

На правах рукописи

БОГДАНОВ СЕРГЕЙ ПЕТРОВИЧ

**МИКРОМОЩНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ
ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орёл – 2013

Работа выполнена в государственном казенном образовательном учреждении высшего профессионального образования Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

Научный руководитель: кандидат технических наук
Басов Олег Олегович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кузичкин Олег Рудольфович,
Муромский филиал ФГБОУ ВПО
«Владимирский государственный университет
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых»,
профессор кафедры «Управление и контроль в
технических системах»

кандидат технических наук, доцент
Богданов Николай Григорьевич,
Академия ФСО России,
нач. кафедры «Электроники и теории связи»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики»

Защита состоится «01» октября 2013 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу: 302020, РФ г. Орел, Наугорское шоссе, 29, (ауд. 212).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

Автореферат разослан 23 августа 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.182.01
кандидат технических наук, доцент

Волков Вадим Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Для снижения ущерба, причиняемого человеческому обществу неблагоприятными природными процессами и явлениями, и, по возможности, уменьшения риска человеческих потерь, необходимым является регулярный (по определенной программе) мониторинг окружающей среды с целью оценки ее состояния, анализа происходящих в ней процессов и своевременного выявления тенденций ее изменения. Одним из основных элементов такой системы мониторинга является комплекс технических средств, обеспечивающий осуществление измерения требуемых параметров.

Для регистрации последних традиционно используются электронные датчики – средства измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Благодаря развитию полупроводниковой и оптоэлектронной элементной базы, миниатюризации интегральных микросхем, появлению новых технологий передачи информации широкое распространение получили беспроводные электронные датчики (БЭД).

Несмотря на успехи производителей БЭД (зарубежные фирмы: *Honeywell International, NXP Semiconductors, Texas Instruments, National Semiconductor, Analog Devices, Atmel, ST Microelectronics, Mitsubishi Electric, Motorola, Philips Electronics Oki, Omron* и др., отечественные: *Интека, Сенсорные технологии, Элкотех, Сенсорика, Теплоприбор, JUMO* и др.), связанные с улучшением массогабаритных характеристик за счет высокой плотности размещения элементов датчиков и уменьшения размеров отдельных функциональных узлов БЭД, а также метрологических и динамических параметров (на основе работ П. В. Новицкого, Я. Т. Загорского, Б. Р. Иванова и др.), открытым остается вопрос увеличения времени их работы в условиях ограниченной ресурсоемкости и невозможности частой замены источников автономного электропитания, характерных для объектов мониторинга окружающей среды.

Увеличение времени работы БЭД может быть обеспечено снижением их энергетической избыточности (части потребляемой электрической мощности, которая не идет на выполнение основных заданных функций) за счет применения микромощной элементной базы без ухудшения метрологических характеристик. Однако, такое применение как разновидность технологического пути снижения потребляемой электрической мощности (энергопотребления) требует разработки новых структурно-алгоритмических решений по построению и функционированию БЭД.

Таким образом, снижение энергопотребления микромощных БЭД, применяемых в системах мониторинга окружающей среды, представляет собой сложную техническую задачу и обуславливает *актуальность темы исследований*.

Объектом исследования являются микромощные БЭД параметров природных и техногенных объектов, в пределах которых по определенной программе осуществляются регулярные наблюдения за окружающей средой с целью контроля за ее состоянием.

Предмет исследования – методы уменьшения энергопотребления микромощных БЭД за счет структурно-алгоритмических технических решений, закладываемых на этапе проектирования и реализуемых на этапе функционирования.

Целью диссертационной работы является снижение энергопотребления микромощных БЭД параметров природных и техногенных объектов.

Научная задача исследований заключается в создании моделей, алгоритмов построения и функционирования и предложений по реализации микромощных БЭД, позволяющих уменьшить их энергопотребление при ограниченной ресурсоемкости и невозможности частой замены источников автономного электропитания.

В работе решаются следующие основные задачи:

- анализ методов снижения энергопотребления БЭД;
- сравнительный анализ характеристик микромощной элементной базы, применяемой в БЭД;
- разработка математических моделей микромощных БЭД;
- разработка алгоритма оптимизации структуры микромощных БЭД на этапе их проектирования;
- разработка алгоритма функционирования микромощных БЭД, обеспечивающего уменьшение их энергопотребления;
- разработка микромощных БЭД, реализующих последовательное во времени включение и выключение основных функциональных узлов в зависимости от выполняемых ими функций или алгоритма преобразования;
- экспериментальная проверка разработанных структур и алгоритмов функционирования микромощных БЭД и моделирование процессов контроля с оценкой их эффективности.

Методы и средства исследований. При решении диссертационных задач использовались элементы теорий графов, измерений и автоматического управления, методы линейного программирования, а также математического моделирования на ПЭВМ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- построены математические модели, описывающие взаимосвязь основных функциональных узлов микромощных БЭД набором обобщенных показателей, учитывающих их энергопотребление, стоимость и техническую совместимость;
- разработан алгоритм оптимизации структур микромощных БЭД на основе предложенного набора обобщенных показателей, позволяющий снизить их структурную избыточность;
- разработан алгоритм функционирования микромощных БЭД, обеспечивающий уменьшение энергопотребления за счет применения трехтактного интегрирующего аналого-цифрового преобразования с комбинированной автоматической коррекцией аддитивной погрешности.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

- предложенные модели и алгоритмы являются основой для проектирования и модернизации БЭД;
- разработаны новые структурные схемы микромощных БЭД и алгоритмы их функционирования, позволяющие снизить среднюю потребляемую мощность за счет последовательного во времени включения и выключения аналоговых функциональных узлов в зависимости от выполняемых ими функций или алгоритма преобразования.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на XV Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (17–19 ноября 2010, г. Рязань), 55-й Всероссийской научной конференции «Современные проблемы фундаментальных и прикладных, естественных и технических наук в современном информационном обществе» (19–25 ноября 2012, г. Москва), Международ-

ной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем», (28–30 марта 2013, г. Москва), Международной молодежной научно-практической конференции «ИНФОКОМ-2013» (22–27 апреля 2013, г. Москва).

Публикации. По результатам исследований опубликовано восемь статей, в том числе три статьи в изданиях из перечня ВАК, получены 2 патента РФ на полезные модели, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Реализация работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены при выполнении ОКР по обработке технологии изготовления многоканальных мало-дозных цифровых рентгеновских установок в ЗАО "Научприбор" (г. Орел), при контроле возгорания производственных помещений в ОАО «Мценский литейный завод» (г. Мценск), что подтверждается соответствующими актами внедрения. Ряд теоретических результатов внедрен в учебный процесс Академии ФСО России (г. Орел) при проведении занятий по дисциплинам «Электроника и схемотехника» и «Технические средства и методы защиты информации».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математические модели и алгоритм оптимизации структур микромошных беспроводных электронных датчиков, основанные на представлении их набором обобщенных показателей, учитывающих энергопотребление, стоимость и техническую совместимость отдельных функциональных узлов.

2. Алгоритм функционирования микромошных беспроводных электронных датчиков, обеспечивающий уменьшение их энергопотребления за счет применения трехтактного интегрирующего аналого-цифрового преобразования с комбинированной автоматической коррекцией аддитивной погрешности.

3. Предложения по реализации микромошных беспроводных электронных датчиков влажности, температуры и задымленности с пониженной средней потребляемой мощностью для систем мониторинга окружающей среды.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 56 иллюстраций и 7 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 115 наименований, и двух приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи, показаны направления исследований, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ природных и техногенных объектов, для мониторинга которых применяются БЭД, а также принципов и структур их построения. Определены основные пути снижения энергопотребления БЭД и характеристики применяемой в них микромошной элементной базы.

Показано, что для снижения (недопущения) ущерба народному хозяйству необходим мониторинг опасных природных процессов и явлений (возгорание лесов, торфа; затопление местности; возникновение наледи и др.). Его реализация подразумевает наличие соответствующих технических средств, ключевую роль среди которых играют БЭД. Последние позволяют вырабатывать сигналы измерительной информации

о параметрах природных и техногенных объектов, преобразовывать и передавать их в единый центр обработки для прогнозирования развития ситуации. Исходя из назначения и анализа типовых структур, определена обобщенная структурная схема БЭД (рис. 1, а), включающая в себя чувствительный элемент (ЧЭ), масштабирующий усилитель (МУ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок обработки данных (БОД), передатчик (ПРД), антенну (А) и источник электропитания.



Рисунок 1 – Обобщенные структурные схемы БЭД (а) и комбинированного (совмещенного) БЭД (б)

Для измерения одной и той же физической величины $x(t)$ могут применяться ЧЭ, использующие различные физические процессы ее преобразования в электрические сигналы и разнообразные принципы действия. Однако, существующие средства мониторинга, например, температуры, оснащенные одним ЧЭ, не в состоянии с заданной точностью производить

контроль в широком диапазоне значений, что обуславливает целесообразность использования комбинированных БЭД с разными ЧЭ (рис. 1, б). Кроме того, в зависимости от типа ЧЭ и назначения БЭД его структурная схема может быть изменена, в том числе – с целью измерения нескольких физических величин. Такие совмещенные БЭД состоят из нескольких соответствующих преобразователей (температуры, влажности, давления и т. д.).

Установлено, что снижение энергопотребления БЭД может быть достигнуто применением технологических, структурных и алгоритмических решений. При этом перспективным направлением является применение микромоцной элементной базы. Для оценки предельных возможностей совершенствования технических характеристик БЭД за счет применения микрорежима в работе рассмотрены основные свойства транзисторов и элементов интегральной электроники при пониженных до (100 – 0,01) мкА значениях тока потребления и уменьшенном до единиц вольт напряжении питания. Установлено, что такое применение позволяет снизить погрешность электронных компонентов, повысить точность измерений и плотность компоновки радиоэлементов, обеспечить стабильность характеристик функциональных узлов при изменении напряжения источника электропитания. Однако, уменьшение токов потребления активных электронных компонентов приводит к пропорциональному возрастанию инерционности и ухудшению их динамических характеристик, вследствие чего необходимы исследование существующих и разработка новых структур и алгоритмов функционирования микромоцных БЭД, обеспечивающих уменьшение их энергопотребления. Противоречивость требований по

снижению возникающей при этом структурной избыточности и обеспечению высокой точности измерений обуславливает также необходимость проведения исследований по определению способов формирования оптимальных структур микроощных БЭД.

Во второй главе представлены математические модели микроощных БЭД различного функционального назначения и алгоритмы оптимизации их структур. Для рационального выбора микроощных электронных компонентов для БЭД его обобщенную структурную схему (рис. 1, а) можно представить с помощью графа (рис. 2), у которого вершины соответствуют множеству структурных элементов

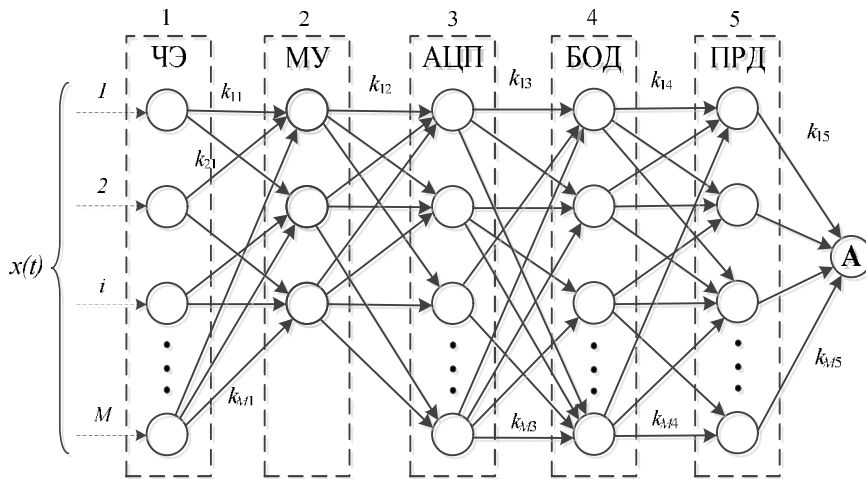


Рисунок 2 – Граф структуры БЭД

средства, а ребра – связям между ними с учетом значений коэффициентов технической совместимости, определяющих соответствие двух сопрягаемых электронных элементов (j -го и $(j-1)$ -го блоков) по ряду важных характеристик (напряжению питания, точности, чувствительности, разрядности), сложности монтажа и т. д., находится экспертным путем в

диапазоне $T_{ij} \in (0;1]$. Установлено, что они могут быть определены на основе метода непосредственных экспертных оценок и присвоены весам ветвей (узлов).

Наряду с коэффициентом технической совместимости T_{ij} при оптимизации структуры микроощных БЭД необходимо учитывать энергопотребление E_{ij} отдельных микроощных электронных элементов. С учетом высокой стоимости последних в работе предложено применять обобщенный показатель:

$$k_{ij} = \frac{E_{ij}^{\text{норм}} \cdot S_{ij}^{\text{норм}}}{T_{ij}}, \quad (1)$$

где j – номер блоков в структуре БЭД ($j = 1 \dots 5$); i – номер структурного элемента в j -м блоке (группе элементов) ($i = 1 \dots M$); M – максимальное число структурных элементов одного типа блоков (группы элементов); $E_{ij}^{\text{норм}}$, $S_{ij}^{\text{норм}}$, $T_{ij}^{\text{норм}}$ – нормированные значения энергопотребления, стоимости и коэффициента технической совместимости i -го элемента j -го блока соответственно; k_{ij} – вес ребра к i -му элементу j -го блока.

Минимизация обобщенного показателя (1) $l_{ij} \leftarrow \min(k_{ij} + l_{i(j-1)})$, где l_{ij} – сумма весов обобщенных показателей на маршруте от последнего узла (A) ко всем первым (рис. 2), позволяет на основе алгоритма Дейкстры оптимизировать структуру БЭД с учетом требований по энергопотреблению, стоимости и коэффициента тех-

нической совместимости. В работе представлен пример такой оптимизации. При необходимости функциональная (структурная) схема средства контроля может быть представлена с большей степенью детализации (большим числом узлов), техническая совместимость формализована в виде отдельных параметров, а обобщенный показатель (1) расширен другими техническими характеристиками элементов.

Учитывая монотонность измеряемых параметров при мониторинге состояния распределенных объектов, появляется возможность их периодического измерения. С учетом этого для снижения энергопотребления предложено использовать одни и те же однотипные структурные элементы совмещенного микромощного БЭД (рис. 1, б) в функциональных схемах нескольких разнотипных преобразователей, осуществляя их последовательную коммутацию (рис. 3). Использование такого технического решения

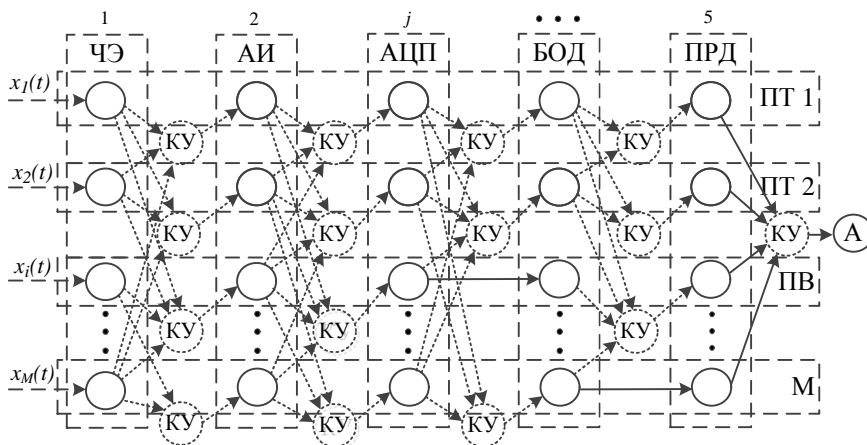


Рисунок 3 – Граф структуры совмещенного БЭД

позволяет унифицировать процесс разработки БЭД различного функционального назначения и сократить экономические затраты на их производство.

Для оптимизации структуры такой аппаратуры предложен модифицированный алгоритм Дейкстры (рис. 4). Исходными данными для его работы являются: матрица весов вершин $K = \{k_{ij}\}$, где k_{ij} – значения обобщенного показателя (1); и $Y = \{y_{ijz}\}$ – матрица смежности, где y_{ijz} – принимает значения 0 (связь отсутствует) или 1 (связь есть) между вершинами шагов j и $(j-1)$, i и z порядковые номера узлов на шагах.

К основным этапам функционирования алгоритма оптимизации относятся:

I – получение матрицы маршрутов $Tr = \{Tr_{ij}\}$, обеспечивающих минимальные значения весов пути для всех вершин графа;

II – восстановление массива оптимальных маршрутов $Op = \{Op_{ij}\}$;

III – удаление узлов графа, соответствующих КУ с одним входом;

IV – формирование матрицы коммутаций $Mk = \{Mk_{ij}\}$, определяющей режимы работы коммутационных узлов (КУ).

Первые два этапа соответствуют выполнению классического алгоритма поиска кратчайших путей (алгоритм Дейкстры), а реализация третьего позволяет получить оптимальные маршруты Op , не содержащие КУ с одним входом, на четвертом – формируется матрица коммутаций, в соответствии с которой определяется таблица динамической адресации КУ.

Практическое использование разработанного алгоритма позволяет снизить структурную избыточность совмещенных и комбинированных БЭД с автономным электропитанием приблизительно на 30 %, обеспечив при этом выигрыш по обобщенному показателю в 2,3 раза.

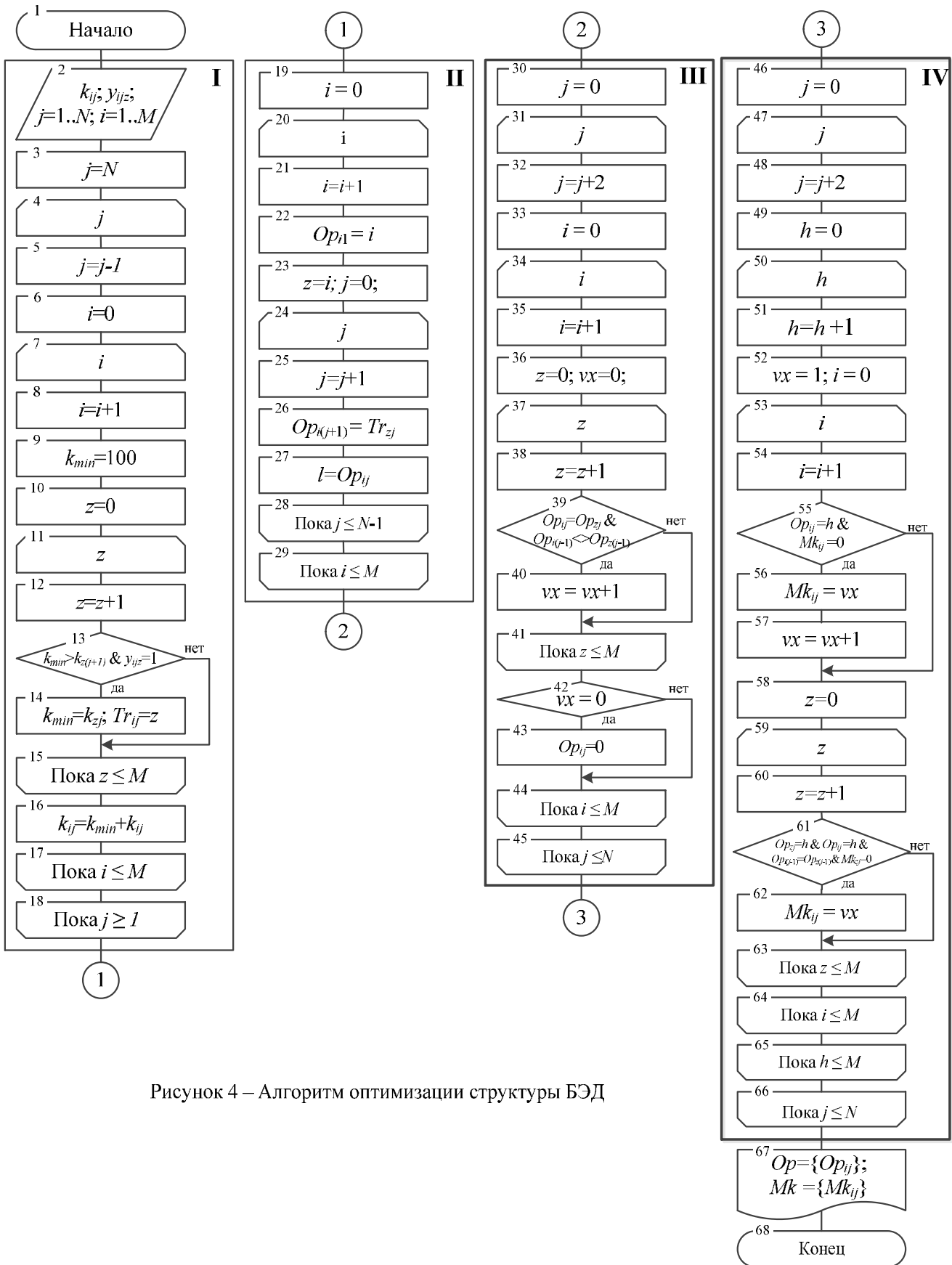


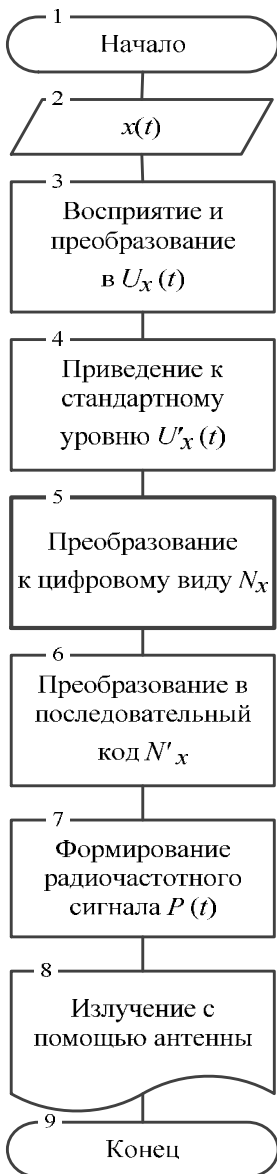
Рисунок 4 – Алгоритм оптимизации структуры БЭД

Разработанный алгоритм (рис. 4) может быть использован для снижения структурной избыточности комбинированного БЭД, который в свою очередь представляется моделью (рис. 3) при $x_1(t) = x_2(t) = \dots = x_M(t)$.

На основе сравнения дисперсии ошибок оценок одного точного датчика ($d_1(\hat{T})=1$) и трех (для примера), разной точности в работе сделан вывод о том, что точность оценки параметра окружающей среды можно улучшить, если учитывать информацию, поступающую от нескольких даже неточных измерительных преобразователей комбинированного БЭД.

$$d_3(\hat{T}) = \frac{d_1 d_2 d_3}{d_2 d_3 + d_1 d_3 + d_1 d_2} = \frac{1000}{1000 + 100 + 10} \approx 0,9009 < d_1(\hat{T})$$

В третьей главе определены существенные предпосылки для комплексного улучшения метрологических параметров микромощных БЭД, предложен алгоритм их функционирования (рис. 5), обеспечивающий уменьшение их энергопотребление. Показано, что одним из способов снижения энергопотребления цифровой части таких средств является применение алгоритмов многотактного интегрирующего аналого-цифрового преобразования (АЦП) с изменением крутизны (скорости изменения)



опорного сигнала. В частности, применение трехтактного интегрирующего преобразования вместо двухтактного позволяет в $k_{эф} = m/2$ раз уменьшить требования к быстродействию и, в результате, снизить в примерно $k_{эф}$ раз энергопотребление БЭД, реализуемых на микромощной элементной базе. Доказано, что относительная эффективность использования многотактного преобразования уменьшается с увеличением количества тактов. Так при переходе от двухтактного к трехтактному интегрирующему преобразованию обеспечивается 50-кратный выигрыш в значениях параметров f_0 , и $t_{зд}$, а при дальнейшем переходе от трех- к пятитактному интегрированию достигается лишь 5-кратное ослабление требований к данным параметрам.

Сравнение частотного и время-импульсного методов многотактного интегрирующего преобразования по минимуму энергопотребления при одинаковых точностных характеристиках позволило сделать вывод о целесообразности использования в микромощных БЭД трехтактного интегрирующего время-импульсного преобразования с изменением крутизны (скорости изменения) опорного сигнала в разных тактах, при котором сравнительно легко реализуется разновременная автоматическая комбинированная коррекция аддитивной погрешности. Комбинирование различных видов коррекции позволяет снизить частоту модуляции исследуемого сигнала в усилителях постоянного тока, улучшить разрешающую способность датчиков и уменьшить практически в десятки раз энергопотребление цифровых средств измерения при их реализации на микромощной элементной базе.

Рисунок 5 – Алгоритм функционирования БЭД

Для реализации процесса аналого-цифрового преобразования с учетом перечисленных факторов необходима разработка новых алгоритмов функционирования БЭД, позволяющих полу-

чить требуемые технические характеристики приборов при использовании микро-мощных компонентов со сравнительно невысоким быстродействием. При этом задача оптимизации указанных алгоритмов сводится к реализации процессов АЦП, обеспечивающих допустимую погрешность, разрешающую способность и помехоустойчивость при минимальной мощности и структурной простоте приборов. Особенности разработанного алгоритма функционирования микро-мощного БЭД пояснены на примере трехтактного интегрирующего аналого-цифрового преобразователя время-импульсного типа (рис. 6). К особенностям рассматриваемой схемы относятся:

- адаптивность – в зависимости от уровня проинтегрированного сигнала реализуется либо двухтактное, или трехтактное время-импульсное преобразование;
- модуляция тока питания компаратора управляющим сигналом логического автомата;
- коммутация переключателем SA3 инвертирующего входа усилителя A1 с входом ключа SA4 на промежутках времени T_S при запоминании напряжения $U_{И}$, или с выходом SA4 – в тактах интегрирования измеряемого и опорных напряжений, что

позволяет уменьшить погрешность нелинейности интегрирующего АЦП.

Повышение разрешающей способности в схеме (рис. 6) обеспечивается применением комбинированной цифро-аналоговой и цифровой автоматической коррекции аддитивной погрешности. При моделировании схемы на ОУ типа К140УД12 при токах потребления $I_{\text{пот}} = (5 - 10)$ мкА было установлено, что использование трехтактного алгоритма преобразования с автоматической коррекцией аддитивной составляющей погрешности позволяет обеспечить разрешающую способность в 1 мкВ за время преобразования $T_{\text{пр}} = 0,4$ с при общем токе потребления аналоговой части устройства $I_{\text{пот.А}} \leq 70$ мкА. При этом ток потребления цифровой части прибора, реализованной на микросхемах серии К561, составил $I_{\text{пот.Ц}} \leq 30$ мкА при напряжении питания $U_{\text{пит}} = 4,5$ В.

При использовании микро-мощных ОУ (типа К140УД12 и т. п.)

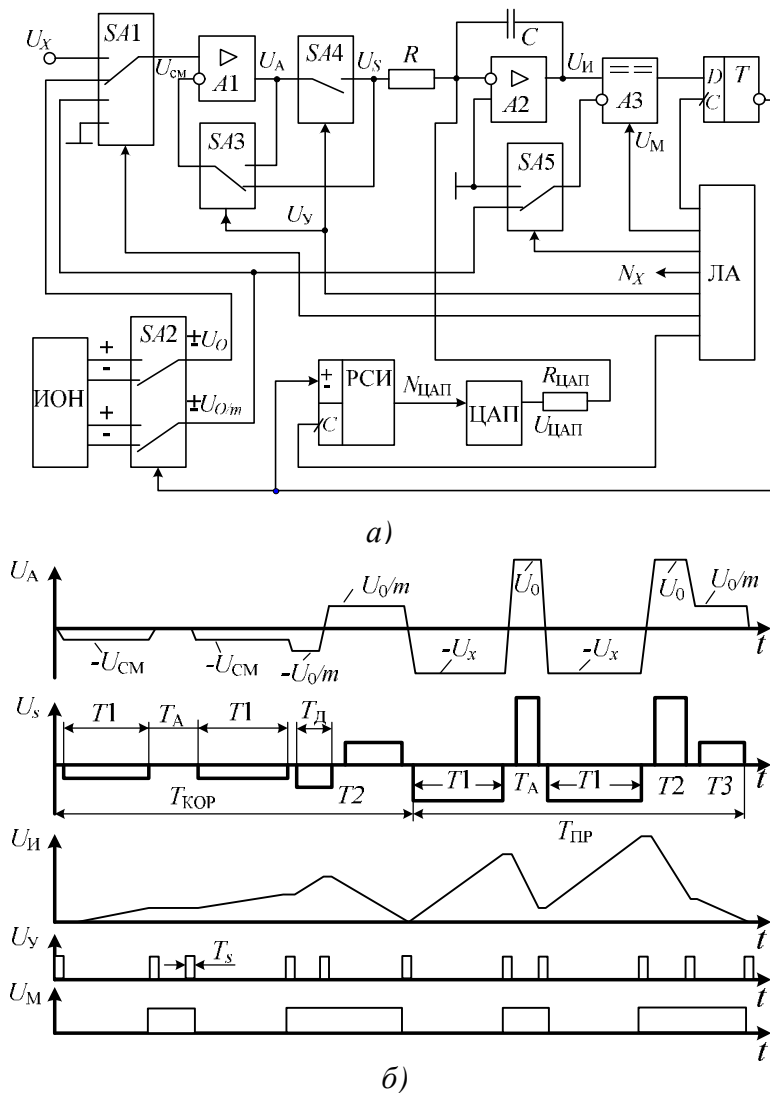


Рисунок 6 – Структурная схема (а) и временные диаграммы работы основных функциональных узлов (б) трехтактного интегрирующего время-импульсного АЦП БЭД

в микроощных БЭД (в том числе в разработанном АЦП) целесообразно применять автоматическую регулировку тока питания в зависимости от частоты входного сигнала. Это позволяет расширить диапазон рабочих частот преобразования при малой средней мощности потребления устройств. Дальнейшее уменьшение энергопотребления аналоговых функциональных узлов микроощных БЭД может быть достигнуто их последовательным во времени включением и отключением в зависимости от выполняемых функций или заданного алгоритма преобразования и наиболее эффективно для снижения потребляемой мощности приборов с малой длительностью цикла $T_{\text{пр}}$ аналого-цифрового преобразования при выводе информации на индикатор.

В четвертой главе рассмотрены вопросы схемной реализации микроощных БЭД влажности, температуры и задымленности, обеспечивающих последовательное во времени включение и выключение основных функциональных узлов в зависимости от выполняемых ими функций или алгоритма преобразования, их экспериментальной проверки и моделирования процессов контроля с оценкой их эффективности.

Показано, что последовательное во времени включение и отключение основных функциональных узлов микроощных БЭД особенно эффективно при контроле медленно изменяющихся параметров, например, температуры или влажности исследуемых материалов с помощью емкостных датчиков, а также при вихретоковом контроле качества ферромагнитных материалов. В этих случаях выполняется промежуточное преобразование контролируемых величин в эквивалентные изменения емкости C_X или индуктивности L_X с помощью высокочастотных автогенераторов, выходная частота которых $f_{\text{вых}}$ уменьшается при возрастании значений C_X или L_X и зависит от измеряемых неэлектрических величин.

Общий принцип уменьшения энергопотребления основан на сокращении времени работы высокочастотного генератора в цикле контроля длительностью $T_{\text{ц}}$ с помощью низкочастотного генератора импульсов большой скважности (рис. 7). При этом частота $f_{\text{вых}}$ измеряется микропроцессором в течение такта измерения

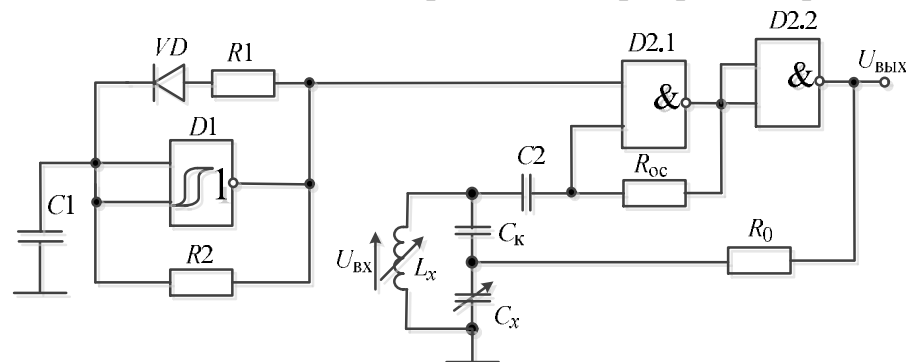


Рисунок 7 – Микроощное устройство резонансного контроля влажности

$T_{\text{изм}} \ll T_{\text{ц}}$ по командам низкочастотного генератора импульсов (ГУ). Показано, что в высокочастотных LC-генераторах (D2) лучше всего использовать микросхемы К1554 серии, которые обеспечивают максимальную частоту переключения $f_{\text{MAX}} = 150$ МГц, а низкочастотные генераторы импульсов реализовать на элементах К561 серии (D1), имеющих минимальный ток потребления при ограниченном быстродействии.

При экспериментальных исследованиях низкочастотного генератора установлено, что независимо от частоты колебаний при сопротивлении резистора $R > 10$ МОм ток потребления $I_{\text{пот}}$ увеличивается от единиц микроампер при $U_{\text{пит}} = 3$ В до значения $I_{\text{пот}} = (0,7 - 0,8)$ мА при $U_{\text{пит}} = 10$ В. Следовательно, малое энергопотребление генератора достигается только при небольшом напряжении пи-

При экспериментальных исследованиях низкочастотного генератора установлено, что независимо от частоты колебаний при сопротивлении резистора $R > 10$ МОм ток потребления $I_{\text{пот}}$ увеличивается от единиц микроампер при $U_{\text{пит}} = 3$ В до значения $I_{\text{пот}} = (0,7 - 0,8)$ мА при $U_{\text{пит}} = 10$ В. Следовательно, малое энергопотребление генератора достигается только при небольшом напряжении пи-

тания, а его параметры могут быть определены, исходя из требуемой частоты импульсов:

$$f_{\text{ГУ}} = \frac{1}{\ln 2 \cdot C_1 \left(R_2 + \frac{R_1}{R_2} \right)}$$

При этом для обеспечения заданной погрешности дискретности δ_d длительность управляющих импульсов должна составлять $t_{\text{и.ГУ}} = \frac{Q}{f_p} + \frac{1}{d_d \cdot f_p}$, где f_p – резонансная частота колебаний контура, Q – его добротность, δ_d – допустимая погрешность дискретности (рис. 8).

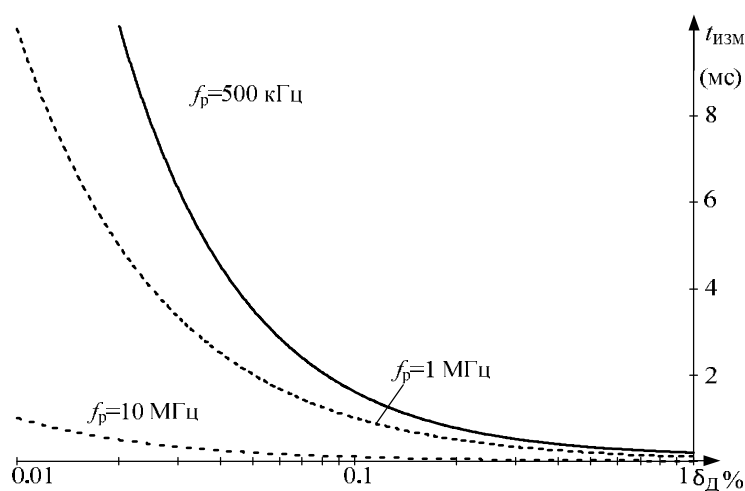


Рисунок 8 – Зависимость времени измерения от погрешности дискретности счета d_d и резонансной частоты f_p колебаний

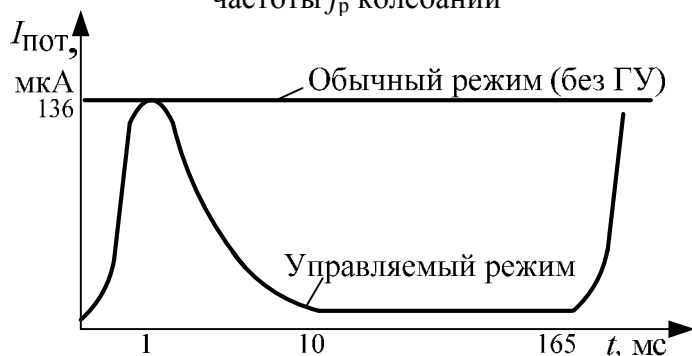


Рисунок 9 – Ток потребления измерительной части влагомера в различных режимах работы

В результате проведенных исследований микромощного устройства контроля влажности в среде Electronics Workbench установлено следующее.

При отсутствии ГУ ток потребления составил около $I_{\text{пот}} \approx 136$ мкА (при потребляемой мощности $P_{\text{пот}} \approx 0,68$ мВт) в течении всего времени непрерывной работы аналоговой части устройства (рис. 9). При включении управляющего генератора ГУ ток потребления постепенно возрастал и достигал максимального значения (136 мкА) через 1,1 мс, затем потребление тока снижалось до 0,02 мкА (в течение 9 мс) и затем не изменялось до конца периода в течение $t \approx 155$ мс.

С учетом энергопотребления ГИ и ГУ полная потребляемая мощность в обычном и управляемом режиме составила соответственно $P_{\text{пот}} \approx 1,5$ мВт и $P_{\text{пот}} \approx 0,65$ мВт. Это позволяет сделать вывод о снижении энергопотребления измерительной части влагомера примерно в 2,3 раза.

Наращивание функциональных возможностей микромощных БЭД параметров окружающей среды может быть достигнуто применением совмещенных датчиков, синтезированных в соответствии с разработанным выше алгоритмом (рис. 4) и реализующими управление по возмущениям (рис. 10).

Результаты экспериментальных исследований совмещенного БЭД, предназначенного для контроля возгораний, свидетельствуют о его низком энергопотреблении (средний ток потребления не превышает значения $I_{\text{пот}} = 34$ мкА), достигаемым авто-

матической регулировкой или модуляцией токов потребления применяемых микро-мощных ОУ в зависимости от уровня входного сигнала.

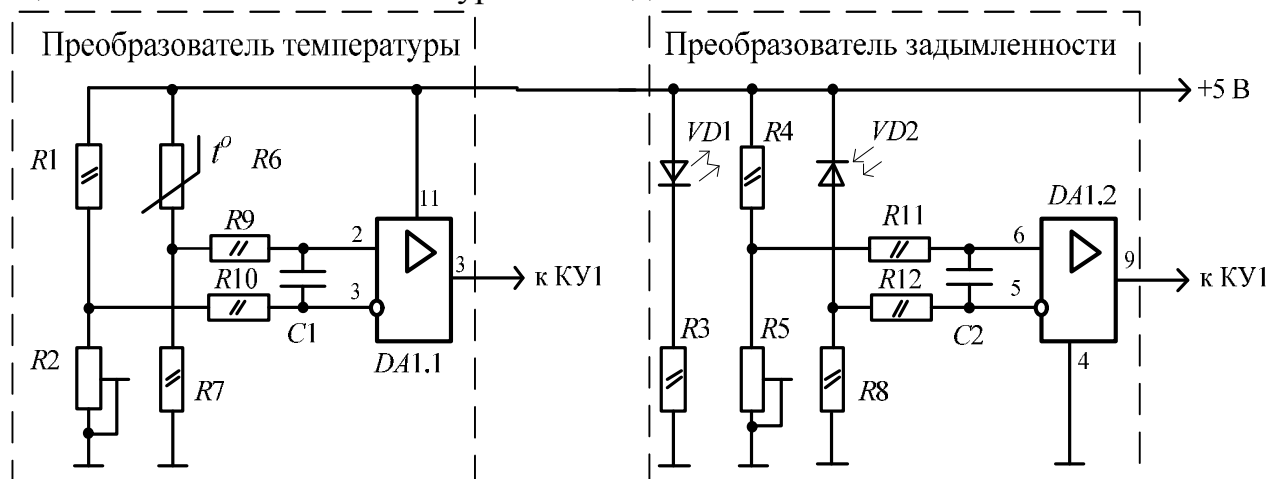


Рисунок 10 – Преобразователи совмещенного микромощного БЭД

Аналогичный эффект уменьшения средней потребляемой мощности за счет модуляции тока потребления в зависимости от уровня входного напряжения обеспечивается при использовании в качестве компараторов микромощных триггеров Шмитта, например, на микросхеме К561ТЛ1. В этом случае при выходной частоте $f_x < 10$ кГц задержка срабатывания не превышает значения $\Delta t_{\text{срАБ}} \leq (0,5 - 1)$ мкс при напряжении $U_{\text{пит}} = (3 - 5)$ В и токе $I_{\text{пот}} < 10$ мкА.

Таким образом, полученные результаты полностью подтверждают эффективность применения управления по программе и возмущениям последовательным во времени включением и выключением основных функциональных узлов БЭД в зависимости от выполняемых функций или заданного алгоритма функционирования для достижения минимального энергопотребления технических средств мониторинга.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Применение микромощной элементной базы позволяет снизить температурную погрешность электронных компонентов, повысить точность измерений и плотность компоновки радиоэлементов, обеспечить стабильность характеристик функциональных узлов БЭД при изменении напряжения источника электропитания, однако требует разработки соответствующих алгоритмов их построения и функционирования.

2. Осуществлен синтез структур микромощных БЭД путем поиска кратчайших путей на их математических моделях в виде графов, у которых вершины соответствуют множеству функциональных узлов, ребра – связям между ними, а весам вершин (ребер) поставлены в соответствие значения обобщенного показателя, учитывающего энергопотребление, стоимость, техническую совместимость элементной базы. Для синтеза совмещенных и комбинированных средств мониторинга алгоритм поиска кратчайших путей модифицирован за счет процедур удаления недействующих функциональных узлов и формирования сигналов управления коммутационными узлами.

3. Разработан алгоритм оптимизации структуры микромощных БЭД, позволяющий снизить структурную избыточность совмещенных средств контроля состояния дорожного полотна на 35%, обеспечив выигрыш по обобщенному показателю

приблизительно в 2,3 раза, и повысить точность оценки измеряемых параметров природных и техногенных объектов комбинированными средствами мониторинга.

4. Снижено энергопотребление цифровой части БЭД параметров объектов мониторинга за счет уменьшения напряжения питания и частоты переключения путем применения в них алгоритмов многотактного интегрирующего аналого-цифрового преобразования с изменением крутизны (скорости изменения) опорного сигнала. При этом улучшение их разрешающей способности реализовано за счет разновременной автоматической комбинированной коррекции аддитивной погрешности.

5. Использование в предложенном алгоритме функционирования микромошных БЭД трехтактного АЦП с автоматической коррекцией аддитивной составляющей погрешности позволило обеспечить разрешающую способность в 1 мкВ за время преобразования $T_{пр} = 0,4$ с при общем токе потребления аналоговой части устройства $I_{пот.А} \leq 70$ мкА. При этом ток потребления цифровой части прибора составил $I_{пот.Ц} \leq 30$ мкА при напряжении питания $U_{пит} = 4,5$ В.

6. Применение в микромошном БЭД влажности управления по программе высокочастотным генератором, включаемым в режим формирования колебаний только в течение длительности выходного импульса управляющего генератора, позволило снизить энергопотребление измерительной части БЭД примерно в 2,3 раза.

7. Результаты экспериментальных исследований совмещенного микромошного БЭД температуры и задымленности с управлением по возмущению свидетельствуют о его низком энергопотреблении, так как средний ток потребления не превышает значения $I_{пот} = 34$ мкА.

8. Обеспечено минимальное энергопотребление технических средств мониторинга окружающей среды путем последовательного во времени включения и выключения основных функциональных узлов микромошных БЭД.

Представленные результаты свидетельствуют о достижении поставленной цели диссертационной работы.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих опубликованных работах:

Журналы из перечня изданий, рекомендованных ВАК

1. **Богданов, С.П.** Повышение точности измерений фазочастотных параметров при вихретоковом контроле [Текст] / С.П. Богданов, В.Г. Лисичкин, Д.П. Санников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий*, 2010. – № 4 (282). – С. 96-103 (доля участия автора – 30%).

2. **Богданов, С.П.** Перспективы и проблемы применения беспроводных датчиков с автономным питанием [Текст] / С.П. Богданов, О.О. Басов // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*, 2012. – № 2(26), часть 1. – С. 20–23 (доля участия автора – 50%).

3. **Богданов, С.П.** Управляемый режим работы автономных устройств резонансного контроля влажности материалов [Текст] / С.П. Богданов, О.О. Басов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий*, 2013. – № 1 (282). – С. 96-103 (доля участия автора – 50%).

Прочие издания

4. **Богданов, С.П.** Обобщенная модель эффективности системы контроля. [Текст] / С.П. Богданов, В.Г. Лисичкин, Д.П. Санников // *Сборник материалов XV Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные техноло-*

гии в научных исследованиях и в образовании» – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010. – С. 62–63 (доля участия автора – 30%).

5. **Богданов, С.П.** Выбор критерия оптимизации прибора резонансного контроля [Текст] /С.П. Богданов, В.Г. Лисичкин, Д.П. Санников // Сборник материалов XV Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010. – С. 64–65 (доля участия автора – 30%).

6. **Богданов, С.П.** К вопросу уменьшения энергопотребления беспроводных датчиков с автономным питанием [Текст] /С.П. Богданов, О.О. Басов // Труды 55-й научной конференции МФТИ: Всероссийской научной конференции «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе», Научной конференции «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики и астрономии», Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Радиотехника и кибернетика. Том 2. – М.: МФТИ, 2012. – С. 113-114 (доля участия автора – 50%).

7. **Богданов, С.П.** Снижение энергопотребления средств резонансного контроля [Текст] /С.П. Богданов, О.О. Басов // Сборник материалов Первой Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем". – М.: МГТУ РТЭА, 2013. – С. 90–93 (доля участия автора – 50%).

8. **Богданов, С.П.** Оптимизация структуры беспроводных датчиков с автономным питанием на основе теории графов [Текст] /С.П. Богданов, О.О. Басов // Сборник материалов Международной молодежной научно-практической конференции «ИНФОКОМ-2013» – Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ, 2013. – С. 57–59 (доля участия автора – 50%).

Патентные материалы

9. Патент на полезную модель № 99149 Российская Федерация, МПК G 01 № 27/90 Двупараметровое устройство вихретокового контроля [Текст] / Б.Р. Иванов, В.Г. Лисичкин, С.П. Богданов : заявитель и патентообладатель Академия ФСО России. Опубликовано 10.11.2010. Бюл. № 31. – 2 с. (доля участия автора – 30%).

10. Патент на полезную модель № 129652 Российская Федерация, МПК G 01 № 27/22 Электронный влагомер [Текст] / С.П. Богданов, О.О. Басов : заявитель и патентообладатель Академия ФСО России. Опубликовано 27.06.2013. Бюл. № 18. – 2 с. (доля участия автора – 50%).

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616099 Программа оптимизации структуры цифрового устройства / С.П. Богданов, О.О. Басов, Д.А. Гуляйкин (доля участия автора – 40%).

Подписано к печати «19» августа 2013 г.

Тираж 100 экз. Объем 1 п. л.

Заказ № 163