

Эльшафеи Мохамед Абдельмонеим Таха

**Исследование методов формирования единого носителя
данных телеизмерений в многоканальной системе регистрации
телеметрической информации**

05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

M. Elshafey

Москва – 2015

Научный руководитель: Сидякин Иван Михайлович, к.т.н., доцент
кафедры информационных систем и
телекоммуникаций МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: Гарипов Вадим Кадимович, д.т.н., профессор
кафедры «Информационные технологии и
приборостроение» Московского технологического
университета.

Выхованец Валерий Святославович, д.т.н., доцент,
ведущий научный сотрудник Института проблем
управления РАН.

Ведущая организация: ЗАО «Штрих-М», г. Москва, ул. Ленинская
Слобода, д. 19, стр. 4.

Защита диссертации состоится « 13 » октября 2015 г. в 14 час. 30 мин. на
заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613 м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью
организации, просьба направлять по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Муратов И.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2087433

Таха Э. Исследование методов

-434

Актуальность темы. В диссертационной работе представлены результаты исследований, направленных на повышение надежности передачи телеметрической информации (ТМИ) по каналу связи с шумами от объекта телеизмерений к системе сбора и обработки данных. Рассматривается случай, когда качество принимаемой информации меняется во времени, вследствие перемещения объекта относительно приемной станции или других факторов, вызывающих изменение характеристик шума в канале, вплоть до полной потери связи на некоторых временных участках. Для повышения надежности передачи и обеспечения постоянной связи с объектом телеизмерений, требуется разработать многоканальную систему регистрации ТМИ, состоящую из нескольких телеметрических станций, которые одновременно регистрируют поток данных, передаваемый от объекта телеизмерений. Система должна формировать для потребителя на выходе единый поток ТМИ, составленный из наиболее достоверных фрагментов информации, принимаемой на все входы системы.

В потоке ТМИ передается последовательность кадров с датчиковой информацией. Каждый кадр содержит оцифрованные показания, периодически считываемые с аналоговых датчиков, установленных на объекте телеизмерений (включая датчики температуры, давления и т.д.). Кадр дополнительно может содержать временную привязку, данные позиционирования и другую цифровую информацию. В потоке имеется служебная информация для восстановления кадровой синхронизации.

Частота опроса телеметрических параметров определяется схемой коммутации каналов телеметрической системы. Выходы датчиков могут быть подключены непосредственно к основному коммутатору и опрашиваться с максимальной частотой, или к коммутатору второго уровня, который в свою очередь подключен к одному из каналов основного коммутатора. Для низко опросных параметров допускается применение схемы коммутации с тремя ступенями. Поток ТМИ формируется бортовым компьютером, расположенным на объекте телеизмерений, и передается по радиоканалу на удаленные телеметрические станции. Каждая телеметрическая станция принимает поток ТМИ, восстанавливает битовую, словную и кадровую синхронизацию и декоммутирует параметры телеизмерений для дальнейшей обработки. Дополнительно требуется выполнить обратимое сжатие принятой информации. Эта операция требуется для сохранения данных на постоянном носителе или передачи, например, по сети, для дальнейшей обработки.

Многоканальная система регистрации позволяет, в режиме реального времени, провести анализ качества принимаемых каждой из входящих в ее состав станций потоков ТМИ и динамически коммутировать эти потоки на выход, основываясь на результатах анализа.

Вышесказанное делает актуальным проведение исследований с целью разработки элементов многоканальной системы регистрации ТМИ, которая обеспечивает одновременный прием данных телеизмерений несколькими станциями и формирование из них единого потока информации для потребителя на основе анализа качества принимаемой информации.

Целью диссертационной работы является разработка методов повышения надежности передачи ТМИ по каналу связи с шумами основанных на применении многоканальной схемы регистрации ТМИ, обеспечивающей одновременный прием данных телеизмерений несколькими телеметрическими станциями и формирование единого потока ТМИ содержащего наиболее достоверные фрагменты принятых данных.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать программное обеспечение имитатора потоков данных телеизмерений для проведения экспериментов.
2. Провести анализ методов обратимого сжатия применительно к сжатию данных телеизмерений. Выбрать, адаптировать и реализовать методы обратимого сжатия потока ТМИ.
3. Разработать метод помехоустойчивого кодирования данных телеизмерений для передачи по каналу связи с шумами, допускающими случайные инверсию и пропуск битов.
4. Провести анализ работы системы кадровой синхронизации и на основе этого анализа разработать кадровый синхронизатор потока ТМИ.
5. Провести сравнительный анализ вариантов реализации многоканальной системы регистрации ТМИ и разработать архитектуру этой системы.

Методы исследований. Для решения вышеуказанных задач были использованы: методы системного анализа, теории информации, теории вероятности, математической статистики.

Научная новизна работы.

1. Представлен новый подход к реализации имитатора ТМИ для проведения исследований и проектирования эффективных алгоритмов обработки ТМИ.
2. Разработано и протестировано программное обеспечение для моделирования ТМИ в формате *IRIG-106* – стандарта широко используемого в системах регистрации ТМИ различного назначения.
3. Разработаны, реализованы и проверены в экспериментах с реальными данными методы обратимого сжатия ТМИ на основе линейного предсказания. Получены результаты исследований эффективности адаптивных и неадаптивных методов сжатия ТМИ, а также сравнительной эффективности сжатия исходного потока ТМИ и декоммутированных данных, эффективности различных методов декорреляции, включая использование метода побитового исключающего ИЛИ для каждого канала в потоке данных телеизмерений.
4. Разработаны, реализованы и проверены экспериментально различные подходы к энтропийному кодированию параметров потока ТМИ.
5. Предложена модель канала связи с шумами, допускающая случайную инверсию, пропуск и вставку битов. Реализована модель симметричного двоичного канала с пропуском битов.
6. Предложена и проверена экспериментально схема помехоустойчивого кодирования, основанная на комбинации кода с малой плотностью проверок на четность (*LDPC*) и сверточного кода с целью повышения эффективности восстановления информации, передаваемой по каналу с шумами, допускающими случайную инверсию и пропуск битов.
7. Предложены и проверены в экспериментах с реальными данными телеизмерений критерии выбора параметров системы кадровой синхронизации ТМИ, включая выбор пороговых значений синхронизатора в режимах: *поиск*, *проверка* и *захват*, а также выбор значения среднего времени ожидания синхронизатора в режиме *проверка*.
8. Разработаны, реализованы и проверены экспериментально два варианта реализации архитектуры многоканальной системы регистрации: схема без использо-

вания помехоустойчивого кодирования и схема на основе комбинации сверточных кодов и *LDPC*. Проведен сравнительный анализ эффективности этих вариантов реализации. Разработаны критерии выбора достоверных фрагментов из входных потоков ТМИ.

Достоверность и обоснованность научных результатов подтверждены результатами экспериментов проведенных с реальными данными телеизмерений систем автоматического регулирования, полученными в лабораторных условиях и сформированными в формате *IRIG-106*. Проведенные исследования и результаты, полученные в диссертационной работе, основаны на теоретическом материале, накопленном в области разработки многоканальных систем регистрации ТМИ.

Практическая ценность работы. Созданы программные реализации разработанных в диссертационной работе алгоритмов обработки ТМИ, которые могут быть использованы в дальнейших исследованиях, а также как прототип для аппаратной реализации системы. Создано программное обеспечение многоканальной системы регистрации ТМИ, состоящее из следующих основных компонентов:

1. Библиотека функций для генерации различных видов сигналов, содержащих цифровые или квантованные значения отсчетов сигналов, имитирующие датчиковую информацию.
2. Имитатор для моделирования схем коммутации потока ТМИ в формате *IRIG-106*.
3. Библиотека функций для выполнения двухэтапного обратимого сжатия ТМИ, на основе методов линейного предсказания (адаптивная и не адаптивная версия) и исключающего ИЛИ в качестве декоррелятора, а также разных методов энтропийного кодирования, таких как метод Хаффмана, арифметическое кодирование и коды Райса.
4. Библиотека для моделирования симметричного двоичного канала с пропуском битов и имитации эффекта наложения шума в канале связи.
5. Библиотеки функций для генерации нерегулярной симметричной проверочной матрицы кодов с малой плотностью проверок на четность (*LDPC*), кодирования и декодирования по алгоритму инверсии битов, а также для свёрточного кодирования и декодирования по алгоритму Витерби.
6. Система моделирования работы и определения параметров кадрового синхронизатора.
7. Библиотека для моделирования работы многоканальной системы регистрации ТМИ.

Практические результаты диссертации подтверждаются актами внедрения ООО фирма «Литон-2».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались на 3 семинарах, проведённых 10-12-2013, 07-10-2014, 25-11-2014 на кафедре информационных систем и телекоммуникаций ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы используются в составе системы регистрации ТМИ «Литон-4», разработанной ООО «Литон-2».

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы отражены в 6 статьях, в том числе 5 – в журналах, включенных ВАК РФ в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов.

Объём и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по диссертации, списка литературы и приложения, занимающих 157 страниц текста, в том числе 79 рисунков и 17 таблиц, список использованной литературы из 113 наименований на 11 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель работы и решаемые задачи. Сформулированы требования к многоканальной системе регистрации ТМИ. Приведена структура работы и краткое содержание отдельных глав.

В первой главе дано краткое описание предметной области регистрации ТМИ. Исследуется задача имитации потоков ТМИ, передаваемых по каналу связи с шумами и предлагается способ практической реализации этой задачи. Для этого рассмотрен формат *IRIG-106* для передачи ТМИ. В стандарте определены одно- и двух-ступенчатая схемы коммутации. Структура кадра хорошо подходит для создания компактных и эффективных алгоритмов обработки потока данных, включая декоммутацию параметров и восстановление кадровой синхронизации.

Разработанный имитатор (в среде *MATLAB*) включает модуль для генерации отчётов различных типов тестовых сигналов, включая синусоидальные, пилообразные и треугольные сигналы, прямоугольные импульсы и реакцию линейной системы управления на ступенчатое воздействие. Каждый тестовый сигнал моделирует данные одного из каналов потока ТМИ.

Основная функция имитатора заключается в создании требуемой структуры кадра ТМИ и генерации двоичного образа потока данных ТМИ на основе заданной структуры. На Рис. 2 показаны примеры структур кадров ТМИ, созданных с помощью разработанного имитатора.

Имитатор включает программный модуль для моделирования эффекта наложения аддитивного белого гауссовского шума в канале связи.

Для подготовки данных и проведения экспериментов в качестве объекта телеизмерений использовались системы автоматического регулирования. В кадр ТМИ включались оцифрованные отсчёты аналоговых датчиков системы, измеряющих типичные для телеметрической системы параметры: температуру, давление, данные позиционирования. Эти параметры были получены в лабораторных условиях. Для проведения экспериментов были разработаны несколько схем коммутации и, на их основе, с помощью имитатора, сформированы потоки ТМИ. Примеры исследуемых сигналов телеизмерений показаны на Рис. 1.9 в диссертации.

Во второй главе исследуется задача обратимого сжатия выходного потока телеизмерений многоканальной системы регистрации ТМИ. Точное восстановление исходных данных после сжатия требуется для анализа нештатных ситуаций, восстановления сбойных участков в потоке ТМИ и других видов пост-обработки или обработки данных в режиме реального времени.

Информация в потоке данных телеизмерений в формате *IRIG-106* передается кадрами, имеющими фиксированную длину и неизменную известную заранее внут-

ренную структуру. Текущее показание датчика передается в отдельном телеметрическом слове кадра, расположенном по заданному смещению от начала кадра. Все телеметрические слова в кадре имеют одинаковую разрядность. Кадр содержит служебную информацию необходимую для восстановления кадровой синхронизации.

Из приведенного выше описания кадров следует, что поток ТМИ имеет ряд особенностей, которые позволяют увеличить эффективность сжатия за счёт использования сведений о структуре потока данных, а также оценки изменяющихся статистических характеристик параметров телеизмерений в режиме реального времени.

Предложена двухэтапная схема обратимого сжатия, в которой процесс сжатия разделяется на этап декорреляции и этап энтропийного кодирования (см. Рис. 2.1 в диссертации)

В проведенных экспериментах применялась декорреляция на основе линейного предсказания с помощью цифрового фильтра (p порядка) с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтр), в которой значение отсчёта (одного слова кадра) x_i квантованного по уровню сигнала предсказывается по известным значениям предыдущих p отсчётов $x_{i-1}, x_{i-2} \dots x_{i-p}$ этого сигнала. На каждом шаге i ошибка предсказания рассчитывается формулой:

$$e_i = x_i - Q \left(\sum_{j=1}^p \hat{a}_j x_{i-j} \right),$$

где оператор Q обозначает квантование по уровню, а $\hat{a}_j$ – коэффициенты фильтра.

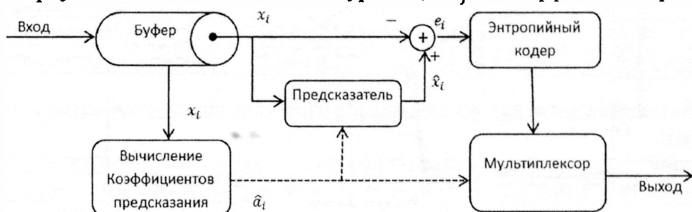


Рис. 1. Структура системы двухэтапного сжатия на основе линейного предсказания

Эффективность работы алгоритмов декорреляции можно оценить по двум показателям: 1) по отношению дисперсии исходных данных (x) к дисперсии сигнала ошибки (e) предсказания σ_x^2 / σ_e^2 (коэффициент усиления дисперсии) и 2) по энтропии сигнала ошибок на выходе фильтра предсказания $H = -\sum_{i=1}^L P_i \log_2(P_i)$, где L – длина алфавита, P_i – вероятность появления i -ой ошибки предсказания. В качестве критерия оценки алгоритма сжатия использовался коэффициент сжатия $V_{вх} / V_{вых}$, где $V_{вх}$ – размер исходного данных на входе системы, а $V_{вых}$ – размер сжатых данных на выходе системы.

Значения коэффициентов фильтра предсказателя необходимы для восстановления последовательности по известным значениям ошибок, поэтому они добавлены в поток сжатых данных. Коэффициенты фильтра рассчитываются из условия минимизации ошибки предсказания $\sum_i e_i^2 \rightarrow \min$.

Согласно предложенной схеме системы сжатия, сигнал ошибки, то есть разность между предсказанным и реальным значением на входе декоррелятора, поступает на вход энтропийного кодера. В экспериментах были использованы несколько вариантов энтропийного кодирования: метод Хаффмана, арифметическое кодирование и код Райса.

Проведены эксперименты с двумя вариантами кадрами ТМИ. Разрядность телеметрических слов кадра составляет 8 бит, в которых сохраняется один квантованный отсчет сигнала датчика, приведенный к шкале 0:255. Структура первого вариан-

та кадра получена при одноступенчатой схеме коммутации 9 каналов с единственным коммутатором. Второй вариант кадра имеет более сложную структуру, полученную с помощью двухступенчатой схемы коммутации, в которой в 4-ом канале основного коммутатора, передаются значения каналов коммутатора второй ступени.

SYNC_F	Данные1	Данные2	Данные3	Данные4	Данные5	Данные6	Данные7	Данные8	Данные9
SYNC16	Tсм	Tвх	Tвых	угол	Tв вых	Tв вх	Дат давл полу	Дат давл	Дат перемещ

а)

SYNC_F	SYNC_SF1	Данные1	Данные2	Данные3	Данные4	Данные5	Данные6
SYNC16	C1	Tсм	Tвх	Tвых	Tв вых	угол	Дат давл полу
SYNC16	C2	Tсм	Tвх	Tвых	Tв вх	угол	Дат давл полу
SYNC16	C3	Tсм	Tвх	Tвых	Дат давл	угол	Дат давл полу
SYNC16	C4	Tсм	Tвх	Tвых	Дат перемещ	угол	Дат давл полу

б)

Рис. 2. Структура кадра (одно (а) / двух (б)) - ступенчатой схемы коммутации

Результаты исследований двухэтапного сжатия на основе схемы линейного предсказания в комбинации с выбранными методами энтропийного кодирования.

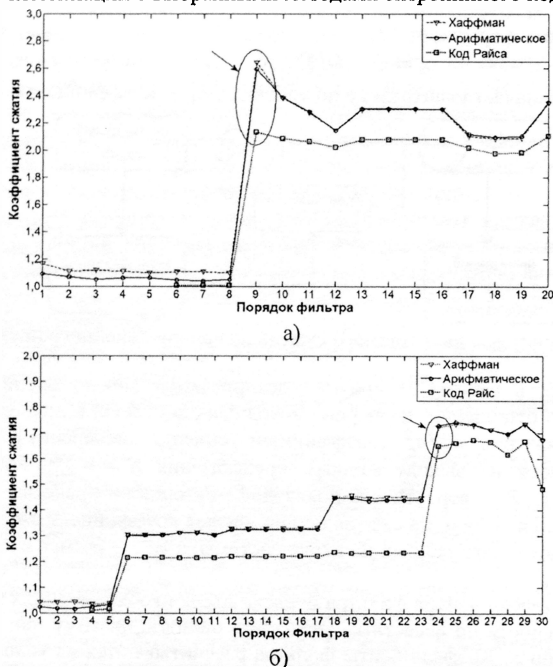


Рис. 3. Экспериментально полученные зависимости коэффициента сжатия от порядка фильтра для одно- (а) / двух- (б) ступенчатой схемы коммутации

В соответствии с полученными данными коэффициент сжатия резко возрастает, когда порядок фильтра становится равным числу слов, содержащихся в циклически повторяющейся структуре потока информации (на Рис. 3 соответственно 9-й и 24-й порядок фильтра, для одно- (а) и двух- (б) ступенчатых схем коммутации).

Из полученных результатов видно, что между отсчетами одного и того же параметра расположенных в соседних кадрах имеется сильная корреляционная зависимость, а между соседними словами в потоке ТМИ обычно такие зависимости

отсутствуют. С другой стороны, повышение порядка фильтра, для выявления указанных зависимостей, приводит к усложнению вычислений. В целом использования метода линейного предсказания для декорреляции данных в исходном потоке ТМИ оправдано в случае небольшой длины кадра и простой одноступенчатой схемы коммутации. Если эти условия не выполняются, то такой способ декорреляции мало эффективен или требует значительных вычислительных ресурсов.

Следует отметить, что эксперименты показали эффективность применения фильтров первого порядка для предсказания значений каждого канала. Также в качестве альтернативы, можно предложить более простой метод снижения корреляционных зависимостей соседних кадров в потоке ТМИ. Для пары телеметрических слов, расположенных на одинаковых позициях в соседних кадрах, выполняется побитовая операция «исключающее ИЛИ».

Основные результаты экспериментов, позволяющие провести сравнительную оценку эффективностей трёх различных методов декорреляции в Таблице 1.

Таблица 1.

Оценки эффективности декорреляции (одно- / двух-) ступенчатой схемы коммутации

Предсказатель \ Оценка	Фильтр 9 / 24 -ого порядка для потока слов ТМИ	Фильтры 1-ого порядка для каждого канала	Операция «исключающее ИЛИ»
Энтропия исходного	7,45 / 7,26		
Усиление σ_x^2 / σ_e^2	77,70 / 28,31	40,84 / 40,84	9,54 / 7,47
Энтропия сигнала ошибок	3,06 / 4,57	3,34 / 3,34	2,90 / 3,41

Результаты работы методов двухэтапного обратимого сжатия приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Эффективности сжатия (одно- / двух-) ступенчатой схемы коммутации

Хаффмана	Арифметическое код.	Райса	Deflate	Метод Zlib
Фильтр 9 / 24 порядка для потока слов ТМИ				1,56 / 1,27
2,64 / 1,72	2,59 / 1,73	2,13 / 1,65	2,39 / 1,63	
Фильтры первого порядка для каждого канала				
2,45 / 2,45	2,40 / 2,40	1,96 / 1,96	2,46 / 2,14	
Операция «исключающее ИЛИ»				
2,77 / 2,43	2,72 / 2,32	1,67 / 1,58	2,30 / 2,03	

Приведены значения коэффициента сжатия, полученные методом Zlib, который построен на основе алгоритма Deflate, использующего комбинацию алгоритма LZ77 и алгоритма Хаффмана. Метод Zlib представлен как образец хорошо оптимизированного и широко применяемого метода сжатия информации общего назначения, в котором, однако, не используются априорные сведения о структуре кодируемых данных.

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать следующие основные выводы:

- Метод Хаффмана и арифметического кодирования демонстрируют похожие результаты, немного лучшие, чем метод Райса.
- Эффективность метод Хаффмана и арифметического кодирования увеличивается с уменьшением энтропией сигнала ошибка предсказания, не учитывая усиление коэффициент предсказания σ_x^2 / σ_e^2 , но эффективность метода Райса боле связана с усилением σ_x^2 / σ_e^2 , что указывает на важность этого показателя для оценки эффективности декоррелятора.
- Метод Zlib очевидно проигрывает другим, оставляя поле для исследований, направленных на разработку эффективных алгоритмов сжатия данных телеизмерений, учитывающих особенности представления этого вида информации.

- Использование априорных сведений о структуре потока телеизмерений позволяет повысить эффективность обратимого сжатия этого вида данных. Для схемы коммутации каналов с фиксированной структурой кадров, предлагается использовать фильтр, порядок которого равен длине цикла опроса каналов системы коммутации ТМИ. Если телеметрический кадр имеет более сложную структуру (например, на основе двухступенчатой схемы коммутации), то декорреляция каналов по отдельности существенно увеличивает коэффициент сжатия.
- Покадровая декорреляция данных в ТМИ с помощью операции «исключающее ИЛИ» существенно снижает сложность вычислений.

Эффективность методов сжатия без потерь во многом определяется свойствами сжимаемых данных. Алгоритмы сжатия показывают лучшие результаты, если они способны адаптироваться к изменению во времени статистических характеристик входных данных. Часто применяется метод разделения данных на блоки. Сложность вычисления коэффициентов фильтра предсказателя при этом возрастает с увеличением длины блока данных. Такой подход также не учитывает изменение статистических характеристик сигнала внутри блока. В качестве альтернативы предлагается использовать адаптивный КИХ фильтр.

В экспериментах использовался адаптивный фильтр на основе нормализованного алгоритма наименьших средних квадратов. Коэффициенты фильтра предсказания $a(n) = \{a_1(n), a_2(n), \dots, a_p(n)\}$ обновляются во времени по формуле:

$$a(n+1) = a(n) + \mu(n) e(n) IX(n),$$

$$\text{где } IX(n) = \{x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-p)\}, \mu(n) = \frac{u}{\sigma_p^2(n)},$$

$$\sigma_p^2(n) = \beta \sigma_p^2(n-1) + (1-\beta) e(n-1)^2,$$

где β – параметр сглаживания фильтра, u – параметр сходимости, а $\sigma_p^2(n)$ – оценка мощности входного сигнала. Для точного восстановления данных, параметры u , β , $a(0)$ и $IX(0)$ добавляются к потоку сжатых данных.

Получены результаты исследований обратимого сжатия потока ТМИ в виде зависимостей коэффициента сжатия от длины блока данных. Наилучшие результаты получены при длине блока 6144 отсчетов для одноступенчатой (9-го порядка), и длине блока 8192 отсчетов для двухступенчатой схемы коммутации (24-го порядка) (см. Рис. 2.22 в диссертации).

Вычислены значения u и β , которые увеличивают эффект декорреляции адаптивным фильтром при нулевых начальных значениях коэффициентов предсказания $a(0)=0$. (см. Таблицу 6 в диссертации).

Таблица 3.

Сравнительный анализ эффективности неадаптивного и адаптивного фильтра показан для одноступенчатой (а) и двухступенчатой (б) схемы коммутации, где

$X\Phi$ – Хаффман, A – арифметическое кодирование и K – код Райса

Декоррелятор	Неадаптивный фильтр 9-го порядка и длина блока данных (6144)			Адаптивный фильтр 9-го порядка для потока данных ($u = 0,1, \beta = 0,9$)			Адаптивный фильтр 9-го порядка для каждого канала ($u = 0,4, \beta = 0,9$)		
Кодирование	$X\Phi$	A	K	$X\Phi$	A	K	$X\Phi$	A	K
Коэффициент сжатия	2,471	2,440	2,000	2,223	2,210	1,941	2,818	2,803	2,123

а)

Декоррелятор	неадаптивный фильтр 24-го порядка и длина блока данных (8192)			Адаптивный фильтр 9-го порядка для потока данных ($U = 0,3, \beta = 0,9$)			Адаптивный фильтр 9-го порядка для каждого канала ($U = 0,4, \beta = 0,9$)		
Кодирование	$X\Phi$	A	K	$X\Phi$	A	K	$X\Phi$	A	K
Коэффициент сжатия	1,787	1,780	1,694	1,687	1,691	1,631	2,547	2,479	1,957

б)

Анализ результатов экспериментов с адаптивным фильтром позволяет сделать следующие основные выводы:

- При декорреляции потока кадров с использованием предложенного адаптивного фильтра коэффициент сжатия очень близок к значению, полученному в экспериментах с неадаптивным фильтром, но в случае декорреляции каналов по отдельности результаты существенно улучшаются.
- Адаптивный фильтр имеет преимущество, состоящее в том, что отсутствует необходимость разделения данных на блоки и вычисления коэффициентов фильтра предсказания отдельно для каждого блока.

В третьей главе исследована задача передачи потока ТМИ от объекта телеизмерений к телеметрической станции по каналу связи с шумами, порождающими инверсии и пропуски битов в рассматриваемой многоканальной системе регистрации. Согласно теории Шеннона при скорости передачи сообщений (R) меньше пропускной способности (C) канала связи существуют коды и методы декодирования такие, что вероятности ошибки декодирования P_e стремятся к нулю, когда длина блока n стремится к бесконечности, т.е. при $n \rightarrow \infty$ $P_e \rightarrow 0$. Максимальное приближение (на расстояние 0,0045дБ) к границе Шеннона ($\approx -1,6$ ДБ) дает код $LDPC$ ($R = 0,5$) с примерной длиной блока в 10 миллионов бит. Важным параметром кодера для помехоустойчивого кодирования является кодовая скорость $R = k/n$, где k – длина исходного сообщения, а n – длина кодированного передаваемого сообщения $n = k + m$, где m – количество добавленных проверочных битов.

В работе для помехоустойчивого кодирования ТМИ, предлагается использовать код $LDPC$ (n, k), где n – длина кода, а k – длина кодируемых данных.

В работе представлены общая модель и диаграмма состояний канала связи с шумами, порождающими случайную инверсию, пропуск и вставку битов (см. Рис. 3.13 в диссертации).

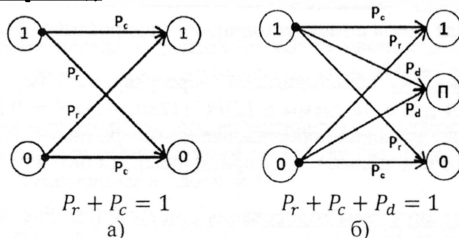


Рис. 4. Модель симметричного двоичного канала (а) с пропуском битов (б), где P_c – вероятность правильной передачи бита без ошибки, P_r – вероятность инверсии бита, P_d – вероятность пропуска бита

Дополнение модели помехоустойчивого кодирования с помощью кода *LDPC* для случаев пропуска битов (Рис. 4,б) приводит к увеличению количества проверочных битов и, следовательно, к уменьшению скорости кодирования *R* требуемой модели.

В работе предложен метод сверточного кодирования (n, k, v) , основанный на модифицированном алгоритме Витерби для решения задачи обнаружения и исправления пропусков битов в потоке данных после передачи по каналу связи с шумами, допускающими и инверсии и пропуски битов (см. Рис. 4,б) (v – длина кодового ограничения). В модифицированном алгоритме Витерби используются n декодеров. Для каждого декодера выполняется обработка данных сдвинутых на 1 бит и вычисляется метрика ошибки для блока данных размером σ битов. Значение σ представляет собой количество битов, которые должны быть накоплены до того как очередной декодированный бит будет доступным на выходе декодера Витерби. Для каждого декодера метрика накопленных ошибок на расстоянии σ битов вычисляется формулой:

$$\Delta\mu_i = \frac{\mu_i - \mu_{i-\sigma}}{\sigma},$$

где μ_i – текущая метрика ошибки декодера i , $\mu_{i-\sigma}$ – метрика ошибки декодера, вычисленная на расстоянии σ битов. Далее выбирается выход декодера, который имеет минимальное значение метрики $\Delta\mu_i$. Модифицированный алгоритм Витерби способен обнаруживать и исправлять $(n - 1)$ пропусков битов в интервале σ битов.

В диссертационной работе предложена схема кодера со скоростью кодирования $R = k/(2n)$, основанная на комбинации кода *LDPC*, $R = k/n$ и сверточного кода (2,1,3), $R = 1/2$. С учетом важности фактора скорости кодирования *R* для помехоустойчивого кодирования ТМИ проведены анализы между схемой помехоустойчивого кодирования – 1-ой схемой, включающей один *LDPC*, $R = k/(2n)$ и предложенной схемой – 2-ой схемой, $R = k/(2n)$ (см. Рис. 3.15 в диссертации).

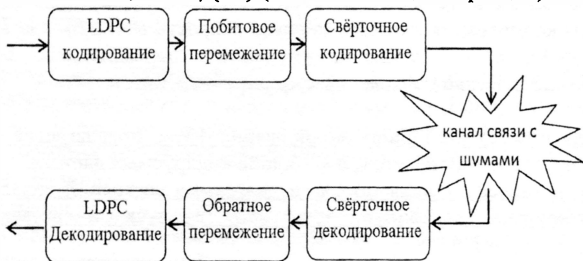


Рис. 5. Предложенная схема помехоустойчивого кодирования (2-ая Схема)

В проведенных экспериментах использовались нерегулярные симметричные коды *LDPC* (2560,1024) $R = 0,4$ для 1-ой схемы и *LDPC* (1280,1024) $R = 0,8$ для 2-ой схемы, а также использована случайная перестановка симметричных блоков *LDPC*. Для декодирования блоков *LDPC* использован алгоритм инверсии битов (*Bit Flipping*).

Проведены анализы двух схем кодирования при $P_d=0$ (см. Рис. 4,а) при разных значениях P_r и σ (см. Рис. 6). Результаты показывают, что выбор *LDPC* кодера (1-ая схема кодирования) предпочтителен для вероятности инверсии битов $P_r > 0,065$, однако для меньших значений эффективность обеих схем примерно одинакова.



Рис. 6. Эффективность 1-ой и 2-ой схем при $P_d = 0$ и разных значениях σ

Проведены эксперименты со 2-ой схемой кодирования при $P_d \neq 0, P_r \neq 0$ (см. Рис. 4,6). Эксперименты проводились для разных значений P_r , P_d и σ (см. Рис. 3.18 в диссертации), а значения задержки декодирования σ , которые привели к лучшей эффективности, выбраны и показаны в Таблице 4.

Таблица 4.

Выбранные значения задержки декодирования σ											
$P_r \backslash P_d$	0	0,001	0,0025	0,005	0,0075	0,01	0,025	0,05	0,055	0,06	0,1
0	120										
0,001	20	20	20	40	60	60	60	60	100	120	
0,002					40	40	40	120			
0,003					20	20	20	40	80		
0,004									60		
0,005	10	10	10	10	10	10	20	40	40	10	
0,006											
0,007											
0,008											
0,009											
0,01											
0,05											
0,1											

Следует в случае передачи данных по каналу связи с вероятностью пропуска бита $P_d \neq 0$, величина задержки декодирования σ должна быть низкой.

Проведен сравнительный анализ эффективности предложенных схем кодирования при передаче данных телеизмерений по каналу связи (см. Рис. 4,6) (используются значения σ , представленные в Таблице 4).

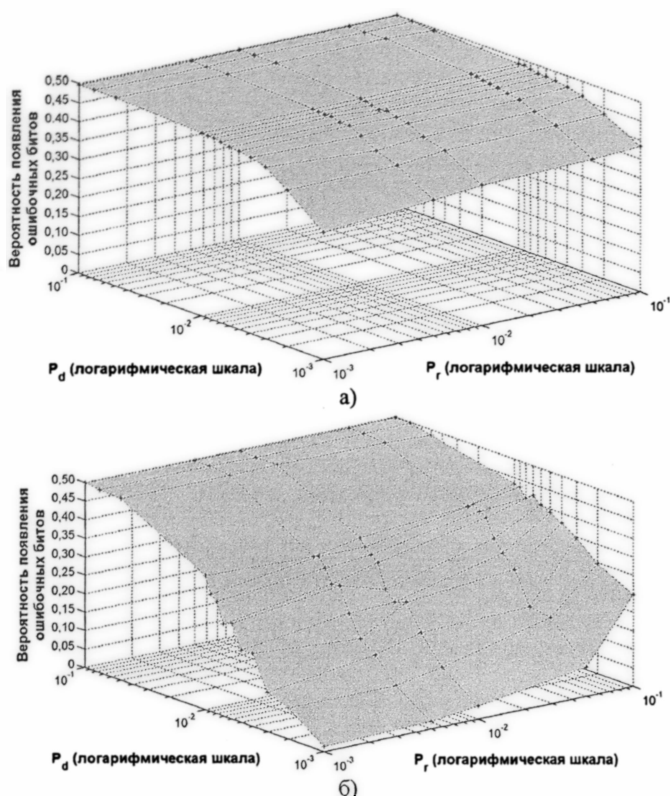


Рис. 7. Эффективность 1-ой схемы (а) и 2-ой схемы кодирования (б) при передаче ТМИ по каналу связи, представленному на Рис. 4,б

Исходя из представленных выше результатов экспериментов следует, что предложенный метод помехоустойчивого кодирования, содержащий комбинацию кода $LDPC$ ($R = k/n$) и блока свёрточного кодирования с параметрами (2,1,3) ($R = 1/2$), использующего модифицированный алгоритм Витерби, позволяет обеспечивать ту же самую эффективность восстановления информации кода $LDPC$ ($R = k/2n$), передаваемой по каналу связи при $P_r \leq 0.065$, а также лучшую эффективность при $P_d \neq 0$ без уменьшения скорости кодирования R .

В четвёртой главе исследована задача восстановления кадровой синхронизации в потоке ТМИ на каждой телеметрической станции в представленной многоканальной системе регистрации. Кадровый синхронизатор можно представить, как конечный автомат с тремя состояниями: *поиск*, *проверка* и *захват*. Значение коэффициента корреляции в каждом состоянии синхронизатора непрерывно сравнивается с заданным порогом ε . Пока это значение не превышает порог ε , синхронизатор остается в текущем состоянии. Когда порог превышен, синхронизатор переходит в предыдущее (см. Рис. 4.2 в диссертации).

Представлено описание модели системы кадровой синхронизации и приведены критерии для выбора параметров синхронизатора ТМИ, включая выбор пороговых значений ε_s для состояния *поиск*, ε_v для состояния *проверка*, ε_l для состояния *захват*, а также выбор значения среднего времени ожидания синхронизатора w_v в режиме *проверка*, где значения w_v представлено средним количеством кадров.

Критерий выбора параметра ε_s режима *поиск*:

$$\varepsilon_s = \arg \max_{\varepsilon_s} \{T(\varepsilon_s) = \max(T), w_s(\varepsilon_s) = \min(w_s)\},$$

где T – вероятность принятия правильного решения в режиме *поиск*, w_s – среднее количество кадров, необходимое для принятия правильного решения в режиме *поиск*.

Критерий выбора параметра (ε_v, w_v) режима *проверка*:

$$(\varepsilon_v, w_v) = \arg \max_p \{d_p : P(\varepsilon_v, w_v) \in m_2, \varepsilon_v > \varepsilon_s\},$$

где $d_p = P_{tci} - P_{tci-1}$, $i = 2 \dots l$, l – количество элементов m_1 .

$m_1 = \{(\varepsilon_v, w_v) : R(\varepsilon_v, w_v) \leq R_T\}$, $m_2 = \{P_{tci}(m_1\{1\}), P_{tci}(m_1\{2\}), \dots, P_{tci}(m_1\{l\})\}$,

где P_{tc} – вероятность выхода из состояний *поиск* и *проверка* после w_v кадров в случае правильного обнаружения кода синхронизации и R_T – требуемое отношение вероятности выхода с ложным к вероятности выхода с правильным решением.

Критерий выбора параметра ε_l режима *захват*:

$$\varepsilon_l = \arg \max_{\varepsilon_l} \{DL : DL(\varepsilon_l) \leq DL_T\},$$

где DL_T – требуемое минимальное значение потери информации.

Представлен анализ качества работы синхронизатора на основе экспериментов с реальными данными телеизмерений в формате *IRIG-106*, в котором выбирается один из 18 маркеров (длиной от 16-бит до 33-бит). Эксперименты проведены при передаче кадров ТМИ по каналу, модель которого представлена на Рис. 4,б. Длина кадра ТМИ в экспериментах составляет 176-бит, включая 16-бит кода синхронизации.

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать вывод: выбранные значения параметров синхронизатора в проведенных экспериментах согласуются с теоретическими значениями для ($\varepsilon_s = 1$, $\varepsilon_v = 3$, $w_v = 3$, $\varepsilon_l = 6$).

В пятой главе на основе представленных ранее результатов экспериментов рассмотрены несколько вариантов построения многоканальной системы регистрации. Представлен сравнительный анализ эффективности этих вариантов и выработаны практические рекомендации по их применению.

Наиболее простой вариант реализации не предполагает использование дополнительных методов помехоустойчивого кодирования при передаче информации по каналу связи с шумами. Повышение надежности обеспечивается, исключительно, за счет передачи информации одновременно по нескольким дублирующим друг друга каналам системы регистрации ТМИ. Формирование единого выходного потока из нескольких входных потоков, поступающих от разных телеметрических станций, выполняется по следующим правилам:

– На основании определения наиболее вероятного значения переданного бита:

$$v_i(n) = \max P(v_i(n) | r_{i,s}(n)),$$

где $v_i(n)$ – значение i -го бита выходного кадра n , а $r_{i,s}(n)$ – значение i -го бита в принятом кадре n на s -ой телеметрической станции, $s = \{1, 2, \dots, t\}$, t – количество телеметрических станций в многоканальной системе, принявших кадр n .

- В случае, если значения бита равновероятны, то выбор основан на наиболее вероятном значении переданного слова данных, содержащего этот бит:

$$D_w(n) = \arg \min_{D_{w,s}(n)} \{ d : s \in \{1, 2, \dots, t\} \};$$

$$d = \sum_{s \in \{1, 2, \dots, t\}} \sum_{k=n-m}^{k=n+m} \frac{1}{|n-k|} [D_{w,s}(n) - D_{w,s}(k)]^2,$$

где $D_w(n)$ – выбранное значение слова данных w для выходного кадра n , которое имеет минимальное d , $D_{w,s}(n)$ – значение слова данных w в принятом кадре n на s -ой станции, а m – количество соседних кадров до и после текущего кадра n .

Второй разработанный вариант реализации существенно увеличивает сложность реализации системы и вычислительную нагрузку, однако, обеспечивает более эффективную защиту от воздействия помех, при передаче потоков ТМИ по каналу связи с шумами. В этом варианте используется дополнительное помехоустойчивое кодирование передаваемых данных комбинацией сверточных кодов и *LDPC* (см. Рис. 5.3 в диссертации), а выходной поток формируется по следующей схеме:

- Выбирается блок *LDPC* с наименьшим значением синдрома после декодирования

$$B(n) = \arg \min_{B(n)} \{ C_s(n) : s \in \{1, 2, \dots, t\} \},$$

где $B(n)$ – выбранный блок данных n , а $C_s(n)$ – значение синдрома декодированного блока n , принятого на станции s .

Представлены результаты сравнительного анализа эффективности предложенного метода помехоустойчивого кодирования (см. Рис. 5.4 и 5.5 в диссертации). Эффект полученный от применения предложенной комбинации сверточных кодов и *LDPC*, определяется коэффициентом усиления $K1 = A/B$, где A – вероятность появления ошибочных битов в кадре ТМИ для системы, не использующей комбинацию сверточных кодов и *LDPC*, B – вероятность появления ошибочных битов в кадре ТМИ для одной и той же системы, но использующей комбинацию сверточных кодов и *LDPC*. Зависимость коэффициента усиления ($K1$) предложенного метода помехоустойчивого кодирования от вероятности инверсии P_i и пропуска P_d битов в трёхканальной системе регистрации ТМИ показана на Рис. 8.

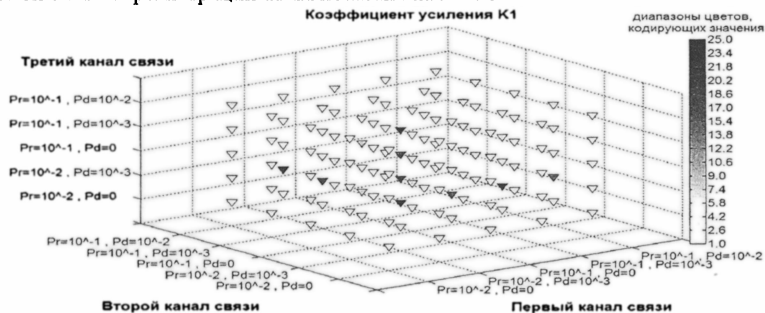


Рис. 8. Коеффициент усиления ($K1$)

Для повышения эффективности восстановления информации, передаваемой по каналам связи, предложен третий вариант реализации многоканальной системы регистрации ТМИ, в котором передаваемый блок кода *LDPC* разделяется на (b) фрагменты, которые независимо друг от друга кодируются сверточным кодированием. Далее, каждый фрагмент передается в отдельном кадре формата *IRIG-106*.

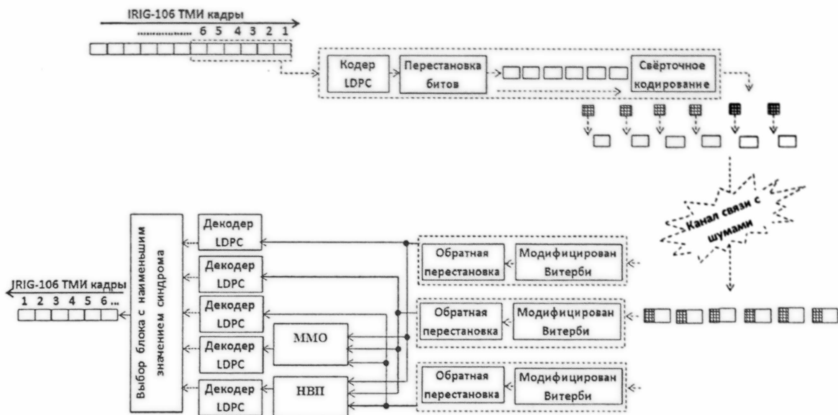


Рис. 9. Схема трёхканальной системы, с разделением *LDPC* блока на (6) фрагментов

- В предложенной схеме ММО (Минимальная Метрика Ошибки) формирует версию блока *LDPC*, составленную из фрагментов, принятых разными телеметрическими станциями, выбранных по минимальной метрике ошибки, вычисленной для фрагмента при сверточном декодировании по критерию:

$$\text{ММО} = \{\text{фрагмент}(1), \text{фрагмент}(2), \dots, \text{фрагмент}(b)\};$$

$$\text{фрагмент}(i) = \underset{\text{фрагмент}(s,i)}{\arg \min} \{m(s,i); s \in \{1,2, \dots, t\}\},$$

где $i = \overline{1:b}$, фрагмент(i) – выбранный фрагмент i , а $m(s,i)$ – значение метрики ошибки свёрточного декодирования фрагмента i для s -ой телеметрической станции (фрагмент(s,i)).

- При этом создается еще одна версия блока *LDPC* – НВП (Наиболее Вероятных Переданных), которая формирует версию блока *LDPC*, сформированного на основе выбора наиболее вероятных переданных битов в кадрах, принятых станциями.
- Окончательно процедура формирования единого потока определяется критерием:

$$B(n) = \underset{B(n)}{\arg \min} \{C_s; s \in \{1,2, \dots, t, \text{ММО}, \text{НВП}\}\}.$$

Дополнительный эффект, полученный от разделения *LDPC* блока на фрагменты и применения критериев ММО и НВП определяется коэффициентом усиления K_6 .

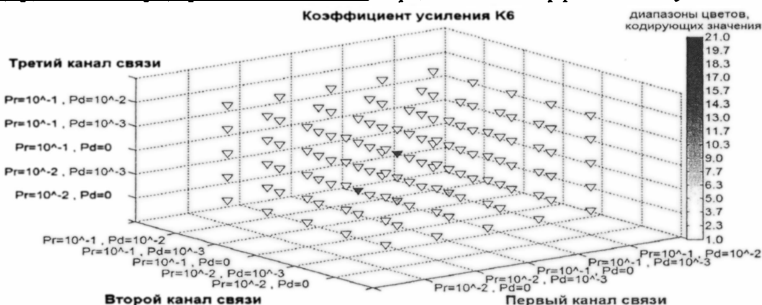


Рис. 10. Коэффициент усиления (K_6)

Коэффициент усиления $K6 = A/B$, где A – вероятность появления ошибочных битов в кадре ТМИ для системы, использующей комбинацию сверточных кодов и *LDPC* без разделения *LDPC* блока на фрагменты, B – вероятность появления ошибочных битов в кадре ТМИ для одной и той же системы, но с разделением *LDPC* блока на фрагменты и с применением критериев ММО и НВП.

Анализ результатов проведенных экспериментов позволяет сделать основной вывод: Представленные в работе новые методы обработки данных повышают надежность передачи ТМИ по каналам связи с шумами.

В общих выводах по диссертации формулируются выводы, и приводится перечень основных результатов, полученных в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны алгоритмы моделирования потоков ТМИ в формате *IRIG-106*.
2. Проведены исследования методов декорреляции и энтропийного кодирования применительно к задаче обратимого сжатия ТМИ.
3. Представлен метод, повышающий эффективность помехоустойчивого кодирования ТМИ, основанный на комбинации сверточных кодов и *LDPC*, исправляющий пропуски и инверсии битов.
4. Предложены критерии выбора параметров кадрового синхронизатора ТМИ.
5. Предложены варианты реализации многоканальных систем регистрации ТМИ и проведен сравнительный анализ их эффективности. Разработана методика формирования единого потока ТМИ составленного из нескольких входных потоков данных телеизмерений передаваемых по каналам связи с шумами на основе анализа качества информации, полученной с объекта телеизмерений.
6. Разработана и представлена архитектура многоканальной системы регистрации ТМИ, обеспечивающая надежный прием и эффективное хранение информации.

Работы по теме диссертации

1. Эльшафеев М.А., Сидякин И.М. Имитация передачи данных телеизмерений в канале с шумами // Инженерный вестник. 2014. № 1. С. 6. (0,7 п. л. / 0,56 п. л.)
2. Эльшафеев М.А., Сидякин И.М., Харитонов А.С., Ворнычев Д.С. Исследование методов обратимого сжатия телеметрической информации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. №. 3 (96). С. 92 – 104. (1,17 п. л. / 0,82 п. л.)
3. Эльшафеев М.А., Сидякин И.М. Применение метода адаптивного линейного предсказания для сжатия телеметрической информации // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. №. 4. С. 354 – 366. DOI: 10.7463/0414.0707364 (0,65 п. л. / 0,49 п. л.)
4. Эльшафеев М.А. Метод помехоустойчивого кодирования телеметрической информации, исправляющий пропуски и инверсии битов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. №. 10. С. 328 – 346. DOI: 10.7463/1014.0727907 (0,95 п. л.)
5. Сидякин И.М., Эльшафеев М.А. Исследование кадровой синхронизации цифровой телеметрической информации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. №. 2 (101). С. 117 – 132. (1,44 п. л. / 1,15 п. л.)
6. Сидякин И.М., Эльшафеев М.А. Исследование методов формирования единого потока данных телеизмерений в многоканальной системе регистрации телеметрической информации // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2015. №. 4. С. 254 – 269. DOI: 10.7463/0415.0764089 (0,8 п. л. / 0,6 п. л.)