

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 27.04.01 Стандартизация и метрология
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Автоматическая калибровка сенсоров в беспроводной сенсорной сети
УДК 004.73:681.586:621.713.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ71	Бауэр Евгения Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Худоногова Людмила Игоревна	к.т.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суханов Алексей Викторович	к.х.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН ШБИП	Николаенко Валентин Сергеевич			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Атепаева Наталья Александровна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Казаков Вениамин Юрьевич	к.ф.-м.н. с.н.с.		
Руководитель ОАР ИШИТР	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения по направлению

27.04.01 «Стандартизация и метрология»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
Профессиональные компетенции		
Р1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для решения комплексных задач метрологического обеспечения, контроля качества, технического регулирования и проверки соответствия с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения	Требования ФГОС (ОК-12, 13, 15, 16, 19; ПК- 17, 18, 19, 21, 22, 26). Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р2	Выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, определять номенклатуру измеряемых и контролируемых параметров, устанавливать оптимальные нормы точности и достоверности контроля, выбирать средства измерений и контроля, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов, кроме того, уметь принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа	Требования ФГОС (ОК-5, ПК-3, 4, 8, 12, 23, 24). Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р3	Выполнять работы в области стандартизации и сертификации: по созданию проектов стандартов, методических и нормативных материалов и технических документов, по нормоконтролю и экспертизе технической документации, участвовать в проведении сертификации продукции, услуг, систем качества и систем экологического управления предприятием, участвовать в аккредитации органов по сертификации, измерительных и испытательных лабораторий	Требования ФГОС (ОК-17, 19; ПК-1, 6, 7, 8, 11, 14, 16, 17, 18, 21, 24). Критерий 5 АИОР (п.1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р4	Выполнять работы в области контроля и управления качеством: участвовать в оперативной работе систем качества, анализировать оценку уровня брака и предлагать мероприятия по его предупреждению и устранению, участвовать в практическом освоении систем менеджмента качества	Требования ФГОС (ОК-3, 9, 15, ПК-2, 5, 11, 12, 13, 15, 21). Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р5	Использовать базовые знания в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; проводить анализ затрат на обеспечение требуемого качества и деятельности подразделения, проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных решений	Требования ФГОС (ОК-8, 9, 18, ПК-10, 25). Критерий 5 АИОР (п.2.1, 1.3, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Универсальные компетенции		
Р6	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-3, 4, 5). Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI

Код результата	Результат обучения (выпускник должен)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы	Требования ФГОС (ОК-3, 18, ПК-26). Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, представлять и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-17,19). Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P9	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а также различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду	Требования ФГОС (ОК-1, 13, 14, ПК-26). Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-6, 7). Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 27.04.01 Стандартизация и метрология
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ В.Ю. Казаков
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ71	Бауэр Евгении Сергеевне

Тема работы:

Автоматическая калибровка сенсоров в беспроводной сенсорной сети	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 1097/с от 12.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2019 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	1 Fadi Kizel, Yael Etzion, Rakefet Shafran-Nathan, Ian Levy, Barak Fishbain, Alena Bartonova, David M. Broday: Node-to-node field calibration of wireless distributed air pollution sensor network. Environmental Pollution, 1-10, 2017. 2 Wang, YZ., Yang, AQ., Chen, XM., Wang, PJ., Wang, Y., Yang, HZ.: A Deep Learning Approach for Blind Drift Calibration of Sensor Networks. IEEE Sensors Journal, volume 17, issue 13, pp. 4158-4171, 2017. 3 Lau, B., Lyons, M.: Lazy Calibration for Wireless Sensor Networks. 2008.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>1 Методы калибровки беспроводных сенсорных сетей 2 Разработка алгоритма автоматической калибровки сенсоров беспроводной сенсорной сети 2.1 Модель сети 2.2 Метод комплексирования интервальных данных 2.3 Алгоритм автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети 3 Разработка программного обеспечения 3.1 Программное обеспечение метода «простой» калибровки 3.2 Программное обеспечение для автокалибровки с использованием алгоритма AutoWSN 4 Экспериментальное исследование алгоритмов автокалибровки</p>
--	---

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация, выполненная в программе Microsoft Power Point</p>
--	---

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
---	--

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	В.С. Николаенко
Социальная ответственность	Н.А. Атепаева
Раздел, выполненный на английском языке	А.В. Диденко

<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>
<p>Методы калибровки беспроводных сенсорных сетей (Calibration methods of wireless sensor networks)</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>25.09.2018 г.</p>
--	----------------------

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Худоногова Людмила Игоревна	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ71	Бауэр Евгения Сергеевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ71	Бауэр Евгении Сергеевне

Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение школы (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	27.04.01 Стандартизация и метрология

Тема ВКР:

Автоматическая калибровка сенсоров в беспроводной сенсорной сети

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических и человеческих	– стоимость расходных материалов (255560 руб.); – оклад исполнителей: научный руководитель (4535,24 руб.), студент (19795,42 руб.)
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений	– отчисления во внебюджетные фонды (30,2 %); – расчет дополнительной заработной платы (13 %).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	– потенциальные потребители результатов исследования; – анализ конкурентных технических решений.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	– структура работ в рамках научного исследования; – определение трудоемкости выполнения работ; – разработка графика проведения научного исследования; – бюджет научно-технического исследования.
3. Определение ресурсной и экономической эффективности исследования	– определение интегрального финансового показателя; – определение интегрального показателя ресурсоэффективности; – определение сравнительной эффективности проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

График проведения и бюджет НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	29.03.2019
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН ШБИП	Николаенко Валентин Сергеевич			29.03.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ71	Бауэр Евгения Сергеевна		29.03.2019

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ71	Бауэр Евгении Сергеевне

Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение школы (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	27.04.01 Стандартизация и метрология

Тема ВКР:

Автоматическая калибровка сенсоров в беспроводной сенсорной сети	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	Объектом исследования является система автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети. Данный объект может применяться как в лаборатории, так и в промышленных помещениях.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019); – ГОСТ 12.2.032-78; – ГОСТ 12.1.003-2014; – ГОСТ 12.1.004-91; – СП 52.13330.2016; – СН 2.2.4/2.1.8.562-96; – СанПиН 2.2.4.3359-16; – СанПиН 2.2.4.548-96.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 2.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	– превышение уровня электромагнитных излучений; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – превышение уровня шума; – отклонение показателей микроклимата.
3. Экологическая безопасность:	В работе проведен анализ негативного воздействия на литосферу, а также проведен анализ потребления электроэнергии.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– возникновение пожара; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.03.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Атепаева Наталья Александровна			14.03.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ71	Бауэр Евгения Сергеевна		14.03.2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 27.04.01 Стандартизация и метрология
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2019 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
14.11.2018	Методы калибровки сенсоров беспроводных сенсорных сетей	
12.01.2019	Программное обеспечение метода «простой» калибровки	
08.02.2019	Метод комплексирования интервальных данных	
04.03.2019	Алгоритм автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети	
22.04.2019	Программное обеспечение для автокалибровки с использованием алгоритма AutoWSN	
20.05.2019	Экспериментальное исследование алгоритмов автокалибровки	
27.05.2019	Социальная ответственность	
27.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
27.05.2019	Раздел на английском языке	
03.06.2019	Оформление расчетно-пояснительной записки	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Худоногова Людмила Игоревна	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Казаков Вениамин Юрьевич	к.ф.-м.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 115 страниц, 31 рисунок, 15 таблиц, 17 источников, 6 приложений.

Ключевые слова: калибровка, датчик, беспроводная сенсорная сеть, программное обеспечение, алгоритм.

Объектом исследования является беспроводная сенсорная сеть.

Цель работы – разработка алгоритма автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети.

В процессе исследования проводились: исследование существующих методов калибровки сенсоров беспроводных сенсорных сетей, разработка алгоритма автоматической калибровки в беспроводной сенсорной сети на основе метода комплексирования интервальных данных, разработка программного обеспечения метода «простой» калибровки и алгоритма автоматической калибровки AutoWSN, экспериментальные исследования алгоритмов автокалибровки.

В результате исследования создан алгоритм автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети.

Степень внедрения: НИР, выполняемые в отделении ОАР ТПУ.

Область применения: калибровка сенсоров беспроводной сенсорной сети.

Оглавление

Введение	12
1 Методы калибровки беспроводных сенсорных сетей	14
1.1 Калибровка «от-узла-к-узлу»	16
1.2 Калибровка с использованием нейронной сети Projection-Recovery Network	19
1.3 «Простая» калибровка	23
1.4 Двухуровневая калибровка на уровне системы	26
2 Разработка алгоритма автоматической калибровки сенсоров беспроводной сенсорной сети	33
2.1 Модель сети	33
2.2 Метод комплексирования интервальных данных	34
2.2.1 Основные понятия	34
2.2.2 Метод комплексирования интервальных данных агрегированием предпочтений	38
2.3 Алгоритм автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети	40
3 Разработка программного обеспечения	43
3.1 Программное обеспечение метода «простой» калибровки	43
3.2 Программное обеспечение для автокалибровки с использованием алгоритма AutoWSN	51
4 Экспериментальное исследование алгоритмов автокалибровки	55
4.1 Исследование точности алгоритмов	55
4.2 Исследование влияния выбросов на результаты алгоритма AutoWSN	57
5 Социальная ответственность	59
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	59
5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	59
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	60
5.2 Производственная безопасность	62
5.2.1 Превышение уровня электромагнитных излучений	63
5.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны	64
5.2.3 Превышение уровня шума	65
5.2.4 Отклонение показателей микроклимата	67
5.3 Экологическая безопасность	69
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	70
5.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность»	71

6	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	73
6.1	Потенциальные потребители результатов исследования	73
6.2	Анализ конкурентных технических решений	74
6.3	Структура работ в рамках научного исследования	75
6.4	Определение трудоемкости выполнения работ	76
6.5	Разработка графика проведения научного исследования	77
6.6	Бюджет научно-технического исследования	78
6.6.1	Расчет материальных затрат	78
6.6.2	Основная заработная плата исполнителей	80
6.6.3	Дополнительная заработная плата исполнителей	81
6.6.4	Отчисления во внебюджетные фонды	82
6.6.5	Расчет накладных расходов	82
6.6.6	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	83
6.7	Определение ресурсной и экономической эффективности исследования	83
6.7.1	Интегральный финансовый показатель	84
6.7.2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	84
6.7.3	Сравнительная эффективность проекта	85
6.8	Выводы к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	86
	Заключение	87
	Список публикаций студента	88
	Список использованных источников	89
	Приложение А Calibration methods of wireless sensor networks	91
	Приложение Б Результаты экспериментальных исследований	100
	Приложение В Требования к освещению помещений промышленных предприятий	112
	Приложение Г Анализ конкурентных технических решений	113
	Приложение Д Временные показатели проведения научного исследования	114
	Приложение Е Календарный план-график	115

Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) состоят из группы небольших и недорогих узлов, предназначенных для считывания, измерения, обработки данных и передачи информации. БСС могут собирать информацию из окружающей среды и передавать собранные данные пользователям [1]. В последние годы развитые технологии позволили развертывать широкомасштабные БСС в труднодоступных местах.

Узлы БСС содержат датчики физических величин, процессор, память, устройство для беспроводной передачи данных и аккумулятор. Эти узлы обычно развертываются в массовом порядке и должны быть недорогими. По этой причине такие датчики часто обладают низкой точностью.

Под сенсорами БСС понимаются датчики физических величин, участвующие в процессе измерений и обладающие нормированными метрологическими характеристиками.

Узлы обычно работают без обслуживания в течение длительных периодов времени, что часто приводит к сбоям в их работе. Это может быть вызвано нехваткой энергии или суровыми окружающими условиями. По мере старения таких узлов систематическая погрешность их датчиков неизбежно возрастает. Это создает серьезную проблему для пользователя, поскольку данные, получаемые с БСС, становятся недостоверными [2].

Хотя датчики БСС могут быть откалиброваны вручную или заменены более точными датчиками, временные, трудовые и денежные затраты на такую калибровку могут быть чрезмерно высокими.

По определению, калибровка относится к процессу исправления систематических ошибок в показаниях датчиков. Обычно требуется повторная калибровка для обеспечения правильной работы измерительного устройства, поскольку со временем износ и другие факторы влияют на датчики и другое измерительное оборудование. В беспроводных сенсорных сетях, когда процесс калибровки выполняется в полевых условиях, при

отсутствии камеры с регулируемыми характеристиками окружающей среды, это называется автокалибровкой в неконтролируемой среде.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка алгоритма автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

- исследование существующих методов калибровки сенсоров беспроводных сенсорных сетей;
- разработка программного обеспечения метода «простой» калибровки;
- разработка алгоритма автоматической калибровки в беспроводной сенсорной сети на основе метода комплексирования интервальных данных;
- разработка программного обеспечения для автокалибровки сенсоров;
- экспериментальные исследования алгоритмов автокалибровки.

В первом разделе рассмотрены методы калибровки беспроводных сенсорных сетей, такие как калибровка «от-узла-к-узлу», калибровка с использованием глубокой нейронной сети «Projection-Recovery Network», «простая» калибровка, двухуровневая калибровка на уровне системы.

Во втором разделе описаны модель сети и алгоритм автоматической калибровки сенсоров беспроводной сенсорной сети на основе метода комплексирования интервальных данных.

В третьем разделе представлено описание процесса разработки программного обеспечения метода «простой» калибровки и алгоритма автокалибровки сенсоров БСС AutoWSN.

В четвертом разделе описываются экспериментальные исследования алгоритмов автокалибровки и их сравнение.

1 Методы калибровки беспроводных сенсорных сетей

Беспроводные сенсорные сети (БСС) состоят из группы небольших и недорогих *узлов*, предназначенных для считывания, измерения, обработки данных и передачи информации. БСС могут собирать информацию из окружающей среды и передавать собранные данные пользователям. Они имеют важное значение во многих новых областях использования, таких как мониторинг окружающей среды, умные города, обнаружение цели и т.д. В последние годы развитые технологии позволили развертывать широкомасштабные БСС в труднодоступных местах.

Узлы БСС содержат датчики физических величин, процессор, память, устройство для беспроводной передачи данных и аккумулятор. Эти узлы обычно развертываются в массовом порядке и должны быть недорогими. По этой причине такие датчики часто обладают низкой точностью.

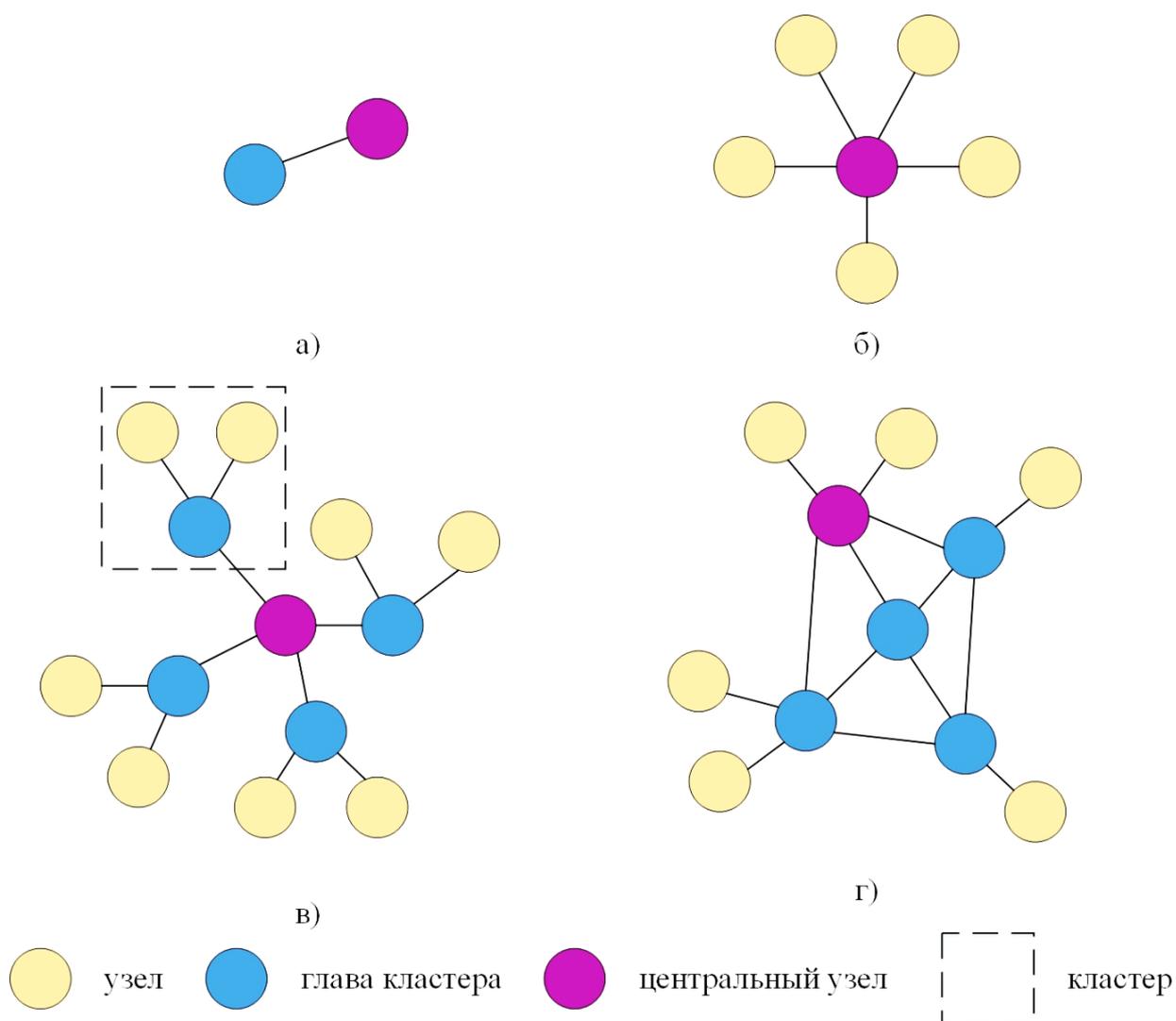
Под *сенсорами* БСС понимаются датчики физических величин, участвующие в процессе измерений и обладающие нормированными метрологическими характеристиками.

Сенсорные сети могут быть реализованы с помощью различных топологий, примеры которых представлены на рисунке 1.

Топология «точка-точка» предполагает соединение двух узлов напрямую. В топологии «звезда» все узлы сети присоединены к центральному узлу, образуя кластер БСС. Топология «кластерное дерево» образовывается посредством связи каждого узла более высокого уровня с узлами более низкого уровня звездообразной связью, образуя набор *кластеров*, каждый из которых имеет *главы кластера*. Ячеистая топология построена на принципе ячеек, в которой узлы сети соединяются друг с другом и способны принимать на себя роль главы кластера для остальных узлов.

Центральный узел (ЦУ), как правило, является компьютером, на котором происходит сбор, обработка и хранение информации. Такой узел не имеет автономного блока питания, а получает энергию от сети.

Соседними узлами будем называть узлы, принадлежащие одному кластеру или находящиеся в одной исследуемой области в пределах диапазона передачи друг друга.



а) – топология «точка-точка»; б) – топология «звезда»;

в) – топология «кластерное дерево»; г) – ячеистая топология

Рисунок 1 – Виды топологий беспроводных сенсорных сетей

Узлы обычно работают без обслуживания в течение длительных периодов времени, что часто приводит к сбоям в их работе. Это может быть вызвано нехваткой энергии или суровыми окружающими условиями. По мере старения таких узлов систематическая погрешность их датчиков

неизбежно возрастает. Это создает серьезную проблему для пользователя, поскольку данные, получаемые с БСС, становятся недостоверными.

Хотя датчики БСС могут быть откалиброваны вручную или заменены более точными датчиками, временные, трудовые и денежные затраты на такую калибровку могут быть чрезмерно высокими. Кроме того, изменения окружающей среды требуют регулярной повторной калибровки.

Для решения этих проблем были предложены различные методы калибровки такие, как:

- калибровка «от-узла-к-узлу»;
- калибровка с использованием глубокой нейронной сети «Projection-Recovery Network» (PRNet);
- «простая» калибровка;
- двухуровневая калибровка на уровне системы.

1.1 Калибровка «от-узла-к-узлу»

Метод калибровки «от-узла-к-узлу» основывается на калибровке цепи автономных датчиков, т. е. недоступных для обслуживающего персонала. Такая калибровка осуществляется с минимальной задержкой между измерениями и с меньшим количеством перемещений узлов между их местами развертывания и исходной позицией [3].

Датчики БСС требуют профилактических частых калибровок, поэтому процедура калибровки, которая предусматривает меньшее количество совместных размещений на главных узлах, является выгодной, поскольку она обеспечивает универсальную калибровочную логистику. Более того, непрерывное измерение на площадках развертывания гарантирует отсутствие недостающих данных и лучший пространственный и временный анализ. Сокращение количества совместных размещений также экономически выгодно и экологически безопасно, поскольку БСС могут быть развернуты

довольно далеко от центрального узла, т.е. узлы могут быть ближе друг к другу, чем к удаленному центральному узлу.

Пусть $S \leftarrow s_1 \leftarrow s_2 \leftarrow s_3 \leftarrow \dots \leftarrow s_{n-1} \leftarrow s_n$ представляет собой последовательность совместно размещенных узлов, как показано на рисунке 2, так что датчик s_1 размещается рядом с ЦУ S в течение периода T . Затем он перемещается и совмещается с датчиком s_2 (совмещения датчиков не совпадают по времени). Затем датчик s_2 перемещается и размещается с датчиком s_3 и т.д. Наконец, последний датчик s_n размещается рядом с датчиком s_{n-1} . На этом этапе датчик s_n может быть откалиброван от-узла-к-узлу по отношению к данным S . Тем не менее, процесс может закончиться также перемещением датчика s_n на центральный узел S , так что процесс калибровки от-узла-к-узлу можно оценить. А именно, процедура калибровки от-узла-к-узлу предлагает, чтобы все датчики ($s_1; s_2; \dots; s_n$) калибровались один по отношению к другому последовательным образом, причем все они (кроме s_1) не размещались на ЦУ S .

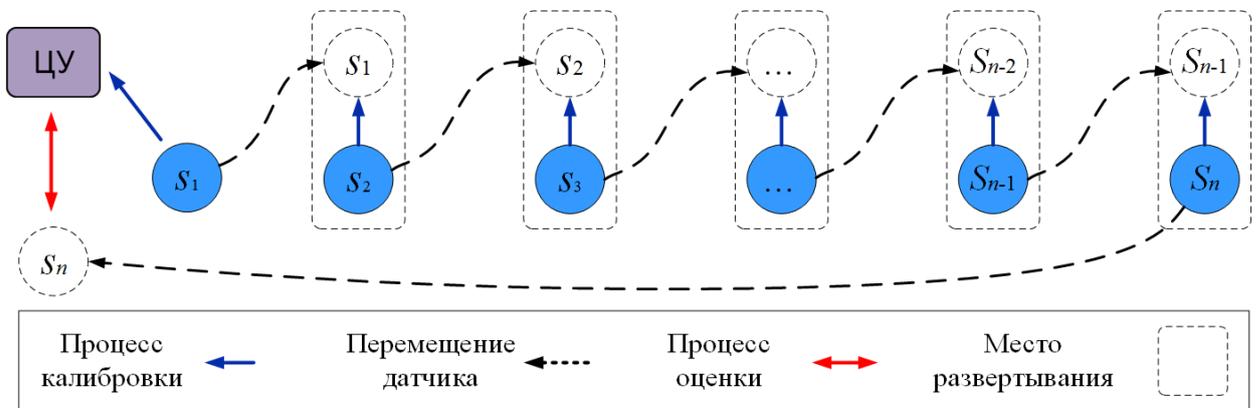


Рисунок 2 – Схематическое представление метода калибровки от-узла-к-узлу

Предполагая линейную зависимость между измерениями, полученными опорным устройством и датчиком БСС, можно записать формулу (1):

$$y = \alpha \cdot x + \beta + e, \quad (1)$$

где y – измерения, полученные опорным устройством;

x – измерения, полученные датчиком БСС;

α – наклон линейной модели;

β – пересечение с координатной осью;

e – вектор ошибок модели, которые имеют нулевое среднее.

Откалиброванные измерения задаются формулой (2):

$$\hat{x} = \hat{\alpha} \cdot x + \hat{\beta}, \quad (2)$$

где $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ – оценочные коэффициенты, полученные с использованием данных после калибровки;

\hat{x} – откалиброванные измерения.

Пусть датчик s_1 будет размещен рядом с центральным узлом S в течение периода времени T_1 и пусть датчик s_2 будет размещен рядом с датчиком s_1 в течение следующего периода времени T_2 , который не совпадает с T_1 . Предполагая линейные зависимости между данными датчиков и ЦУ, процесс калибровки от-узла-к-узлу подразумевает, что можно получить калиброванные измерения, \hat{x}_2 , датчика s_2 , применяя уравнение (2).

Выполняя последовательность калибровки от-узла-к-узлу, можно сначала получить калибровку необработанных данных от датчика s_1 по сравнению с опорными данными S по формуле (3):

$$\hat{x}_{\text{ЦУ} \leftarrow 1} = \hat{\alpha}_1 \cdot x_1 + \hat{\beta}_1. \quad (3)$$

Затем используется откалиброванный датчик для косвенной калибровки датчика s_2 , путем калибровки его с помощью s_1 , когда они совмещены по формуле (4):

$$\begin{aligned} \hat{x}_2 &= \hat{\alpha}_1 \cdot \hat{x}_{1 \leftarrow 2} + \hat{\beta}_1 = \hat{\alpha}_1 \cdot (\hat{\alpha}_2 \cdot x_2 + \hat{\beta}_2) + \hat{\beta}_1 = \\ &(\hat{\alpha}_1 \cdot \hat{\alpha}_2) \cdot x_2 + (\hat{\alpha}_1 \cdot \hat{\beta}_2 + \hat{\beta}_1). \end{aligned} \quad (4)$$

Для n датчика откалиброванное значение будет рассчитываться по формуле (5):

$$\hat{x}_n = \left(\prod_{i=1}^n \hat{\alpha}_i \right) \cdot x_n + \sum_{j=2}^n \left(\left(\prod_{i=1}^{j-1} \hat{\alpha}_i \right) \cdot \hat{\beta}_j \right) + \hat{\beta}_1. \quad (5)$$

Ниже представлены недостатки метода калибровки от-узла-к-узлу:

– ошибки оценки коэффициентов регрессии каждого датчика в калибровочной цепи распространяются по всей процедуре калибровки от-узла-к-узлу и накапливаются в общей погрешности калибровки;

– если узлы перемещаются по местам развертывания, время между измерениями увеличивается, что может привести к потере данных.

– погрешность калибровки больше для более удаленных друг от друга узлов, x_n , независимо от длины последовательности узлов, и она увеличивается с длиной последовательности узлов и может достигать больших значений для длинных цепей.

Однако последний недостаток можно обойти, избегая длинных калибровочных цепей и/или используя лучшие датчики, поскольку скорость, с которой скапливаются калибровочные ошибки, зависит от производительности отдельных датчиков. В общем, более точные датчики позволяют поддерживать более длинные цепи калибровки до того, как ошибка превысит заданный порог.

Данный метод больше подходит для небольшого количества датчиков. На практике это означает, что для больших БСС потребуется значительное количество дополнительных узлов для обеспечения надежной калибровки от-узла-к-узлу.

1.2 Калибровка с использованием нейронной сети Projection-Recovery Network

Projection-Recovery Network – глубокая нейронная сетевая архитектура, которая может автоматически извлекать пространственные и временные функции из сенсорных данных и генерировать скорректированные измерения без систематической погрешности [4].

БСС могут масштабироваться до сотен датчиков, которые часто располагаются в почти недоступных местах. Невозможно демонтировать и откалибровать такие датчики по отдельности. Поэтому существует

необходимость калибровки датчиков без знания истинных значений. Такая задача называется «слепой» калибровкой.

Сверточная нейронная сеть (convolutional neural network – CNN) для «слепой» калибровки сенсорных сетей общего мониторинга. Предлагаемый метод непосредственно преобразовывает измерения с систематической погрешностью в измерения без нее. Подобно методам подпространства и прогнозирования, калибровочная функция определяется на основании сенсорных данных. Однако методы подпространства и прогнозирования имеют два этапа: 1) обучение функций подпространства или прогнозирования и 2) корректировка сенсорных данных с использованием заранее определенных правил, при этом только первый этап может в полном объеме использовать особенности данных. Предложенная нейронная сеть, напротив, представляет собой сквозной метод, в котором функции обучения и шаги коррекции систематической погрешности моделируются как разные уровни, которые совместно используют сенсорные данные. Это означает, что предлагаемый метод может более эффективно использовать корреляцию данных и построить лучшую модель данных.

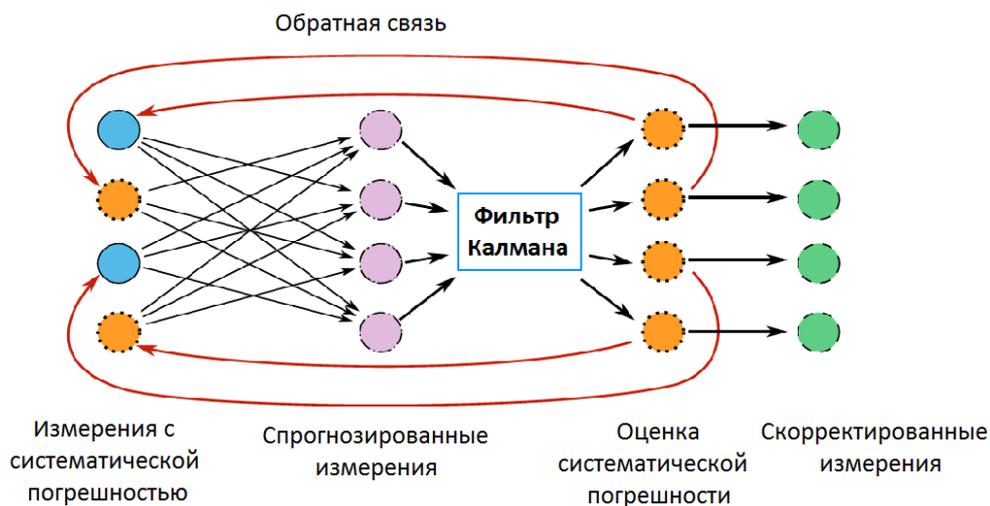
На рисунке 3 показано сравнение методов «слепой» калибровки.

Эксперименты показывают, что PRNet обладает более высокими скоростью корректировки и точностью калибровки, а также может скорректировать измерения с различными типами погрешности. Поэтому для долгосрочных сетей общего мониторинга с датчиками, развернутыми в фиксированных местах, предлагаемый метод может «вслепую» калибровать датчики, обеспечивая качество и достоверность данных.

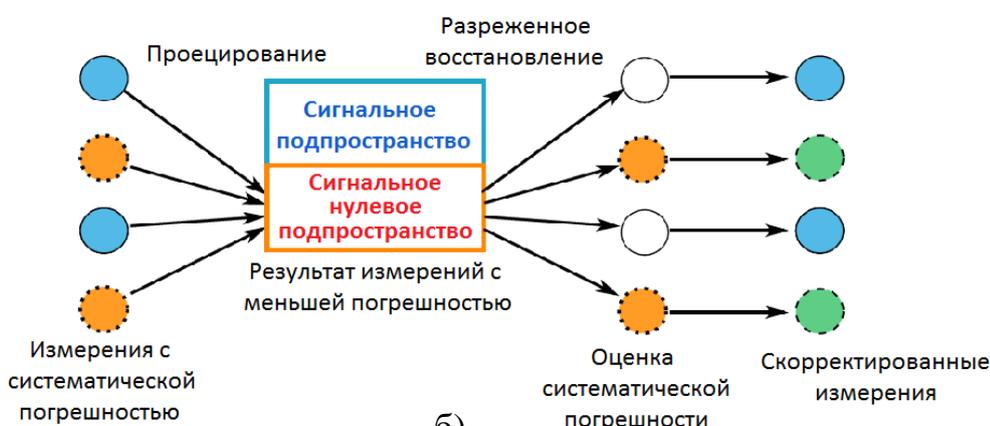
Алгоритм работы сети состоит из двух следующих процессов:

1) Обучение сети:

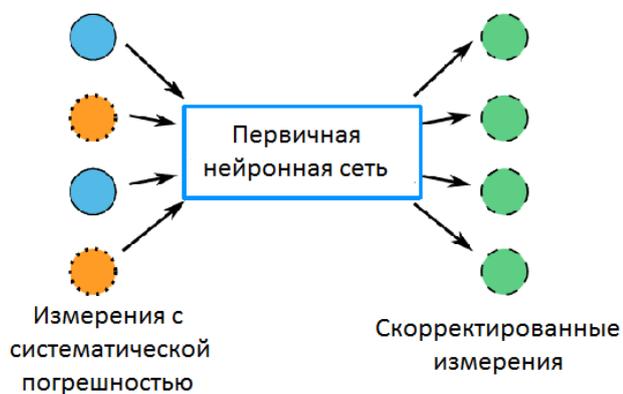
– датчики калибруются перед развертыванием, поэтому измерения, собранные в течение начального периода, можно рассматривать как измерения без систематической погрешности;



а)



б)



в)

- Результат измерений с систематической погрешностью
- Результат калибровки
- Датчик
- Промежуточный результат

- а) цикл прогнозирования-оценки-обратной связи;
- б) процесс метода калибровки подпространства;
- в) метод калибровки нейронной сетью

Рисунок 3 – Сравнение методов «слепой» калибровки

– увеличение данных за счет генерации данных обучения из начальных измерений;

– обучение PRNet для автоматического извлечения пространственных и временных характеристик измерений датчиков и подавления систематической погрешности.

2) Корректировка данных, полученных с БСС.

Процесс обучения нейронной сети заключается в минимизации функции потерь по отношению к входным данным путем корректировки сетевых параметров. Функция потерь PRNet вычисляется по формуле (6):

$$L_{PR} = L_P + L_R, \quad (6)$$

где L_P – потеря проекции;

L_R – потеря восстановления.

Ключевой функцией проекции является получение погрешности результата измерений от измерений с систематической погрешностью для аппроксимации прогнозируемой погрешности истинного значения. Следовательно, потери на проекцию можно представить формулой (7):

$$L_P = \frac{1}{2|D|N \cdot T_P} \sum_{i \in D} \|f_P(Y_i^P) - f_P(Y_i^P - X_i^P)\|_F^2, \quad (7)$$

где X^P и Y^P – измерения без систематической погрешности и измерений с систематической погрешностью;

f_P – функция проекции;

D – набор данных обучения;

N – количество датчиков;

T_P – длина периода.

По формуле (8) вычисляется потеря при восстановлении, для которой используется среднее квадратичное отклонение (СКО) между откалиброванными значениями и действительным значением.

$$L_R = \frac{1}{2|\mathbf{D}|N \cdot T_P} \sum_{i \in \mathbf{D}} \|f_{PR}(Y_i^P) - X_i^P\|_F^2, \quad (8)$$

где f_{PR} – общая функция PRNet.

Недостатками этого метода калибровки БСС является:

- необходимость предварительной калибровки датчиков перед развертыванием БСС;
- возможность недостоверности измерений после предварительной калибровки датчиков;
- необходимость большого количества данных для обучения, т.е. дополнительно необходима генерация данных;
- учет множества факторов алгоритмом генерации;
- необходимость предварительного обучения нейронной сети, следовательно, затраты больших временных ресурсов.

1.3 «Простая» калибровка

Метод «простой» калибровки (Lazy Calibration, букв. «ленивая калибровка»), впервые предложенный Билли Лау и Майклом Лайонсом, находит оптимальное соотношение между измеренными значениями локального узла и соседних узлов. Каждый узел регулярно транслирует свои измерительные данные вместе с постоянно контролируемые метаданными датчиков соседним узлам. Затем каждый соседний узел объединяет эту информацию со своими собственными измеренными показаниями и метаданными для расчета откалиброванных данных [5].

Несмотря на то, что данный метод относится к методам нахождения распределенного консенсуса, метод «простой» калибровки вычисляет локальное откалиброванное значение на каждом узле. Целью данного метода не является нахождение одного значения, согласованного всеми узлами. Вместо этого подтверждается, что фактические значения, хотя и пространственно связаны друг с другом, могут быть разными по сенсорной

сети. В данном случае используется метод, подобный консенсусу, для калибровки каждого узла с помощью широкополосной беспроводной сенсорной сети, позволяющий применить пространственную корреляцию и снизить количество сетевых передач. С помощью показаний соседних датчиков динамически настраиваются локальные измеренные данные. Следовательно, данный метод не зависит от конкретной модели калибровки.

Пусть БСС состоит из $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ распределенных узлов, в результате чего местоположение каждого узла $s_i \in S$ определяется координатами (x, y) и множеством его соседей $N_i \in S$, так что расстояние до любого соседа n_j , определяемое формулой (9), меньше максимального диапазона передачи R :

$$d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, \quad (9)$$

где Δx – разность между координатами x ;

Δy – разность между координатами y .

Каждая координата в любой конкретный момент времени t содержит значение $r_i(x, y, t)$, называемое *фактическим показанием*. Это значение соответствует значению измеряемой величины окружающей среды, такой как температура, влажность и т.д. Каждый узел будет считывать измеренное значение $f(x, y, t)$, которое может быть или не быть точным. Считается, что откалиброванные узлы полностью точны, а некалиброванные узлы будут иметь измеренное значение, которое содержит случайную погрешность в заданном диапазоне. Предварительно откалиброванные узлы калибруются вручную. Кроме того, каждый узел обладает информацией о том, откалиброван он или нет. Каждый узел характеризуется уровнем достоверности c_i , который соответствует предполагаемой точности измеренного значения (у откалиброванных узлов $c_i = 1$).

«Простой» подход к калибровке – это итеративная корректировка собственных измеренных значений узла, а также значений его соседних

узлов. Для множества соседей N_i среднее измеренное значение определяется по формуле (10):

$$\bar{f}_i(x, y, t) = \frac{\sum_{m_j \in N_i} f_j(x, y, t)}{|N_i|}. \quad (10)$$

Если узел не откалиброван, на основании $\bar{f}_i(x, y, t)$ он вычислит скорректированное значение $a_i(x, y, t)$ по формуле (11), которое является средневзвешенным по его собственному уровню достоверности c_i :

$$a_i(x, y, t) = (1 - c_i)\bar{f}_i(x, y, t) + c_i f_i(x, y, t). \quad (11)$$

Во время следующей итерации это отредактированное значение $a_i(x, y, t)$ транслируется соседним узлам взамен их измеренных значений. Другими словами, $f_i(x, y, t + 1) = a_i(x, y, t)$. Поскольку откалиброванные узлы не имеют погрешности и знают, что они точны, на следующей итерации они просто транслируют свои измеренные значения.

Хотя алгоритм усреднения несколько наивен в том, что \bar{f}_i является равномерным средним измеренных показаний из окрестности, «простая» калибровка является предпочтительной, поскольку она работает с небольшим числом регулируемых параметров. Двумя основными переменными алгоритма усреднения являются доверительное значение c_i , которое влияет на взвешенность скорректированного значения, и диапазон окрестности R , который влияет на число соседних узлов $|N_i|$.

В общем виде можно записать формулу (12) измеренного значения в следующий момент времени для любой произвольной задачи. Любые скорректированные показания $a(x; y; t - t_0)$ для $t_0 \geq 1$ взвешиваются экспоненциально меньше для каждой итерации времени. Поэтому ожидается, что $f_i(x; y; t)$ всегда будет сходиться при $t \rightarrow \infty$.

$$\begin{aligned}
f_i(x, y, t+1) = & \left(\prod_{s_i \in S} \frac{1-c_i}{|N_i|} \right) \left(\sum_{s_j \in N_i} \sum_{s_k \in N_j} \cdots \sum_{s_z \in N_z} f_z(x, y, t-|S|) \right) + \\
& + c_y \left(\left(\prod_{\substack{s_i \in S \\ S \setminus s_z}} \frac{1-c_i}{|N_i|} \right) \left(\sum_{s_j \in N_i} \sum_{s_k \in N_j} \cdots \sum_{s_y \in N_y} f_z(x, y, t-|S-1|) \right) \right) + \dots + \\
& + c_j \frac{1-c_i}{|N_i|} \sum_{s_i \in N_i} f_j(x, y, t-1) + c_i f_i(x, y, t),
\end{aligned} \quad (12)$$

где s_z и s_y – последний и предпоследний узлы соответственно.

Можно выделить следующие недостатки этого метода:

- требуется предварительная калибровка датчиков;
- большие энергозатраты на передачу данных от узлов соседним узлам;
- необходимость четкого определения границ областей каждого датчика;
- существует вероятность того, что эталонный (откалиброванный) датчик подвергается каким-либо влияниям, следовательно, нельзя полностью доверять его значениям.

1.4 Двухуровневая калибровка на уровне системы

В отличие от калибровки на уровне устройства, калибровка на уровне системы направлена на оптимизацию общего качества работы системы за счет настройки всех датчиков в сети. Калибровка на системном уровне часто приводит к значительно меньшим затратам ресурсов, используя знания о сенсорной сети. Комплексирование данных (data fusion) – широко распространенный метод обработки сигналов, который может улучшить результат измерений системы, совместно рассматривая измерения нескольких датчиков. Основная проблема калибровки для комплексирования данных заключается в использовании сложной корреляции между

результатом системы и характеристиками отдельных датчиков. С одной стороны, результат сети на основе комплексирования данных тесно связан с измерениями нескольких датчиков. С другой стороны, калибровка на системном уровне должна избегать централизованного сбора и обработки данных из-за ограничений ресурсов беспроводных датчиков [6].

На первом уровне каждый датчик определяет свою локальную модель измерений, используя локальные измерения, и передает на центральный узел только параметры модели, а не измеренные значения. На втором уровне центральный узел калибрует модель каждого датчика до общей модели.

Необходимо решить несколько проблем для реализации такого двухуровневого подхода. Во-первых, измерения датчиков часто искажаются влиянием внешних факторов. Модельное обучение с помощью данных с погрешностью является сложной задачей для маломощных датчиков с ограниченными вычислительными ресурсами и ресурсами памяти. В то же время локальная модель должна хранить точное значение систематической погрешности датчика, необходимое для калибровки на уровне системы. Кроме того, при калибровке второго уровня необходимо тщательно учитывать корреляцию между локальными моделями измерений и общим результатом системы, чтобы обеспечить оптимальное функционирование измерений системы.

Существует две возможные схемы калибровки, которые показаны на рисунке 4.

Первая схема работает централизованно. На рисунке 4 каждый узел кластера A отправляет необработанные измерения главе кластера S_{A1} , который вычисляет калибровочные параметры для каждого отдельного датчика. Однако часто требуется большое количество измерений, чтобы точно охарактеризовать модель измерений одного датчика. Следовательно, такая схема приведет к большим затратам на связь.

Вторая схема основана на двухуровневой архитектуре. На рисунке 4 каждый датчик в кластере B изучает свою модель измерений, которая

характеризуется несколькими параметрами, основанными на исходных измерениях, и отправляет главе кластера S_{B1} только параметры модели, такие как среднее значение μ , СКО σ , опорное расстояние r_i , коэффициент затухания k_i . Затем глава кластера калибрует модель измерений каждого датчика, так что ожидаемая производительность системы максимизируется. Такая схема не только распределяет нагрузку вычислений на каждый датчик, но также позволяет избежать дорогостоящей передачи необработанных данных.

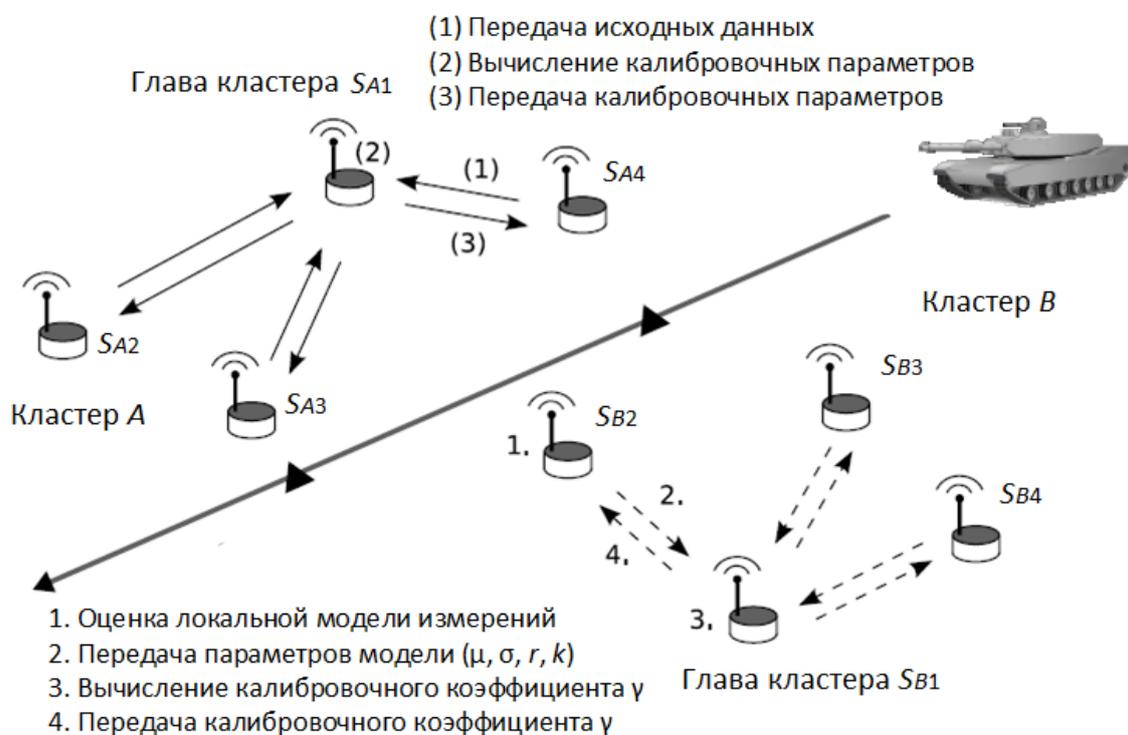


Рисунок 4 – Две схемы калибровки на уровне системы

Энергия многих физических сигналов затухает с расстоянием от источника сигнала. Предположим, что датчик i находится в d_i метрах от цели, который испускает сигнал энергией E . Затухающая энергия сигнала e_i в положении датчика i следует модели распада сигнала, заданной формулой (12):

$$e_i = \frac{E}{(d_i / r_i)^{k_i}}, \quad (12)$$

где r_i – опорное расстояние, определяемое формой цели и датчика;

k_i – коэффициент затухания, который обычно равен от 1 до 5.

На практике измеряемые значения датчиков имеют погрешность. Измерение энергии датчика i определяется формулой (13):

$$y_i = e_i + n_i, \quad (13)$$

где n_i – энергия шума, испытываемого датчиком i , обычно $n_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$.

Сенсорная сеть, использующая комплексирование данных, часто организуется в кластеры. Глава кластера отвечает за принятие решения путем слияния информации, собранной с помощью узлов-датчиков. Каждая глава кластера принимает решение о результате измерения путем сравнения суммы измерений, сообщаемых узлами, с порогом чувствительности T . Предположим, что в кластере есть N узлов, сумма измерений Y определяется по формуле (14):

$$Y = \sum_{i=1}^N y_i. \quad (14)$$

Рассмотрим применение данного метода на примере задачи обнаружения цели. Результат измерения системы характеризуется двумя характеристиками: вероятностью ложной тревоги P_F и вероятностью обнаружения цели P_D . В соответствии с вышеупомянутой моделью слияния данных P_F и P_D задаются формулами (15):

$$P_F = \mathbb{P}(Y \geq T | H_0), \quad P_D = \mathbb{P}(Y \geq T | H_1), \quad (15)$$

где H_0 и H_1 – случаи, когда цель отсутствует и присутствует.

Если $Y \geq T$, вероятность равна 1, иначе 0.

На уровне локальной калибровки каждый датчик i оценивает свои модели шума и распада сигнала с использованием измерений параметров контролируемых целей. Датчики периодически измеряют энергию сигналов, излучаемых управляемой целью, движущейся через область развертывания. Чтобы уменьшить влияние шума, каждый датчик проводит ряд измерений, когда цель находится в определенном положении. Оценочные параметры модели каждого датчика затем передаются на главу кластера. Для решения

этой проблемы можно использовать несколько методов оценки параметров, таких как оценивание методом максимального правдоподобия. В данном случае используется метод наименьших квадратов из-за его низких вычислительных затрат и издержек памяти.

При калибровке на уровне системы глава кластера вычисляет параметры калибровки для каждого датчика, так что общая производительность системы максимизируется. Из-за ограничений ресурсов датчиков применяется простая схема линейной калибровки. Скорректированное значение измерения датчика i определяется по формуле (16):

$$\hat{y}_i = \gamma_i \cdot y_i, \quad (16)$$

где γ_i – калибровочный коэффициент датчика i .

Задача состоит в том, чтобы определить коэффициенты калибровки всех датчиков, участвующих в комплексировании данных.

Откалиброванная БСС обнаруживает цель следующим образом. Чтобы определить, присутствует ли цель в конкретном месте наблюдения, каждый датчик i вычисляет скорректированное значение измерения \hat{y}_i . Затем глава кластера объединяет все скорректированные значения измерений, как было описано выше, чтобы принять решение об обнаружении цели в месте наблюдения.

Целью локальной калибровки на каждом датчике является изучение модели нормального распределения шума и модели распада сигнала по формуле (12), которые характеризуются μ_i , σ_i^2 , r_i и k_i . Для одного датчика i входные данные представляют собой совокупность пар данных $(d_i; y_i)$, то есть значение измерения y_i , когда цель находится в d_i метрах. Основная проблема заключается в том, как изучать эти модели, используя стохастические (случайные) результаты измерений с погрешностью. Чтобы избавиться от погрешности, датчик i измеряет несколько значений энергии, когда контролируемая цель находится в определенном положении. Эти результаты

измерений могут использоваться для вычисления статистики, такой как среднее, чтобы уменьшить погрешность.

При использовании параметров модели, полученных при локальной калибровке каждого датчика, калибровка на уровне системы предназначена для калибровки измерительной модели каждого датчика, чтобы максимизировать производительность обнаружения цели на каждом участке наблюдения.

Когда цель находится в какой-либо точке наблюдения, скорректированное значение измерения датчика i задается формулой (17):

$$\hat{y}_i | H_1 = \gamma_i \cdot y_i | H_1 = \gamma_i \cdot e_i + \gamma_i \cdot n_i, \quad (17)$$

где e_i – модель распада сигнала;

n_i – белый гауссовский шум.

Общая модель распада сигнала после калибровки задается формулой (18):

$$\hat{e}_i = \frac{E'}{(d_i / r)^k}, \quad (18)$$

где E' – общая энергия источника;

r – опорное расстояние;

k – коэффициент затухания для всех калиброванных датчиков;

d_i – расстояние между датчиком i и точкой наблюдения.

Оптимальная общая модель распада сигнала и калибровочные коэффициенты определяются формулами (19) и (20) соответственно:

$$\hat{e}_i = d_i^{-k^*}, \quad (19)$$

$$\gamma_i = d_i^{k_i - k^*} \exp(-b_i), \quad (20)$$

где b_i – коэффициент линейной регрессии, который определяется формулой (21);

k^* – коэффициент затухания, при котором достигается максимум функции (22);

$$b_i = \ln\left(E \cdot r_i^{k_i}\right), \quad (21)$$

$$\Lambda(k) = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^{-k}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cdot \exp(-2b_i) \cdot d_i^{2k_i - 2k}}}. \quad (22)$$

Недостатками этого метода являются:

- необходимость в дополнительных ресурсах памяти и вычислительной мощности датчиков для обработки измеренных данных;
- возможность выхода из строя главы кластера за счет увеличения нагрузки, связанной с расчетами общей модели;
- применимость метода только для данных, которые имеют нормальное распределение.

В целом можно выделить общие недостатки всех рассмотренных методов калибровки БСС. Во-первых, необходима предварительная калибровка датчиков перед развертыванием БСС. Во-вторых, существует вероятность недостоверности измерений после предварительной калибровки датчиков. В-третьих, энергозатраты на передачу данных от узлов соседним узлам, главе кластера или центральному узлу могут быть значительные, и наконец, чаще всего данные методы применяются только для данных, имеющих нормальное распределение.

2 Разработка алгоритма автоматической калибровки сенсоров беспроводной сенсорной сети

2.1 Модель сети

В данной работе рассматривается беспроводная сенсорная сеть с топологией «кластерное дерево», представленная на рисунке 5. Группа m узлов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ в одном кластере передает набор измеренных значений $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ главе кластера, который в свою очередь посылает эту информацию на центральный узел. Считаем, что узлы в каждом кластере гомогенные (т.е. обладают одним и тем же набором сенсоров с одинаковыми характеристиками) и измеряют одни и те же физические величины. Показания узлов в одном кластере коррелированы между собой пространственно и по времени, т.е. степень корреляции зависит от расстояния между узлами и времени измерения. Далее работа БСС будет рассматриваться на примере таких величин, как температура и относительная влажность окружающего воздуха.

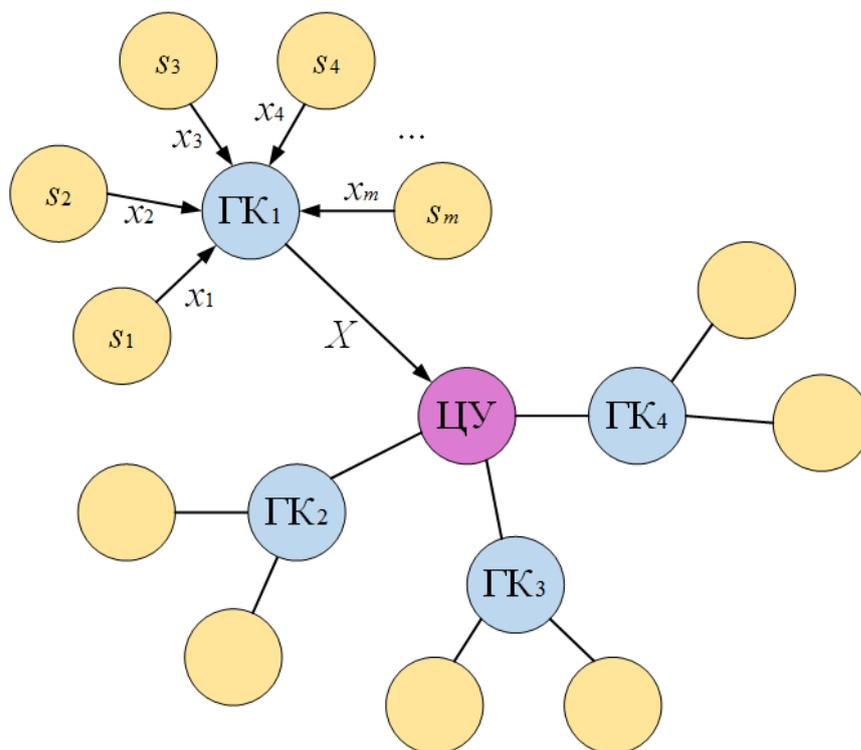


Рисунок 5 – Топология беспроводной сенсорной сети

В работе будет исследована временно-управляемая сенсорная сеть, в которой узлы периодически опрашиваются центральным узлом. Это позволяет экономить энергию и получать информацию тогда, когда это необходимо.

К разрабатываемому алгоритму калибровки сенсоров беспроводной сенсорной сети предъявляются следующие *требования*:

- калибровка сенсоров должна быть автоматической;
- отсутствует необходимость проведения предварительной калибровки сенсоров;
- отсутствует необходимость установки дополнительного оборудования для калибровки;
- минимальное количество узлов должно быть до 10 шт.;
- проведение калибровки сенсоров не должно увеличивать общие энергозатраты сети.

Исходя из заданных требований было принято решение разрабатывать алгоритм автоматической калибровки сенсоров БСС на основе метода комплексирования интервальных данных агрегированием предпочтений.

2.2 Метод комплексирования интервальных данных

2.2.1 Основные понятия

Метод нахождения ранжирования (или отношения) консенсуса агрегированием предпочтений относится к методам *голосования*, в котором множество A – это множество кандидатов (альтернатив), а Λ – множество избирателей. То, каким образом будет определяться ранжирование консенсуса, зависит от конкретного *правила голосования* [7]. В данной работе используется *правило Кемени*.

Пусть пространство Π является множеством всех $n!$ линейных (строгих) отношений порядка \succ на множестве A . Каждый линейный порядок

соответствует одной из *перестановок* первых n натуральных чисел N_n . Правило Кемени позволяет находить ранжирование консенсуса β как линейный порядок альтернатив $\beta \in \Pi$ такой, что определенное в терминах числа парных несоответствий между ранжированиями расстояние Кемени $D(\beta, \Lambda)$ между β и профилем Λ минимально и выражается формулой (23):

$$\beta = \arg \min_{\lambda \in \Pi} D(\lambda, \Lambda). \quad (23)$$

Профиль Λ будем описывать $(n \times n)$ матрицей профиля $P = [p_{ij}]$ по формуле (24):

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^m d_{ij}^k, \quad (24)$$

где

$$d_{ij}^k = \begin{cases} 0, & \text{если } a_i^k \succ a_j^k \\ 1, & \text{если } a_i^k \sim a_j^k \\ 2, & \text{если } a_i^k \prec a_j^k \end{cases}. \quad (25)$$

Одно из свойств матрицы P описывается выражением (26):

$$(p_{ij} + p_{ji})/2 = m \text{ для } i, j = 1, \dots, n, \quad (26)$$

т.е. значение $p_{ij}/2$ можно трактовать, как число предпочтений альтернативы a_j относительно a_i .

Тогда расстояние Кемени $D(\lambda, \Lambda)$ определяется суммой элементов верхней треугольной подматрицы матрицы P , и расстояние $D(\lambda, \Lambda)$ между ранжированием λ и профилем Λ находится по формуле (27):

$$D(\lambda, \Lambda) = \sum_{i < j} p_{ij}. \quad (27)$$

Полученное в соответствии с (23) ранжирование консенсуса β называют *ранжированием Кемени*. Заметим, что порядок элементов a_i в ранжировании λ соответствует перестановке соответствующих строк и столбцов матрицы P . Иными словами, метод заключается в нахождении

такой перестановки строк и столбцов матрицы профиля P , что сумма элементов ее верхней треугольной подматрицы минимальна.

Однако число найденных оптимальных решений (ранжирований консенсуса, представляющих собой строгие порядки), особенно при четных n , может значительно превышать единицу. Для разрешения этой проблемы можно применять специальное преобразование множественных оптимальных строгих порядков в единственный слабый порядок [8].

Будем называть профиль предпочтения $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ *входным профилем* задачи о ранжировании Кемени, а множество всех полученных ранжирований консенсуса $B = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_{\text{kem}}}\}$ – *выходным профилем*. Чтобы получить из выходного профиля единственное итоговое ранжирование $\beta_{\text{fin}} = \Phi(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_{\text{kem}}})$, воспользуемся следующим введенным в [7] *правилом свертки*: для любого i, j , если отношения $a_i \succ a_j$ и $a_i \prec a_j$ встречаются одинаковое количество раз во всех ранжированиях консенсуса, тогда $a_i \sim a_j$ в β_{fin} . Иначе в β_{fin} включается то отношение строгого предпочтения, которое встречается среди оптимальных решений наибольшее число раз.

Таким образом, все ранжирования выходного профиля B являются отношениями строгого порядка, в то время как итоговое ранжирование β_{fin} становится слабым порядком.

Целью комплексирования интервалов является нахождение такой точки x^* на вещественной оси, которая принадлежит максимальному количеству интервалов из $\{I_k\}$ и может служить представителем всех этих интервалов.

На *диапазоне актуальных значений* (ДАЗ) $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ существует унаследованное от вещественной оси отношение полного порядка $a_1 < a_2 < \dots < a_n$. Процесс перехода от набора интервалов $\{I_k\}_{k=1}^m$ на вещественной числовой оси к дискретному множеству A осуществляется в три этапа.

Этап 1. Формирование ДАЗ $[a_1, a_n]$ из исходных интервалов $\{I_k\}_{k=1}^m$.

В качестве нижней границы a_1 выбирается наименьшая нижняя граница l_k для всех интервалов, т.е.

$$a_1 = \min\{l_k \mid k = 1, \dots, m\}, \quad (28)$$

а в качестве верхней границы a_n – наибольшая верхняя граница u_k этих интервалов, т.е.

$$a_n = \max\{u_k \mid k = 1, \dots, m\}. \quad (29)$$

Этап 2. Разбиение ДАЗ на $n - 1$ равных подынтервалов длиной h , где

$$h = \frac{a_n - a_1}{n - 1}. \quad (30)$$

Длина h называется *нормой* разбиения. После разбиения норма определяется формулой

$$h = |a_i - a_{i-1}|, \quad (31)$$

где a_i – правая граница i -го подынтервала, $i = 2, \dots, n$.

Этап 3. Представление ДАЗ элементами дискретного множества $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, где $A \subset [a_1, a_n]$, а i -й элемент множества определяется как

$$a_i = a_{i-1} + h, \quad (32)$$

при $i = 2, \dots, n$. Число дискретных значений множества A называется *мощностью* разбиения ДАЗ.

Таким образом, результатом разбиения ДАЗ является дискретное множество $A_n = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, которое может быть использовано для формирования ранжирований, представляющих исходные интервалы $\{I_k\}$.

Для любого отдельно взятого интервала из множества $\{I_k\}$ можно рассматривать диапазон актуальных значений A как объединение двух непересекающихся множеств: множества A_k , включающего все те элементы A , которые принадлежат интервалу I_k , и дополнения \bar{A}_k , включающего все остальные элементы A , т.е. $A = A_k \cup \bar{A}_k$, $A_k \cap \bar{A}_k = \emptyset$, для любого $k = 1, \dots, m$.

Тогда для любого $k = 1, \dots, m$, некоторое k -е ранжирование λ_k , наведенное интервалом I_k и состоящее из элементов множества A , должно удовлетворять следующим условиям при $i, j = 1, \dots, n$:

$$\begin{cases} \text{(i)} & a_i \in A_k \wedge a_j \notin A_k \Rightarrow a_i \succ a_j; \\ \text{(ii)} & a_i, a_j \in A_k \vee a_i, a_j \notin A_k \Rightarrow a_i \sim a_j; \\ \text{(iii)} & a_i \notin A_k \wedge a_j \in A_k \Rightarrow a_i \prec a_j. \end{cases} \quad (33)$$

Разность индексов любой пары соседних элементов a_i и a_j из A_k не может быть больше 1, т.е. справедливо условие

$$\text{(iv)} \quad a_i, a_j \in A_k - \text{соседние элементы} \Rightarrow j \equiv i + 1. \quad (34)$$

Ранжирования, удовлетворяющие условиям (33) – (34), называются *ранжированиями, наведенными интервалами*, или, в краткой форме, *инранжированиями*. Таким образом, набор интервалов $\{I_k\}$, $k = 1, \dots, m$, может быть представлен в соответствии с выражениями (33) – (34) профилем предпочтений $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$, где любое λ_k является инранжированием.

2.2.2 Метод комплексирования интервальных данных агрегированием предпочтений

В основе алгоритма калибровки сенсоров БСС лежит метод комплексирования интервальных данных агрегированием предпочтений (IF&PA). Метод IF&PA помогает находить такую точку x^* на вещественной оси, которая принадлежит максимальному количеству интервалов из $\{I_k\}$ и может служить представителем всех этих интервалов.

Метод включает в себя 4 основных этапа:

Этап 1. Формирование диапазона актуальных значений $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

На этом этапе происходит формирование ДАЗ из набора исходных интервалов $\{I_k\}$, $k = 1, \dots, m$, расчет нормы h и разбиение ДАЗ на $n - 1$ равных

подынтервала длиной h для получения множества дискретных значений $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

Этап 2. Представление интервалов инранжированиями и построение профиля предпочтений $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$.

На основании исходных интервалов $\{I_k\}$ в соответствии с формулами (33) – (34) формируются инранжирования λ_k и профиль предпочтения Λ , состоящий из m инранжирований.

Этап 3. Определение значения x^* как лучшей альтернативы в ранжировании консенсуса для профиля Λ .

Этап включает в себя применение рекурсивного алгоритма ветвей и границ RECURSALL для поиска всех ранжирований консенсуса β по правилу Кемени, свертку найденных ранжирований в единственное ранжирование консенсуса β_{fin} и выбор наиболее предпочтительной альтернативы a_i в полученном ранжировании в качестве результата комплексирования x^* . При наличии в β_{fin} нескольких наилучших альтернатив за результат x^* принимается их медиана.

Этап 4. Расчет неопределенности U значения x^* .

Находим и исключаем из множества $\{I_k\}$ интервалы, не содержащие значение x^* . При этом мощность множества согласованных интервалов равна m_{con} , а неопределенность U результата комплексирования x^* определяется как наименьшее из двух значений: максимальная нижняя граница l_k и минимальная верхняя граница u_k исходных интервалов, т.е.:

$$U = \min\left(\max_{k=1, \dots, m_{\text{con}}} \{l_k \leq x^*\}, \min_{k=1, \dots, m_{\text{con}}} \{u_k \geq x^*\}\right). \quad (35)$$

Достоинства метода:

- уменьшение неопределенности измерений за счет использования свойства избыточности данных в БСС;
- решение проблемы противоречивых данных путем нахождения ранжирования консенсуса, представляющего собой наилучший компромисс исходных данных.

– хорошая работоспособность в случае неполных данных.

Недостатком метода IF&PA является его медленная работа по сравнению с алгоритмами, работающими в реальном времени. Но в данном случае это не является серьезным недостатком, поскольку для калибровки скорость нахождения решения не критична.

2.3 Алгоритм автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети

Разработанный алгоритм калибровки сенсоров беспроводной сенсорной сети, который был назван AutoWSN, изображен на рисунке 6.

Сначала пользователю необходимо определить такие параметры калибровки, как количество измерений и интервал между ними. Затем центральный узел дает главам кластеров команду о начале калибровки, ГК в свою очередь передают команду узлам в своем кластере. Узлы проводят измерения физических величин и отправляют измерительные данные главе кластера. На ГК данные объединяются в набор измеренных значений X и далее передаются на ЦУ. Центральный узел вычисляет скорректированное значение x^* и его неопределенность U по методу IF&PA для каждого кластера. Далее рассчитывается поправка Δ_k для каждого узла по формуле (36) в абсолютных единицах и по формуле (37) в процентах:

$$\Delta_k = |x_k - x^*|, \quad (36)$$

$$\Delta_{k\%} = \frac{x_k - x^*}{x_k} \cdot 100, \quad (37)$$

где Δ_k – поправка, абсолютные единицы;

$\Delta_{k\%}$ – поправка, %;

x_k – измеренное значение k -го узла;

x^* – скорректированное значение.

Найденная поправка учитывается при дальнейших экспериментах. Результат с учтенной поправкой $x_{\Delta k}$ выражается формулой (38):

$$x_{\Delta k} = x_k - \frac{\Delta_k \cdot x_k}{100}. \quad (38)$$

Результаты калибровки узлов БСС и промежуточные расчеты (т.е. скорректированное значение x^* , его неопределенность U и поправка Δ_k) для каждого узла сохраняются в файл.

Алгоритм AutoWSN запускается на ЦУ в начале цикла опроса сети.

Интервал проведения калибровки сенсоров БСС зависит от межповерочного интервала датчиков, которые используются в данной БСС. Он может составлять полгода, один или два года. Данный алгоритм калибровки сенсоров БСС не имеет ограничений по количеству проведенных экспериментов, таким образом калибровку можно проводить настолько часто, насколько это необходимо. Поскольку узлы БСС в значительной степени подвержены влиянию факторов окружающей среды, рекомендуется проводить калибровку сенсоров с интервалом в месяц.

Так как в основу разработанного алгоритма положен робастный метод, который позволяет определить точное значение на основании неполных, неточных, несогласованных данных, отсутствует необходимость проведения предварительной калибровки сенсоров. Данный алгоритм может работать при минимальном количестве узлов БСС от 4 шт. Также поскольку алгоритм работает на центральном узле, который подключен к бытовой сети электропитания и не имеет ограничений по питанию, для узлов и главы кластера не будет дополнительной вычислительной нагрузки и затрат на передачу данных. Учитывая это, можно сделать вывод, что данный алгоритм соответствует заданным требованиям.

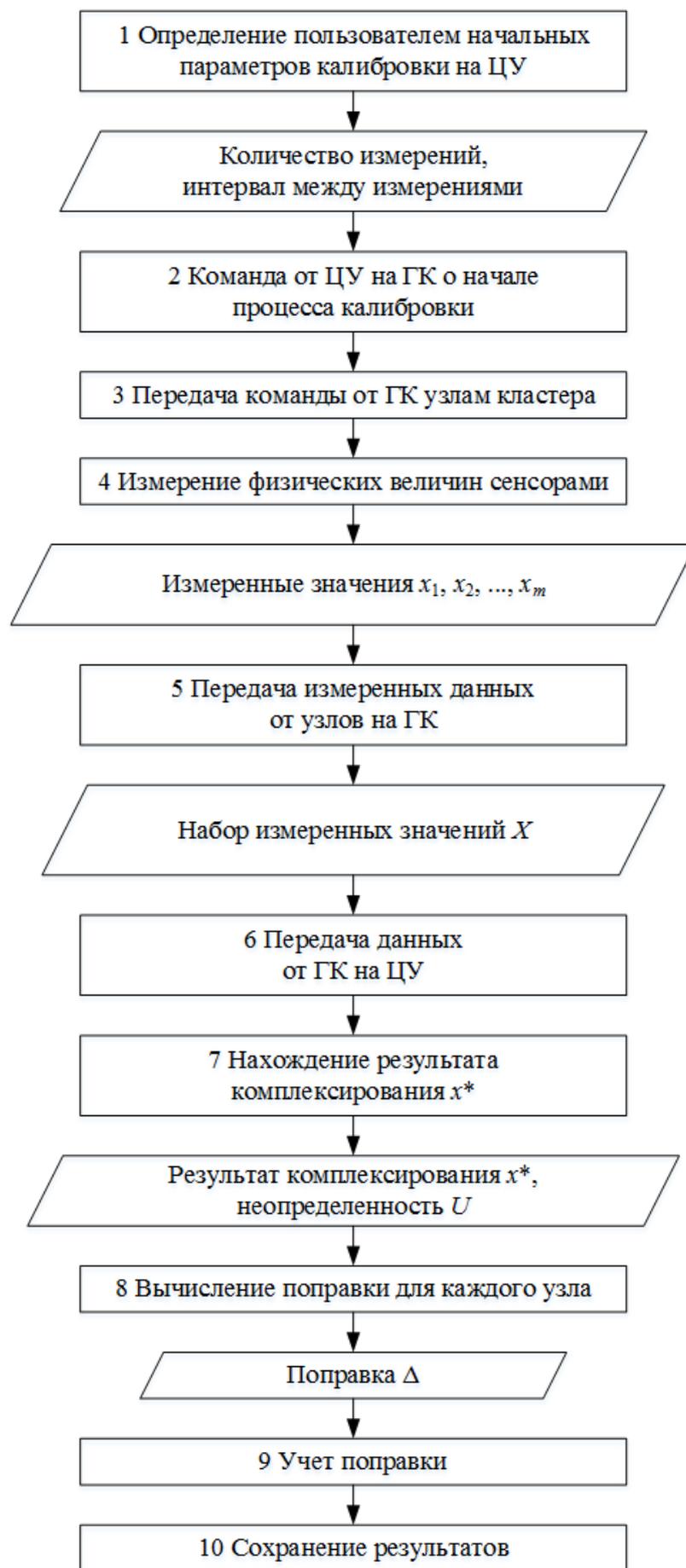


Рисунок 6 – Алгоритм работы БСС

3 Разработка программного обеспечения

3.1 Программное обеспечение метода «простой» калибровки

Была разработана программа для моделирования работы БСС и процесса ее калибровки методом «простой» калибровки в графической среде разработки LabVIEW. В рассматриваемой модели БСС количество узлов $n = 15$. На рисунке 7 представлена схема расположения узлов.

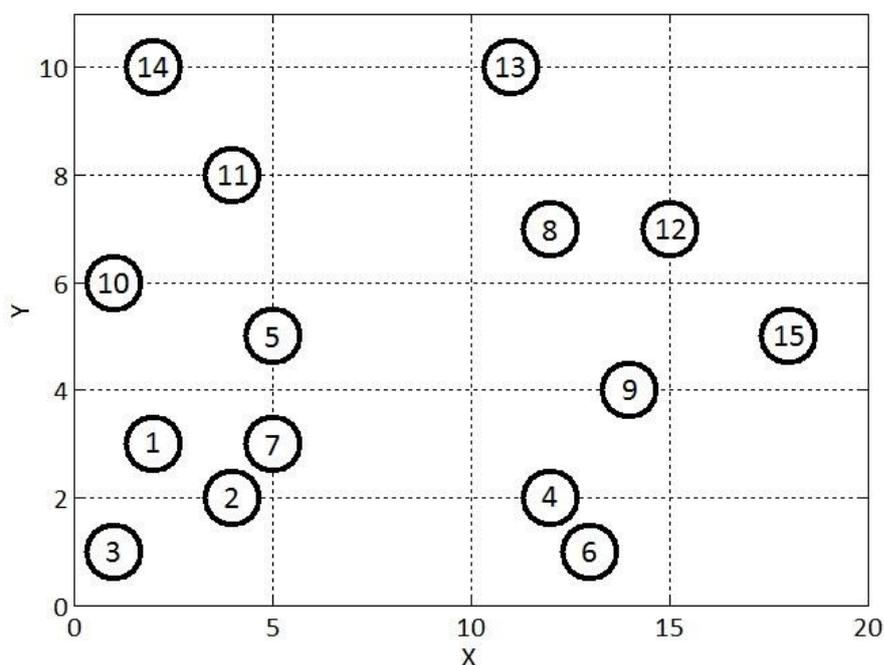
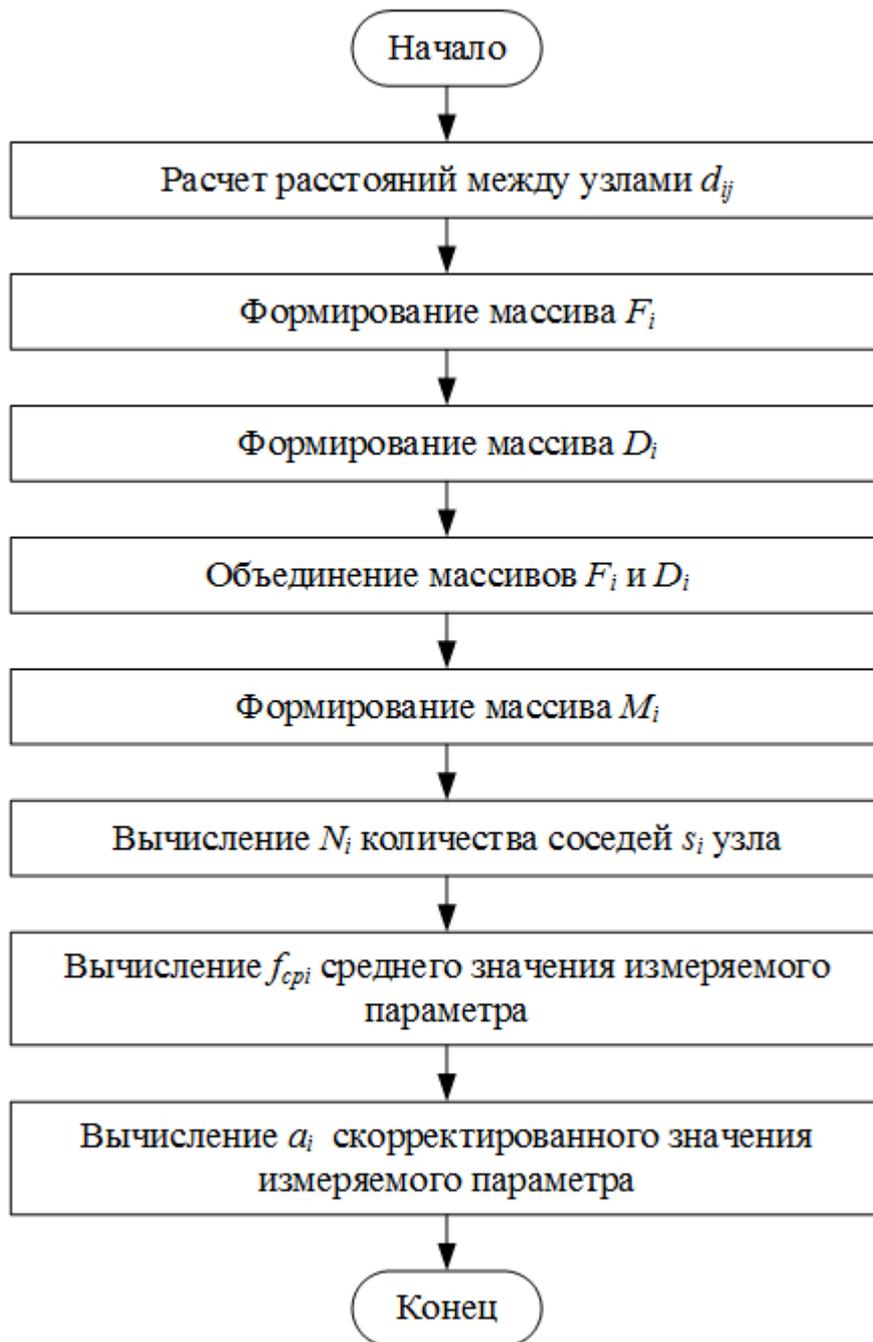


Рисунок 7 – Схема расположения узлов в БСС

Алгоритм программы представлен на рисунке 8.

Для начала пользователю необходимо задать на лицевой панели несколько параметров БСС таких, как:

- информация о местонахождении узлов, т.е. координаты (x, y) (рисунок 9);
- количество экспериментов;
- доверительное значение c_i (рисунок 10);
- максимальный диапазон передачи R .



F_i – массив значений измеряемого параметра в первый момент времени всех узлов, кроме s_i ; D_i – массив расстояний от s_i узла до остальных узлов;
 M_i – массив информации о соседних узлах для s_i узла

Рисунок 8 – Алгоритм программы

Количество экспериментов

Координаты узлов

x1 <input type="text" value="2"/> <input type="text" value="3"/>	x2 <input type="text" value="4"/> <input type="text" value="2"/>	x3 <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="1"/>
x4 <input type="text" value="12"/> <input type="text" value="2"/>	x5 <input type="text" value="5"/> <input type="text" value="5"/>	x6 <input type="text" value="13"/> <input type="text" value="1"/>
x7 <input type="text" value="5"/> <input type="text" value="3"/>	x8 <input type="text" value="12"/> <input type="text" value="7"/>	x9 <input type="text" value="14"/> <input type="text" value="4"/>
x10 <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="6"/>	x11 <input type="text" value="4"/> <input type="text" value="8"/>	x12 <input type="text" value="15"/> <input type="text" value="7"/>
x13 <input type="text" value="11"/> <input type="text" value="10"/>	x14 <input type="text" value="2"/> <input type="text" value="10"/>	x15 <input type="text" value="18"/> <input type="text" value="5"/>

Рисунок 9 – Поле задания координат узлов

Доверительная вероятность

c1 <input type="text" value="1"/>	c6 <input type="text" value="0,74"/>	c11 <input type="text" value="0,77"/>
c2 <input type="text" value="0,85"/>	c7 <input type="text" value="0,8"/>	c12 <input type="text" value="0,93"/>
c3 <input type="text" value="0,8"/>	c8 <input type="text" value="0,75"/>	c13 <input type="text" value="0,7"/>
c4 <input type="text" value="0,8"/>	c9 <input type="text" value="0,9"/>	c14 <input type="text" value="0,85"/>
c5 <input type="text" value="0,82"/>	c10 <input type="text" value="0,95"/>	c15 <input type="text" value="0,75"/>

Рисунок 10 – Поле задания доверительных значений узлов

Остальная часть лицевой панели содержит поля с информацией о следующих параметрах:

- расстояниях между узлами d_{ij} (рисунок 13);
- средних измеренных значений для каждого узла $f_{срi}$ (рисунок 11);

- скорректированных значениях для каждого узла a_i (рисунок 12);
- массивах соседних узлов M_i и количестве соседних узлов N_i для каждого узла (рисунок 14).

Некоторая часть лицевой панели может выглядеть недостаточно информативной для пользователя, в частности поле с расстояниями между узлами, однако эти данные важны для расчетов.

Среднее измеренное значение

fcp1	fcp6	fcp11
19,9799	19,9908	19,9733
fcp2	fcp7	fcp12
19,9871	19,9865	20,0122
fcp3	fcp8	fcp13
19,9799	19,9908	20,002
fcp4	fcp9	fcp14
19,9908	20,0053	19,9791
fcp5	fcp10	fcp15
19,9826	19,9799	20,0122

Рисунок 11 – Индикаторы средних измеренных значений

Скорректированное значение

a1	a6	a11
20	20,0711	19,986
a2	a7	a12
19,8796	19,9636	20,0236
a3	a8	a13
19,9447	19,9383	19,9815
a4	a9	a14
19,9974	19,9496	19,984
a5	a10	a15
20,0008	20,0991	20,0972

Рисунок 12 – Индикаторы скорректированных значений

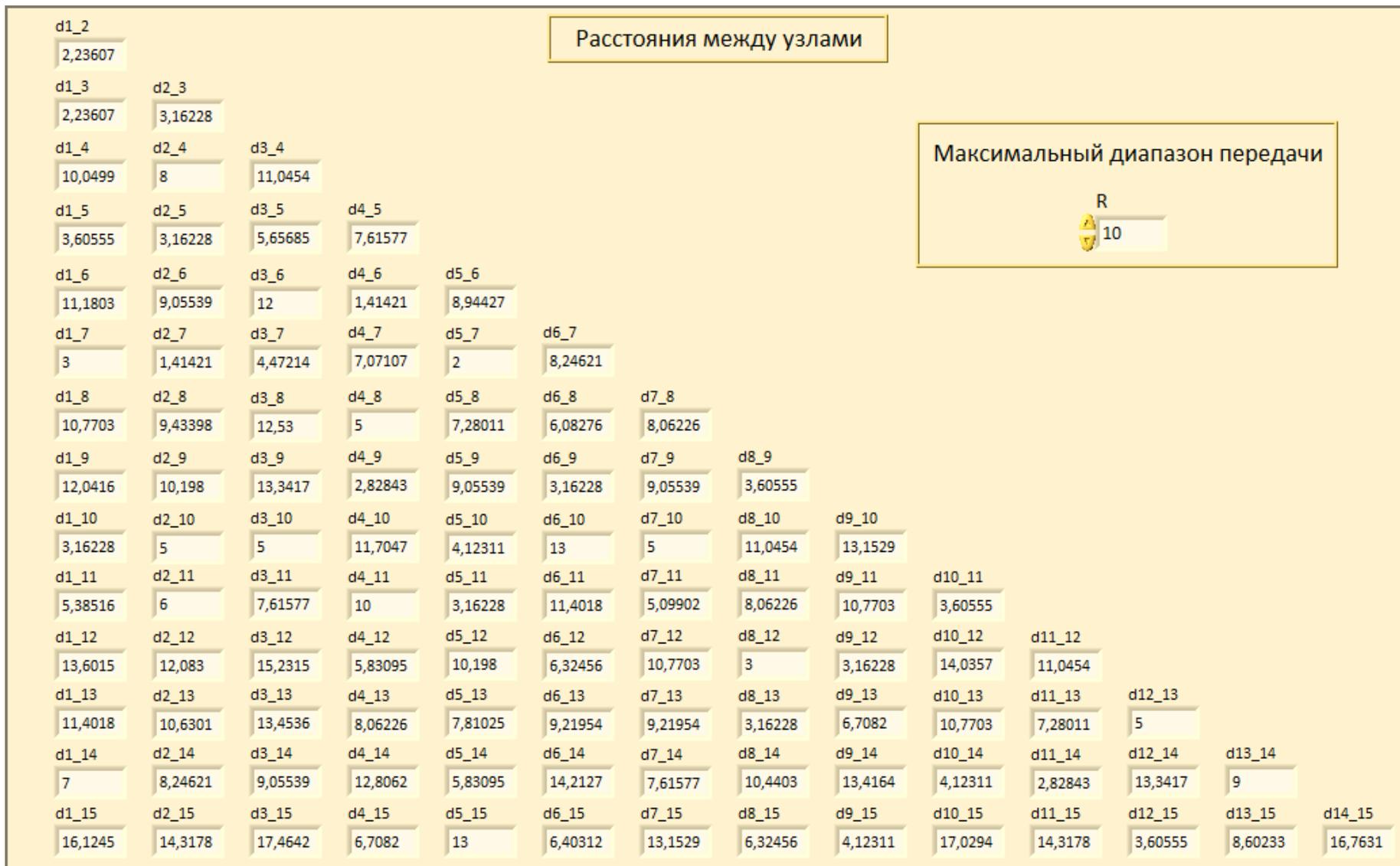


Рисунок 13 – Индикаторы расстояний между узлами

Ni(m1) Узел 1

8

Номер узла	Расстояние до соседнего узла	Значение измеряемого параметра	Скорректированное значение
2	2,236	19,861	19,880
3	2,236	19,936	19,973
5	3,606	20,005	20,064
7	3,000	19,958	20,001
10	3,162	20,105	19,955
11	5,385	19,990	19,948
14	7,000	19,985	20,003

Рисунок 14 – Массив данных о соседних узлах

На рисунке 15 показана часть блок диаграммы, отвечающая за формирование массивов значений измеряемого параметра F_i и расстояний между узлами D_i , а также за объединение этих массивов в один. Рассмотрим эту часть на примере первого узла.

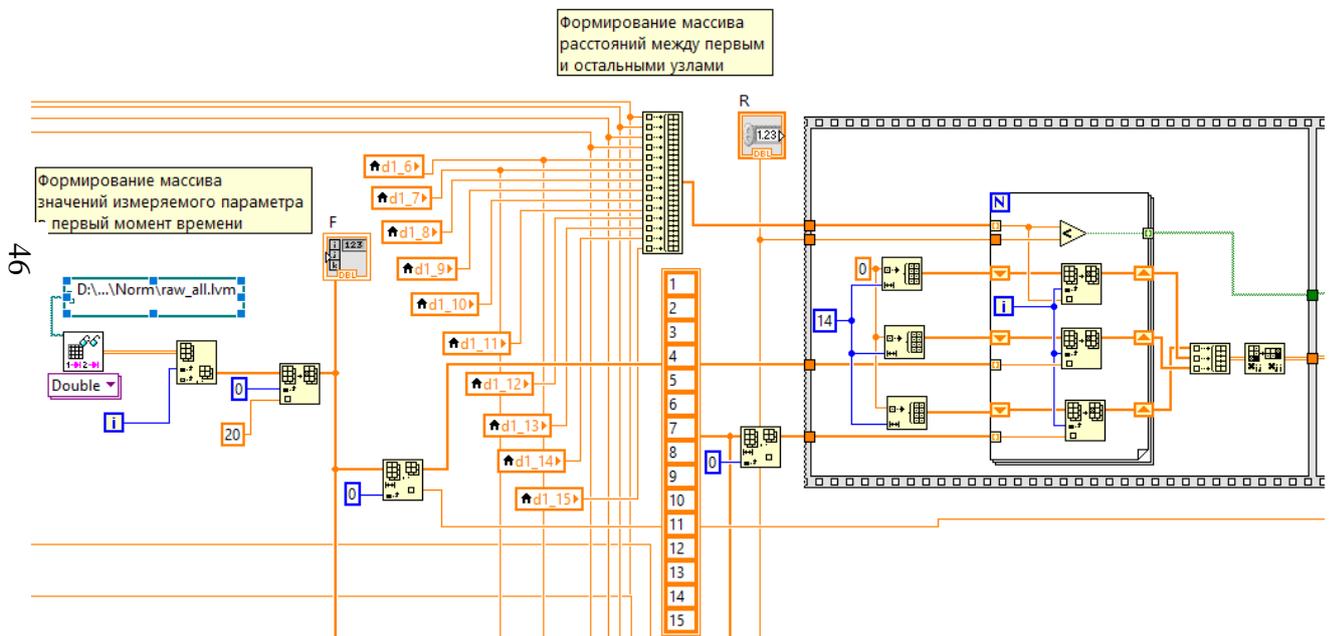


Рисунок 15 – Формирование массивов F_i и D_i

На вход блока для F_1 подаются значения $f_2(t), f_3(t) \dots f_{15}(t)$, т.е. значения измеряемого параметра со всех узлов кроме первого. На вход блока для D_1

подаются значения $d_{1_2}, d_{1_3} \dots d_{1_{15}}$, расстояния от первого до всех остальных узлов.

Далее в объединенном массиве все значения расстояний, которые больше максимального диапазона передачи R , удаляются, и остается массив соседних узлов M_i . Блок схема данной процедуры показана на рисунке 16.

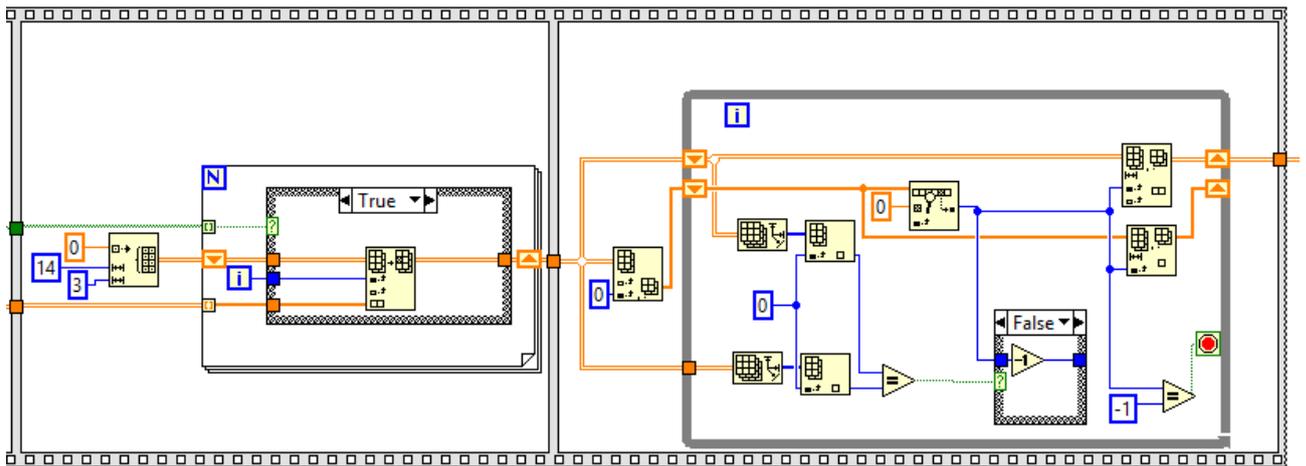


Рисунок 16 – Формирование массива M_i

Часть блок диаграммы с расчетом скорректированного значения a_i по формуле (11) представлена на рисунке 17.

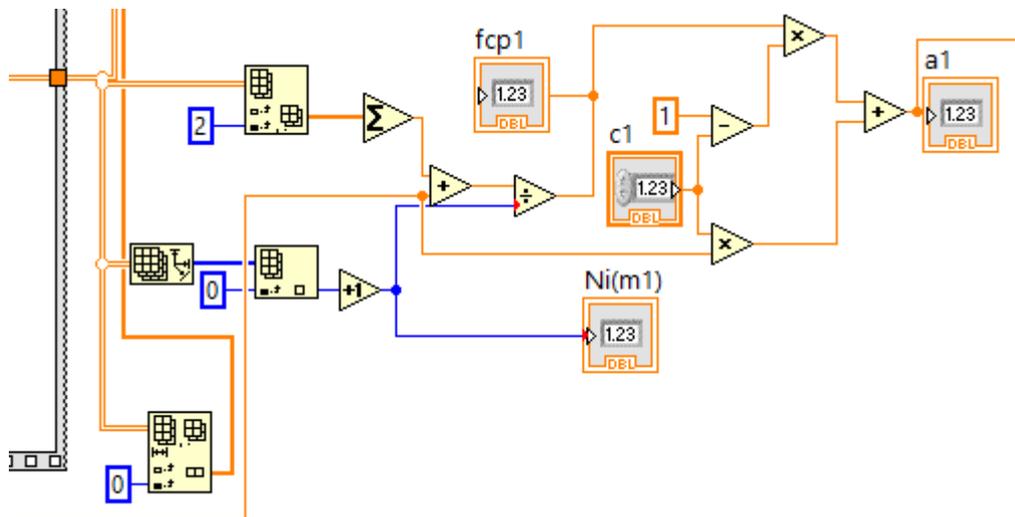


Рисунок 17 – Расчет скорректированного значения

Вышеизложенная процедура повторяется для всех 15 узлов.

Для проверки работоспособности разработанной программы было проведено 100 экспериментов, со следующими параметрами: номинальное

значение равно 20, погрешность сенсора составляет 0,5 в абсолютных единицах. Результаты сохраняются в файл и представлены в приложении.

На рисунке 18 отображены графики абсолютной погрешности для каждого узла, синяя линия показывает значения погрешности до корректировки, красная линия – скорректированные значения. В данном случае за истинное значение измеряемой величины принимается значение первого узла 20, так как первый узел был откалиброван.

Из графиков видно, что при применении данного метода, может возникать увеличение абсолютной погрешности для некоторых узлов, что является недостатком. В целом после проведения одного цикла «простой» калибровки БСС абсолютная погрешность уменьшается.

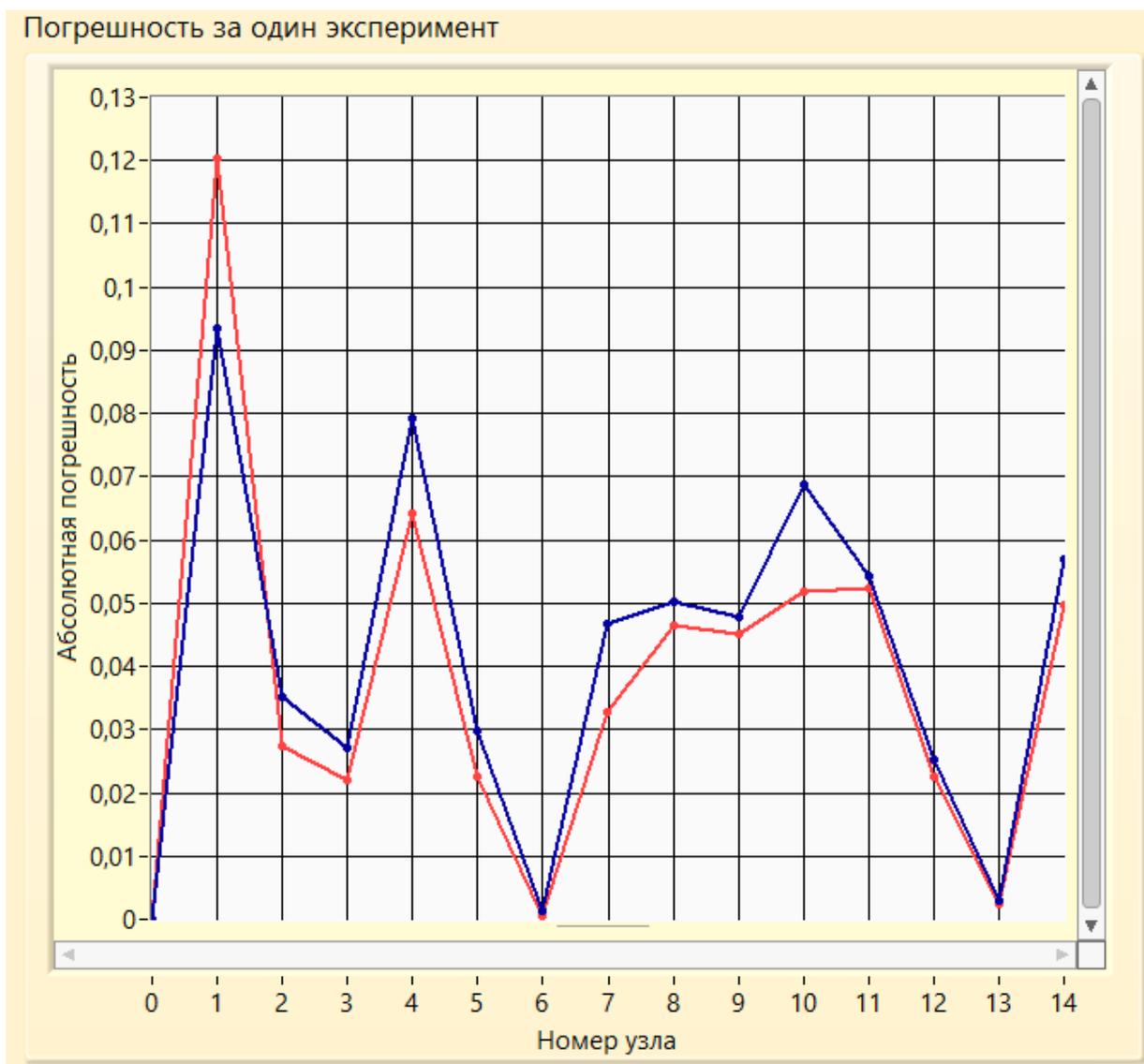


Рисунок 18 – Графики абсолютной погрешности

3.2 Программное обеспечение для автокалибровки с использованием алгоритма AutoWSN

В ходе работы было разработано программное обеспечение для автокалибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети методом комплексирования интервальных данных агрегированием предпочтений в графической среде разработки LabVIEW. Данная программа отображает результаты корректировки измеренных значений, а также результаты калибровки сенсоров в БСС.

На рисунке 19 приведено расположение полей лицевой панели программы.

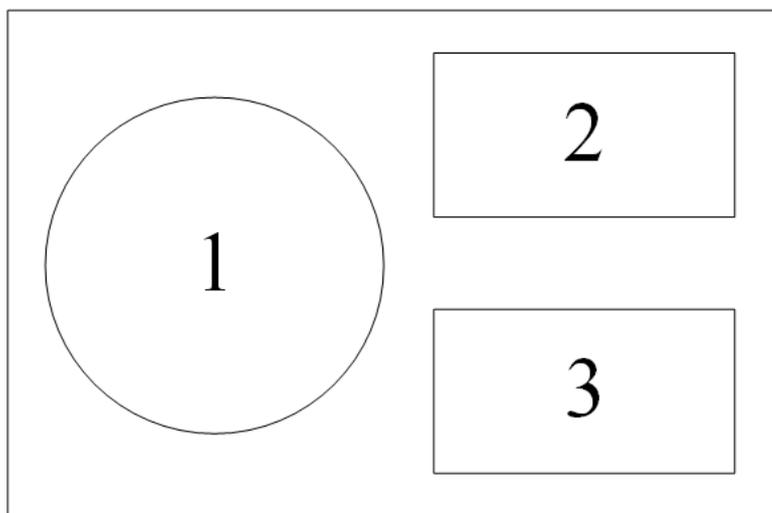


Рисунок 19 – Поля лицевой панели

В первом поле лицевой панели располагаются (рисунок 20):

- индикаторы для каждого узла БСС, которые отображают измеренное значение в зависимости от указанного номера эксперимента;
- индикатор главы кластера.

На втором поле лицевой панели имеются (рисунок 21):

- элементы управления такие, как количество узлов БСС, количество проведенных экспериментов и номер эксперимента;
- таблица с результатами комплексирования измеренных значений, в которой указаны номер эксперимента, скорректированное значение, разница

между скорректированным значением и номинальным, а также неопределенность скорректированного значения.

И на третьем поле лицевой панели (рисунок 22) приведена таблица результатов калибровки узлов для указанного эксперимента. В данной таблице отображаются такие данные, как номер узла, измеренное значение без поправки, поправка и измеренное значение с учетом поправки.

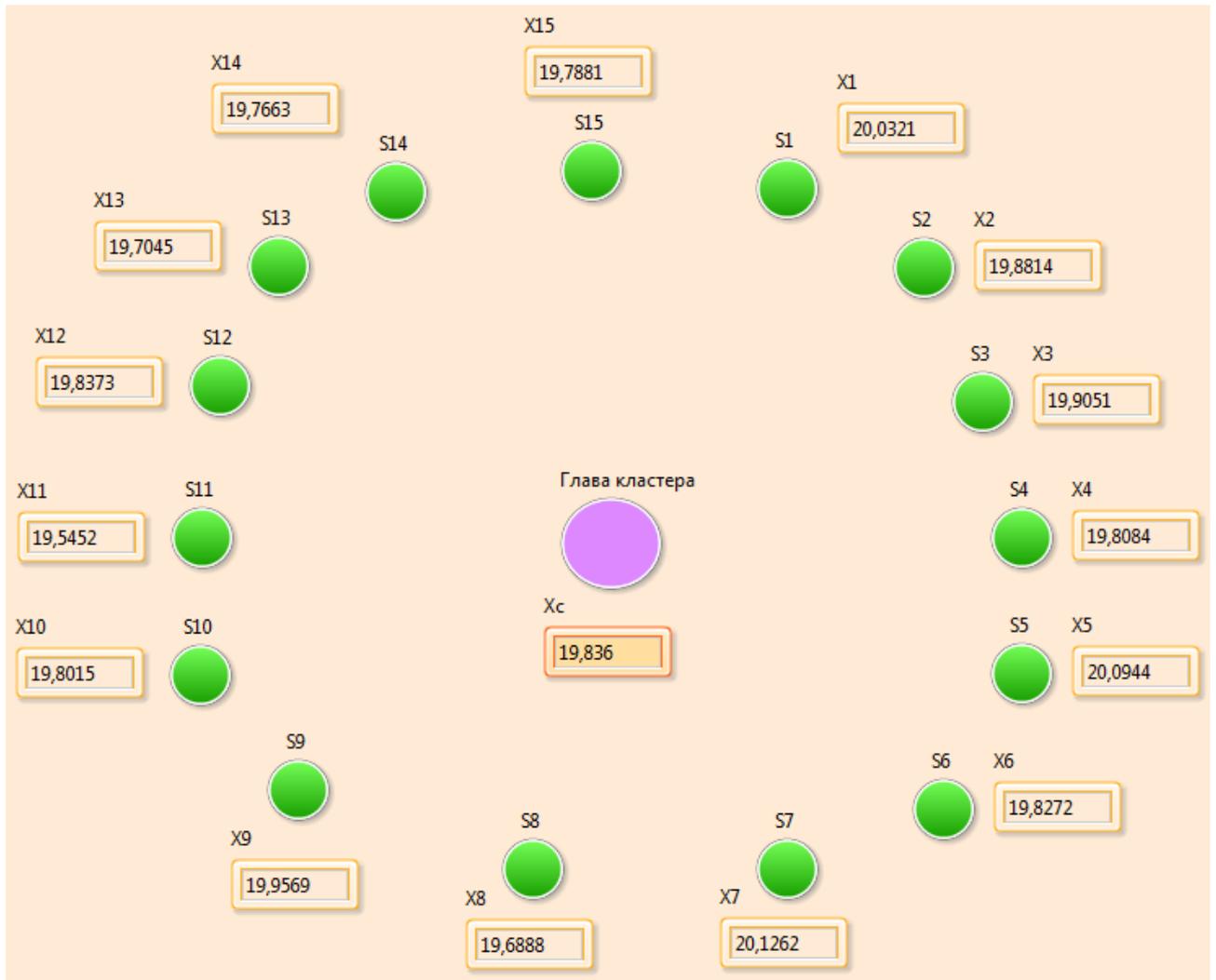


Рисунок 20 – Первое поле лицевой панели



Рисунок 21 – Второе поле лицевой панели



Рисунок 22 – Третье поле лицевой панели

Пользователю на лицевой панели необходимо указать количество узлов беспроводной сенсорной сети, количество проведенных экспериментов и номер эксперимента. Результаты экспериментов генерировались по методу Монте-Карло с помощью программного обеспечения IntFusion [7].

На рисунке 23 представлена часть блок-диаграммы программы для получения поправок измеренных значений.

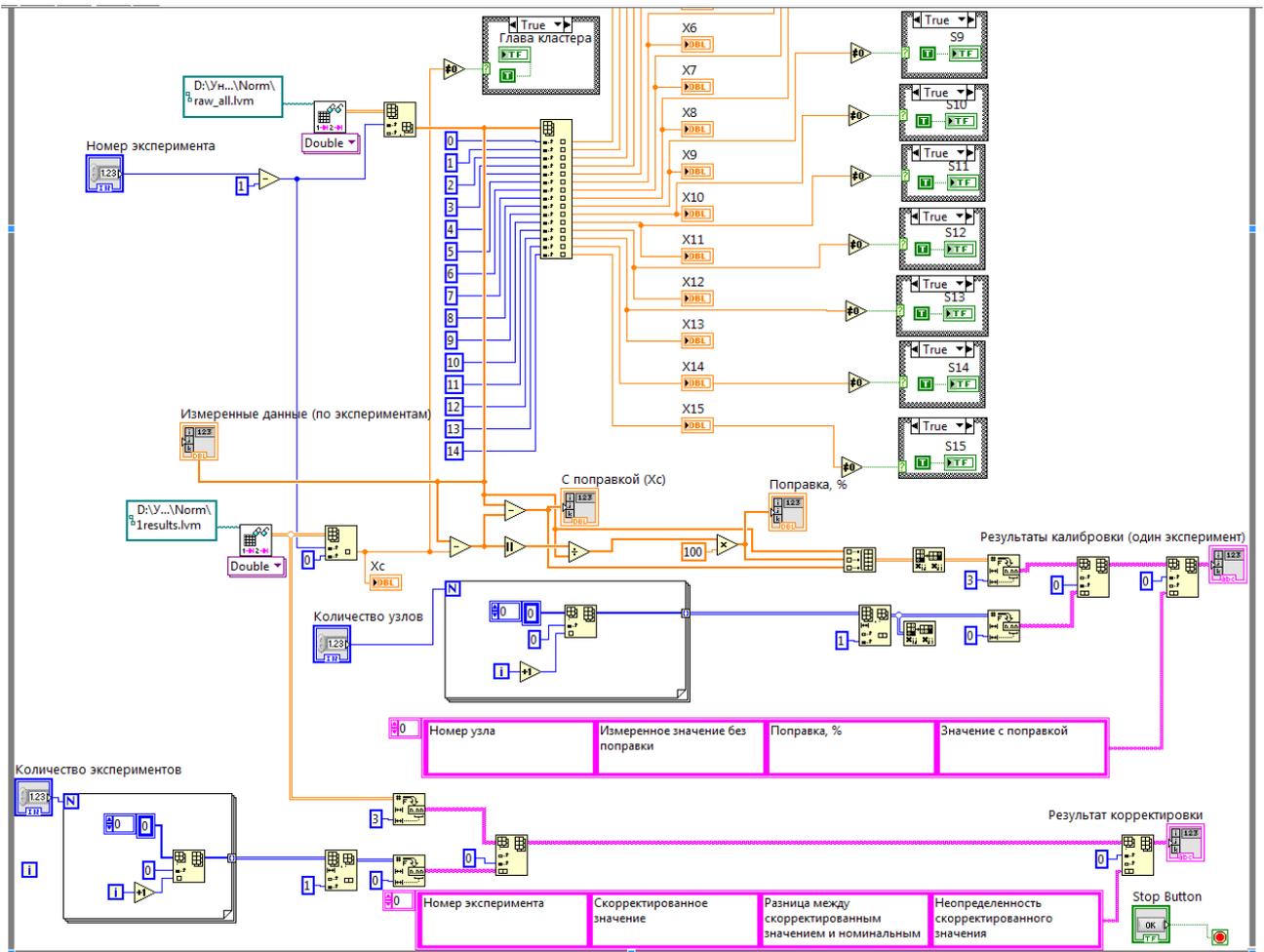


Рисунок 23 – Блок-диаграмма программы

По результатам калибровки можно судить о пригодности к дальнейшему применению сенсоров БСС. Если поправка превышает погрешность сенсора в течение трех циклов калибровки, то этот сенсор должен быть исключен из данной беспроводной сенсорной сети.

4 Экспериментальное исследование алгоритмов автокалибровки

4.1 Исследование точности алгоритмов

Для того, чтобы сравнить эффективность работы двух методов автокалибровки сенсоров беспроводной сенсорной сети, проводились экспериментальные исследования со следующими исходными параметрами:

- беспроводная сенсорная сеть состоит из 15 узлов;
- номинальное значение измеряемой физической величины равно 20 в принятых абсолютных единицах;
- погрешность сенсора составляет 0,5 в абсолютных единицах;
- количество экспериментов – 100.

В соответствии с заданными параметрами генерировались измерительные данные для 15 узлов, которые приведены в таблице Б.1 приложения Б. Данные обрабатывались по процедуре рассматриваемых алгоритмов. Для метода «простой» калибровки измеренные значения первого узла были приняты равными 20, так как один из узлов БСС должен быть предварительно откалиброван.

В результате калибровки сенсоров по методу «простой» калибровки были получены скорректированные значения для каждого узла в 100 экспериментах (таблица Б.2). Результаты проведения калибровки по алгоритму AutoWSN приведены в таблице Б.3 и включают скорректированные значения x^* для 100 экспериментов, поправку Δ_k , отклонение скорректированного значения от номинального ξ и неопределенность скорректированного значения U . Для примера данные приведены только для второго узла.

Отклонение ξ рассчитывалось по формуле (39):

$$\xi = X_N - x^*, \quad (39)$$

где X_N – номинальное значение.

Поскольку известно номинальное значение, можно оценить точность алгоритма по степени близости полученного скорректированного значения к номинальному.

Эксперименты метода «простой» калибровки и калибровки методом комплексирования интервальных данных агрегированием предпочтений проводились с одними и теми же данными.

На рисунке 24 представлены графики отклонений ξ для двух методов.

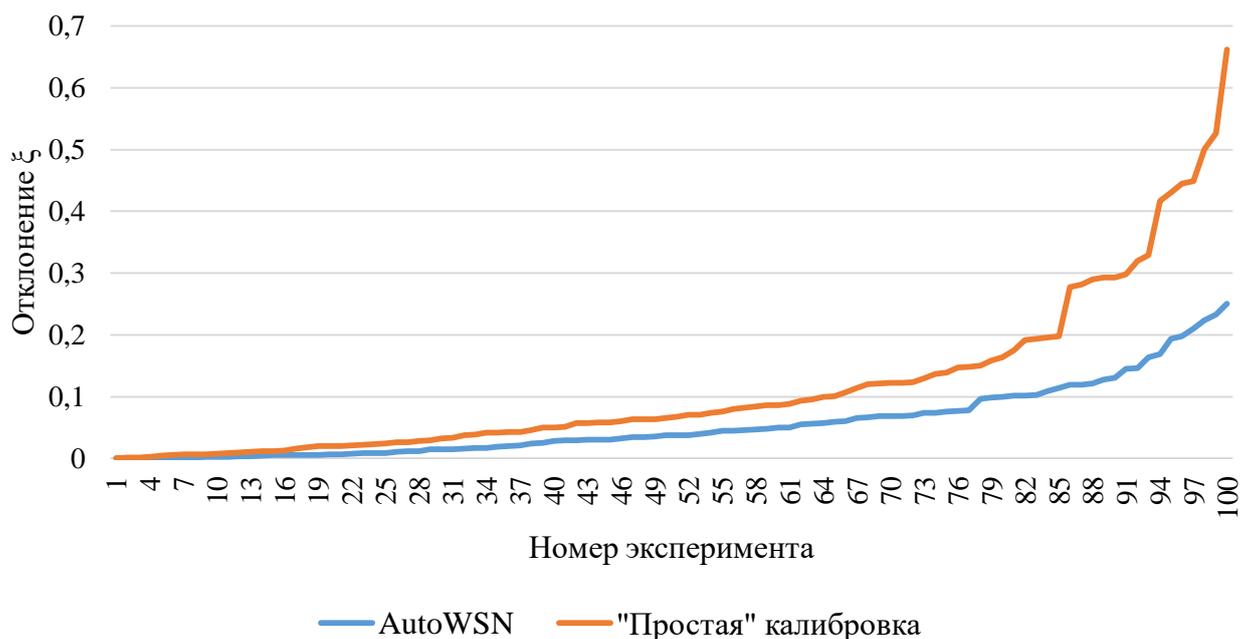


Рисунок 24 – Сравнение отклонения ξ двух методов

По графику видно, что отклонение скорректированного значения от номинального у метода «простой» калибровки больше, чем у алгоритма AutoWSN. Следовательно, скорректированные значения, полученные алгоритмом AutoWSN, ближе к номинальному значению, и можно считать, что этот метод точнее, чем метод «простой» калибровки. В среднем алгоритм AutoWSN выигрывает по точности в 2,3 раза.

На рисунке 25 представлен график поправок для всех узлов в одном эксперименте. Штрихом указана погрешность датчиков, равная 0,5. По графику видно, что у трех узлов поправка сильно превышает погрешность датчика. В этом случае, необходимо еще раз провести процедуру калибровки, если эта

ситуация повторится еще несколько раз, то эти датчики необходимо исключить из БСС и проверить вручную.

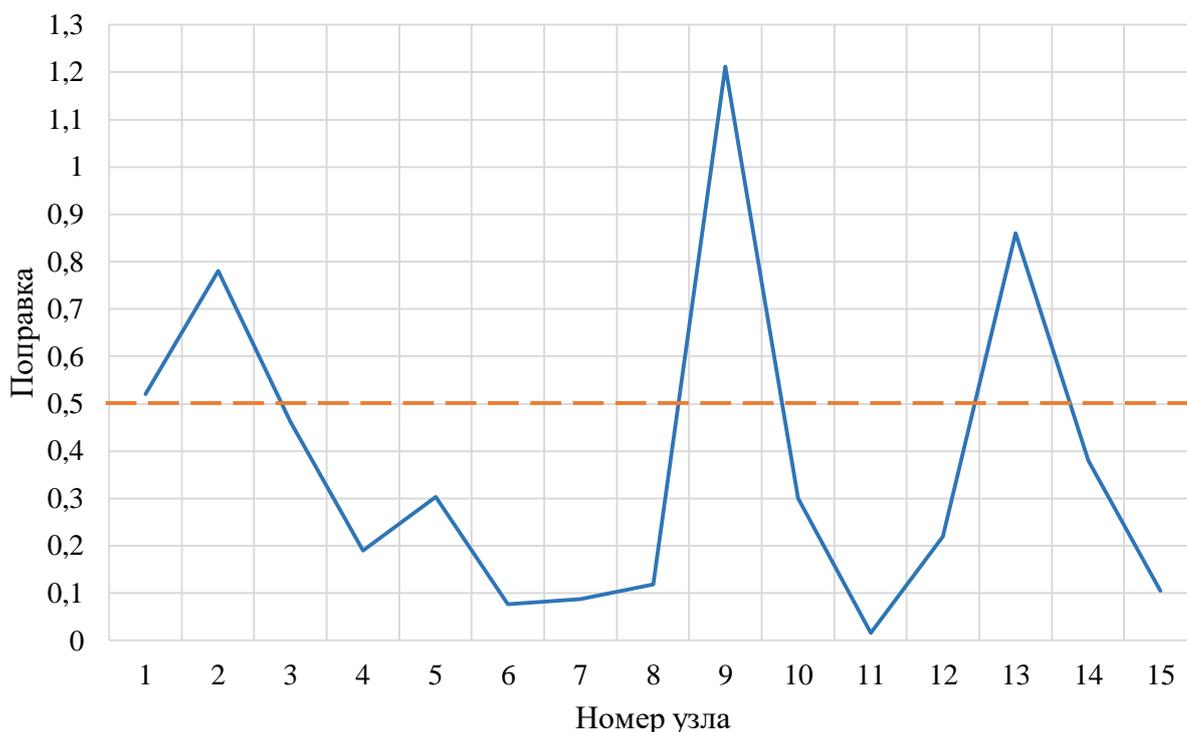


Рисунок 25 – График поправок в одном эксперименте

4.2 Исследование влияния выбросов на результаты алгоритма AutoWSN

Для того, чтобы изучить влияние выбросов на результаты работы алгоритма AutoWSN, было проведено несколько экспериментов. При номинальном значении 20 измеряемой физической величины, значение выброса принималось равным 30 абсолютных единиц.

На рисунке 26 показаны графики отклонений ξ при выбросах на одном, трех и шести узлах. Для сравнения синей линией показаны отклонения ξ без выбросов. Как и ожидалось, при наличии выбросов значений отклонение возрастает, хоть и не зависит от их количества. Можно сделать вывод, что при увеличении числа выбросов с 1 до 6 отклонение практически не увеличивается, что говорит об устойчивости метода и хорошей робастности.

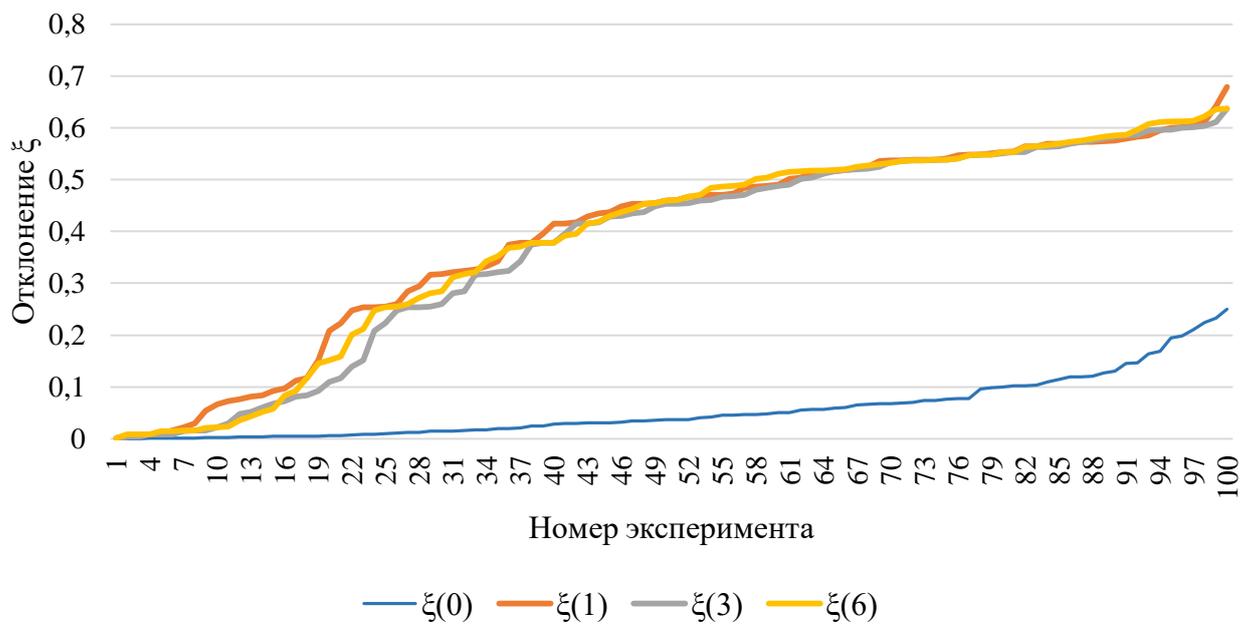


Рисунок 26 – Графики отклонений ξ при выбросах значений

5 Социальная ответственность

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места и условий, в которых будет реализовываться разработка системы автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети (БСС). Узлы БСС содержат датчики физических величин. Эти узлы обычно развертываются в массовом порядке и должны быть недорогими. По этой причине такие датчики обладают низкой точностью и требуют частой калибровки.

В дальнейшем, разработку, полученную в ходе написания данной магистерской диссертации, будет использовать инженер-метролог. Рабочее место представляет собой компьютерный стол с персональным компьютером (ПК) в лаборатории. Работа производится сидя, при небольшом физическом напряжении.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Государственный надзор и контроль за соблюдением трудового законодательства в организациях независимо от организационно-правовых форм и форм собственности осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами. Согласно трудовому кодексу РФ:

- продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю;
- во время регламентированных перерывов целесообразно выполнять комплексы упражнений и осуществлять проветривание помещения [9].

Существуют также специализированные органы, осуществляющие государственный контроль и надзор в организациях на предмет соблюдения существующих правил и норм.

К таким органам относятся:

- Федеральная инспекция труда;
- Государственная экспертиза условий труда Федеральной службы по труду и занятости населения;
- Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека и др.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место представляет собой помещение со столом с персональным компьютером. Рабочее место для выполнения работ сидя организуют при легкой работе, не требующей свободного передвижения работающего, а также при работе средней тяжести в случаях, обусловленных особенностями технологического процесса.

Конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы [10].

Для создания зрительного комфорта имеется возможность настройки четкости, контрастности и яркости на экране монитора. Высота рабочей поверхности рекомендуется в пределах 680 – 760 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм.

Рекомендуемая высота сиденья над уровнем пола должна быть в пределах 420 – 550 мм. Поверхность сиденья рекомендуется делать мягкой, передний край закругленным, а угол наклона спинки рабочего кресла – регулируемым.

Пример рабочего места приведен на рисунке 27.

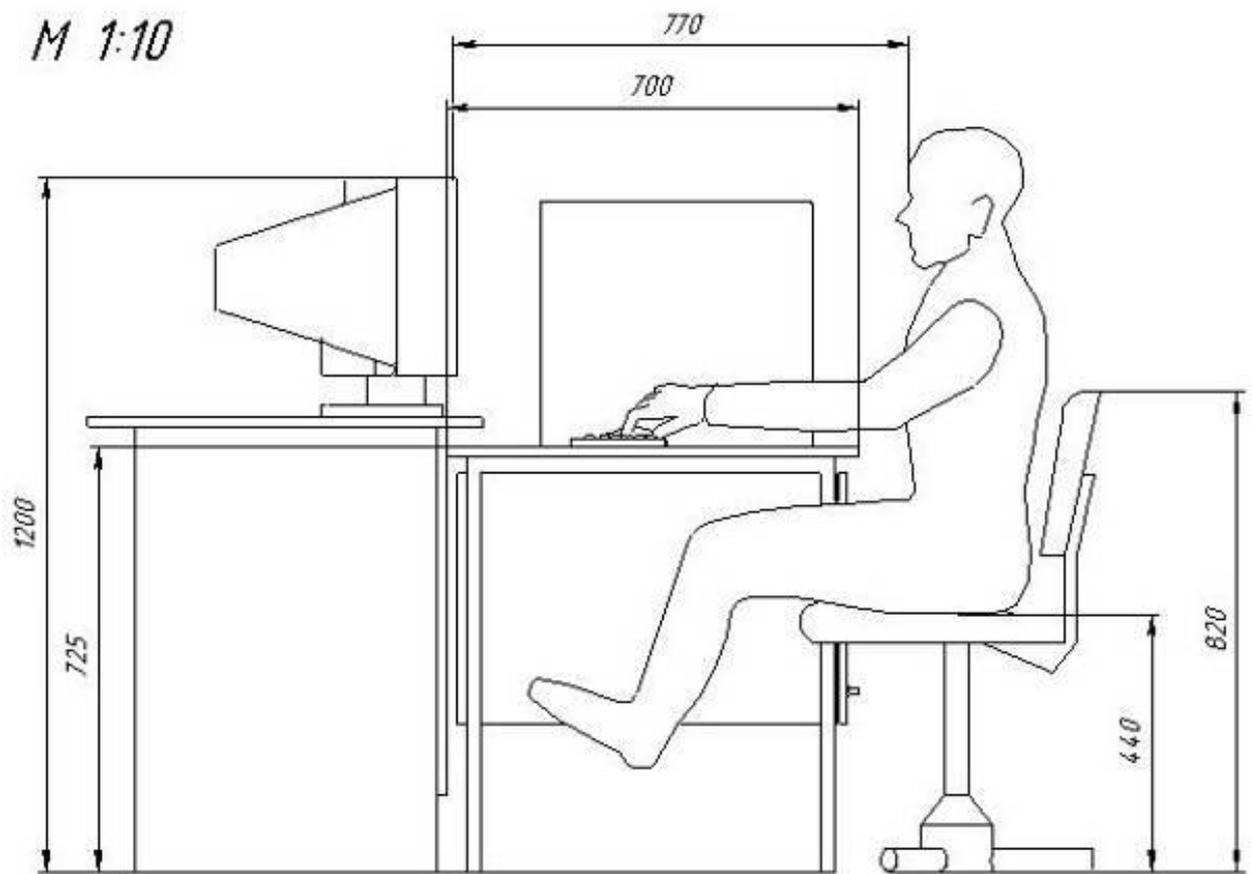


Рисунок 27 – Рабочее место

Очень часто используемые средства отображения информации, требующие точного и быстрого считывания показаний, следует располагать в вертикальной плоскости под углом $\pm 15^\circ$ от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости под углом $\pm 15^\circ$ от сагиттальной плоскости, рисунки 28 и 29.

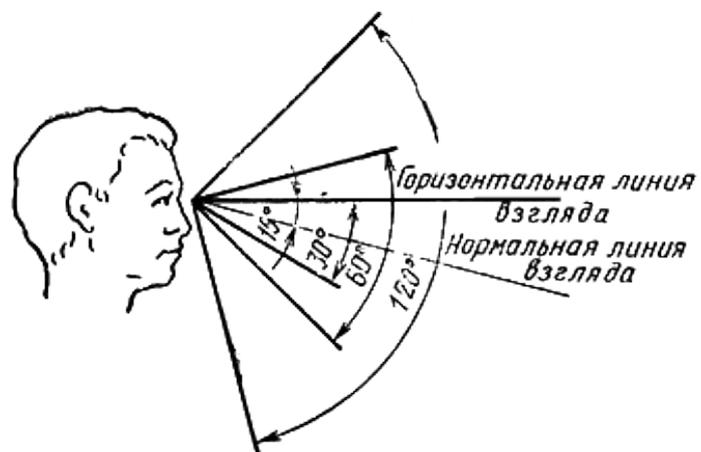


Рисунок 28 – Зоны зрительного наблюдения в вертикальной плоскости

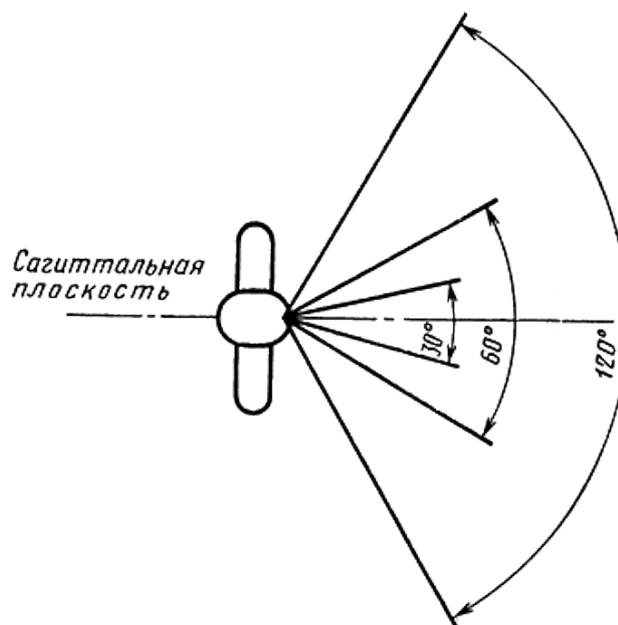


Рисунок 29 – Зоны зрительного наблюдения в горизонтальной плоскости

5.2 Производственная безопасность

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для работы с системой автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети представлен в таблице 1 согласно ГОСТ 12.0.003-2015 [11].

Таблица 1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплуа тация	
1 Превышение уровня электромагнитных излучений		+	+	Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019) [9]; ГОСТ 12.2.032-78 [10]; СанПиН 2.2.4.3359-16 [12]; СП 52.13330.2016 [13]; ГОСТ 12.1.003-2014 [14]; СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [15]; СанПиН 2.2.4.548-96 [16]; ГОСТ 12.1.004-91 [17].
2 Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	
3 Превышение уровня шума		+	+	
4 Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	

5.2.1 Превышение уровня электромагнитных излучений

Источником повышенной напряженности электромагнитного поля в данном случае могут являться персональный компьютер.

Длительное воздействие электромагнитных полей промышленной частоты (50 Гц) приводит к расстройствам в головном мозге и центральной нервной системе. У человека могут наблюдаться головная боль в височной и затылочной областях, вялость, ухудшение памяти, боли в области сердца, угнетенное настроение, апатия, своеобразная депрессия с повышенной чувствительностью к яркому свету и интенсивному звуку, расстройство сна, сердечно-сосудистой системы, органов пищеварения, дыхания, повышенная раздражительность. Могут наблюдаться функциональные нарушения в центральной нервной системе, а также изменения в составе крови.

Воздействие постоянного магнитного поля (ПМП) и с частотой 50 Гц на человека проявляется в индуцировании в теле человека вихревых токов. При длительном систематическом воздействии могут возникнуть изменения функционального состояния нервной системы, иммунной системы и сердечно-сосудистой системы. Длительное воздействие ЭМП промышленной частоты может спровоцировать онкологические заболевания.

В соответствии с СанПиН 2.2.4.3359-16 предельно допустимые уровни электромагнитных полей на рабочих местах пользователей персональными компьютерами (ПК) и другими средствами информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) представлены в таблице 2 [12].

Для уменьшения уровня электромагнитного поля от персонального компьютера рекомендуется включать в одну розетку не более двух компьютеров, сделать защитное заземление, подключать компьютер к розетке через нейтрализатор электрического поля.

Таблица 2 – ПДУ электромагнитных полей на рабочих местах пользователей ПК и другими средствами ИКТ

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

К средствам индивидуальной защиты при работе на компьютере относят спектральные компьютерные очки для улучшения качества изображения, защиты от избыточных энергетических потоков видимого света и для профилактики «компьютерного зрительного синдрома». Очки уменьшают утомляемость глаз на (25 – 30) %. Их рекомендуется применять всем операторам при работе более 2 ч в день, а при нарушении зрения на 2 диоптрии и более – независимо от продолжительности работы.

5.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Выполнение зрительной работы при недостаточной освещенности рабочего места может привести к развитию некоторых дефектов глаз: близорукость и дальнозоркость.

В помещении, где проводятся работы применяется совместное освещение. Основным источником освещения – шесть потолочных светильников с зеркальными решетками, в каждом по четыре люминесцентные лампы типа TL-D с мощностью 60 Вт.

К производственному освещению независимо от источника света предъявляются следующие требования:

- достаточная освещенность, т. е. освещенность объекта должна обеспечить комфортные условия для общей работоспособности;
- равномерность освещения, т. е. освещенность должна быть равномерной во времени и пространстве;
- отсутствие блескости в поле зрения работающих.

В соответствии с СП 52.13330.2016 к освещению помещений промышленных предприятий применяются требования, представленные в приложении В [13].

5.2.3 Превышение уровня шума

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты. В данном случае источниками шума могут быть персональный компьютер и шум с улицы.

Внезапные шумы высокой интенсивности, даже кратковременные (взрывы, удары и т.п.), могут вызвать как острые нейросенсорные эффекты (головокружение, звон в ушах, снижение слуха), так и физические повреждения (разрыв барабанной перепонки с кровотечением, поражения среднего уха и улитки) [14].

Предельно допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука для рабочих мест в лаборатории и производственном помещении, разработанные с учетом категорий тяжести и напряженности труда, представлены в таблице 3 в соответствии с СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [15].

Таблица 3 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивален тные уровни звука (дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в рабочих комнатах конторских помещений, в лабораториях.	93	79	70	68	58	55	52	52	49	60
Работа, выполняемая с часто получаемыми указаниями и акустическими сигналами; работа, требующая постоянного слухового контроля; операторская работа по точному графику с инструкцией; диспетчерская работа. Рабочие места в помещениях диспетчерской службы, кабинетах и помещениях наблюдения и дистанционного управления с речевой связью по телефону; машинописных бюро, на участках точной сборки, на телефонных и телеграфных станциях, в помещениях мастеров, в залах обработки информации на вычислительных машинах.	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Работа, требующая сосредоточенности; работа с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами. Рабочие места за пультами в кабинах наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону, в помещениях лабораторий с шумным оборудованием, в помещениях для размещения шумных агрегатов вычислительных машин.	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75
Выполнение всех видов работ (за исключением перечисленных выше) на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий.	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Для снижения уровня шума, производимого ПК рекомендуется регулярно проводить их техническое обслуживание: чистка от пыли, замена смазывающих веществ; также применяются звукопоглощающие материалы. Для снижения уровня шума с улицы рекомендуется установка герметичных стеклопакетов.

5.2.4 Отклонение показателей микроклимата

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах.

Оптимальные величины показателей микроклимата необходимо соблюдать на рабочих местах производственных помещений, на которых выполняются работы операторского типа, связанные с нервно-эмоциональным напряжением (в кабинах, на пультах и постах управления технологическими процессами, в залах вычислительной техники и др.) [16].

В соответствии с СанПиН 2.2.4.548-96 оптимальные величины параметров микроклимата на рабочих местах применительно к выполнению работ различных категорий в холодный и теплый периоды года приведены в таблице 4.

Таблица 4 Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22 – 24	21 – 25	40 – 60	0,1
Теплый	Ia (до 139)	23 – 25	22 – 26	40 – 60	0,1

Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 5 применительно к выполнению работ различных категорий в холодный и теплый периоды года. Помещение, где проводилась разработка системы соответствует оптимальным нормам параметров микроклимата.

Отклонение параметров микроклимата от нормативных значений существенно влияет на здоровье и производительность труда. Высокая температура вызывает интенсивное потоотделение, что приводит к обезвоживанию организма, потере минеральных солей и водорастворимых витаминов С, В1, В2.

Таблица 5 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энерготрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	Ia (до 139)	20,0 – 21,9	24,1 – 25,0	19 – 26	15 – 75	0,1	0,1
Теплый	Ia (до 139)	21,0 – 22,9	25,1 – 28,0	20 – 29	15 – 75	0,1	0,2

Низкая температура может быть причиной охлаждения и переохлаждения организма человека. При охлаждении организма в нем рефлекторно уменьшается теплоотдача и усиливается теплообразование за счет интенсивности окислительных обменных процессов. Компенсация тепловых потерь происходит до тех пор, пока запасы энергии не иссякнут. Мышечная дрожь – это попытка организма за счет микродвижений выработать дополнительное тепло и ускорить движение крови. Она может быть такой сильной, что приведет к повреждению мышц.

5.3 Экологическая безопасность

Так как основным объектом исследования данной работы являются электрические приборы, серьезной проблемой является электропотребление. Это влечет за собой общий рост объема потребляемой электроэнергии. Для удовлетворения потребности в электроэнергии, приходится увеличивать мощность и количество электростанций. Это приводит к нарушению экологической обстановки, так как электростанции в своей деятельности используют различные виды топлива, водные ресурсы, а также являются

источником вредных выбросов в атмосферу.

На данный момент во многих странах используются альтернативные источники энергии (солнечные батареи, энергия ветра). Еще одним способом решения данной проблемы является использование энергосберегающих систем.

В лаборатории не ведется никакого производства. К отходам, производимым в помещении можно отнести сточные воды и бытовой мусор.

Сточные воды здания относятся к бытовым сточным водам. За их очистку отвечает городской водоканал.

Основной вид мусора – это отходы печати, бытовой, коробки от техники, использованная бумага. Утилизация отходов печати вместе с бытовым мусором происходит в обычном порядке.

Утилизация электрических приборов осуществляется сотрудниками университета и предусматривает следующие пункты:

- 1 Правильное заполнение акта списания с указанием факта невозможности дальнейшей эксплуатации;
- 2 Осуществление списания перечисленной в акте измерительной техники с баланса предприятия с указанием в бухгалтерском отчете;
- 3 Непосредственно утилизация техники с полным демонтажем устройств на составляющие детали с последующей сортировкой по видам материалов и их дальнейшей передачей на перерабатывающие заводы.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайными ситуациями в рассматриваемых помещениях могут быть пожары. Требования по пожарной безопасности устанавливаются ГОСТ 12.1.004-91 [17].

С ростом энергооснащенности производства в значительной степени увеличивается опасность пожара. Короткое замыкание, перегрузка, большие переходные сопротивления, взрывы колб и ламп накаливания, замыкания

фазных проводов на заземленные конструкции. Чаще всего причиной пожара становится короткое замыкание в электрических установках.

Здание учебного корпуса №10 ТПУ относится к категории Г (умеренная пожароопасность) по взрывопожарной и пожарной опасности и соответствует требованиям пожарной безопасности. В здании установлена система охранно-пожарной сигнализации, имеются в наличии порошковые огнетушители, а также установлен план эвакуации с указанием направлений к основному и запасному эвакуационным выходам.

На рисунке 30 представлен план эвакуации при возникновении пожара и других ЧС.



Рисунок 30 – План эвакуации

5.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность»

Были рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места и условий, в которых будет реализовываться разработка системы автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети, в соответствии с нормами производственной санитарии, техники безопасности и охраны труда и окружающей среды.

Были проанализированы такие вредные производственные факторы, оказывающие негативное влияние на организм человека, как электромагнитное излучение, неоптимальный микроклимат помещения, недостаточность освещения, повышенный уровень шума.

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Магистерская диссертация включает в себя разработку системы автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети (БСС). Узлы БСС содержат датчики физических величин. Эти узлы обычно развертываются в массовом порядке и должны быть недорогими. По этой причине такие датчики обладают низкой точностью и требуют частой калибровки. *Целями раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»* являются:

- 1 Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- 2 Планирование и формирование бюджета научных исследований;
- 3 Определение ресурсной и экономической эффективности исследования.

Для достижения данных целей необходимо выполнить следующие *задачи*:

- 1 Определение потенциальных потребителей результатов исследования; анализ конкурентных технических решений.
- 2 Описание структуры работ в рамках научного исследования; определение трудоемкости выполнения работ; разработка графика проведения научного исследования; расчет бюджета научно-технического исследования.
- 3 Определение интегрального финансового показателя, интегрального показателя ресурсоэффективности и сравнительной эффективности проекта.

6.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Сегментировать рынок по разработке системы автоматической калибровки сенсоров можно по следующим критериям: тип потребителя и метод калибровки. Потребителем может выступать научная лаборатория,

которая занимается калибровкой средств измерений (СИ); промышленная компания по производству СИ; а также физическое лицо, использующее СИ. Метод комплексирования интервальных данных агрегированием предпочтений помогает находить такую точку x^* на вещественной оси, которая принадлежит максимальному количеству интервалов измеренных значений и может служить представителем всех этих интервалов. Метод «простой» калибровки находит оптимальное соотношение между измеренными значениями локального узла и соседних узлов.

		Метод калибровки	
		IF&PA	«Простая» калибровка
Потребитель	Научная лаборатория	+	
	Промышленная компания	+	+
	Физическое лицо	+	+

Рисунок 31 – Карта сегментирования рынка

По итогам сегментирования определены основные сегменты данного рынка. Метод IF&PA может использоваться любым типом потребителя. «Простая» калибровка подходит для промышленных компаний и физических лиц.

6.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Для того, чтобы выявить ресурсоэффективность научной разработки и определить направления для ее будущего повышения, необходимо провести анализ конкурентных технических решений. Данный анализ проводится с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице Г.1 приложения Г, где

в качестве конкурентной разработки для сравнения был взят метод «простой калибровки» (K_1).

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле (40):

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (40)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

Главным преимуществом разрабатываемой в рамках магистерской диссертации системы автоматической калибровки сенсоров является удобство в эксплуатации, повышение производительности труда потребителя, надежность и функциональная мощность. В то время как конкурентные разработки узконаправленные и более дорогостоящие. Таким образом, данные особенности дают преимущество разработке и позволят ей занять свою нишу на целевом рынке.

6.3 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научного исследования была создана рабочая группа, в которую вошли научный руководитель (НР) и непосредственно студент (С), выполняющий написание магистерской диссертации. Перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования с указанием исполнителей представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	НР
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	С
	3	Выбор направления исследований	НР, С
	4	Календарное планирование работ по теме	С
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка алгоритма и методики калибровки	НР, С
	6	Разработка программного обеспечения	С
	7	Тестирование системы	С
	8	Проведение экспериментальных исследований	С
Обобщение и оценка результатов	9	Обработка результатов	С
	10	Составление пояснительной записки	С

Всего выделено 4 основных этапа, которые подразделяются на 10 видов работ, выполняемых двумя исполнителями – научным руководителем и студентом.

6.4 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется формула (41):

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{\min\ i} + 2t_{\max\ i}}{5}, \quad (41)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p по формуле (42), учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (42)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Все расчеты приведены в приложении Г.

6.5 Разработка графика проведения научного исследования

В качестве графика проведения научного исследования использовалась диаграмма Ганта, т.к. она является наиболее наглядным и удобным способом построения ленточного графика.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться формулой (43):

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (43)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле (44):

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (44)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округляются до целого числа.

Все рассчитанные значения сведены в таблицу Д.1 приложения Д.

На основе таблицы Д.1 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. На рисунке Е.1 приложения Е представлен календарный план-график для первого исполнения.

6.6 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

6.6.1 Расчет материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по формуле (45):

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расxi}, \quad (45)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

$Ц_i$ – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах (15 – 25) % от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Материальные затраты

Наименование	Кол-во, шт.			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (З _м), руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Компьютер	1	1	1	60000	60000	60000	60000	60000	60000
Заправка картриджа	1	1	1	300	300	300	300	300	300
Пачка бумаги формата А4	1	1	1	260	260	260	260	260	260
Лицензия на среду разработки	1	1	1	120000	120000	60000	195000	195000	60000
Итого							255560	255560	120560

Необходимо учитывать, что данное оборудование в дальнейшем будет использоваться в других проектах.

6.6.2 Основная заработная плата исполнителей

Заработная плата включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату, и рассчитывается по формуле (46):

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (46)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12 – 20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия рассчитывается по следующей формуле (47).

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (47)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица Г.1);

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле (48):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (48)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя);

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 8).

Таблица 8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные дни и праздничные дни)	118	118
Потери рабочего времени (отпуск, невыходы по болезни)	48	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	247

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле (49):

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (49)$$

где Z_{TC} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 % от Z_{TC});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата Z_{TC} находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_T и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке, для научного руководителя $k_{T(НР)}$ принимается равным 2,047; для студента $k_{T(С)}$ – 1,407. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 9.

Таблица 9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{TC} , руб.	Z_M , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.			$Z_{осн}$, руб.		
				Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
НР	1228,2	2394,99	125,17	21,3			2666,12		
С	844,2	1646,19	69,31	167,9	216,9		11637,15	15033,34	

6.6.3 Дополнительная заработная плата исполнителей

Расчет дополнительной заработной платы ведется по формуле (50):

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (50)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Результаты расчета дополнительной заработной платы представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Дополнительная заработная плата

Исполнитель	Дополнительная заработная плата, руб.		
	Исп.1	Исп. 2	Исп. 3
Научный руководитель	346,6		
Студент	1512,8	1954,3	

6.6.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из формулы (51):

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (51)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент уплаты во внебюджетные фонды, принятый равным 30,2 % для учреждений, осуществляющих научную деятельность.

Величина отчислений во внебюджетные фонды представлена в таблице 11.

Таблица 11 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	$k_{\text{внеб}}$	$Z_{\text{осн}}$, руб.			$Z_{\text{доп}}$, руб.			$Z_{\text{внеб}}$, руб.		
		Исп.1	Исп. 2	Исп. 3	Исп.1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
НР	0,302	2666,12			346,6			909,84		
С	0,302	11637,15	15033,34		1512,8	1954,3		3971,3	5130,27	

6.6.5 Расчет накладных расходов

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (52)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент накладных расходов, взятый в размере 16 %.

Результаты расчетов накладных расходов представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Накладные расходы

Исполнители	З _{накл.} руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Научный руководитель	612,68		
Студент	2674,17	3454,61	

6.6.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Полученная в результате величина затрат на научно-исследовательскую работу является базой для формирования бюджета затрат на проект. Определение бюджета затрат на НТИ представлено в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.				Номер пункта
	Научный руководитель	Студент			
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	
Материальные затраты НТИ	–	255560	255560	120560	5.8.1
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	2666,12	11637,15	15033,34		5.3.4.3
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	346,6	1512,8	1954,3		5.3.4.4
Отчисления во внебюджетные фонды	909,84	3971,3	5130,27		5.3.4.5
Накладные расходы	612,68	2674,17	3454,61		5.3.4.6
Бюджет затрат НТИ	4535,24	275355,42	281132,52	146132,52	Сумма статей с 5.8.1 по 5.8.5

6.7 Определение ресурсной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

6.7.1 Интегральный финансовый показатель

Данный показатель можно определить по формуле (53):

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (53)$$

где Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральные показатели для различных исполнений приведены ниже:

$$- I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = 0,979;$$

$$- I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = 1;$$

$$- I_{\text{финр}}^{\text{исп.}3} = 0,519.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

6.7.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (54)$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – экспериментально установленная бальная оценка варианта разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения

Критерии / Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп. 2	Исп. 3
1. Удобство при разработке	0,25	4	3	3
2. Удобство в эксплуатации	0,23	5	4	4
3. Удобство в дальнейшей поддержке проекта	0,15	5	3	3
4. Уменьшение времени разработки	0,15	5	3	2
5. Производительность	0,12	4	3	3
6. Использование наработок и компонентов в других проектах	0,1	5	4	3
Итого	1	4,63	3,33	3,08

6.7.3 Сравнительная эффективность проекта

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле (55):

$$I_{исп.i} = \frac{I_{pi}}{I_{финр}} \quad (55)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта, которая рассчитывается по формуле (56):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (56)$$

Сравнительная эффективность разработки приведена в таблице 15.

Несмотря на то, что первый вариант исполнения оказался не самым эффективным, необходимо учитывать то, что оборудование, применяемое для данной разработки, используется не только в данном проекте.

Таблица 15 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,979	1	0,519
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,63	3,33	3,08
3	Интегральный показатель эффективности	4,73	3,33	5,93
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,42	0,8

6.8 Выводы к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

В данном разделе были рассмотрены такие вопросы как оценка коммерческого потенциала НИ, планирование и формирование бюджета научных исследований, а также определение ресурсной и экономической эффективности исследования.

Были определены потенциальные потребители результатов исследования: научная лаборатория, промышленная компания и физическое лицо. Проанализированы конкурентные технические решения. Научное исследование состоит из 10 работ, которые выполняются двумя исполнителями – научным руководителем и студентом. Определена трудоемкость выполнения работ, которая составила 271 день. Разработан график проведения научного исследования, а также рассчитан бюджет научно-технического исследования: стоимость расходных материалов составила 255560 руб., оклад исполнителей – 4535,24 руб. у научного руководителя и 19795,42 руб. у студента.

Определены интегральный финансовый показатель, интегральный показатель ресурсоэффективности и сравнительная эффективность проекта. Несмотря на то, что данное научное исследование оказалось не самым эффективным, необходимо учитывать то, что оборудование, применяемое для данной разработки, используется не только в данном проекте.

Заключение

В ходе данной выпускной квалификационной работы был разработан алгоритм автоматической калибровки сенсоров в беспроводной сенсорной сети AutoWSN. Были проанализированы существующие методы калибровки сенсоров БСС, сформулированы требования к алгоритму и на их основе было принято решение разрабатывать алгоритм на основе метода комплексирования интервальных данных агрегированием предпочтений.

Также было разработано программное обеспечение для метода «простой» калибровки и алгоритма AutoWSN. Проводились экспериментальные исследования двух алгоритмов автокалибровки, по результатам которых был сделан вывод о том, что в среднем метод AutoWSN выигрывает по точности в 2,3 раза у метода «простой» калибровки.

Так как в основу разработанного алгоритма положен робастный метод, который позволяет определить точное значение на основании неполных, неточных, несогласованных данных, отсутствует необходимость проведения предварительной калибровки сенсоров. Данный алгоритм может работать при минимальном количестве узлов БСС от 4 шт. Также поскольку алгоритм работает на центральном узле, который подключен к бытовой сети электропитания и не имеет ограничений по питанию, для узлов и главы кластера не будет дополнительной вычислительной нагрузки и затрат на передачу данных. Учитывая это, можно сделать вывод, что данный алгоритм соответствует заданным требованиям.

Список публикаций студента

1 E.S. Bauer. Automated wireless system for measuring environmental parameters based on NI myRIO platform // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». – 2018 – Томск: Д-Принт. – С. 154-155.

2 Е.С. Бауэр. Автоматизированная беспроводная система измерений параметров окружающей среды на базе платформы NI myRIO // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2017– СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. – С. 147-149.

3 Е.С. Бауэр. Моделирование метода «простой» калибровки беспроводной сенсорной сети // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием. Информационные технологии и системы. – 2018 – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal: Wireless sensor network survey. Computer Networks, volume 52, issue 12, pp. 2292–2330, 2008.
- 2 Takruri, M., Challa, S., Yunis, R.: Data fusion techniques for auto calibration in wireless sensor networks. 12th International Conference on Information Fusion, No. 5203880, pp. 132-139, 2009;
- 3 Fadi Kizel, Yael Etzion, Rakefet Shafran-Nathan, Ilan Levy, Barak Fishbain, Alena Bartonova, David M. Broday: Node-to-node field calibration of wireless distributed air pollution sensor network. Environmental Pollution, 1-10, 2017.
- 4 Wang, YZ., Yang, AQ., Chen, XM., Wang, PJ., Wang, Y., Yang, HZ.: A Deep Learning Approach for Blind Drift Calibration of Sensor Networks. IEEE Sensors Journal, volume 17, issue 13, pp. 4158-4171, 2017.
- 5 Lau, B., Lyons, M.: Lazy Calibration for Wireless Sensor Networks. 2008.
- 6 Rui Tan, Guoliang Xing, Zhaohui Yuan, Xue Liu, Jianguo Yao.: System-level Calibration for Data Fusion in Wireless Sensor Networks. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN). volume 9, issue 3, 2013.
- 7 Худоногова, Л.И. Комплексование интервальных измерительных данных методом агрегирования предпочтений: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.11.13 / Л.И. Худоногова // ТПУ; науч. рук. С. В. Муравьев. – Томск, 2017.
- 8 Muravyov, S.V.: Dealing with chaotic results of Kemeny ranking determination. Measurement, volume 51, pp. 328-334, 2014.
- 9 Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ. Официальный текст. – М.: Пропаганда: Омега-Л, 2002. – 176 с.
- 10 ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. М.: Изд-во стандартов, 1978. – 9 с.
- 11 ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Изд-во стандартов, 2016. – 16 с.

12 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – М.: Минздрав России, 2016. – 69 с.

13 Свод правил: СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. М.: М.: Стандартинформ, 2017. – 108 с.

14 ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности – М.: Стандартинформ, 2015. – 24 с.

15 Санитарные нормы: СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. – М.: Минздрав России, 1996. – 8 с.

16 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997. – 20 с.

17 ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 67 с.

Приложение А

(обязательное)

Раздел 1

Calibration methods of wireless sensor networks

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ71	Бауэр Евгения Сергеевна		

Консультант проф. кафедры:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Худоногова Людмила Игоревна	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Диденко Анастасия Владимировна	к.ф.н.		

1 Calibration methods of wireless sensor networks

A wireless sensor network (WSN) is composed of a group of small and inexpensive *nodes* with the ability of sensing, measuring, data processing, and communication. WSNs can gather information from the environment and transmit the collected data to users [1]. They have important usage in many emerging applications such as environmental monitoring, smart cities, precise agriculture, etc. In recent years, mature WSN technologies have made it possible to deploy large-scale WSNs in hard-to-reach places.

WSN nodes contain sensors of physical quantities, a processor, a memory device for wireless data transmission and a battery. These nodes are typically deployed in masse and must be cheaply produced.

Sensor networks can be implemented using various topologies, examples of which are presented in figure A.1. The “Point-to-point” topology involves the connection of two nodes directly. In the “star” topology, all network nodes are attached to the central node, forming a WSN cluster. The “Cluster tree” topology is formed by connecting each node of a higher level with nodes of a lower level by a star-shaped link. It forms a set of *clusters*, each of which has a *cluster head*. The Mesh topology is built on the principle of cells, in which network nodes are connected to each other and are able to assume the role of head of the cluster for the other nodes.

A *central node* (CN) is a computer on which information is collected, processed and stored. Such a node does not have an independent power package, but receives energy from the network. *Neighboring nodes* (neighbors) will be called nodes belonging to the same cluster or located in the same region of interest within the transmission range of each other.

- Node-to-node calibration;
- Deep neural network “Projection-Recovery network” (PRNet);
- Lazy calibration;
- Two-tier system-level calibration.

2 Node-to-node calibration

The Node-to-node (N2N) calibration method is based on calibration of a chain of autonomous sensors, i.e., inaccessible to service personnel. This calibration is performed with minimal interruption to the continuous measurement and fewer hops of the nodes between their deployment sites and the reference (AQM) site [3].

WSN sensors require proactive frequent calibrations; therefore, a calibration procedure that involves a smaller number of collocations at central nodes is advantageous as it enables versatile calibration logistics. Moreover, continuous measurement at the deployment sites guarantees little missing data and better spatial and temporal analyses. Reducing the number of collocations is also cost effective and environmentally friendly, since WSNs may be deployed quite far from central nodes, i.e. the nodes may be closer to each other than to a distant central node.

Assuming $S \leftarrow s_1 \leftarrow s_2 \leftarrow s_3 \leftarrow \dots \leftarrow s_{n-1} \leftarrow s_n$ represent a sequence of collocated nodes, as shown in figure A.2, such that the sensor s_1 is collocated next to an CN S for a period T . Then it is relocated and collocated with the sensor s_2 (during a non-overlapping period T). Next, the sensor s_2 is relocated and collocated with the sensor s_3 , etc. Finally, the last sensor s_n is collocated next to the sensor s_{n-1} . At this stage, the sensor s_n can be N2N calibrated against the S data. Yet, the process can end also by relocating the sensor s_n to the central node S , such that the N2N calibration process can be evaluated. Namely, the N2N calibration procedure proposes that all the sensors ($s_1; s_2; \dots; s_n$) are calibrated one against the other in a sequential manner, with all of them (but s_1) not collocated at the CN.

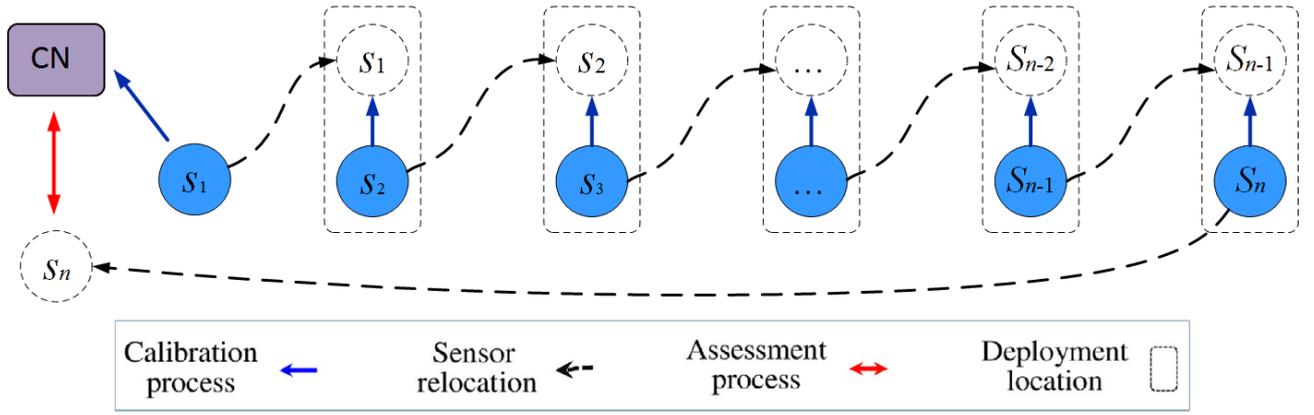


Figure A.2 – Schematic representation of the N2N calibration process

Assuming a linear relationship between measurements by the reference device and by the WSN sensor, which is represented by the formula (1):

$$y = \alpha \cdot x + \beta + e, \quad (1)$$

where y is measurements by the reference device;

x is measurements by WSN sensor;

α is a slope of the linear model;

β is an intercept of the linear model;

e is a vector of the model errors, which are assumed to have a zero mean.

The calibrated measurements \hat{x} are given by (2):

$$\hat{x} = \hat{\alpha} \cdot x + \hat{\beta}, \quad (2)$$

where $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ are the estimated coefficients that are obtained using the collocation data.

Supposing the sensor s_1 be collocated next to the central node S for a time-period T_1 and the sensor s_2 be collocated next to the sensor s_1 for a consecutive time-period T_2 that does not overlap with T_1 . Assuming there are linear relationships between the sensors and CN data, the N2N calibration process implies that we can obtain the calibrated measurements \hat{x}_2 of the sensor s_2 by applying Eq. (2).

Namely, by performing a sequence of sensor-to-sensor calibration we can first obtain calibration of the raw data from the sensor s_1 against the reference data S by applying Eq. (3):

$$\hat{x}_{\text{CN} \leftarrow 1} = \hat{\alpha}_1 \cdot x_1 + \hat{\beta}_1. \quad (3)$$

Then the calibrated sensor is used to indirectly calibrate the sensor s_2 to the reference records, by calibrating it to s_1 while they are collocated,

$$\hat{x}_2 = \hat{\alpha}_1 \cdot \hat{x}_{1 \leftarrow 2} + \hat{\beta}_1 = \hat{\alpha}_1 \cdot (\hat{\alpha}_2 \cdot x_2 + \hat{\beta}_2) + \hat{\beta}_1 = (\hat{\alpha}_1 \cdot \hat{\alpha}_2) \cdot x_2 + (\hat{\alpha}_1 \cdot \hat{\beta}_2 + \hat{\beta}_1). \quad (4)$$

For the n^{th} sensor:

$$\hat{x}_n = \left(\prod_{i=1}^n \hat{\alpha}_i \right) \cdot x_n + \sum_{j=2}^n \left(\left(\prod_{i=1}^{j-1} \hat{\alpha}_i \right) \cdot \hat{\beta}_j \right) + \hat{\beta}_1. \quad (5)$$

The disadvantages of the node-to-node calibration method are:

- estimation errors of the regression coefficients of each sensor in the calibration chain propagate throughout the N2N calibration procedure and accumulate in the overall calibration error;
- frequent relocations of nodes to the central node for calibration involve also loss of measurements until the sensors are returned to their prescribed deployment sites;
- normalized calibration error is larger for lower concentrations, x_n , regardless of the sensor sequence length, and it increases with the sensor sequence length and can attain large values for long chains.

This method is more suitable for a small number of sensors. In practice, this means that large WSNs will require a large number of additional nodes to ensure reliable node-to-node calibration.

3 Deep neural network “Projection-Recovery network”

Projection-Recovery network (PRNet) is a novel deep neural network architecture, which can automatically extract spatial and temporal features from sensory data and generate recovered measurements with a systematic error (drifted measurements) [4].

WSNs can scale out to hundreds of sensors, which are often deployed in nearly inaccessible locations. It is infeasible to unmount and recalibrate the sensors

individually. Therefore, there is an urgent need to calibrate the sensors without the true value of a quantity. This problem is called blind calibration.

In [4], Wang et al. propose a convolutional neural network (CNN) to blindly calibrate general monitoring sensor networks. The proposed method directly maps the measurements with systematic error to measurements without it. Similar to the subspace and prediction methods, the calibration function is learned from the sensory data. However, the subspace and prediction methods have two steps:

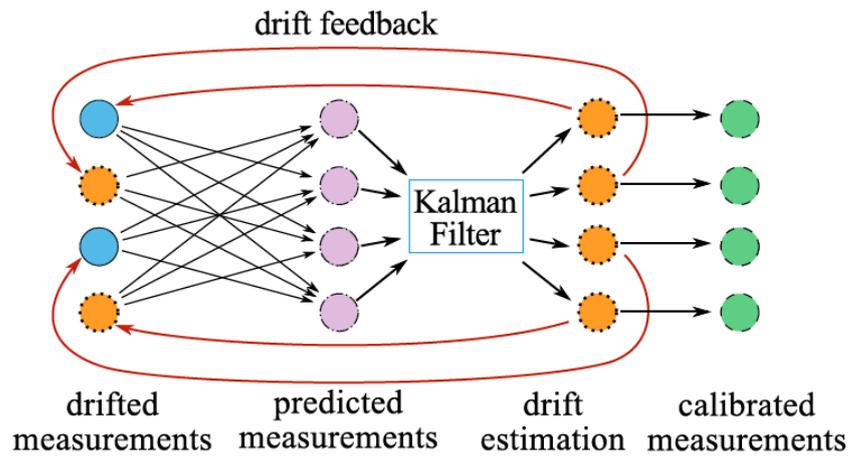
- 1) learning the subspace or prediction function;
- 2) recovering sensory data using pre-defined rules.

In these two steps, only the learning step can fully utilize data features. The proposed neural network is an end-to-end method, where the feature learning and the drift compensation steps are modeled as different layers, which are jointly trained using sensory data. This means that the proposed method can make better use of data correlations and learn a better data model. Figure A.3 shows a comparison of blind calibration methods.

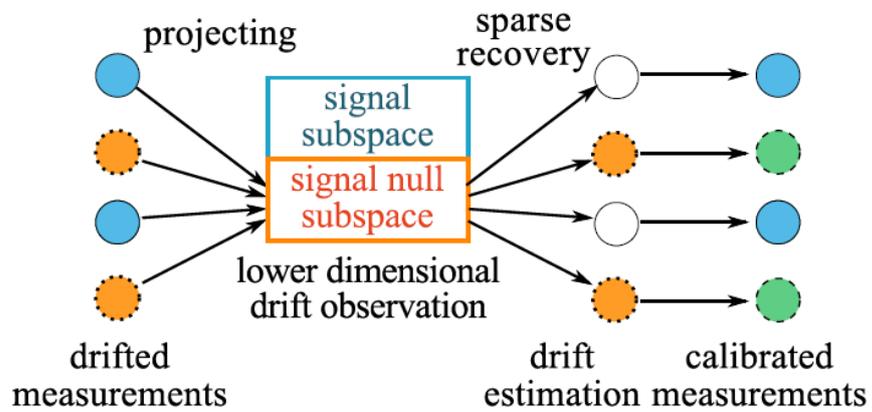
Experiments show that PRNet are more stable and more accurate, and can also correct measurements with different types of errors. Therefore, for long-term general monitoring networks with sensors deployed in fixed locations, the proposed method can blindly calibrate the sensors, ensuring the quality and reliability of the data.

The network operation algorithm consists of the following two processes:

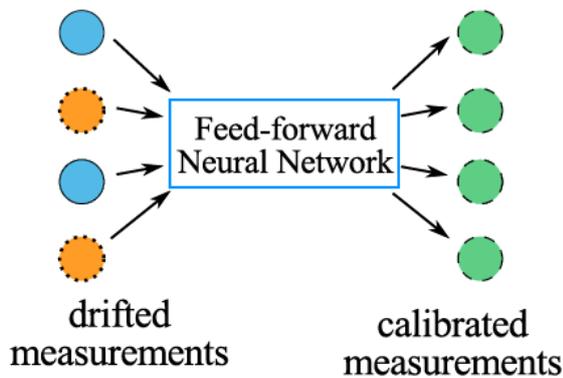
- 1) Network training:
 - sensors are calibrated before deployment, therefore the measurements collected during the initial period can be considered as measurements without systematic error;
 - increase of data by generating learning data from initial measurements;
 - PRNet training for automatic extraction of spatial and temporal characteristics of sensor measurements and suppression of systematic error.
- 2) Correction of data obtained from WSN.



a)



b)



c)

- drifted sensor calibration result
- normal sensor intermediate result

a) the prediction-estimation-feedback loop of prediction-based methods;

b) the process of subspace-based calibration method;

c) the neural network calibration method

Figure A.3 – Comparison of blind calibration methods

The training process of a neural network is to minimize a loss function with respect to input data by adjusting the network parameters. The loss function of PRNet includes the projection loss and the recovery loss, denoted as

$$L_{PR} = L_P + L_R, \quad (6)$$

where L_P is the projection loss; L_R is the recovery loss.

The key function of the projection layer is to obtain a drift observation from drifted measurements to approximate the projected ground truth drift. Therefore, the projection loss is designed as

$$L_P = \frac{1}{2|\mathbf{D}|N \cdot T_P} \sum_{i \in \mathbf{D}} \|f_P(Y_i^P) - f_P(Y_i^P - X_i^P)\|_F^2, \quad (7)$$

where X^P and Y^P are patches of drift-free and drifted measurements;

f_P represents the function of the projection layer;

\mathbf{D} represents the training dataset;

N is number of sensors;

T_P is the period.

For the recovery loss, we simply use the mean square error between the calibrated measurements and the ground truth signal:

$$L_R = \frac{1}{2|\mathbf{D}|N \cdot T_P} \sum_{i \in \mathbf{D}} \|f_{PR}(Y_i^P) - X_i^P\|_F^2, \quad (8)$$

where f_{PR} denotes the overall forward function of PRNet.

The disadvantages of this WSN calibration method are:

- the need for pre-calibration of sensors before deploying WSN;
- the possibility of unreliable measurements after preliminary calibration of the sensors;
- the need for a large amount of data for training, i.e. data generation is required;
- consideration of many factors by the generation algorithm;
- the need for prior training of the neural network, therefore, the high cost of temporary resources.

Таблица Б.1 – Сгенерированные измеренные значения

№ эксперимента	Номер узла														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	20,072	20,023	19,931	20,170	19,953	19,783	20,039	20,098	19,810	20,081	20,282	20,133	20,080	19,720	19,938
2	20,225	19,913	19,670	19,981	19,682	20,257	20,186	19,907	20,145	20,252	19,987	19,999	20,103	20,006	20,001
3	20,002	19,985	20,039	20,038	19,959	19,983	19,976	20,058	20,065	19,998	19,972	20,040	19,964	19,988	20,008
4	19,474	20,051	19,823	19,746	20,122	20,172	20,415	19,519	19,728	20,122	19,707	19,968	19,857	19,555	20,362
5	19,793	19,960	19,780	19,822	19,466	20,195	19,787	20,046	20,070	19,819	20,037	20,300	20,329	20,169	19,926
6	20,032	19,881	19,905	19,808	20,094	19,827	20,126	19,689	19,957	19,801	19,545	19,837	19,704	19,766	19,788
7	20,053	19,828	20,001	19,998	19,969	20,004	20,100	20,291	20,278	20,114	20,305	20,510	20,089	19,935	19,937
8	20,178	19,479	19,319	20,193	19,971	20,700	20,219	20,349	20,374	19,971	20,356	20,392	19,725	20,400	20,522
9	20,433	19,924	19,613	19,671	20,836	20,512	19,692	20,244	19,839	20,227	20,041	20,039	19,751	20,259	20,316
10	20,160	20,218	20,510	19,888	19,562	20,261	19,933	19,892	20,083	20,140	19,923	20,189	20,180	20,568	19,700
11	19,994	20,008	19,987	19,997	19,984	19,997	20,001	20,001	20,006	19,993	20,008	20,010	19,988	20,014	20,005
12	20,035	19,970	19,893	19,928	19,969	19,948	20,117	20,007	19,889	19,926	20,106	19,997	19,984	20,093	19,983
13	19,997	20,001	20,005	20,001	19,997	19,998	20,001	19,998	19,996	19,999	20,004	19,998	19,998	20,007	20,002
14	19,985	20,017	19,984	19,900	20,066	19,957	19,979	19,961	19,933	19,936	19,941	19,951	20,094	20,050	19,954
15	19,686	20,034	20,372	19,999	19,720	19,685	20,064	20,016	20,212	19,677	20,182	20,397	20,343	19,688	20,266
16	19,719	20,172	19,698	20,010	20,193	20,086	19,313	20,279	20,049	20,064	20,298	19,707	19,801	20,182	19,672
17	20,057	19,798	19,655	20,023	20,033	20,303	19,983	19,956	19,945	20,415	19,735	20,078	20,048	19,861	20,177
18	20,049	19,937	19,936	20,009	20,033	19,987	19,967	19,945	20,066	19,982	20,006	20,029	19,936	19,973	19,969
19	20,082	19,868	19,800	19,870	19,942	19,504	19,936	20,425	20,273	20,015	19,924	20,306	20,175	19,440	20,154

Результаты экспериментальных исследований

(обязательное)

Приложение Б

Продолжение таблицы Б.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20	20,056	19,777	19,737	19,999	20,041	20,007	20,204	20,085	20,202	19,745	20,051	19,913	19,936	20,005	20,176
21	19,779	19,835	19,844	20,293	19,986	20,312	19,978	20,089	20,280	19,900	20,263	19,808	20,075	19,786	19,846
22	19,905	20,060	19,935	20,168	20,100	20,075	20,075	20,078	19,950	20,000	19,991	20,108	19,979	20,005	20,185
23	19,994	19,985	19,996	19,992	20,018	19,962	20,048	20,017	20,103	19,963	19,979	19,984	19,962	20,049	19,999
24	20,014	20,076	20,132	19,945	20,044	20,041	19,936	19,931	19,858	20,067	20,085	19,954	19,963	19,936	19,996
25	19,281	20,048	20,098	20,142	19,574	19,532	20,182	19,808	20,122	20,113	20,254	19,906	20,580	20,294	19,934
26	20,029	20,000	20,065	19,997	20,048	19,933	19,885	19,976	20,161	19,993	19,911	20,248	20,059	20,061	19,867
27	20,086	19,944	19,962	19,821	19,821	19,932	19,904	19,868	20,015	19,986	20,019	19,916	19,955	19,976	19,887
28	19,987	19,988	19,985	20,003	20,006	20,006	20,004	19,994	19,981	19,984	19,998	20,009	20,004	19,998	19,991
29	20,007	20,045	20,347	19,688	19,857	19,668	20,196	20,004	19,898	20,206	19,838	19,682	19,805	20,094	19,813
30	20,047	20,114	20,048	19,941	20,002	20,171	20,290	20,020	19,858	20,007	20,048	20,194	19,905	20,041	20,011
31	19,918	19,923	19,988	19,915	20,043	20,020	19,964	19,935	19,833	19,997	19,792	19,940	19,983	20,027	20,217
32	20,147	20,522	20,087	20,082	19,904	19,705	19,974	20,019	20,474	20,121	20,180	20,151	20,250	19,775	20,038
33	20,064	19,866	19,846	19,544	19,810	19,584	20,018	20,440	20,238	20,348	19,983	20,525	19,828	19,864	19,609
34	20,197	20,502	20,401	20,149	19,967	20,031	19,980	20,312	20,423	20,046	19,291	20,226	20,523	20,672	20,522
35	19,658	19,595	20,101	20,824	20,650	20,075	20,067	20,072	20,016	20,274	19,910	20,240	20,443	20,189	19,670
36	19,956	19,914	19,780	20,006	19,850	19,874	19,738	20,365	19,890	20,004	19,736	19,981	19,765	19,932	19,895
37	20,144	19,947	19,357	20,023	19,762	19,775	19,800	19,864	19,692	19,881	19,698	19,759	19,772	19,808	20,142
38	19,832	20,018	19,893	19,843	19,871	19,791	19,875	19,875	20,021	20,029	20,109	20,154	20,292	20,147	19,968
39	20,033	19,956	19,964	20,034	20,005	20,071	19,998	19,917	19,902	20,115	19,732	19,795	20,020	19,828	19,978
40	19,876	20,220	19,925	20,170	20,431	19,993	19,794	20,026	19,717	20,067	19,910	20,357	19,943	19,825	20,352
41	19,991	19,941	20,032	20,106	20,077	19,892	19,892	20,019	19,858	19,851	20,056	19,893	20,096	20,102	19,834
42	20,329	19,890	20,073	19,913	19,791	20,132	19,905	20,170	19,837	20,057	19,939	20,027	20,097	20,050	19,947
43	19,785	20,178	20,371	19,591	20,234	19,650	20,628	19,886	19,750	19,377	20,925	19,820	19,018	20,075	20,750
44	19,605	20,125	20,126	19,907	19,808	19,916	19,952	19,897	19,690	19,616	20,089	20,255	19,818	20,102	20,168
45	19,989	20,001	19,997	20,000	20,002	19,993	19,999	19,995	20,003	19,994	19,995	20,013	20,005	19,986	20,009

Продолжение таблицы Б.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
46	20,052	19,952	20,024	20,015	20,330	19,913	19,908	19,475	19,902	19,923	20,183	19,916	20,142	19,607	19,788
47	20,768	20,758	20,239	19,799	19,812	19,933	20,030	20,096	19,493	19,949	20,281	19,474	19,648	20,389	20,563
48	20,322	20,583	20,264	19,992	20,105	19,725	19,714	19,920	21,014	20,103	19,818	20,021	20,662	20,182	19,697
49	20,321	20,051	19,965	20,392	20,051	20,216	20,524	19,796	19,713	19,883	20,237	19,901	20,192	19,974	20,298
50	20,045	19,901	19,864	19,914	20,063	20,073	19,973	20,027	19,905	20,172	19,941	20,114	19,889	20,196	19,985
51	19,649	20,039	20,056	19,636	20,166	19,824	19,690	20,238	19,834	19,972	20,000	19,908	19,636	19,554	20,336
52	19,924	20,148	19,967	19,966	19,706	20,058	19,883	19,972	20,127	19,839	20,098	19,950	20,129	20,001	20,162
53	19,422	19,966	20,004	19,657	19,975	20,443	20,059	19,753	20,192	19,557	20,198	19,860	19,467	20,099	19,680
54	19,786	19,878	20,002	20,009	20,015	19,994	19,837	19,744	19,700	20,037	19,810	19,751	19,885	19,944	20,062
55	19,962	20,147	19,770	20,037	19,830	19,829	20,014	19,898	20,112	20,051	20,170	19,930	20,167	20,050	19,612
56	19,767	19,935	19,975	19,779	20,117	19,957	19,908	19,975	20,096	19,862	19,997	19,938	20,273	19,949	19,908
57	19,772	20,079	19,981	19,983	19,820	20,017	20,082	19,948	19,828	20,022	20,025	19,831	20,049	19,717	20,083
58	19,956	20,109	19,900	19,898	20,323	19,966	19,830	19,752	19,784	20,066	20,026	20,237	19,873	20,140	19,907
59	19,994	20,588	20,520	20,446	19,711	19,846	20,105	20,537	19,480	19,868	20,331	20,281	20,449	20,058	20,050
60	19,681	20,317	19,969	19,820	20,198	20,272	19,940	20,082	20,113	20,204	19,915	20,141	20,053	19,851	19,949
61	20,004	19,980	20,052	20,010	19,892	20,078	20,109	19,971	19,959	19,919	20,000	19,832	20,033	20,041	19,966
62	19,977	19,957	20,014	20,013	19,999	20,028	19,995	19,999	19,973	19,980	19,983	19,949	19,992	19,970	19,983
63	20,196	19,989	20,050	19,933	19,753	19,739	19,931	20,005	19,787	19,692	19,877	19,919	20,598	19,968	20,181
64	20,044	20,090	19,877	20,003	19,894	19,985	20,048	20,011	20,077	19,872	19,810	19,969	19,899	20,021	20,084
65	19,993	20,006	19,979	20,001	20,013	19,992	20,025	19,962	19,992	20,028	19,976	20,017	19,993	19,985	20,011
66	20,591	20,071	20,463	20,211	20,087	19,767	20,128	19,722	19,928	19,911	19,676	19,635	19,439	20,301	20,448
67	19,919	20,033	19,930	20,083	20,066	19,913	19,827	19,937	20,143	20,036	20,097	19,986	19,944	19,917	20,067
68	19,877	19,946	20,189	19,948	19,898	20,098	20,188	20,190	20,004	19,811	20,006	20,044	20,049	19,977	19,935
69	19,740	20,099	20,432	20,352	20,105	20,271	19,559	20,279	20,599	19,808	19,756	20,038	20,161	19,519	20,305
70	19,977	19,923	20,125	20,317	20,036	19,628	20,577	19,809	19,950	20,056	19,811	20,103	19,828	19,959	20,081
71	19,508	20,223	20,235	19,762	20,003	20,020	20,151	19,944	20,004	19,993	20,059	19,724	19,861	20,091	20,648

Продолжение таблицы Б.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
72	20,083	20,172	19,834	19,828	20,169	19,791	19,927	20,178	19,973	20,267	20,043	20,250	20,141	19,909	20,044
73	20,004	19,992	20,084	19,959	20,071	19,878	19,941	19,989	19,949	20,122	19,953	20,057	20,053	20,092	19,980
74	20,014	20,029	19,999	20,015	19,977	20,016	19,968	19,963	20,041	19,974	20,008	20,023	20,027	19,979	19,992
75	19,971	19,978	20,027	19,973	20,042	19,985	19,926	20,029	20,013	19,968	19,947	19,954	19,994	20,015	19,949
76	20,001	20,048	20,133	20,103	19,952	20,070	19,957	19,917	19,983	19,934	19,962	20,178	19,964	20,122	19,939
77	20,443	20,318	19,655	20,636	20,077	20,288	19,981	20,196	20,102	19,846	20,249	20,598	19,816	20,220	20,181
78	19,924	19,969	20,093	19,961	19,934	19,832	20,022	19,846	20,058	20,077	20,132	19,917	20,078	19,992	20,159
79	20,104	19,881	19,919	19,974	19,962	20,104	20,237	19,891	20,140	20,002	19,997	19,822	19,806	20,044	20,148
80	19,987	19,818	19,890	20,023	19,937	20,147	20,060	19,887	19,919	20,122	20,006	19,925	20,040	19,829	20,124
81	19,984	20,002	19,990	19,979	20,001	19,985	19,995	19,991	19,994	20,003	19,987	20,004	20,025	19,981	19,983
82	20,003	19,989	19,970	19,966	20,023	19,992	19,985	19,985	20,012	20,029	19,996	19,997	19,984	19,961	20,001
83	19,894	20,328	20,199	19,723	19,839	19,865	20,125	19,919	20,118	20,357	19,771	20,186	20,023	20,156	19,805
84	20,318	19,670	19,691	20,226	19,736	19,968	19,697	20,158	20,228	19,940	20,071	19,876	20,036	19,950	20,091
85	19,984	20,023	20,010	20,028	20,007	19,985	20,021	19,988	20,003	20,016	20,006	19,987	19,951	19,984	20,037
86	19,953	19,992	19,972	20,007	19,976	20,014	19,972	20,026	20,008	19,997	19,972	19,981	19,997	20,077	20,003
87	20,012	20,037	19,946	19,792	20,088	20,092	19,980	19,925	19,914	19,885	19,838	19,842	19,790	20,207	19,887
88	20,014	20,164	20,341	20,109	20,062	20,102	20,132	20,137	20,153	19,609	19,960	20,058	19,878	19,989	20,257
89	20,273	20,102	20,273	20,016	19,573	19,712	20,075	19,953	19,792	19,904	20,103	20,038	20,057	20,246	19,850
90	20,028	20,023	19,980	19,906	19,950	20,170	19,738	19,945	20,004	20,052	20,062	19,979	19,931	20,034	19,904
91	19,931	20,350	19,788	19,697	19,870	19,814	19,935	20,112	19,961	19,885	20,102	20,048	19,928	20,125	19,909
92	20,070	19,540	19,748	19,269	19,740	19,723	19,759	19,613	20,469	19,976	20,324	20,302	19,923	20,416	19,984
93	19,992	19,661	19,741	20,074	19,712	19,752	19,738	20,530	20,151	19,959	19,911	19,915	20,042	20,211	20,058
94	19,552	20,066	20,915	19,960	19,626	19,871	19,899	19,941	20,112	20,076	19,997	20,308	20,216	19,917	19,896
95	19,742	19,996	20,121	20,079	19,573	20,706	20,280	19,955	19,703	20,218	19,934	20,319	20,536	19,783	19,548
96	19,846	19,895	19,729	20,255	20,321	20,073	19,473	20,054	19,807	20,224	20,113	20,082	20,256	19,975	20,262
97	19,923	20,382	20,200	20,002	19,768	19,962	20,355	20,031	19,633	20,164	19,743	19,801	19,977	19,685	20,236

Продолжение таблицы Б.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
98	19,947	20,006	20,049	20,043	19,992	19,967	20,031	19,930	20,027	20,051	20,021	19,960	20,005	20,016	19,915
99	20,011	20,093	19,965	19,973	20,079	19,970	20,001	20,047	19,950	19,952	19,931	19,946	19,975	20,003	19,943
100	20,023	19,861	19,936	19,999	20,005	20,099	19,958	19,921	19,943	20,105	19,990	20,024	19,973	19,985	20,126

Таблица Б.2 – Скорректированные значения для каждого узла по методу «простой» калибровки

№ эксперимента	Номер узла														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	20	20,02	19,945	19,997	20,001	20,071	19,964	19,938	19,95	20,099	19,986	20,024	19,981	19,984	20,097
2	20	19,924	19,945	20,136	19,961	19,84	20,032	20,081	19,829	20,077	20,222	20,123	20,056	19,764	19,954
3	20	19,987	19,728	19,988	19,741	20,195	20,156	19,934	20,134	20,238	19,984	20,003	20,079	20,002	20,015
4	20	20,032	20,029	20,032	19,967	19,99	19,981	20,045	20,06	19,997	19,977	20,039	19,977	19,988	20,012
5	20	19,954	19,854	19,795	20,084	20,125	20,315	19,632	19,754	20,115	19,756	19,963	19,877	19,616	20,248
6	20	19,878	19,8	19,855	19,555	20,142	19,825	20,033	20,063	19,822	20,014	20,285	20,234	20,133	19,969
7	20	19,861	19,902	19,821	20,051	19,839	20,071	19,727	19,948	19,806	19,616	19,835	19,742	19,782	19,791
8	20	19,57	20,007	20,019	19,987	20,029	20,095	20,248	20,263	20,11	20,25	20,485	20,101	19,95	19,992
9	20	19,95	19,448	20,193	19,991	20,568	20,204	20,313	20,364	19,97	20,269	20,387	19,895	20,33	20,472
10	20	20,198	19,705	19,754	20,694	20,4	19,77	20,203	19,865	20,219	20,045	20,04	19,859	20,226	20,25
11	20	20,006	20,429	19,909	19,657	20,191	19,957	19,915	20,071	20,138	19,962	20,178	20,131	20,5	19,782
12	20	19,974	19,989	19,998	19,987	19,997	20,001	20,001	20,006	19,994	20,006	20,01	19,992	20,012	20,004
13	20	20,001	19,917	19,939	19,972	19,956	20,093	20,003	19,898	19,931	20,084	19,994	19,989	20,08	19,978
14	20	20,012	20,004	20,001	19,998	19,998	20	19,998	19,996	19,999	20,003	19,998	19,999	20,006	20,001
15	20	20,021	19,987	19,917	20,051	19,964	19,98	19,965	19,937	19,939	19,955	19,952	20,06	20,043	19,956

Продолжение таблицы Б.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	20	20,15	20,291	20,014	19,77	19,786	20,045	20,033	20,198	19,691	20,142	20,378	20,256	19,736	20,232
17	20	19,825	19,756	19,993	20,16	20,045	19,458	20,2	20,034	20,06	20,23	19,723	19,849	20,15	19,74
18	20	19,943	19,711	20,025	20,024	20,233	19,988	19,969	19,957	20,391	19,784	20,077	20,037	19,874	20,152
19	20	19,87	19,944	20,005	20,024	19,987	19,971	19,956	20,059	19,982	19,998	20,026	19,953	19,973	19,975
20	20	19,806	19,813	19,905	19,941	19,645	19,938	20,327	20,252	20,008	19,93	20,291	20,121	19,509	20,141
21	20	19,863	19,779	20,006	20,031	20,014	20,164	20,072	20,188	19,755	20,029	19,922	19,972	19,996	20,143
22	20	20,057	19,865	20,245	19,997	20,244	19,996	20,084	20,26	19,902	20,197	19,828	20,072	19,813	19,91
23	20	19,988	19,952	20,15	20,088	20,076	20,068	20,076	19,963	20,001	19,998	20,106	20,005	20,006	20,158
24	20	20,067	19,998	19,995	20,016	19,974	20,04	20,014	20,093	19,965	19,984	19,985	19,976	20,042	20
25	20	20,042	20,112	19,951	20,036	20,024	19,947	19,944	19,869	20,065	20,069	19,954	19,966	19,949	19,986
26	20	19,998	20,092	20,111	19,661	19,649	20,156	19,858	20,107	20,111	20,218	19,913	20,415	20,269	19,951
27	20	19,942	20,051	20,001	20,04	19,955	19,908	19,984	20,147	19,993	19,931	20,233	20,045	20,053	19,909
28	20	19,99	19,96	19,838	19,842	19,925	19,911	19,88	20,004	19,984	20,002	19,916	19,944	19,973	19,894
29	20	20,037	19,987	20,002	20,004	20,004	20,003	19,995	19,983	19,985	19,998	20,008	20,003	19,998	19,993
30	20	20,107	20,292	19,724	19,878	19,72	20,146	19,969	19,893	20,199	19,884	19,69	19,824	20,086	19,808
31	20	19,929	20,053	19,963	20,008	20,14	20,238	20,028	19,877	20,01	20,048	20,181	19,947	20,042	20,012
32	20	20,449	19,984	19,927	20,027	20,009	19,962	19,942	19,848	19,996	19,832	19,943	19,979	20,018	20,157
33	20	19,877	20,084	20,088	19,936	19,811	19,996	20,044	20,434	20,119	20,158	20,147	20,19	19,822	20,055
34	20	20,445	19,87	19,624	19,836	19,678	20,006	20,317	20,21	20,329	19,987	20,486	19,864	19,877	19,698
35	20	19,68	20,342	20,172	20,004	20,091	20,016	20,278	20,404	20,049	19,493	20,232	20,423	20,594	20,469
36	20	19,916	20,1	20,692	20,564	20,099	20,089	20,09	20,038	20,265	19,961	20,237	20,369	20,182	19,8
37	20	19,926	19,798	19,991	19,861	19,888	19,775	20,251	19,894	19,997	19,775	19,98	19,809	19,92	19,913
38	20	20,008	19,442	19,989	19,769	19,795	19,807	19,858	19,708	19,876	19,719	19,766	19,789	19,804	20,071
39	20	19,958	19,913	19,868	19,891	19,838	19,898	19,902	20,015	20,028	20,087	20,142	20,203	20,129	19,974
40		20,192	19,961	20,02	19,998	20,044	19,992	19,924	19,908	20,107	19,783	19,806	19,995	19,848	19,973

Продолжение таблицы Б.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
41	20	19,949	19,945	20,156	20,354	20,021	19,837	20,041	19,754	20,065	19,934	20,337	19,974	19,853	20,284
42	20	19,905	20,025	20,077	20,062	19,91	19,912	20,007	19,869	19,858	20,045	19,897	20,062	20,088	19,865
43	20	20,164	20,051	19,925	19,827	20,09	19,921	20,119	19,852	20,052	19,952	20,026	20,063	20,039	19,965
44	20	20,1	20,341	19,663	20,187	19,728	20,491	19,924	19,768	19,419	20,728	19,817	19,322	20,078	20,507
45	20	20,001	20,096	19,916	19,83	19,925	19,943	19,914	19,715	19,634	20,058	20,233	19,862	20,081	20,113
46	20	19,95	19,997	20	20,001	19,995	19,999	19,997	20,003	19,994	19,996	20,012	20,004	19,988	20,007
47	20	20,662	20,017	19,999	20,262	19,918	19,915	19,595	19,905	19,927	20,13	19,914	20,077	19,667	19,811
48	20	20,501	20,228	19,832	19,852	19,94	20,028	20,07	19,531	19,961	20,244	19,501	19,74	20,349	20,387
49	20	20,058	20,23	20,022	20,115	19,833	19,802	19,968	20,922	20,103	19,891	20,03	20,487	20,178	19,809
50	20	19,918	19,989	20,336	20,056	20,19	20,437	19,878	19,754	19,893	20,198	19,913	20,169	19,992	20,242
51	20	20,022	19,894	19,928	20,05	20,05	19,979	20,015	19,914	20,164	19,956	20,105	19,925	20,167	19,986
52	20	20,121	20,032	19,695	20,118	19,852	19,728	20,163	19,843	19,97	19,985	19,908	19,713	19,606	20,231
53	20	19,967	19,964	19,975	19,758	20,045	19,905	19,983	20,114	19,845	20,069	19,957	20,092	19,997	20,135
54	20	19,886	20	19,707	19,971	20,303	20,036	19,798	20,163	19,578	20,131	19,861	19,61	20,073	19,726
55	20	20,122	19,99	19,985	19,996	19,966	19,85	19,778	19,719	20,033	19,834	19,76	19,885	19,943	20,016
56	20	19,937	19,817	20,021	19,862	19,862	20,017	19,918	20,095	20,049	20,133	19,931	20,107	20,046	19,695
57	20	20,063	19,973	19,821	20,093	19,965	19,923	19,979	20,085	19,868	19,997	19,942	20,188	19,957	19,928
58	20	20,093	19,978	19,981	19,846	20,005	20,059	19,955	19,841	20,02	20,013	19,84	20,017	19,756	20,053
59	20	20,527	19,93	19,912	20,26	19,967	19,86	19,807	19,8	20,065	20,02	20,214	19,904	20,123	19,91
60	20	20,277	20,446	20,387	19,79	19,925	20,108	20,444	19,542	19,882	20,305	20,273	20,35	20,077	20,076
61	20	19,984	19,985	19,873	20,173	20,224	19,965	20,08	20,108	20,196	19,946	20,136	20,046	19,881	19,977
62	20	19,962	20,041	20,005	19,912	20,053	20,087	19,974	19,962	19,923	20	19,842	20,02	20,035	19,969
63	20	19,976	20,009	20,008	19,997	20,018	19,994	19,996	19,975	19,981	19,984	19,952	19,991	19,973	19,985
64	20	20,071	20,021	19,943	19,788	19,802	19,932	19,997	19,806	19,703	19,902	19,926	20,41	19,97	20,141
65	20	20,004	19,892	20,004	19,907	19,99	20,033	20,005	20,069	19,876	19,843	19,972	19,924	20,009	20,064
66	20	20,065	19,984	20,001	20,01	19,995	20,02	19,971	19,993	20,027	19,98	20,016	19,995	19,987	20,008

Продолжение таблицы Б.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
67	20	20,026	20,386	20,157	20,067	19,813	20,09	19,771	19,928	19,92	19,746	19,652	19,589	20,257	20,306
68	20	19,957	19,941	20,067	20,053	19,936	19,862	19,955	20,129	20,034	20,07	19,987	19,96	19,927	20,053
69	20	20,086	20,152	19,965	19,92	20,08	20,153	20,149	20,007	19,821	20,011	20,044	20,043	19,981	19,961
70	20	19,937	20,328	20,317	20,099	20,247	19,656	20,244	20,557	19,813	19,806	20,056	20,139	19,582	20,301
71	20	20,196	20,112	20,259	20,03	19,731	20,46	19,858	19,959	20,056	19,857	20,093	19,882	19,97	20,05
72	20	20,148	20,207	19,816	20,007	20,024	20,122	19,967	20,005	19,999	20,058	19,743	19,91	20,088	20,485
73	20	19,994	19,875	19,871	20,142	19,858	19,948	20,145	19,979	20,256	20,048	20,235	20,106	19,931	20,04
74	20	20,023	20,074	19,965	20,059	19,906	19,953	19,988	19,953	20,117	19,97	20,052	20,035	20,083	19,98
75	20	19,98	19,998	20,013	19,981	20,013	19,974	19,973	20,037	19,975	20,004	20,022	20,019	19,981	19,997
76	20	20,043	20,02	19,975	20,033	19,985	19,938	20,017	20,01	19,969	19,957	19,956	19,991	20,011	19,958
77	20	20,29	20,109	20,085	19,962	20,054	19,966	19,939	19,985	19,938	19,97	20,167	19,979	20,105	19,959
78	20	19,971	19,732	20,553	20,082	20,27	20,014	20,202	20,113	19,856	20,2	20,574	19,935	20,19	20,201
79	20	19,899	20,08	19,964	19,946	19,87	20,016	19,882	20,05	20,074	20,105	19,921	20,053	19,998	20,114
80	20	19,842	19,937	19,978	19,968	20,076	20,19	19,917	20,127	20,003	19,992	19,833	19,867	20,035	20,107
81	20	20	19,903	20,016	19,944	20,106	20,044	19,912	19,928	20,114	19,995	19,931	20,025	19,85	20,095
82	20	19,989	19,991	19,982	20	19,988	19,995	19,992	19,995	20,003	19,989	20,003	20,016	19,983	19,986
83	20	20,282	19,975	19,972	20,017	19,992	19,987	19,987	20,01	20,028	19,995	19,996	19,986	19,966	19,999
84	20	19,707	20,179	19,777	19,874	19,899	20,104	19,933	20,102	20,344	19,84	20,17	20,003	20,146	19,841
85	20	20,02	19,722	20,175	19,775	19,968	19,752	20,113	20,205	19,935	20,031	19,891	20,026	19,937	20,089
86	20	19,993	20,009	20,023	20,006	19,989	20,017	19,992	20,003	20,016	20,004	19,988	19,966	19,987	20,027
87	20	20,028	19,976	20,005	19,98	20,01	19,978	20,018	20,007	19,997	19,978	19,983	19,999	20,065	20,003
88	20	20,147	19,956	19,821	20,065	20,051	19,977	19,925	19,915	19,89	19,869	19,846	19,836	20,172	19,888
89	20	20,086	20,279	20,108	20,059	20,103	20,11	20,126	20,147	19,631	19,975	20,061	19,937	19,993	20,217
90	20	20,018	20,226	19,996	19,647	19,765	20,052	19,948	19,803	19,911	20,086	20,03	20,024	20,215	19,867
91	20	20,293	19,98	19,916	19,956	20,114	19,788	19,95	19,998	20,048	20,041	19,979	19,941	20,025	19,922
92	20	19,583	19,831	19,75	19,887	19,852	19,944	20,078	19,957	19,891	20,08	20,039	19,936	20,106	19,912

Продолжение таблицы Б.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
93	20	19,702	19,786	19,382	19,766	19,752	19,786	19,679	20,409	19,974	20,227	20,274	19,933	20,344	19,962
94	20	20,06	19,766	20,052	19,757	19,807	19,786	20,387	20,135	19,954	19,92	19,926	20,032	20,162	20,062
95	20	20,005	20,744	19,966	19,702	19,902	19,914	19,953	20,099	20,075	20,012	20,29	20,144	19,942	19,933
96	20	19,912	20,094	20,077	19,662	20,541	20,237	19,981	19,74	20,206	19,958	20,305	20,387	19,823	19,692
97	20	20,329	19,776	20,213	20,266	20,066	19,586	20,054	19,832	20,211	20,088	20,084	20,197	19,978	20,225
98	20	20,006	20,167	20,004	19,809	19,976	20,279	20,021	19,667	20,158	19,809	19,811	19,962	19,737	20,164
99	20	20,08	20,044	20,032	19,995	19,973	20,027	19,946	20,023	20,05	20,019	19,961	20,001	20,016	19,931
100	20	19,88	19,973	19,978	20,064	19,977	20,001	20,033	19,953	19,955	19,948	19,948	19,977	20,003	19,95

Таблица Б.3 – Результаты проведения калибровки по алгоритму AutoWSN

№ эксперимента	Скорректированное значение	Поправка Δ_k ,	Отклонение ξ	Неопределенность U
1	20,001	0,022	0,001	0,719
2	19,963	0,050	0,037	0,706
3	20,012	0,027	0,012	0,947
4	19,944	0,107	0,056	0,529
5	19,898	0,062	0,102	0,569
6	19,836	0,045	0,164	0,71
7	20,169	0,341	0,169	0,659
8	20,009	0,530	0,009	0,31
9	20,224	0,300	0,224	0,388
10	20,065	0,153	0,065	0,497
11	19,999	0,009	0,001	0,985
12	20,003	0,033	0,003	0,886
13	20,002	0,001	0,002	0,994
14	19,997	0,020	0,003	0,903
15	20,037	0,003	0,037	0,64
16	19,806	0,366	0,194	0,508
17	20,035	0,237	0,035	0,62
18	20,001	0,064	0,001	0,935
19	19,932	0,064	0,068	0,508
20	19,97	0,193	0,03	0,767
21	20,045	0,210	0,045	0,733
22	20,045	0,015	0,045	0,86
23	20,032	0,047	0,032	0,93
24	19,995	0,081	0,005	0,863
25	19,931	0,117	0,069	0,351
26	20,057	0,057	0,057	0,81
27	19,953	0,009	0,047	0,867
28	19,995	0,007	0,005	0,986
29	20,008	0,037	0,008	0,661
30	20,074	0,040	0,074	0,784
31	20,004	0,081	0,004	0,788
32	20,114	0,408	0,114	0,591
33	20,034	0,168	0,034	0,51
34	19,981	0,521	0,019	0,31
35	20,21	0,615	0,21	0,386
36	20,05	0,136	0,05	0,685
37	19,75	0,197	0,25	0,606
38	20,042	0,024	0,042	0,749
39	19,924	0,032	0,076	0,808
40	20,074	0,146	0,074	0,643
41	19,97	0,029	0,03	0,864
42	20,06	0,170	0,06	0,731

Продолжение таблицы Б.3

№ эксперимента	Скорректированное значение	Поправка Δ_k ,	Отклонение ξ	Неопределенность U
43	19,972	0,206	0,028	0,047
44	19,93	0,195	0,07	0,675
45	20	0,001	0	0,987
46	19,902	0,050	0,098	0,573
47	20,121	0,637	0,121	0,353
48	19,802	0,781	0,198	0,14
49	20,119	0,068	0,119	0,595
50	20,03	0,129	0,03	0,834
51	19,945	0,094	0,055	0,609
52	19,934	0,214	0,066	0,772
53	19,932	0,034	0,068	0,49
54	19,881	0,003	0,119	0,819
55	19,891	0,256	0,109	0,721
56	20,02	0,085	0,02	0,747
57	19,9	0,179	0,1	0,817
58	20,037	0,072	0,037	0,714
59	20,034	0,554	0,034	0,446
60	19,999	0,318	0,001	0,682
61	19,971	0,009	0,029	0,861
62	19,989	0,032	0,011	0,96
63	20,145	0,156	0,145	0,547
64	19,95	0,140	0,05	0,86
65	19,995	0,011	0,005	0,967
66	20,015	0,056	0,015	0,424
67	19,985	0,048	0,015	0,842
68	20	0,054	0	0,811
69	20,059	0,040	0,059	0,46
70	20,102	0,179	0,102	0,526
71	20,078	0,145	0,078	0,43
72	20,029	0,143	0,029	0,762
73	20	0,008	0	0,878
74	20,002	0,027	0,002	0,961
75	19,984	0,006	0,016	0,942
76	20,048	0,000	0,048	0,869
77	20,146	0,172	0,146	0,509
78	19,995	0,026	0,005	0,837
79	20,021	0,140	0,021	0,784
80	19,983	0,165	0,017	0,835
81	20,002	0,000	0,002	0,977
82	19,995	0,006	0,005	0,966
83	20,04	0,288	0,04	0,683

Продолжение таблицы Б.3

№ эксперимента	Скорректированное значение	Поправка Δ_k ,	Отклонение ξ	Неопределенность U
84	19,994	0,324	0,006	0,676
85	19,994	0,029	0,006	0,957
86	20,015	0,023	0,015	0,938
87	19,999	0,038	0,001	0,792
88	19,975	0,189	0,025	0,634
89	19,923	0,179	0,077	0,65
90	19,954	0,069	0,046	0,784
91	20,024	0,326	0,024	0,673
92	19,869	0,329	0,131	0,4
93	20,096	0,435	0,096	0,566
94	20,233	0,167	0,233	0,319
95	20,127	0,131	0,127	0,421
96	19,897	0,002	0,103	0,576
97	20,008	0,374	0,008	0,625
98	19,983	0,023	0,017	0,932
99	20,012	0,081	0,012	0,919
100	19,993	0,132	0,007	0,868

Таблица В.1 – Требования к освещению помещений промышленных предприятий

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение				Естественное освещение	Совмещенное освещение			
						Освещенность, лк		Сочетание нормируемых величин объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации	КЕО, %					
						при системе комбинированного освещения	при системе общего освещения		при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении		
													всего	в том числе от общего
Высокой точности	От 0,30 до 0,50	III	a	Малый	Темный	2000	200	500	25	15	-	-	3,0	1,2
			б	Средний	Средний	1000	200	400	25	15				
				Малый	Темный									
			в	Малый	Светлый	750	200	300	25	15				
				Средний	Средний									
				Большой	Темный									
			г	Средний	Светлый	400	200	200	25	15				
				Большой	Средний									

Приложение В
(обязательное)
Требования к освещению помещений промышленных предприятий

Приложение Г

(обязательное)

Анализ конкурентных технических решений

Таблица Г.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Удобство в эксплуатации	0,17	5	3	0,85	0,51
2. Повышение производительности труда потребителя	0,15	5	3	0,75	0,45
3. Надежность	0,1	5	4	0,5	0,4
4. Потребность в ресурсах памяти	0,1	4	4	0,4	0,4
5. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,12	5	4	0,6	0,48
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0,12	4	4	0,48	0,48
2. Цена	0,14	5	4	0,7	0,56
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	0,5	0,5
Итого	1	38	31	4,78	3,78

Таблица Д.1 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Трудоёмкость									Длительность в рабочих днях, T_p			Длительность в календарных днях, T_k		
	t_{min}			t_{max}			$t_{ож}$			Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3						
1	10	10	10	14	14	14	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	18	18	18
2	7	20	20	12	25	25	9	22	22	9	22	22	14	33	33
3	8	8	8	12	12	12	9,6	9,6	9,6	4,8	4,8	4,8	8	8	8
4	6	6	6	10	10	10	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	12	12	12
5	7	7	7	14	14	14	9,8	9,8	9,8	4,9	4,9	4,9	8	8	8
6	50	70	70	60	90	90	54	78	78	54	78	78	80	116	116
7	20	30	30	45	60	60	30	42	42	30	42	42	45	63	63
8	14	14	14	21	21	21	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	25	25	25
9	14	14	14	21	21	21	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	25	25	25
10	20	20	20	30	30	30	24	24	24	24	24	24	36	36	36
Итого										179,5	228,5	228,5	271	344	344

Временные показатели проведения научного исследования

(обязательное)

Приложение Д

Приложение Е
(обязательное)

Календарный план-график

№ работ	Вид работ	Исполнители	Ткi кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																													
				сен.18			окт.18			ноя.18			дек.18			янв.19			фев.19			мар.19			апр.19			май.19			июн.19		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение технического задания	НР	18	1	2	3																											
2	Подбор и изучение материалов по теме	С	14		1	2																											
3	Выбор направления исследований	НР, С	8			1																											
4	Календарное планирование работ по теме	С	12			1																											
5	Разработка алгоритма и методики калибровки	НР, С	8						1																								
6	Разработка программного обеспечения	С	80							1	2	3	1	2	3	1	2	3															
7	Тестирование системы	С	45													1	2	3	1	2	3												
8	Проведение экспериментальных исследований	С	25																1	2	3	1	2	3									
9	Обработка результатов	С	25																			1	2	3	1	2	3						
10	Составление пояснительной записки	С	36																						1	2	3	1	2	3			

Рисунок Е.1 – Календарный план-график для первого исполнения