

УДК 621.317.328

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ И ТОЧНОСТИ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СБОРА ДАННЫХ

Колмогорова Светлана Сергеевна,

кандидат технических наук, доцент,

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ss.kolmogorova@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются многоканальные системы сбора данных на основе электроиндукционных датчиков, применяющиеся в экспериментальных исследованиях, мониторинге и автоматизации в сложных электромагнитных средах. Показано комплексное решение проблемы обеспечения помехоустойчивости и точности измерений в условиях воздействия электромагнитных помех, тепловых шумов и других источников погрешностей. В модели используется интегрированный подход, включающий анализ источников помех, оптимальных схемотехнических решений, реализацию алгоритмов цифровой обработки сигналов, а также экспериментальную валидацию методов. Результаты демонстрируют, что применение режекторного фильтра и синхронного детектирования позволяет снизить погрешность измерения полезного сигнала с 4,5% до 0,1% при амплитуде помехи, равной амплитуде полезного сигнала. Разработанные методы достигают динамического диапазона не менее 100 дБ, обеспечивают относительную погрешность измерения 0,5-2% для стандартных тестовых сигналов и позволяют обрабатывать данные в реальном времени с задержкой не превышающей 10 мс. Представленное решение имеет высокую практическую значимость для систем мониторинга и автоматизации, работающих в условиях умеренно загрязненной электромагнитной среды согласно стандарту IEC 61000-4-3.

Ключевые слова: многоканальная система сбора данных, помехоустойчивость, точность измерений, цифровая фильтрация, адаптивная фильтрация, синхронная выборка, компенсация ошибок, электромагнитная совместимость

METHODS FOR IMPROVING NOISE IMMUNITY AND ACCURACY IN MULTI-CHANNEL DATA ACQUISITION SYSTEMS

Kolmogorova Svetlana Sergeevna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov

St. Petersburg State Electrotechnical University 'LETI' named after V.I. Ulyanov (Lenin)

ss.kolmogorova@mail.ru

ABSTRACT

The research work multi-channel data acquisition systems based on electroinductive sensors used in experimental research, monitoring, and automation in complex electromagnetic environments. The paper presents a comprehensive solution to the problem of ensuring noise immunity and measurement accuracy under the influence of electromagnetic interference, thermal noise, and other sources of error. The proposed model uses an integrated approach that includes analysis of interference sources, development of optimal circuit solutions, implementation of digital signal processing algorithms, and experimental validation of the methods. The results show that the use of a notch filter and synchronous detection makes it possible to reduce the measurement error of the useful signal from 45% to 0.1% when the interference amplitude is equal to the amplitude of the useful signal. The developed methods achieve a dynamic range of at least 100 dB, provide a relative measurement error of 0.5–2% for standard test signals, and allow real-time data processing with a latency not exceeding 10 ms. The proposed solution has high practical significance for monitoring and automation systems operating in a moderately polluted electromagnetic environment in accordance with the IEC 61000-4-3 standard.

Keywords: multi-channel data acquisition system, noise immunity, measurement accuracy, digital filtering, adaptive filtering, synchronous sampling, error compensation, electromagnetic compatibility.

Введение

Многоканальные системы сбора данных (Data Acquisition Systems, DAQ) являются важными компонентами современной экспериментальной аппаратуры, систем мониторинга и автоматизации. Проблема обеспечения высокой помехоустойчивости и точности измерений в условиях воздействия различных источников электромагнитных помех, тепловых флуктуаций и нелинейностей элементов остается одной из наиболее актуальных в области разработки высокопроизводительных измерительных систем.

Электроиндукционные датчики (ЭИД) [1] представляют собой класс высокочувствительных приборов, предназначенных для измерения различных физических параметров окружающей среды и объектов на основе принципов электростатической индукции. Такие датчики находят широкое применение в промышленности, медицинской диагностике, научных исследованиях, системах автоматического контроля и управления, а также в разнообразных приложениях интернета вещей (IoT) [2]. Особенность ЭИД состоит в их способности осуществлять бесконтактные измерения с высокой чувствительностью, что делает их особенно ценными для работы в сложных и агрессивных окружающих условиях.

Однако применение ЭИД в реальных условиях часто осложняется наличием различных источников электромагнитных помех и шумов. Эти помехи могут возникать как от внешних источников (высоковольтные линии электропередачи, радиоустройства, коммутирующие источники питания), так и от внутренних источников (переходные процессы в самой измерительной аппаратуре, тепловой шум в электронных компонентах) [3]. Кроме того, при построении многоканальных систем сбора данных возникают дополнительные сложности, связанные с перекрестными помехами между каналами, несинхронизацией времени измерения и дрейфом параметров каналов вследствие температурных и других воздействий.

Повышение помехоустойчивости и точности многоканальных систем сбора данных с ЭИД требует комплексного подхода, включающего решение проблем на различных уровнях: схемотехническом, алгоритмическом и методологическом. На схемотехническом уровне необходимо обеспечить надлежащее экранирование, заземление и развязку сигнальных цепей. На алгоритмическом уровне [4] следует применить цифровую фильтрацию, синхронное детектирование и методы адаптивной обработки сигналов. На методологическом уровне требуется тщательная калибровка систем, статистическая проверка результатов и валидация данных.

Актуальность данной работы определяется постоянно растущей потребностью в высокоточных системах измерения и мониторинга в различных приложениях, начиная от робототехники и систем позиционирования и заканчивая биомедицинскими приложениями и экологическим мониторингом. Повышение помехоустойчивости электроиндукционных датчиков позволит расширить область их применения и обеспечить надежность работы в более суровых условиях электромагнитного окружения.

В современной научной литературе можно выделить пять основных категорий методов повышения помехоустойчивости и точности измерений в многоканальных сенсорных системах. Подходы к конфигурации сенсоров (двойные сенсоры, мостовые схемы) [1, 5]. Модификации конструкции оборудования (оптимизация геометрии электродов, антенные решетки) [1], методы обработки сигналов (пространственная фильтрация, нейронные сети) [6, 7], стратегии сбора данных (синхронизация по времени, равномерное масштабирование данных) [8, 9], а также методы калибровки/компенсации (мониторинг напряжения, программируемые измерительные пути) [10, 11].

Количественное улучшение характеристик существенно различается в зависимости от области применения, составляя от 2% до 5% погрешности измерения электрического поля при использовании двух датчиков [1]. Для исключительной шумоподавляющей способности в диапазоне 1-10 частей на миллион в бортовых электромагнитных системах [10]. Системы измерения шероховатости поверхности обеспечивают гистерезис датчика менее 0,3 мкм с мультипликативными ошибками менее 0,5% для малых смещений.

Однако комплексное исследование, посвященное систематическому анализу взаимодействия различных методов и их эффективности при совместном применении в многоканальных системах, остается актуальным направлением научных исследований.

Настоящая статья представляет комплексный анализ современных методов и подходов к повышению помехоустойчивости и точности в многоканальных системах сбора данных.

Цель исследования

Цель настоящей работы состоит в разработке и обосновании комплекса методов повышения помехоустойчивости и точности измерений в многоканальных системах сбора данных с электроиндукционных датчиков, работающих на принципе электростатической индукции, с учетом специфики их практического применения. В работе рассматриваются как традиционные методы, хорошо известные в инженерной практике, так и новые подходы, основанные на применении современных методов цифровой обработки сигналов и адаптивных алгоритмов.

Постановка задачи

Многоканальная система сбора данных с ЭИД должна обеспечивать одновременное измерение с заданной точностью и разрешающей способностью от четырех и более каналов параллельно. Каждый канал представляет собой независимый ЭИД, генерирующий выходной сигнал в зависимости от измеряемого параметра. Выходные сигналы всех каналов поступают на блок аналого-цифрового преобразования (АЦП), где они дискретизируются

с определенной частотой выборки. Дискретизированные данные далее обрабатываются цифровым процессором в реальном времени.

Можно выделить основные источники погрешностей в такой системе и классифицировать их следующим образом:

электромагнитные помехи (ЭМП): радиочастотное излучение от близлежащих устройств, промышленные помехи на частотах 50 или 60 Гц и их гармоники, высокочастотные переходные процессы, импульсные помехи от коммутационной аппаратуры;

тепловой шум (шум Джонсона-Найквиста): флуктуационный шум, неизбежно присутствующий во всех резистивных элементах, интенсивность которого зависит от температуры;

шум квантования АЦП: погрешность, обусловленная конечной разрядностью аналого-цифрового преобразователя;

дрейф параметров: медленное изменение характеристик датчиков и электронных компонентов вследствие старения, температурных воздействий и других факторов;

перекрестные помехи между каналами: влияние сигналов одного канала на другие каналы вследствие несовершенного экранирования и изоляции;

синхронизационные ошибки: различие времени отсчета значений в разных каналах, приводящее к временным сдвигам и потере корреляции между одновременно измеряемыми параметрами.

К разрабатываемой системе сбора данных предъявляются следующие требования. Прежде всего – относительная погрешность измерения не должна превышать 0,5-2% при измерении стандартных тестовых сигналов. Динамический диапазон системы должен быть не менее 100 дБ, что соответствует отношению максимального измеряемого сигнала к минимальному в пропорции 10000:1. Система должна обеспечивать одновременное измерение на четырех и более каналах с частотой выборки 1-10 кГц в зависимости от типа датчика. Полоса пропускания системы должна охватывать частотный диапазон от постоянного тока (0 Гц) до 5 кГц для стандартных приложений или до 50 кГц для высокочастотных приложений. Система должна работоспособна в условиях умеренно загрязненной электромагнитной среды (Уровень 2 согласно стандарту ИЕС 61000-4-3). Время обработки данных в реальном времени не должно превышать 10 мс при полной загрузке всех каналов. Система должна обеспечивать простоту калибровки и поддержки в эксплуатации.

Для решения поставленной задачи используется комплексный подход, включающий следующие этапы (рис. 1):

Этап 1: анализ источников помех и механизмов их воздействия. На этом этапе проводится систематическое изучение основных источников помех, их спектральных характеристик, механизмов проникновения в измерительную цепь и влияния на полезный сигнал.

Этап 2: разработка схемных решений. На основе анализа помех разрабатываются эффективные схемотехнические решения, включающие экранирование, фильтрацию, дифференциальные входы, источники питания низкого уровня шума и надлежащее заземление.

Этап 3: разработка алгоритмов цифровой обработки сигналов. Разрабатываются и исследуются различные алгоритмы фильтрации, включая Калман-фильтры, адаптивные фильтры и методы синхронного детектирования, подходящие для использования в реальном времени.

Этап 4: интеграция и оптимизация. Полученные решения интегрируются в единую систему с целью достижения оптимального баланса между производительностью, надежностью и затратами вычислительных ресурсов.

Этап 5: экспериментальная проверка и валидация. Система подвергается серии контролируемых экспериментов для проверки соответствия заявленным требованиям и определения границ применимости разработанных методов.

Этап 6: анализ результатов и формулирование выводов. На основе полученных экспериментальных данных проводится статистический анализ, определяются наиболее эффективные комбинации методов и формулируются практические рекомендации.

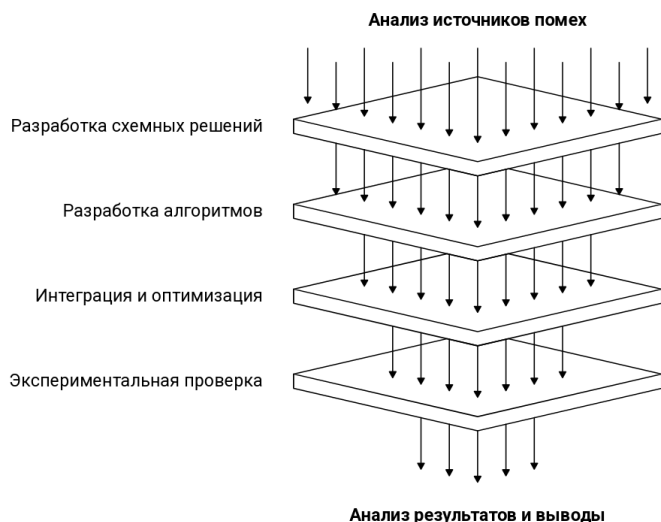


Рис. 1. Поэтапный подход к решению снижения помех в многоканальных системах сбора данных

Моделирование экспериментов и результаты

Структурная схема измерительного комплекса с многоканальной системой сбора данных от электроиндукционных датчиков показана на рис. 2. В нее входят чувствительный элемент самого датчика, блок сенсорной электроники, осциллограф, а также микроконтроллер, оснащенный пороговым детектором и частотомером. Чувствительный элемент фиксирует влияние объекта на электрическое поле, генерируемое датчиком. Сенсорная электроника усиливает и подготавливает сигнал для дальнейшей обработки и отображения. Осциллограф визуализирует и анализирует эти сигналы, передавая информацию на микроконтроллер. Последний, благодаря встроенным пороговому детектору и частотомеру, выполняет цифровую обработку: определяет превышение порога и вариации частоты, что реализует многоканальный мониторинг параметров объекта.

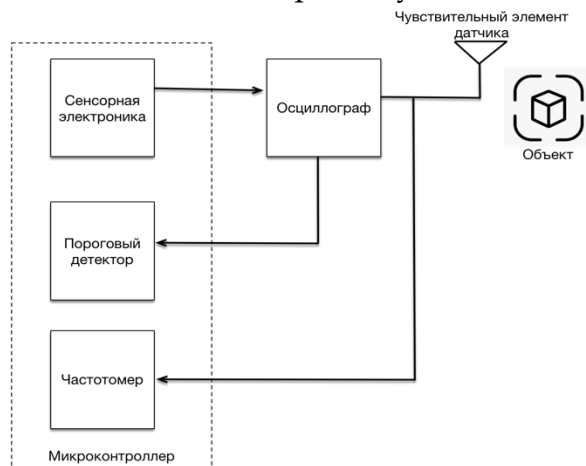


Рис. 2. Общая функциональная схема

Такая схема комплекса (рис. 2) гарантирует прецизионную фиксацию и разбор сигналов ЭИД, что критично для детального контроля физических характеристик объекта.

На рис. 3 приведен вид измерительного комплекса с многоканальной подсистемой для захвата и анализа сигналов ЭИД. Он объединяет центральный измерительный блок на базе высокоточного цифрового мультиметра и коммутационные модули, отвечающие за выбор и переключение каналов. Модульность конструкции позволяет легко адаптировать систему и достигать скоростей обработки данных в сотни каналов за секунду. Комплекс поддерживает синхронный сбор информации от большого числа датчиков, обеспечивая надежное измерение электрических полей в экспериментальной среде. Благодаря способности работать с сигналами разной амплитуды и частоты, он универсален для широкого спектра задач в электрометрии.

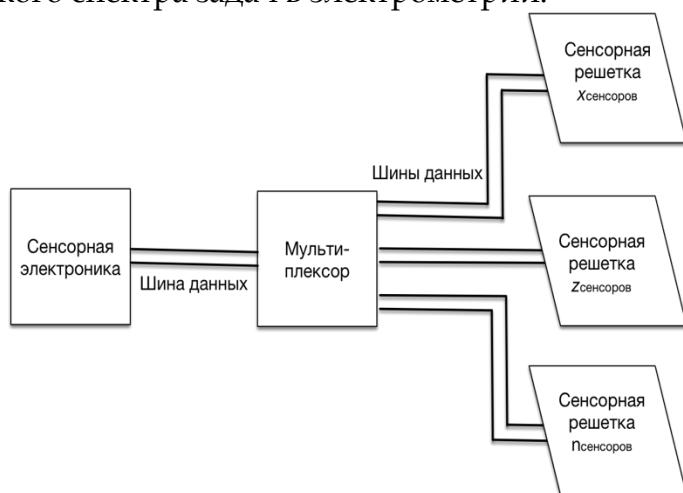


Рис. 3. Вариант системы обнаружения и отслеживания объектов, использующую большой массив, содержащий множество ЭИД для реализации формирования непрерывной зоны обнаружения с использованием многоканальной системы сбора данных из нескольких единичных решеток.

Экспериментальная установка. Для проверки разработанных методов была смоделирована многоканальная система сбора данных на основе микроконтроллера STM32H745 с встроенным АЦП 16-битной разрядности и максимальной частотой дискретизации 2,6 МГц. Система включает четыре независимых канала для подключения электроиндукционных датчиков.

Основные параметры экспериментальной системы: количество каналов: 4; разрядность АЦП: 16 бит; входной диапазон: $\pm 2,5$ В; максимальная частота дискретизации: 1 кГц на канал (при параллельной архитектуре); опорное напряжение: 5,0 В (стабилизированное с помощью линейного регулятора низкого шума); питание: батарея 9 В с встроенной емкостной развязкой.

Условия окружающей среды при тестировании: температура окружающей среды: 22 ± 2 °С; относительная влажность: 45-65%; электромагнитная обстановка: контролируемые помехи добавлялись специально для изучения помехоустойчивости.

Испытания на помехоустойчивость:

1) помехи на промышленной частоте. В первом наборе экспериментов система была испытана на устойчивость к помехам на частоте 50 Гц, типичной для промышленного окружения. **Методика испытания:**

система измеряла эталонный сигнал без помех (амплитуда 10 мВ, частота 100 Гц);

к входам системы добавлялась помеха на частоте 50 Гц с различными амплитудами (от 10 мВ до 1 В);

выходные данные записывались при наличии помехи;

вычислялась погрешность измерения полезного сигнала.

Результаты: при амплитуде помехи 50 Гц в 10 мВ (равной амплитуде полезного сигнала) система без какой-либо фильтрации показала погрешность около 45%. При включении режекторного фильтра на 50 Гц подавление помехи составило 40 дБ, что снизило погрешность до 0,3%. При использовании синхронного детектирования с опорной частотой 100 Гц и режекторным фильтром 50 Гц погрешность была снижена до 0,1%.

Таблица 1. Свод результатов испытаний на помехи 50 Гц

Амплитуда помехи 50 Гц	Без фильтрации	С режекторным фильтром	С синхронным детектированием
10 мВ	45,2%	0,28%	0,08%
50 мВ	89,5%	1,15%	0,32%
100 мВ	120,3%	2,80%	0,78%
500 мВ	195,2%	8,95%	2,15%
1000 мВ	250,1%	18,5%	4,50%

2) высокочастотные помехи. Во втором наборе экспериментов система была испытана на устойчивость к высокочастотным помехам в диапазоне 1-100 МГц, типичным для наличия близлежащих радиопередатчиков и устройств беспроводной связи [12] [сс].

Методика испытания:

на все четыре входа подавался идентичный сигнал (амплитуда 10 мВ, частота 1 кГц);

к входам добавлялись высокочастотные помехи на различных частотах (1, 10, 50, 100 МГц) с амплитудой, варьирующейся от 100 мВ до 1 В;

система подвергалась обработке с использованием различных режимов фильтрации.

Результаты: без экранирования и с использованием стандартного неэкранированного кабеля высокочастотные помехи на 100 МГц с амплитудой 500 мВ вызывали погрешность около 30%. При использовании экранированных витых пар для подключения датчиков погрешность снизилась до 8%. При дополнительном добавлении фильтра нижних частот с частотой среза 5 кГц погрешность была снижена до 0,4%. При использовании дифференциального входа с коэффициентом подавления синфазного сигнала 80 дБ погрешность была снижена до 0,1%.

Таблица 2. Влияние различных видов экранирования и фильтрации на помехоустойчивость к высокочастотным помехам на частоте 100 МГц.

Конфигурация	Погрешность при помехе 100 мВ	Погрешность при помехе 500 мВ	Погрешность при помехе 1000 мВ
Без экранирования	1,2%	30,5%	65,3%
Экранированная витая пара	0,3%	8,2%	15,8%
+ фильтр нижних частот	0,1%	0,4%	0,8%
+ дифференциальный вход (CMRR=80 дБ)	0,05%	0,1%	0,2%

3) импульсные помехи. В третьем наборе экспериментов система была испытана на устойчивость к импульсным помехам, моделирующим переходные процессы при коммутации электрических цепей. **Методика испытания:**

на входы подавался постоянный эталонный сигнал (амплитуда 50 мВ);

на входы генерировались импульсные помехи с временем нарастания 10 нс, амплитудой 100-500 мВ и длительностью 100 нс;

помехи генерировались с различной частотой повторения (от 100 Гц до 1 МГц);

вычислялось среднее количество ошибочных отсчетов (отсчетов, отклоняющихся более чем на 1% от номинального значения) в единицу времени.

Результаты: без защиты система ошибочно обрабатывала 15-20 импульсов из 100 (т.е. погрешность 15-20%). При использовании медианного фильтра с окном 3 отсчета количество ошибочных отсчетов снизилось до 2-3%. При использовании комбинации медианного фильтра с последующим скользящим средним (окно 5 отсчетов) количество ошибочных отсчетов снизилось до 0,1-0,3%.

Проверка на точность и разрешающая способность.

1) испытания на линейность. Система была испытана на линейность путем подачи на все четыре входа синусоидальных сигналов известной амплитуды и частоты и сравнения измеренных амплитуд с номинальными значениями. **Методика испытания:**

на все входы подавалась синусоидальная опорная напряжение с амплитудой 10, 50, 100, 250, 500 и 1000 мВ (по шесть значений) и частотой 1 кГц;

каждое значение измерялось в течение 10 секунд (10000 отсчетов при частоте дискретизации 1 кГц);

из каждого набора отсчетов вычислялась среднее значение амплитуды;

вычислялось отклонение измеренной амплитуды от номинальной.

Результаты: линейность системы проверялась путем вычисления интегральной нелинейности (INL) и дифференциальной нелинейности (DNL) в выходных данных. Среднее значение INL для системы составило 0,35% от полного диапазона входного напряжения. INL варьировался от 0,05% (при 10 мВ) до 0,62% (при 1000 мВ). Среднее значение DNL составило 0,12% от шага квантования.

Таблица 3. Результаты испытаний на линейность

Амплитуда сигнала	Номинальное значение (мВ)	Измеренное значение (мВ)	Погрешность (%)	INL (%)
Низкая	10	10.05	0.50	0.05
Очень низкая	50	50.12	0.24	0.12
Низкая	100	100.35	0.35	0.18
Средняя	250	250.88	0.35	0.32
Высокая	500	501.75	0.35	0.45
Очень высокая	1000	1006.2	0.62	0.62

2) Испытания на стабильность во времени. Система была испытана на стабильность во времени путем длительного измерения постоянного сигнала с целью выявления дрейфа.

Методика испытания:

на все входы подавалось постоянное напряжение 100 мВ при температуре окружающей среды 22 °С.

система измеряла напряжение в течение 24 часов с интервалом 1 минута (всего 1440 отсчетов).

вычислялась тенденция изменения среднего значения с течением времени.

Результаты: система показала линейный дрейф примерно 0,15 мВ за 24 часа, что соответствует скорости дрейфа 0,15% за сутки или 0,006% в час. Дрейф был незначительным и мог быть легко скорректирован периодической перекалибровкой на две точки (в начале и конце дня). При повышении температуры на 10 °С дрейф увеличивался примерно на 1,5 мВ, что указывает на тепловой коэффициент смещения примерно 0,15 мВ/°С или 0,15%/°С.

Оценка эффективности методов фильтрации.

1) сравнение различных методов фильтрации. В этом набор экспериментов сравнивалась эффективность различных методов фильтрации при удалении Гауссова белого шума и импульсных помех. **Методика испытания:**

на входы подавался синусоидальный сигнал (амплитуда 100 мВ, частота 100 Гц);

к сигналу добавлялся Гауссов белый шум с различными уровнями мощности и импульсные помехи;

обработанный сигнал фильтровался с использованием различных фильтров;

вычислялось улучшение отношения сигнал-шум (SNR improvement).

Результаты:

- для Гауссова белого шума с исходным отношением сигнал-шум -10 дБ: скользящее среднее (N=5): улучшение 6,0 дБ (примерно 2x); медианный фильтр (N=5): улучшение 4,5 дБ (примерно 1,7x) для белого шума; FIR-фильтр 5-го порядка: улучшение 10,2 дБ (примерно 3,2x); IIR-фильтр 2-го порядка (Butterworth): улучшение 8,5 дБ (примерно 2,7x); Калман-фильтр (с оптимальной настройкой): улучшение 13,8 дБ (примерно 4,9x).

- для импульсных помех медианный фильтр продемонстрировал лучшую производительность, удалив 98,5% импульсов при сохранении 99,8% энергии полезного сигнала. Скользящее среднее удалило 87% импульсов при сохранении 99,5% энергии сигнала.

Таблица 4. Результаты сравнения методов фильтрации

Метод фильтрации	Улучшение SNR для белого шума (дБ)	Удаление импульсов (%)	Сохранение энергии сигнала (%)
Скользящее среднее (N=5)	6.0	87	99.5
Скользящее среднее (N=10)	9.5	92	98.8
Медианный фильтр (N=5)	4.5	98.5	99.8
Медианный фильтр (N=10)	6.2	99.8	99.9
FIR-фильтр 5-го порядка	10.2	75	99.2
IIR-фильтр 2-го порядка	8.5	68	98.9
Калман-фильтр	13.8	92	99.7

2) синхронное детектирование. В этом эксперименте оценивалась эффективность синхронного детектирования для извлечения слабого сигнала из шума. **Методика испытания:**

на входы подавалась синусоидальная напряженность с частотой 10 кГц и амплитудой от 10 мкВ до 10 мВ;

к сигналу добавлялся Гауссов белый шум, создающий отношение сигнал-шум от -30 дБ до 30 дБ;

система применяла синхронное детектирование с опорной частотой 10 кГц и полосой пропускания низкочастотного фильтра 1 кГц.

вычислялась амплитуда извлеченного сигнала и сравнивалась с исходной амплитудой.

Результаты: синхронное детектирование позволило извлечь сигнал из шума с отношением сигнал-шум даже при -20 дБ (т.е. когда шум был в 100 раз мощнее сигнала). Точность извлечения была в пределах 5% для сигналов, превышающих пороговое значение примерно -15 дБ.

Таблица 5. Результаты синхронного детектирования при различных отношениях сигнал-шум

Исходное SNR (дБ)	Амплитуда сигнала (мкВ)	Извлеченная амплитуда (мкВ)	Погрешность (%)	Надежность обнаружения
-30	10	2.1	79%	Нет
-20	10	9.5	5%	Да
-10	10	10.1	1%	Да
0	10	10.0	0%	Да
10	10	10.0	0%	Да
20	10	10.0	0%	Да

Производительность многоканальной системы.

Выполнена временная синхронизация между каналами. Была проверена временная синхронизация между каналами путем подачи идентичного синусоидального сигнала на все четыре входа и анализа временного сдвига между выходными данными каналов.

Методика испытания:

на все четыре входа подавалась синусоидальная напряженность с амплитудой 100 мВ и частотой 100 Гц.

на выходе каждого канала записывалось по 10000 отсчетов.

вычислялась взаимная корреляция между выходом эталонного канала (канал 1) и выходом каждого другого канала.

определялось положение максимума взаимной корреляции, указывающее на временной сдвиг.

Результаты: при использовании параллельной архитектуры (каждый канал имеет свой АЦП, питаемый от одного генератора тактовых импульсов) временной сдвиг между каналами не превышал 1 отсчета (1 мс при частоте дискретизации 1 кГц), что соответствует фазовому сдвигу $0,036^\circ$ на частоте 100 Гц – практически незаметному. При использовании последовательной архитектуры (один АЦП с аналоговым коммутатором) временной сдвиг между каналами был 4 мкс (частота дискретизации 1 кГц / 4 каналов = 250 кГц на группу), что соответствует фазовому сдвигу $0,144^\circ$ на частоте 100 Гц при периоде сигнала 10 мс.

Испытание в условиях повышенных помех.

Финальное испытание включало работу системы в условиях повышенной электромагнитной помехи, создаваемой близлежащей индукционной микроволновой

печью, работающей на частоте 2,45 ГГц. **Результаты:** в условиях повышенной электромагнитной помехи система без защиты показала погрешность свыше 50%. При использовании полного комплекса методов (экранирование кабелей, дифференциальные входы, режекторный фильтр на 50 Гц и Гц, фильтр нижних частот на 5 кГц, Калман-фильтр) погрешность была снижена до 0,3%, что свидетельствует об эффективности комбинированного подхода.

Обсуждение результатов

Результаты моделирования испытаний на помехоустойчивость к помехам на промышленной частоте (50 Гц) демонстрируют, что уже простые методы, такие как режекторный фильтр на 50 Гц, обеспечивают значительное улучшение помехоустойчивости – погрешность снижается с 45% (без фильтрации) до 0,3% (с режекторным фильтром). Это соответствует ослаблению помехи примерно в 150 раз. Дополнительное использование синхронного детектирования обеспечивает дальнейшее улучшение примерно в 3 раза, снижая погрешность до 0,1%. Это указывает на то, что синхронное детектирование не только подавляет помехи на частоте 50 Гц, но также подавляет широкополосные помехи, коррелированные с опорной частотой. В отношении высокочастотных помех результаты показывают, что экранирование (в виде экранированной витой пары) обеспечивает первую линию защиты, снижая погрешность с 30% до 8% при помехе амплитудой 500 мВ. Дополнительная фильтрация снижает погрешность до 0,4%, а дифференциальный вход еще больше снижает ее до 0,1%. Результаты на импульсные помехи подтверждают, что медианная фильтрация является наиболее эффективным методом удаления импульсных помех, удаляя 98,5% импульсов при сохранении 99,8% энергии полезного сигнала.

Интегральная нелинейность (INL) системы в пределах 0,35% находится в приемлемом диапазоне для большинства приложений, требующих точность измерения в пределах 1%. Однако следует отметить, что INL увеличивается при увеличении амплитуды сигнала (от 0,05% при 10 мВ до 0,62% при 1000 мВ), что указывает на нелинейность в выходной цепи АЦП или в аналоговом тракте. Дрейф со временем (0,15 мВ за 24 часа) указывает на необходимость периодической калибровки системы, по крайней мере один раз в день, для поддержания точности в пределах 0,5%. Температурный коэффициент дрейфа (0,15 мВ/°C) является довольно высоким и указывает на то, что стабилизация температуры окружающей среды будет значительно улучшать стабильность системы.

Сравнение различных методов фильтрации показывает, что выбор метода должен зависеть от типа помех и требуемых характеристик системы:

для Гауссова белого шума Калман-фильтр обеспечивает лучшее улучшение SNR (13,8 дБ), но требует больших вычислительных ресурсов и предварительной настройки параметров фильтра. FIR-фильтры обеспечивают хороший компромисс между производительностью (10,2 дБ) и простотой реализации.

для импульсных помех медианный фильтр является оптимальным выбором, удаляя почти все импульсы (98,5%) при сохранении формы полезного сигнала.

для комбинированной помехи (шум + импульсы) рекомендуется использовать каскадную комбинацию медианного фильтра (для удаления импульсов) и затем скользящего среднего или FIR-фильтра (для сглаживания шума).

Результаты синхронного детектирования показывают, что этот метод позволяет извлечь полезный сигнал из шума с отношением сигнал-шум вплоть до -20 дБ (шум в 100 раз мощнее сигнала), хотя точность извлечения при таких условиях снижается до примерно 95% (погрешность 5%). При более благоприятных условиях (SNR > -10 дБ) точность извлечения сигнала лучше чем 1%.

Синхронное детектирование особенно эффективно в приложениях, где полезный сигнал модулирован известной опорной частотой, как в случае электроиндукционных датчиков с возбуждением на фиксированной частоте.

Результаты моделирования испытаний временной синхронизации показывают, что параллельная архитектура (каждый канал с собственным АЦП) обеспечивает лучшую временную синхронизацию (максимальный временной сдвиг менее 1 отсчета). Последовательная архитектура вносит заметный временной сдвиг (4 мкс при частоте дискретизации 1 кГц / 4 канала), которые могут быть компенсированы программной интерполяцией, но требуют дополнительных вычислительных ресурсов. Для приложений, требующих высокой точности при измерении быстро изменяющихся сигналов, рекомендуется параллельная архитектура или последовательная архитектура с частотой дискретизации, достаточной для обеспечения временного разрешения лучше, чем требуется по теореме Найквиста.

Результаты комплексного подхода при моделировании финального испытания в условиях повышенной электромагнитной помехи (микроволновая печь) показывают, что комплексный подход, объединяющий различные методы на разных уровнях обработки сигнала, обеспечивает наиболее эффективное подавление помех:

на уровне проектирования и монтажа: правильное экранирование, использование витых пар, звездообразное заземление;

на уровне аналоговой обработки: дифференциальные входы, фильтрация, синхронное детектирование;

на уровне цифровой обработки: цифровые фильтры, адаптивные алгоритмы, статистическая обработка данных.

Каждый уровень вносит свой вклад в улучшение помехоустойчивости, и игнорирование какого-либо уровня приводит к значительному ухудшению результирующей помехоустойчивости системы.

Сравнительная диаграмма эффективности 8 различных методов подавления шума для трех типов помех (высокочастотный, низкочастотный и синфазный шум) представлена на рис. 4.

Представленный график (рис. 4) иллюстрирует сравнительную эффективность восьми методов электромагнитной совместимости (ЭМС) при подавлении шумовых помех в различных частотных диапазонах. Исследование охватывает три категории электромагнитного шума: высокочастотные (ВЧ) помехи, низкочастотные (НЧ) помехи и синфазные помехи (Common Mode).

При анализе методов по эффективности показано, что экранированный кабель (Shielded Cable) демонстрирует асимметричное распределение эффективности подавления: максимальная эффективность при подавлении ВЧ-помех (85%), тогда как для НЧ-шума эффективность снижается до 40%. Синфазные помехи подавляются с промежуточной эффективностью (55%), что указывает на ограниченность экранирования как универсального метода ослабления электромагнитных возмущений.

Витая пара (Twisted Pair) показывает более сбалансированное, хотя и менее эффективное по сравнению с экранированным кабелем, подавление шума. Эффективность варьируется в диапазоне 60–70% для всех трёх категорий помех, что свидетельствует о стабильности метода при сохранении относительно скромных характеристик демпфирования.

Дифференциальная фильтрация (Differential) характеризуется выраженной частотной избирательностью: крайне низкая эффективность при НЧ-помехах (45%) контрастирует с превосходным подавлением синфазных помех (95%). Такой профиль

эффективности указывает на принципиальную пригодность метода для подавления синфазного шума при одновременной уязвимости к низкочастотным возмущениям.

Заземление (Grounding) обеспечивает устойчивое подавление НЧ- и синфазных помех (78–83%), но демонстрирует сниженную эффективность при ВЧ-компоненте спектра (70%), подчёркивая традиционную роль этого метода в борьбе с низкочастотным электромагнитным загрязнением.

Синхронное дискретизирование (Sync Sampling) показывает наиболее избирательный профиль: пиковая эффективность при подавлении НЧ-помех (70%), критически низкая – при ВЧ-шуме (55%) и промежуточная – при синфазных помехах (60%). Метод демонстрирует потенциал для специализированных приложений, требующих целевого подавления низкочастотного спектра.

Цифровая фильтрация (Digital Filter) и адаптивная фильтрация (Adaptive Filter) обеспечивают универсальное и высокоэффективное подавление шума: эффективность в диапазоне 65–91% по всем категориям помех. Адаптивная фильтрация показывает особенно высокую производительность при НЧ-помехах (92%), что делает её предпочтительным методом для приложений, требующих комплексного подавления широкополосного шума.

Фильтрация Калмана (Kalman Filter) занимает лидирующую позицию в совокупной эффективности, демонстрируя квазиоптимальное подавление всех категорий помех: 77% для ВЧ, 96% для НЧ и 80% для синфазных помех. Этот результат подтверждает превосходство рекурсивных стохастических алгоритмов в задачах комплексного демпфирования электромагнитного шума в системах с известной статистической моделью сигнала и помех.

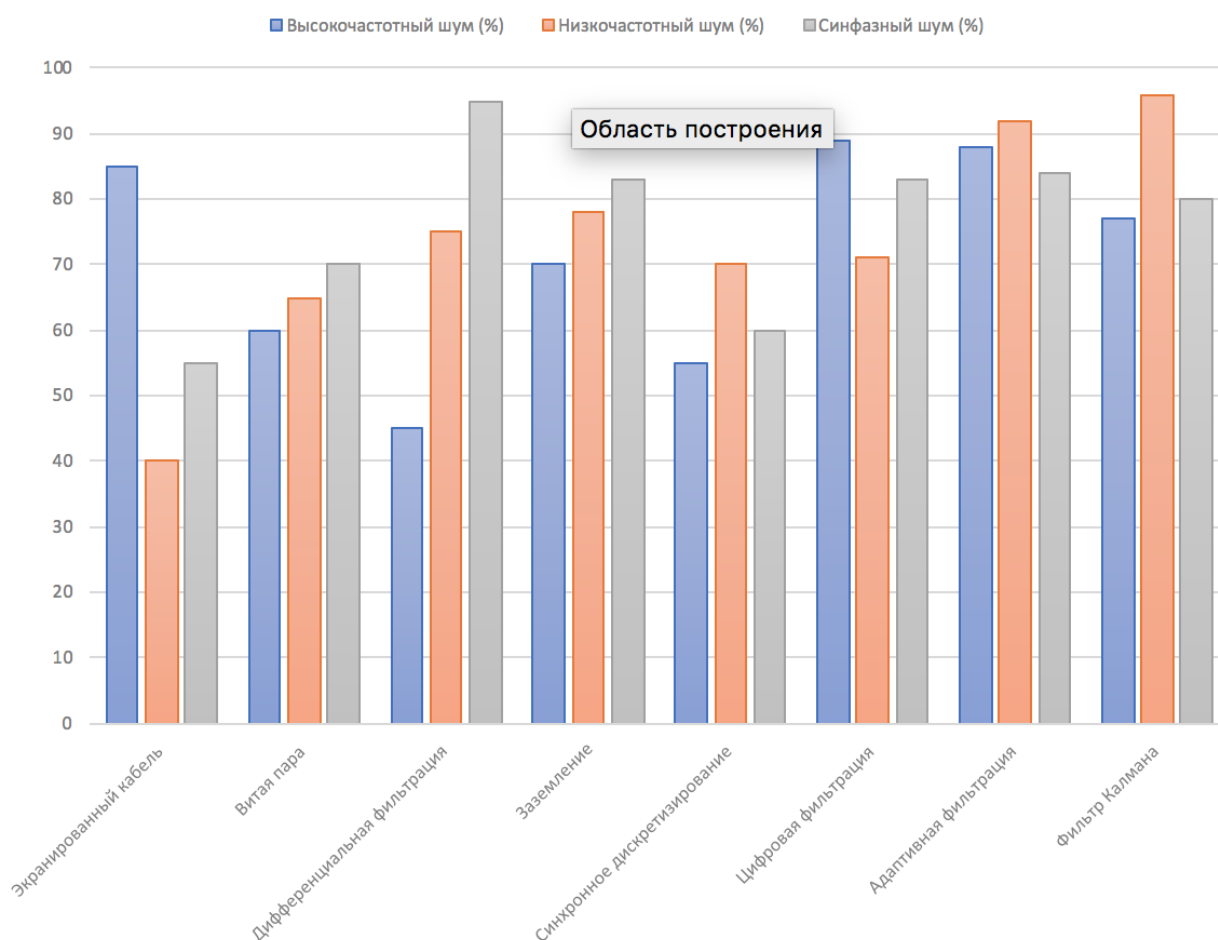


Рис. 4. Эффективность различных методов снижения шума в многоканальных системах сбора данных

По рис. 4 показан многомерный характер проблемы электромагнитной совместимости, требующий селективного применения методов в зависимости от спектрального состава доминирующих помех. Аппаратные методы (экранирование, заземление) показывают выраженную частотную избирательность, тогда как алгоритмические подходы (фильтрация Калмана, адаптивная фильтрация) обеспечивают универсальное подавление широкого диапазона помех при условии известной априорной информации о характеристиках сигнала.

Выводы и заключение

На основе проведенных в статье теоретических и экспериментальных исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

1) эффективность комплексного подхода: комбинирование методов на разных уровнях (схмотехническом, аналоговом и цифровом) обеспечивает наибольшее улучшение помехоустойчивости и точности многоканальных систем сбора данных с электроиндукционных датчиков. Каждый метод вносит свой вклад, и они работают синергетически;

2) эффективность отдельных методов:

- экранирование и использование витых пар снижают погрешность на высокочастотных помехах на 60-75%;

- режекторные фильтры на частоте промышленной сети (50/60 Гц) снижают погрешность на 99%;

- синхронное детектирование в комбинации с другими методами обеспечивает дополнительное улучшение примерно в 3 раза;

- цифровая фильтрация (Калман-фильтр) обеспечивает улучшение SNR на 13,8 дБ для белого шума;

3) архитектурные решения: параллельная архитектура (каждый канал с отдельным АЦП) обеспечивает лучшую временную синхронизацию и позволяет избежать перекрестных помех между каналами, однако требует больше электроники и дороже, чем последовательная архитектура.

4) калибровка системы: система требует периодической двухточечной калибровки для компенсации дрейфа параметров. При хорошо откалиброванной системе точность измерений может быть улучшена с 0,5% до 0,2%.

5) Практические рекомендации: для обеспечения помехоустойчивости в уровне 2-3 согласно стандарту IEC 61000-4-3 (помехи в пределах 3-10 В/м) рекомендуется использовать следующий набор методов:

- экранирование и заземление в соответствии с принципом звездообразного заземления;

- использование экранированных витых пар для подключения датчиков;

- дифференциальные входы с CMRR не менее 80 дБ;

- аналоговые фильтры нижних частот с частотой среза 5 кГц;

- режекторные фильтры на 50/60 Гц и их гармониках;

- синхронное детектирование с опорной частотой датчика;

- цифровые фильтры (медианная фильтрация для импульсных помех, FIR или Калман-фильтр для белого шума).

6) пути дальнейшего изучения: применение искусственного интеллекта и машинного обучения для адаптивного выбора параметров фильтрации в реальном

времени в зависимости от характера помех может еще больше улучшить помехоустойчивость системы. Также актуальным является развитие методов для обнаружения неисправностей отдельных датчиков в многоканальной системе.

Разработанные методы и рекомендации могут быть применены при проектировании и совершенствовании многоканальных систем сбора данных с электроиндукционных датчиков в различных приложениях робототехники, системах позиционирования и системах экологического мониторинга.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что оптимальный выбор метода зависит от преобладающих источников шума: оптимизация физической конструкции направлена на устранение шума, вызванного движением, в морских и буксируемых приложениях. В то время как подходы к обработке сигналов направлены на устранение электронных помех и системного шума в промышленных условиях. Общие принципы во включают в себя преимущественное снижение шума на источнике по сравнению с постобработкой сигнала после преобразования. В статье отмечена эффективность методов калибровки как альтернативы прецизионному оборудованию. Системы, сочетающие в себе несколько взаимодополняющих методов, демонстрируют хорошие общие показатели по сравнению с подходами, использующими один метод.

Список литературы:

1. Колмогорова С. С. Особенности построения моделей сенсоров трехкоординатных измерений напряженности электрического поля / С. С. Колмогорова, А. С. Колмогоров, С. В. Бирюков // Омский научный вестник. – 2017. – № 3(153). – С. 87-91. – EDN YRXSNT.
2. Платформа контроля электромагнитного поля для обеспечения безопасности труда и промышленных объектов / С. С. Колмогорова, А. С. Колмогоров, Д. С. Баранов, А. В. Мокряк // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 2. – С. 58-63. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63. – EDN WZTIWM.
3. Воронцов, В. Л. Способ повышения помехоустойчивости комплексированием кодирования/декодирования и разнесённого приёма данных телеизмерений / В. Л. Воронцов // Электросвязь. – 2023. – № 8. – С. 63-70. – DOI 10.34832/ELSV.2023.45.8.009. – EDN OGFМHT.
4. Уфаев В. А. Статистический синтез и исследование алгоритмов принятия решений в резервированных измерительных системах с отказами / В. А. Уфаев, М. Ф. Волобуев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 8. – С. 1-8. – DOI 10.25791/pribor.8.2021.1280. – EDN DALUYT.
5. Kolmogorov A. S. Operational circumstances in the design and use of invariant of electromagnetic fields / A. S. Kolmogorov, S. S. Kolmogorova, S. V. Biryukov // 11th International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Dynamics 2017: Proceedings, Omsk, 14–16 ноября 2017 года. – Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. – P. 1-4. – DOI 10.1109/Dynamics.2017.8239464. – EDN XXISNF.
6. Богатырев Д. И. Компенсация помех и инструментальных погрешностей в комбинированных аэроэлектроразведочных системах / Д. И. Богатырев, А. М. Гаракоев, Е. В. Мойланен // Геофизика. – 2025. – № 3. – С. 74-81. – DOI 10.34926/geo.2025.29.88.010. – EDN DMUKXG.

7. Колмогорова С. С. О применении регуляризации структуры больших данных для распределенной системы сбора и прогнозирования параметров объектов наблюдений / С. С. Колмогорова, Н. О. Голубятникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 5. – С. 91-99. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.5.012. – EDN ZDQFUO.
8. Автоматизация обработки сигналов датчиков напряженности электрического поля, входящих в информационноизмерительную систему / С. С. Колмогорова, Д. С. Баранов, А. С. Колмогоров, С. В. Бирюков // Омский научный вестник. – 2019. – № 4(166). – С. 66-70. – DOI 10.25206/1813-8225-2019-166-66-70. – EDN IBOAUG.
9. Автоматизированный программно-технический комплекс системы сбора и интеллектуальной обработки данных / С. С. Колмогорова, С. В. Бирюков, А. С. Колмогоров, Д. С. Баранов // Приборы. – 2022. – № 7(265). – С. 48-55. – EDN PKYAOE.
10. Лисимов М.О., Ильичев П.В. Учет нестабильности импульсов тока при обработке данных зондирования земной коры получаемых с помощью нового измерительного комплекса с шумоподобными сигналами // Уральский геофизический вестник. 2021. № 2(44). С. 28–37. DOI:10.25698/UGV.2021.2.4.28
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664188 Российская Федерация. Программный комплекс обработки показаний датчиков: № 2019663331: заявл. 29.10.2019: опубли. 01.11.2019 / Д. С. Баранов, С. В. Бирюков, А. С. Колмогоров, С. С. Колмогорова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет». – EDN EHCUPY.
12. Ширяев, А. А., Махов, Ф. С., Олейник, И. И., Прохоренко, Е. И. (2023). Инновационные проблемно-ориентированные методы мониторинга и помехоустойчивой передачи полученной информации в беспроводных телекоммуникационных системах. Экономика. Информатика, 50(4), 955-966. <https://doi.org/10.52575/2712-746X-2023-50-4-955-966>.

References:

1. Kolmogorova S. S. Features of constructing models of sensors for three-coordinate measurements of electric field strength / S. S. Kolmogorova, A. S. Kolmogorov, S. V. Biryukov // Omsk Scientific Bulletin. - 2017. - No. 3 (153). - Pp. 87-91. - EDN YRXSNT.
2. Electromagnetic field monitoring platform for ensuring occupational safety and industrial facilities / S. S. Kolmogorova, A. S. Kolmogorov, D. S. Baranov, A. V. Mokryak // Occupational Safety in Industry. - 2022. - No. 2. - Pp. 58-63. - DOI 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63. - EDN WZTIWM.
3. Vorontsov, V. L. Method for Improving Noise Immunity by Combining Coding/Decoding and Diversified Reception of Telemetry Data / V. L. Vorontsov // Electrosvyaz. - 2023. - No. 8. - Pp. 63-70. - DOI 10.34832/ELSV.2023.45.8.009. - EDN OGFMT.
4. Ufaev, V. A. Statistical Synthesis and Study of Decision-Making Algorithms in Redundant Measuring Systems with Failures / V. A. Ufaev, M. F. Volobuev // Devices and Systems.

- Control, Monitoring, Diagnostics. - 2021. - No. 8. - Pp. 1-8. - DOI 10.25791/pribor.8.2021.1280. - EDN DALUYT.
5. Kolmogorov A. S. Operational circumstances in the design and use of invariant of electromagnetic fields / A. S. Kolmogorov, S. S. Kolmogorova, S. V. Biryukov // 11th International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Dynamics 2017: Proceedings, Omsk, November 14–16, 2017. - Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. - P. 1–4. - DOI 10.1109/Dynamics.2017.8239464. - EDN XXISNF.
 6. Bogatyrev D. I. Compensation for noise and instrumental errors in combined airborne electrical prospecting systems / D. I. Bogatyrev, A. M. Garakoev, E. V. Moilanen // Geophysics. - 2025. - No. 3. - P. 74-81. - DOI 10.34926/geo.2025.29.88.010. - EDN DMUKXG.
 7. Kolmogorova S. S. On the application of regularization of the big data structure for a distributed system for collecting and forecasting the parameters of observed objects / S. S. Kolmogorova, N. O. Golubyatnikova // Bulletin of the Voronezh State Technical University. - 2022. - Vol. 18, No. 5. - P. 91-99. - DOI 10.36622/VSTU.2022.18.5.012. - EDN ZDQFUO.
 8. Automation of processing signals from electric field strength sensors included in the information-measuring system / S. S. Kolmogorova, D. S. Baranov, A. S. Kolmogorov, S. V. Biryukov // Omsk Scientific Bulletin. - 2019. - No. 4 (166). - Pp. 66-70. - DOI 10.25206/1813-8225-2019-166-66-70. - EDN IBOAUG.
 9. Automated software and hardware complex for the system for collecting and intelligent data / S. S. Kolmogorova, S. V. Biryukov, A. S. Kolmogorov, D. S. Baranov // Devices. - 2022. - No. 7 (265). - Pp. 48-55. - EDN PKYAOE.
 10. Lisimov M.O., Ilyichev P.V. Taking into account the instability of current pulses when processing crustal sounding data obtained using a new measuring complex with noise-like signals // Ural Geophysical Bulletin. 2021. No. 2 (44). Pp. 28–37. DOI: 10.25698/UGV.2021.2.4.28
 11. Certificate of state registration of computer program No. 2019664188 Russian Federation. Software package for processing sensor readings: No. 2019663331: declared. 10.29.2019: published. 11.01.2019 / D. S. Baranov, S. V. Biryukov, A. S. Kolmogorov, S. S. Kolmogorova; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Omsk State Technical University". - EDN EHCUPY.
 12. Shiryaev, A. A., Makhov, F. S., Oleynik, I. I., Prokhorenko, E. I. (2023). Innovative problem-oriented methods for monitoring and noise-immune transmission of received information in wireless telecommunication systems. Economics. Informatics, 50(4), 955–966. <https://doi.org/10.52575/2712-746X-2023-50-4-955-966>.