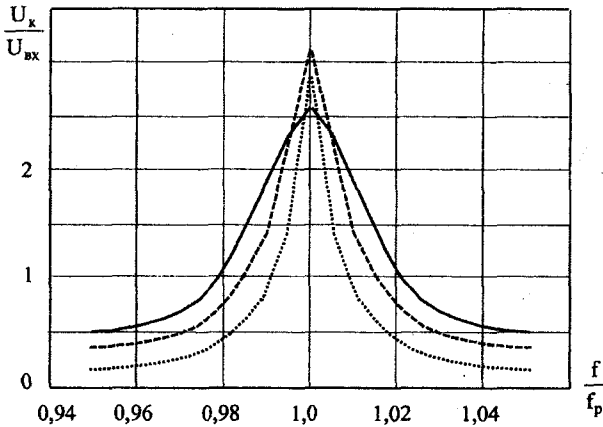


Рис. 8. Относительное напряжение ВЧ заградителя при различных значениях  $\chi$ :

- .....  $\chi = 0,1$ ;
- $\chi = 0,2$ ;
- $\chi = 0,3$

Технические характеристики усилителей мощности различных типов

Параметр \ Тип усилителя	МУС-1	МУС-2	ЛУС-3, разработанный
Фирма производитель	АО «Непгун» г. Одесса	ПО «Зенит» г. Могилев	
Страна производитель	Украина	Беларусь	
Тип аппаратуры	АВС-1	АВК	АВК-1
Диапазон рабочих частот, кГц	20-1000	20-500	20-2500
Тип усилителя (класс выходного каскада)	А	АВ	АВ
Входное сопротивление, не менее, кОм	1		
Сопротивление нагрузки, Ом	18,75 или 75		
Номинальное входное напряжение, В	1		
Номинальная выходная мощность, Вт ( $f=500$ кГц, $U_{ex}=1$ В, $R_n=18,75$ Ом)	12	15	16
Максимальная выходная мощность, Вт ( $f=500$ кГц, $R_n=18,75$ Ом, $U_{пит}=U_{ном}$ )	15	17	20
Напряжение питания МУС, В			
– выходной каскад	56	$\pm 30$	$\pm 30$
– предварительный	–	–	$\pm 10$
Потребляемый ток, не более, А	1,8	0,9	0,5
Коэффициент полезного действия усилителя, %	15	30	54
Неравномерность АЧХ в диапазоне частот 0,1-1 МГц, не более, дБ	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,2$
Нелинейность коэффициента передачи в динамическом диапазоне $U_{ax}=0,05-1$ В, не более, дБ	$\pm 2,5$	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$
Габаритные размеры, мм	300×200×200	150×250×200	70×250×200
Масса, кг	2,0	1,5	1,0

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена научно-прикладная задача по разработке и совершенствованию средств передачи информации по высоковольтным линиям электропередач для систем диспетчерского и технологического управления. Это подтверждается следующими результатами, полученными в данной диссертационной работе:

1. Разработан новый метод кодирования информации путем выбора оптимальной базисной функции, ограниченной во времени и имеющей минимум энергии вне заданной полосы частот и удовлетворяющей основному критерию минимизации ошибок передачи информации – ортогональности соседних отсчетов передаваемой информации [3, с. 146-147; 11, с. 49-50].

2. Исследованы характеристики антенного способа присоединения для ВЧ каналов передачи информации по ЛЭП в расширенном диапазоне частот (20...1000) кГц на основании интегрального уравнения Поклингтона и доказана возможность его использования в качестве элемента присоединения в данном диапазоне [5, с. 116-118; 8, с. 113-115].

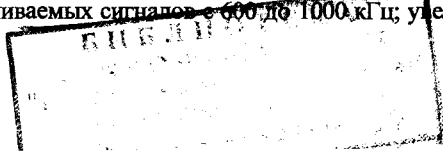
3. Предложено и исследовано новое устройство обработки ВЧ сигнала для каналов передачи информации по ЛЭП – высокочастотный заградитель на связанных линиях, отличающийся отсутствием гальванического контакта с ЛЭП при обеспечении одновременно функции эффективного присоединения [5, с. 116-118].

4. На основе разработанного метода кодирования информации создана структурная схема модема для передачи информации, позволяющего повысить качество и увеличить объем передаваемой информации, организовать ВЧ каналы передачи данных с плотным их расположением по частоте, тем самым увеличить общее число таких каналов в выделенной полосе частот. Проведенное компьютерное моделирование доказывает правильность разработанной структурной схемы устройства [1, с. 10-12; 6, с. 118-120; 10, с. 51].

5. Разработан линейный усилитель мощности для ВЧ аппаратуры уплотнения и передачи информации по ЛЭП с улучшенными техническими характеристиками, позволяющий расширить диапазон рабочих частот ВЧ аппаратуры уплотнения, повысить надежность, помехозащищенность и дальность передачи служебной и телеметрической информации в энергетике [1, с. 10-12; 4, с. 190-193; 10, с. 51; 12, с. 25].

6. Изготовлены, испытаны и внедрены:

– линейный усилитель мощности для ВЧ аппаратуры уплотнения по линиям электропередач на Могилевском заводе «Зенит». Производственные испытания усилителя показали следующее улучшение технических характеристик по сравнению с применяемыми в настоящее время: расширение верхней частоты усиливаемых сигналов с 600 до 1000 кГц; увеличение на макси-



мальной частоте выходной мощности с 8 до 20 Вт; снижение потребляемой мощности более, чем в 3 раза.

– антенное устройство присоединения для ВЧ каналов передачи информации по линиям электропередач в Гомельских электрических сетях РУП «Гомельэнерго». Испытания антенных устройств показали, что антенное присоединение характеризуется следующими преимуществами по сравнению с широко используемым конденсаторным: простотой исполнения устройства; безопасностью по причине отсутствия гальванического контакта с линией электропередач; выраженной направленностью, позволяющее разделить сигналы различных направлений, а в передающем режиме – изменять направление посылки сигнала по ЛЭП путем коммутации входов; более низкой стоимостью [5, с. 116-118; 12, с. 25].

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Верига Б. А., Осипенко В.Т., Осипенко И.В. Тенденции развития аппаратуры высокочастотной связи и телемеханики по линиям электропередачи //Энергоэффективность. – 1999. – № 9. – С. 10-12.

2. Булкин Л.Г., Клопов Д.Т., Осипенко И.В. Способ реорганизации каналов ВЧ связи по линиям электропередачи //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 2. – С. 9-16.

3. Верига Б.А., Осипенко И.В. Выбор базисных функций с наименьшей энергией за пределами заданной полосы //Современные проблемы машиноведения: Материалы международной науч.-техн. конф., посвящ. П. О. Сухому. – Гомель: ГПИ им. П.О. Сухого, 1998. – Т. 2. – С. 146-147.

4. Кухаренко С. Н., Осипенко И.В. Спектральный анализ усилителя периодических сигналов //Современные проблемы машиноведения: Материалы международной науч.-техн. конф., посвящ. П. О. Сухому. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2000. – Т. 2. – С. 190-193.

5. Осипенко И.В. Антенное устройство присоединения для высокочастотной связи по линиям электропередачи //Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Материалы международной науч.-техн. конф. – Гомель: Учреждение образования «ГГТУ им. П.О. Сухого», 2001. – С. 116-118.

6. Осипенко И.В., Федоренко О.В., Верига Б.А. Модем для ВЧ связи по ЛЭП //Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Материалы международной науч.-техн. конф. – Гомель: Учреждение образования «ГГТУ им. П.О. Сухого», 2001. – С. 118-120.

7. Виноградов Э. М., Кухаренко С. Н., Осипенко И.В. Способ повышения качества выходного напряжения инверторов с ШИМ //Современные про-

блемы машиноведения: Материалы международной науч.-техн. конф., посвящ. П.О. Сухому. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2000. – Т. 2. – С. 201-203.

8. Гизенко В.В., Осипенко И.В., Федоренко О.В. Электродинамический анализ параметров двухпроводной линии //Сборник материалов международной межвузовской НТК студентов, аспирантов и магистрантов. – Гомель, 2001. – С. 113-115.

9. Верига Б.А., Осипенко И.В. Автоматический частотный корректор для аппаратуры ВЧ связи и телемеханики //Современные направления развития производственных технологий и робототехники: Материалы международной науч.-техн. конф. – Могилев: ММИ, 1999. – С. 26.

10. Осипенко И.В. Основные направления разработки и модернизации аппаратуры связи и телемеханики для каналов ВЧ-связи по линиям электропередачи //Современные направления развития производственных технологий и робототехники: Материалы международной науч.-техн. конф. – Могилев: ММИ, 1999. – С. 51.

11. Осипенко И.В., Федоренко О.В. Алгоритм восстановления сигнала в системе базисных функций  $\sin x/x$  //Тезисы докладов первой региональной межвузовской НТК студентов. – Гомель, 1999. – С. 49-50.

12. Верига Б.А., Козусев Ю.А., Кухаренко С.Н., Осипенко И.В. Линейный усилитель мощности для каналов высокочастотной связи по линиям электропередачи //Современные направления развития производственных технологий и робототехники: Материалы международной науч.-техн. конф. – Могилев: ММИ, 1999. – С. 25.

## РЕЗЮМЕ

**Осипенко Игорь Васильевич**

**Разработка средств передачи информации для систем диспетчерского и технологического управления**

Оборудование высокочастотной (ВЧ) связи по линиям электропередач (ЛЭП), аппаратура уплотнения и передачи информации, оборудование обработки и присоединения к проводам ЛЭП, способы передачи, методы сжатия и кодирования информации, анализ, математическое и программное обеспечение, структура ВЧ каналов передачи информации по ЛЭП.

Объект исследования – передача информации по каналам ВЧ связи, осуществляемая посредством проводов ЛЭП.

Предмет исследования – способы передачи информации, ВЧ оборудование для каналов передачи информации по ЛЭП.

Цель работы заключается в разработке новых методов кодирования и сжатия информации и средств передачи ее по линиям электропередач для систем диспетчерского и технологического управления.

Научная и практическая значимость полученных результатов состоит в том, что:

- разработан новый метод кодирования информации путем выбора оптимальной базисной функции;

- исследованы характеристики антенного способа присоединения для каналов передачи информации по ЛЭП в расширенном диапазоне рабочих частот (20...1000) кГц;

- предложена схема нового устройства обработки – высокочастотного заградителя на связанных линиях;

- разработана принципиальная электрическая схема и опытный образец линейного усилителя мощности для ВЧ аппаратуры уплотнения по ЛЭП.

Результаты исследования использованы на Могилевском заводе «Зенит», Республиканском унитарном предприятии «Гомельэнерго».

Область применения – организации и предприятия, занимающиеся проектированием, производством и эксплуатацией оборудования ВЧ каналов передачи информации по ЛЭП.

## РЭЗІЮМЕ

Асіпенка Ігар Васільевіч

Распрацоўка сродкаў перадачы інфармацыі для сістэм дыспетчарскага і тэхналагічнага кіравання

Абсталяванне высокачастотнай (ВЧ) сувязі па лініях электраперадач (ЛЭП), апаратура ўшчыльнення і перадачы інфармацыі, абсталяванне апрацоўкі і далучэння да правадоў ЛЭП, спосабы перадачы, метады суціскання і кадзіравання інфармацыі, аналіз, матэматычнае і праграмнае забеспячэнне, структура ВЧ каналаў перадачы інфармацыі па ЛЭП.

Аб'ект даследавання – перадача інфармацыі па каналах ВЧ сувязі, якая ажыццяўляецца пры дапамозе правадоў ЛЭП.

Прадмет даследавання – спосабы перадачы інфармацыі, ВЧ абсталяванне для каналаў перадачы інфармацыі па ЛЭП.

Мэта работы заключаецца ў распрацоўцы новых метадаў кадзіравання і суціскання інфармацыі і сродкаў яе перадачы па лініях электраперадач для сістэм дыспетчарскага і тэхналагічнага кіравання.

Навуковая і практычная значнасць атрыманых вынікаў заключаецца ў тым, што:

– распрацаваны новы метады кадзіравання інфармацыі шляхам выбару аптымальнай базіснай функцыі;

– даследаваны характарыстыкі антэннага спосабу далучэння да каналаў перадачы інфармацыі па ЛЭП у расшыраным дыяпазоне рабочых частот (20...1000) кГц;

– прапанавана схема прынцыпова новага ўстройства апрацоўкі – высокачастотнага забруджвальніка на звязаных лініях;

– распрацавана прынцыпіяльная схема і вопытны ўзор лінейнага ўзмацняльніка магутнасці для ВЧ апаратуры ўшчыльнення па ЛЭП.

Вынікі даследавання выкарыстаны на Магілёўскім заводзе «Зеніт», Рэспубліканскім унітарным прадпрыемстве «Гомельэнерга».

Вобласць прымянення – арганізацыі і прадпрыемствы, якія займаюцца практаваннем, вытворчасцю і эксплуатацыяй абсталявання ВЧ каналаў перадачы інфармацыі па ЛЭП.

**SUMMARY****Osipenko Igor Vasilievich****Developing Means of Data Transfer for the Systems of  
Supervisory and Process Control**

Instrumentation for high frequency (HF) communication via electric power lines, data compression and data transfer instruments, instrumentation for processing and coupling to electric power lines, methods of transfer, methods of data compression and encoding, analysis, software, electric power line HF data transfer channel structure.

Research object – data transfer by HF communications channels via electric power lines.

Research subject – methods of data transfer, HF instrumentation for data transfer channels via electric power lines

Research objective – development of new methods of data encoding and compression of the information and means of data transfer it via electric power lines for the systems of supervisory and process control.

Novelty of the results obtained:

– a new method of data encoding by selecting optimum base function has been obtained;

– characteristics of antenna coupling for data channels via electric power lines in wide operating frequency range (20...1000) kHz have been studied;

– schematic diagram of fundamentally new processing device – HF rejecter on connected lines has been proposed;

– circuit diagram and prototype model of linear power amplifier for HF instrumentation for compression via electric power lines has been developed.

The results of the study were introduced at Mogilev Plant «Zenit» and Republican Unitary Enterprise «Gomelenergo».

Field of application – organizations and enterprises for design, manufacture and operation of instrumentation for HF channels for data transfer via electric power lines.





**Осипенко Игорь Васильевич**

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ  
ДЛЯ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСКОГО  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и  
систем управления

Редактор: Н. Г. Мансурова  
Компьютерная верстка: Н. Б. Козловская

Подписано в печать 14.02.2002.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. печ. л. 1,39. Уч. – изд. л. 1,58. Тираж 120 экз. Изд. № 14.  
Заказ № **231**

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».  
Лицензия ЛВ № 399 от 12.06.2001.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Отпечатано на ризографическом оборудовании Учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».  
Лицензия ЛП № 114 от 12.06.2001.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.