

На правах рукописи

Посягин Антон Игоревич

**САМОМАРШРУТИЗИРУЮЩИЙСЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования (ФГАОУ ВО) «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель:

Южак Александр Анатольевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Официальные оппоненты:

Королев Павел Геннадьевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационно-измерительных систем и технологий ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (г. Санкт-Петербург)

Долженкова Мария Львовна

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой электронных вычислительных машин ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (г. Киров)

Ведущее предприятие:

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ» (г. Казань)

Защита состоится «24» декабря 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614000, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. № 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан «27» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



В.И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные системы автоматического управления (САУ) базируются на использовании различных микроконтроллеров для принятия решений о воздействии на объект управления. При этом исходная информация об объекте управления собирается, как правило, за счет применения аналоговых датчиков, поэтому требуется использование аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для связи объекта управления с САУ. Подобные системы находят свое применение уже не только на производстве, но и для решения различных «повседневных» задач человека, например, управление микроклиматом в системах типа «умный дом», базирующихся на централизованном анализе различных параметров среды внутри помещения, или полностью автоматическое управление автомобилем за счет анализа окружающего пространства вокруг него. Во всех подобных САУ используется большое количество различных датчиков, оценивающих параметры объекта управления и представляющих эти параметры в виде аналоговых сигналов.

Таким образом, при анализе большого количества параметров актуальной является задача повышения быстродействия систем ввода-вывода САУ за счет параллельной обработки всех сигналов, поступающих от датчиков. Аналого-цифровое преобразование может быть осуществлено за счет средств, реализованных непосредственно в микроконтроллере, однако это приводит к необходимости разделять вычислительные ресурсы, что может критично отразиться на скорости принятия решения. Поэтому в современных системах управления предлагается использовать для решения задач, связанных с аналого-цифровым преобразованием, специализированный АЦП в виде отдельной интегральной схемы. Выделение АЦП в отдельный элемент системы управления также может помочь в ускорении процесса преобразования за счет применения потоковой динамической архитектуры (ПДА), когда возможно изменять количество измеряемых сигналов, а также точность их измерения путем изменения количества разрядов АЦП для каждого отсчета.

Кроме того, одним из важнейших требований, предъявляемых к САУ в целом, является надежность, а значит надежность АЦП как элемента САУ выступает не менее значимым параметром, и способы ее повышения являются актуальной задачей. При разработке АЦП ПДА как отдельного устройства задачу повышения отказоустойчивости можно решить за счет применения нейронных сетей (НС) на аппаратном уровне. НС – это система, состоящая из однотипных элементов (нейронов), которые эффективно реализуют операции по обработке поступающих сигналов. При этом нейроны способны объединяться и образовывать достаточно сложные отказоустойчивые системы обработки информации, а также между нейронами предусмотрены дополнительные связи, которые позволят исключать из НС отказавшие элементы.

Созданию АЦП НС, имеющему своей задачей повышение отказоустойчивости и быстродействия, посвящены работы Авдеева Б.Я., Гитиса Э.И., Горцева А.М., Гутникова В.С., Локтюхина Н.В., Ломтева Е.А., Матушкина Н.Н., Новицкого П.В., Смирнова Д.Н., Челебаева С.В., Южакова А.А., Daronte P., Grimaldi D., Michaeli L. и др.

В работах Локтюхина Н.В. и Челебаева С.В. предложена структура НС АЦП, которая позволяет снижать погрешности аналого-цифрового преобразования за счет применения обратных связей и обучения НС в процессе измерения, нацеленного на нейтрализацию ошибок и искажений, возникающих в нейронах. Кроме того, предложенная структура НС позволяет изменять динамический диапазон измерения АЦП и является инвариантной к форме представления входного сигнала, обеспечивая возможность преобразования не только аналогового напряжения в цифровой код, но и частоты измеряемого сигнала и других его параметров. В качестве основных недостатков можно выделить недостаточную отказоустойчивость полученной НС, а также отсутствие измерения одновременно нескольких входных аналоговых сигналов за счет распределения ресурсов НС.

В работах Daronte P. и Grimaldi D. рассматривается создание АЦП, работающего в коде Грея. В основу нейрона для предложенной структуры НС положен компаратор, сравнивающий входное напряжение с весом данного разряда, после чего формируется выходное аналоговое напряжение для следующего нейрона в зависимости от полученного значения данного разряда. К недостаткам можно отнести сложную структуру нейрона, включающую по меньшей мере 3 операционных усилителя и множество сопротивлений, что увеличивает затраты на разработку принципиальных схем, а также вероятность появления во время эксплуатации некомпенсируемой погрешности, вызванной тепловым старением сопротивлений или дрейфом нуля операционных усилителей.

В работах Матушкина Н.Н., Смирнова Д.Н., Южакова А.А. архитектура адаптивного АЦП ПДА позволяет управлять точностью измерения, изменяя разрядность АЦП. Предложенная архитектура позволяет измерять одновременно ансамбль входных сигналов за счет подключения одноразрядных преобразователей (нейронов) к различным шинам, с помощью которых происходит формирование нескольких АЦП произвольной разрядности. Также рассматриваются варианты увеличения точности измерения за счет использования кодов Фибоначчи для проведения аналого-цифрового преобразования. Недостатком этой архитектуры является использование общих шин и централизованной системы управления, возникновение константных дефектов в которых может приводить к отказу АЦП в целом.

С учетом вышесказанного, актуальной задачей является создание оригинальной отказоустойчивой архитектуры АЦП НС, которая позволила бы обрабатывать одновременно большое число входных сигналов с различной разрядностью, при этом формирование индивидуальных АЦП (ИАЦП) для этих

сигналов будет происходить за счет объединения определенного количества звеньев (нейронов) с образованием отдельного измерительного канала. При этом управление формированием ИАЦП и проведением аналого-цифрового преобразования будет осуществляться с помощью местного фрагментарного устройства управления (МФУУ), распределенного между нейронами, что позволяет избежать ошибок при отказах в отдельных нейронах, повысить отказоустойчивость, а также уменьшить аппаратные затраты на один нейрон по сравнению с использованием полностью децентрализованной системы управления.

Объектом исследования является самомаршрутизирующийся АЦП НС, обладающий улучшенными характеристиками быстродействия и надежности.

Предметом исследования являются методы проектирования и математические модели самомаршрутизирующегося АЦП на основе нейронной сети, позволяющей проводить параллельное измерение заданного числа входных сигналов с различной разрядностью, а также улучшить отказоустойчивость за счет введения дополнительных связей между нейронами.

Цель диссертационной работы состоит в разработке архитектуры самомаршрутизирующегося АЦП НС высокой надежности и быстродействия за счет формирования ИАЦП произвольной величины (из заданного диапазона), требующих минимальных дополнительных аппаратных затрат.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели в рамках диссертационной работы были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Разработана архитектура самомаршрутизирующегося АЦП НС, позволяющая формировать ИАЦП произвольной разрядности за счет объединения требуемого количества основных измерительных нейронов (ОИН) в пределах (q_{\min} ; q_{\max}), что позволяет проводить измерение входных сигналов одновременно с различной разрядностью.

2. Построены и исследованы математические модели ОИН, описывающие поведение нейрона, определены значения весовых коэффициентов и активационные функции, что позволило разработать две структуры НС, состоящие из одного и двух скрытых слоев нейронов соответственно, которые обеспечивают настройку точности и скорости измерения каждого входного сигнала в отдельности.

3. Создан метод самомаршрутизации сигналов внутри НС на различных этапах работы АЦП НС: формирование ИАЦП под конкретный входной сигнал, проведение измерения с помощью сформированного ИАЦП, разрушение ИАЦП и освобождение НС – а также разработано МФУУ, реализующее предложенный метод и распределенное между ОИН, для увеличения надежности за счет использования дополнительных связей между ОИН.

4. Разработаны аналитическая модель в классе систем массового обслуживания (СМО) и имитационная модель АЦП НС, позволяющие получать его вероятностно-временные характеристики (ВВХ) в зависимости от

начальных параметров сети с учетом возникновения отказов в некоторых ОИН в процессе эксплуатации и наличия дополнительных связей между ними.

5. Для проектирования АЦП НС построена оптимизационная функция и создана методика определения параметров АЦП НС на базе аналитической и имитационной моделей для обеспечения заданных технических требований с минимальными аппаратными затратами.

6. Выполнено внедрение в составе системы автоматизации испытаний авиационных агрегатов 16-ти канального самомаршрутизирующегося АЦП НС, показавшее эффективность его применения по сравнению с используемым ранее оборудованием по надежности и аппаратным затратам.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена новая архитектура АЦП НС, состоящая из основных измерительных нейронов (одноразрядных преобразователей), с помощью которых возможно формировать ИАЦП требуемой разрядности и проводить параллельное измерение входных сигналов, отличающаяся тем, что системы управления распределена между нейронами, что позволяет повысить отказоустойчивость преобразователя.

2. Создан оригинальный метод самомаршрутизации сигналов внутри АЦП, позволяющий формировать ИАЦП требуемой разрядности, в том числе с использованием дополнительных связей между ОИН, отличающийся тем, что для исключения неисправных нейронов используется МФУУ, что повышает отказоустойчивость структуры на уровне каждого ОИН.

3. Построены новые математические модели ОИН, описывающие поведение нейрона на всех этапах работы АЦП НС, учитывающие разделение МФУУ между ОИН и метод самомаршрутизации, отличающиеся тем, что позволяют увеличить быстродействие за счет параллельного измерения входных сигналов с переменной разрядностью.

4. Разработаны новые аналитическая и имитационная модели для оценки ВВХ АЦП НС в зависимости от начальных параметров сети, отличающиеся тем, что учитывают наличие дополнительных связей между ОИН в НС, самомаршрутизацию сигналов, параллельное измерение входных сигналов с различной разрядностью и возникновения отказов в ОИН с течением времени.

5. Создана оригинальная методика выбора оптимальных параметров АЦП НС, удовлетворяющих техническим требованиям к проведению измерений и обеспечивающих заданные ВВХ АЦП НС, на основе предложенной оптимизационной функции, отличающаяся тем, что обеспечивает минимизацию аппаратных затрат на реализацию АЦП НС с учетом возникновения отказов в ОИН и наличия дополнительных связей между ними.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новой архитектуры нейронной сети и метода самомаршрутизации сигналов в ней, позволяющих использовать единый аппаратный ресурс для задач, связанных с параллельными вычислениями, а также увеличивающих отказоустойчивость системы за счет исключения из сети неисправных нейронов. Созданные

аналитическая и имитационная модели нейронной сети позволяют изучать вероятностно-временные характеристики для разрабатываемых в дальнейшем устройств и систем различного применения.

Практическая значимость работы заключается в применении оригинальной архитектуры нейронной сети для создания новых классов устройств не только для проведения измерений, но и в области передачи и хранения данных и в других областях практического применения автоматизированных систем для проведения параллельных вычислений. Разработанное местное фрагментарное устройство управления позволяет использовать оригинальный метод самомаршрутизации для модернизации существующих распределенных систем управления за счет уменьшения дублирования функций управления в каждом элементе. Предложенная архитектура и модели использованы при построении 16-канального АЦП НС, внедренного в состав системы автоматизации испытаний авиационных агрегатов на АО «ОДК-СТАР», что позволило сократить аппаратные затраты на 20-30% в зависимости от требуемой точности и интенсивности проводимых измерений. Результаты диссертационного исследования применены в учебном процессе, при проведении лабораторных работ по дисциплине «Электроника» на кафедре «Автоматики и телемеханики» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ).

Методология и методы исследования. В ходе решения поставленных задач использовались методы проектирования цифровых устройств и теории электрических цепей, теории автоматического управления, теории систем и сетей массового обслуживания, теории математического моделирования, метрологии, методологии построения имитационных моделей и теории эксперимента, программные комплексы компьютерного моделирования MultiSim, AnyLogic и Quartus.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая архитектура самомаршрутизирующегося АЦП НС, являющаяся научной основой для формирования и исследования ИАЦП произвольной разрядности из заданного диапазона (q_{\min} ; q_{\max}), построенных на основе объединения универсальных и однотипных ОИН (**п. 1**).

2. Новые математические модели ОИН, которые позволяют провести теоретический анализ и экспериментальные исследования поведения нейрона при формировании ИАЦП и обеспечивают настройку скорости и точности измерения каждого входного сигнала в отдельности (**п. 2**).

3. Оригинальный метод самомаршрутизации сигналов внутри НС, повышающий надежность АЦП НС за счет использования дополнительных связей и распределения МФУУ между ОИН (**п. 4**).

4. Новые аналитическая и имитационная модели АЦП НС в виде СМО, позволяющие провести теоретический анализ и экспериментальные исследования ВВХ АЦП НС в зависимости от начальных параметров сети с

учетом возникновения отказов в ОИН с течением времени и наличия дополнительных связей между ними (п. 2).

5. Оригинальный научный подход (методика) к созданию и исследованию АЦП НС на основе разработанных аналитической и имитационной моделей и предложенной оптимизационной функции, позволяющий выбрать оптимальные параметры НС исходя из заданных технических требований и обеспечить минимальные аппаратурные затраты (п. 1).

6. Результаты экспериментальных исследований и практической реализации АЦП НС в рамках многопоточного адаптивного измерительного канала в системе автоматизации испытаний авиационных агрегатов (п. 2)

Область исследования соответствует пп. 1, 2 и 4 паспорта научной специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

Достоверность полученных результатов. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат теоретическим положениям, известным из публикаций других авторов, и подтверждаются результатами расчетов, компьютерного моделирования и результатами исследования функциональной модели АЦП НС, а также экспериментальными данными, полученными в ходе внедрения самомаршрутизирующегося АЦП НС в систему автоматизации испытаний авиационных агрегатов (САИ АА) для параллельного измерения 16 входных сигналов с различных датчиков с переменной точностью.

Апробация результатов. Основные результаты работы обсуждались на XII Всероссийском совещании по проблемам управления, г. Москва, 2014; Всероссийских научно-технических конференциях «Автоматизированные системы управления и информационные технологии», г. Пермь, 2013-2016; II Российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О.В. Лосева, г. Нижний Новгород, 2015, а также на семинарах ПНИПУ

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 13 научных работах, из них: 6 опубликованы в журналах, входящих в перечень ведущих журналов и изданий, рекомендуемых ВАК; 3 – в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus; остальные – в тезисах докладов, материалах конференций и прочих источниках.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Содержит 159 страниц машинописного текста, 88 рисунков и 26 таблиц, списка использованной литературы из 98 наименований, приложения на 8 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность проблемы разработки нового класса АЦП НС, главной особенностью которого являются самомаршрутизация и местное фрагментарное устройство управления, а также высокая

отказоустойчивость системы при минимальных аппаратурных затратах на реализацию. Для решения данной проблемы предлагается использовать НС, состоящую из универсальных ОИН с самомаршрутизацией сигналов. Определены объект и предмет исследования, поставлена цель и сформулированы задачи, а также выделены научная и практическая новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются современные тенденции в создании аналого-цифровых преобразователей на основе нейронных сетей. Среди основных недостатков выделены: малое количество измеряемых сигналов, низкая отказоустойчивость из-за наличия централизованной системы управления, высокие аппаратурные затраты на реализацию. Для решения сформулированных проблем был выбран метод поразрядного взвешивания с помощью матрицы R-2R, так как этот метод показал наименьшие аппаратурные затраты на реализацию по сравнению с другими приведенными методами.

В матрице R-2R выделен единичный измерительный компонент (ИК) – одно звено матрицы R-2R (рисунок 1), которое содержит 3 электронных ключа: ключи №1 и №2 отвечают за объединение отдельных ИК в матрицу R-2R, а ключ №3 отвечает за добавление напряжения, которое зависит от положения ИК в матрице R-2R, к общему уравнивающему напряжению. При этом необходимо отметить, что за счет ключа №2 старший ИК в матрице подключается к компаратору, передавая на него уравнивающее напряжение, а ключ №1 в младшем ИК соединяет матрицу с последним сопротивлением R, которое обеспечивает баланс в матрице. Таким образом, каждый ИК может быть и первым, и последним в ИАЦП.

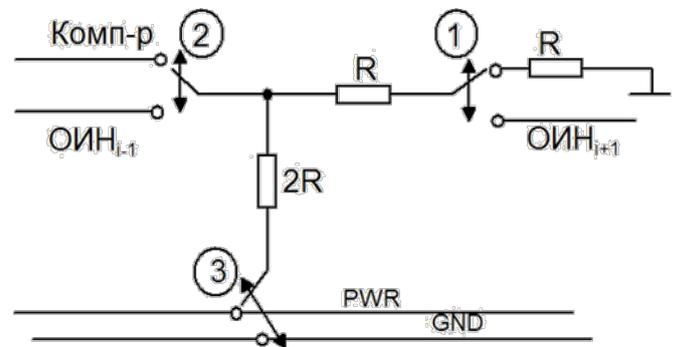


Рисунок 1 – ИК с возможностью изменения положения в матрице R-2R

При разработке НС ключевым элементом выступает основной измерительный нейрон (ОИН), внутри которого размещается ИК, а также системы управления и контроля. Между собой ОИН соединены по топологии мультикольца, которая обеспечивает возможность формировать ИАЦП для параллельного измерения входных сигналов и при этом увеличивает отказоустойчивость сети за счет дополнительных связей между ОИН. Кроме того, топология мультикольца позволяет уйти от системы централизованного управления в сети, используя методы самомаршрутизации сигналов между элементами сети. Самомаршрутизация сигналов требует распределенной системы управления (PCY), которая приведет к кратному увеличению аппаратурных затрат из-за размещения полноценной системы управления в каждом из ОИН. Для снижения аппаратурных затрат предлагается разделить

элементы системы управления между ОИН таким образом, чтобы в каждом из них содержалась только часть местного фрагментарного устройства управления (МФУУ). В процессе формирования ИАЦП происходит объединение ОИН, и части МФУУ образуют полноценную систему управления.

В результате поставлена общая задача исследования, формализованная следующим образом. Дано: множество X входных аналоговых сигналов: $X = \{x_1, x_2 \dots x_n\}$; множество Y выходных цифровых сигналов: $Y = \{y_1, y_2 \dots y_n\}$; существующий адаптивный АЦП ПДА с центральным устройством управления (ЦУУ) ADC_0 , содержащий множество A измерительных элементов (ИЭ): $A = \{a_1, a_2 \dots a_m\}$, где $m = nq_{\max}$, q_{\max} – максимально возможная разрядность для измерения одного сигнала. Существующий ADC_0 характеризуется следующими параметрами: погрешность измерения ε_0 , аппаратные затраты на систему управления C_0 , вероятность обработки всех входных сигналов P_0 с учетом возможных отказов в ИЭ или ЦУУ.

Требуется разработать самомаршрутизирующийся АЦП НС с МФУУ ADC_1 , содержащий множество B основных измерительных нейронов (ОИН): $B = \{b_1, b_2 \dots b_N\}$. Для определения N требуется построить аналитическую и имитационную модели самомаршрутизирующегося АЦП НС в классе СМО и разработать методику проектирования, которая позволит обеспечить требуемую вероятность обработки всех входных сигналов P_1 с учетом возможных отказов в ОИН и минимизировать аппаратные затраты на систему управления ($C_1 \rightarrow \min$). При этом необходимо выполнить следующие условия: $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_0$; $P_1 \geq P_0$; $C_1 \leq C_0$.

Во второй главе была поставлена задача построить математические модели ОИН на всех этапах работы самомаршрутизирующегося АЦП НС и разработать метод самомаршрутизации сигналов внутри сети.

В ходе решения поставленной задачи была получена структура АЦП НС и разработан алгоритм работы, состоящий из трех основных этапов: формирование ИАЦП для входного сигнала; проведение аналого-цифрового преобразования; разрушение ИАЦП. Для каждого из этапов была построена математическая модель, в которой определены весовые коэффициенты входных сигналов и пороговая функция активации. При этом показано, что не все весовые коэффициенты являются постоянными: величина некоторых из них зависит от времени и положения ОИН в ИАЦП – таким образом, нейронная сеть является детерминированной сетью прямого распространения, в которой настройка коэффициентов происходит без учителя.

Для объединения ОИН в ИАЦП и самомаршрутизации сигналов между ними предложено две структуры НС, которые реализуют построенные математические модели. Многослойная НС содержит дополнительный слой коммутаторов (Км), которые собирают информацию о состоянии ОИН и распределяют между ними ИАЦП, что позволяет эффективно использовать ресурс НС. Недостатки такой структуры заключаются в самих Км: возникновение отказа в одном из них приведет к существенному сокращению

возможностей АЦП НС, а также большие аппаратурные затраты на реализацию Км по сравнению с ОИН. Для устранения этих недостатков и унификации структуры нейронов показано, что для самомаршрутизирующегося АЦП лучше использовать однослойную НС (рисунок 2). Такая сеть позволяет обеспечить максимальную автономность ОИН и увеличить отказоустойчивость, так как при наличии дополнительной связи возникновение отказа в одном из ОИН снижает возможности АЦП НС на формирование всего лишь одного разряда.

Разработан метод самомаршрутизации сигналов в однослойной НС при помощи алгоритма «эхо-локации», который позволяет ОИН самостоятельно определять состояние сети. Каждый ОИН может находиться в двух состояниях активном и пассивном. Активные ОИН отправляют в сеть сигнал «эхо-запрос», последовательность логических «1» длительностью соответствующей максимально возможной разрядности формируемых ИАЦП. Пассивные ОИН, в которые

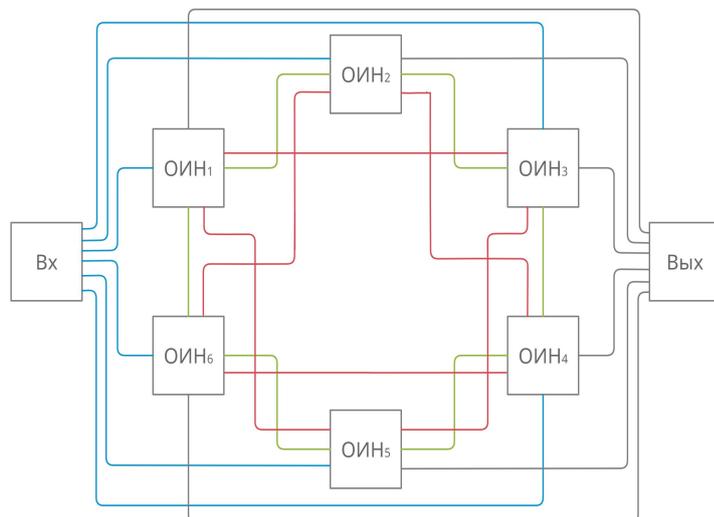


Рисунок 2 – Пример однослойной НС с одним входным и выходным нейронами и 6 ОИН в скрытом слое и одной дополнительной связью между ними

поступает «эхо-запрос», передают его дальше по кольцу, уменьшая на одну из «1», а также отправляют в противоположном направлении «эхо-ответ», импульс «1» длительностью один такт. Таким образом, подсчитывая количество поступивших «эхо-ответов», активный ОИН получает информацию о возможности формирования ИАЦП соответствующей разрядности, начиная с себя. Так как входные сигналы поступают в случайные моменты времени, то и формирование ИАЦП происходит независимо в разных участках сети, поэтому для поддержания актуальности сведений о состоянии сети обеспечены постоянная циркуляция «эхо-запросов» в сети и соревновательное распределение входящих заявок между активными ОИН. Это позволяет «уплотнить» размещение ИАЦП в сети, чтобы эффективнее использовать доступный ресурс НС.

Разработана структура ОИН (рисунок 3), содержащая три основных блока: измерительная часть, блок МФУУ и блок контроля – а также два вспомогательных: входные и выходные ключи. Измерительная часть ОИН состоит из аналоговой части (звено матрицы R-2R в виде ИК) и цифровой части, которая определяет состояние ИК. МФУУ отвечает за состояние входных и выходных ключей на этапе формирования ИАЦП и управляет порядком срабатывания ИК на этапе проведения аналого-цифрового

преобразования, а также инициирует разрушение ИАЦП после окончания измерения входного сигнала. Блок контроля необходим для проверки исправности ОИН на всех этапах работы АЦП НС.



Рисунок 3 – Структура предлагаемого ОИН

Разработаны функциональные схемы всех блоков ОИН с целью определения аппаратных затрат на реализацию одного нейрона. В основу расчетов положен базис 2И-НЕ элементов, позволяющий оценить мощность СБИС требуемой для реализации самонастраивающегося АЦП НС. Зависимость аппаратных затрат $C_{ОИН}$ на реализацию ОИН в зависимости от параметров АЦП НС выражена функцией:

$$C_{ОИН} = f(s, n, q_{max}) = C_1(0,23s + 0,08n + 0,03 \log_2 q_{max} + 1), \quad (1)$$

где s – количество дополнительных связей между ОИН; n – количество входных сигналов; q_{max} – максимальная разрядность ИАЦП; C_1 – количество элементов 2И-НЕ для реализации базового ОИН.

В качестве базового был взят ОИН, рассчитанный на один входной сигнал и максимальную разрядность – 16 ИК, объединенный в НС без дополнительных связей. Для оценки общих аппаратных затрат на реализацию НС можно использовать следующую функцию, так как ОИН составляют более 90% объема аппаратных затрат на реализацию НС:

$$C_{\Sigma} = f(N, C_{ОИН}) \quad , \quad (2)$$

где $C_{ОИН}$ – аппаратные затраты на один ОИН; N – количество ОИН.

Используя (1) и (2), можно получить функцию для оценки аппаратных затрат на реализацию НС в зависимости от параметров АЦП НС:

$$C_{\Sigma} = f(N, s, n, q_{max}) = NC_1(0,23s + 0,08n + 0,03 \log_2 q_{max} + 1) \quad (3)$$

Для проверки работоспособности разработанных функциональных схем и оценки аппаратных затрат были созданы модель АЦП НС в программной среде MultiSim, а также макет на базе ПЛИС Intel в программной среде Quartus. Отклонение между теоретическим расчетом и результатами, полученными по макету, составляет не более 5%, что объясняется компиляцией проектов с учетом входных и выходных нейронов.

Так как n и q_{max} – параметры, как правило, определяемые заказчиком, а N и s определяются разработчиком, то определить оптимальные значения этих параметров, используя только один критерий (3) не представляется возможным,

поэтому было решено ввести дополнительный критерий оптимальности параметров АЦП НС, а именно временно-вероятностные характеристики (ВВХ) его работы.

В третьей главе была поставлена задача создать методику для расчета оптимальных параметров самомаршрутизирующегося АЦП НС. Для того чтобы определить ВВХ АЦП НС, решено использовать аналитическое и имитационное моделирование АЦП НС. После анализа потока входных заявок на формирование ИАЦП было установлено, что его можно считать простейшим пуассоновским потоком.

Аналитическая модель, таким образом, согласно классификации Кендала будет иметь вид векторной системы массового обслуживания (СМО) с отказами М/М/п. Кроме того, так как в ОИН могут возникнуть отказы и тем самым уменьшить возможности НС по формированию ИАЦП, то модель АЦП НС должна быть представлена в виде соединения нескольких векторных графов СМО с различными параметрами НС. Анализ зависимости ВВХ от состояния НС привел к выводу о том, что вероятность наступления отказа входящей заявки можно определить как отношение времени нахождения СМО в состояниях отказа ко всему времени моделирования. Этот порядок расчета был использован при построении усовершенствованной аналитической модели СМО в программной среде AnyLogic, которая по начальным параметрам АЦП НС автоматически генерирует граф СМО и определяет состояния, в которых будет наступать отказ в обслуживании входным заявкам в зависимости от состояния НС. Анализ результатов аналитической и усовершенствованной моделей показал их полную идентичность. Поэтому для аналитического расчета будет использоваться модель в AnyLogic, так как она позволяет проводить серии экспериментов в автоматическом режиме, когда ВВХ рассчитывается для заданного диапазона изменений одного из параметров. Кроме того, расчет с помощью усовершенствованной аналитической модели занимает меньшее количество времени по сравнению с имитационным моделированием, так как процесс построения графов СМО и расчет вероятностей переходов в нем не требует значительных вычислительных ресурсов.

Недостаток усовершенствованной аналитической модели заключается в том, что при моделировании они не учитывают методы самомаршрутизации сигналов при работе АЦП НС. Поэтому была построена имитационная модель АЦП НС, которая учитывает все этапы работы и положение уже сформированных ранее ИАЦП в НС при формировании нового ИАЦП. С помощью имитационной модели были получены уточненные ВВХ АЦП НС, при сравнении их с результатами аналитической модели (рисунок 4) был сделан вывод об их адекватности по критерию Пирсона (отклонение не более 5%).

Время затрачиваемое на имитационное моделирование значительно выше, поэтому при разработке методики определения оптимальных параметров АЦП НС усовершенствованная аналитическая модель будет использоваться для

первичной грубой оценки параметров АЦП НС, а имитационная модель позволит уточнить их и принять решение об окончательном выборе параметров АЦП НС.

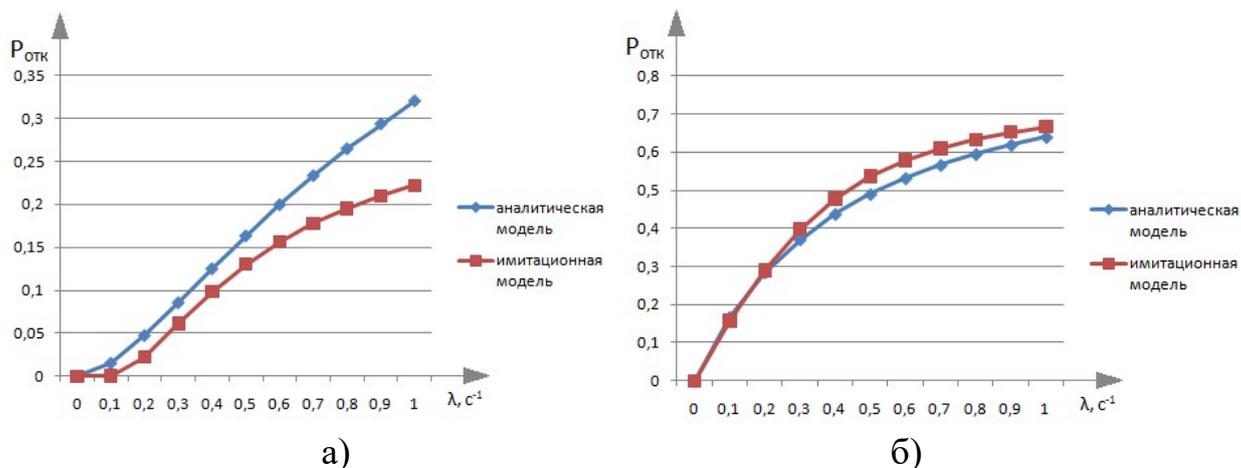


Рисунок 4 – Графики результатов моделирования (а – базовая НС с двумя последовательно отказавшими ОИН, б – базовая НС с двумя отказавшими ОИН через один исправный)

Для получения параметров АЦП НС под конкретные требования заказчика необходимо осуществить многокритериальную оптимизацию по двум критериям: аппаратурные затраты на реализацию и ВВХ. В качестве управляемых параметров выступают N и s :

$$F = \min_{(N;s)} C = \min_{(N;s)} f(n, N, s, q_{\max}), \quad (5)$$

$$0 \leq P_{отк}(T) \leq 0.0063, \quad (6)$$

$$nq_{\max} C_1 \leq C \leq Q_{\max}. \quad (7)$$

Для решения задачи многокритериальной оптимизации применен метод поисковой оптимизации, при этом для получения целевой функции использован метод частного критерия – в таком случае целевая функция может быть представлена в виде (5) с ограничивающими условиями (6) и (7). Для решения (5) была разработана методика определения оптимальных значений N и s с помощью поисковой оптимизации, используя усовершенствованную аналитическую и имитационную модели АЦП НС.

Четвертая глава посвящена внедрению самомаршрутизирующегося АЦП НС в многопоточный адаптивный измерительный канал (МАИК) системы автоматизации испытаний авиационных агрегатов (САИ АА). Для этого был изучен испытательный стенд, определены параметры, предъявляемые к АЦП, такие как: количество измеряемых сигналов, требуемая точность измерения, интенсивность входящих заявок на формирование ИАЦП и интенсивность обработки отсчетов с помощью сформированных ИАЦП. По этим параметрам и разработанной методике были подобраны оптимальные значения N и s для АЦП НС.

В соответствии с этими параметрами и разработанными функциональными схемами был спроектирован 16 канальный самомаршрутизирующийся АЦП НС, который встроен в структуру МАИК САИ

АА (рисунок 5), где С – это сигналы с датчиков, К – компараторы, АА – анализаторы активности канала, УДП – устройство динамического приоритета. Для реализации самомаршрутизирующегося АЦП НС пришлось разделить аналоговую и цифровую части преобразователя, так как создание специализированной СБИС на текущем этапе было недоступно. Поэтому цифровая управляющая часть была реализована на базе имеющейся ПЛИС фирмы Intel, а для аналоговой части была разработана печатная плата, на которой размещаются сопротивления, компараторы и ключевые элементы методом навесного монтажа.

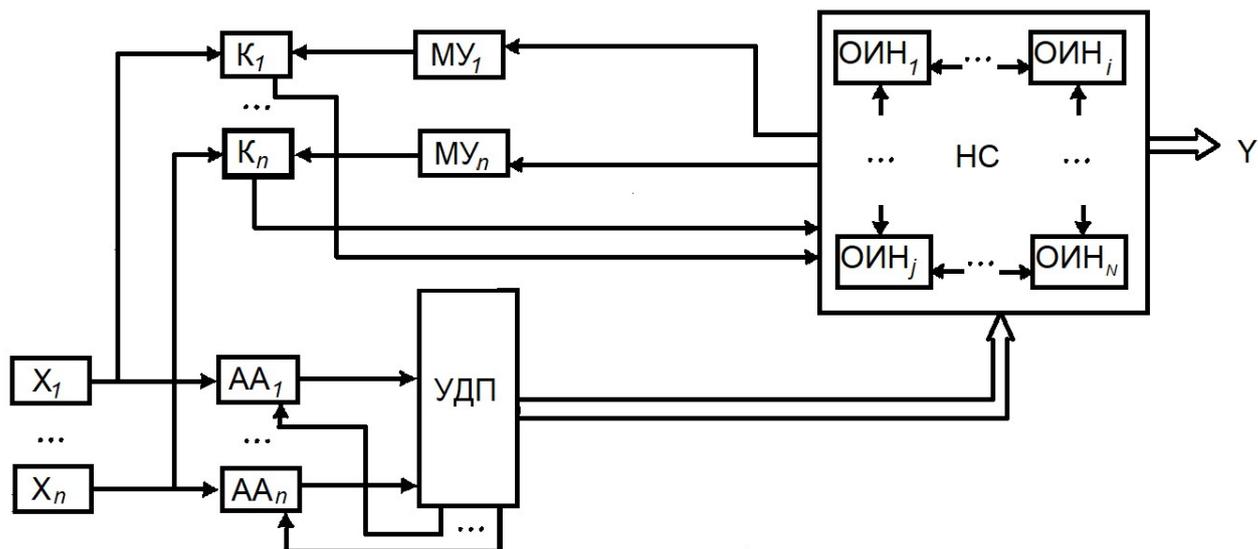


Рисунок 5 – Структура самомаршрутизирующегося АЦП НС

Полученный преобразователь обладает следующими основными характеристиками: количество измеряемых сигналов – 16, разрядность преобразователей при измерении находится в диапазоне от 4 до 19, погрешность измерения не хуже 0,1%, время наработки на отказ – не менее 8000 час (экспертная оценка). Также была проведена серия экспериментов для определения вероятности обработки всех входных сигналов при возникновении отказов в части ОИН, для этого была добавлена возможность искусственно отключить ОИН от сети. Анализ результатов показал, что даже при отключении половины ОИН сохраняется возможность проводить измерения, уменьшив их интенсивность до 20% от максимальной или ниже.

Для оценки эффективности предложенной архитектуры по сравнению с адаптивным АЦП ПДА, проанализированы целевые параметры, поставленные в начале исследования. Погрешности измерения обоих устройств показывают сопоставимые значения и в целом не превышают 0,1%, это объясняется одинаковым методом аналого-цифрового преобразования на основе матрицы R-2R. Вероятность обработки всех входных сигналов (рисунок 6, а) показала, что отказоустойчивость самомаршрутизирующегося АЦП НС на порядок выше, так как любые неисправности в адаптивном АЦП ПДА приводят к значительному сокращению возможностей для измерения, вплоть до полного

отказа всего устройства. При этом выполнена поставленная задача по минимизации аппаратных затрат на реализацию системы управления (рисунок 6, б), применение МФУУ в самомаршрутизирующемся АЦП НС позволило сократить аппаратные затраты на 20-30% в зависимости от интенсивности потока входных заявок на измерение. Кроме того, наращивание интенсивности потока входных заявок увеличивает эту разницу, а значит использование самомаршрутизирующегося АЦП НС для измерения большего количества сигналов с большей интенсивностью будет еще эффективнее.

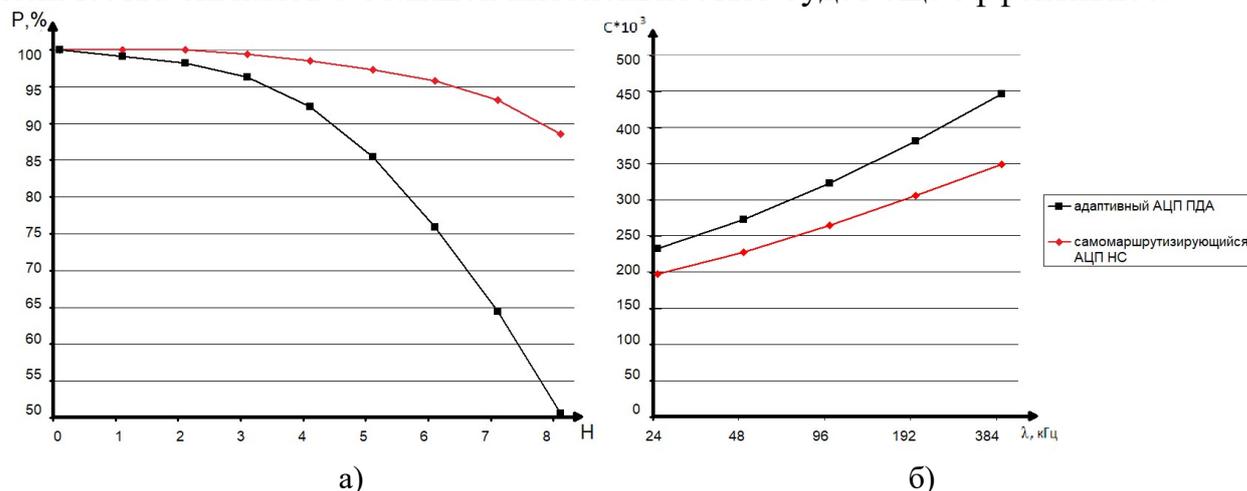


Рисунок 7 – Графики для адаптивного АЦП ПДА и самомаршрутизирующегося АЦП НС (а – вероятности обработки всех входных сигналов в зависимости от количества отказавших ИЭ или ОИН, б – зависимости аппаратных затрат от интенсивности потока входных заявок)

В качестве эксперимента на базе созданной схемы был проверен метод мажоритирования измерения сигналов за счет подачи сигнала одновременно на три ИАЦП. Метод показал эффективность в части обнаружения отклонения в результатах измерения, что в будущем предлагается использовать для диагностики состояния НС и для линеаризации характеристики измерителя.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных теоретических и экспериментальных диссертационных исследований.

Основные результаты и выводы

В ходе выполнения работы осуществлена разработка архитектуры самомаршрутизирующегося АЦП НС высокой надежности и быстродействия за счет формирования ИАЦП произвольной величины (из заданного диапазона), требующих минимальных дополнительных аппаратных затрат и получены следующие основные результаты:

1. Разработана новая архитектура самомаршрутизирующегося АЦП НС, в которой выделены ОИН, позволяющие формировать ИАЦП для параллельного измерения входных сигналов с разной разрядностью по каждому входному сигналу. При этом ОИН является универсальным элементом, что позволяет формировать ИАЦП произвольной величины в пределах $(q_{\min}; q_{\max})$ на любом свободном участке сети.

2. Построены и исследованы математические модели ОИН, для которых определены весовые коэффициенты и активационные функции на этапах формирования ИАЦП и параллельного измерения входных сигналов. На базе этих моделей разработаны две структуры НС, состоящие из одного и двух скрытых слоев соответственно, а также достигнуто увеличение отказоустойчивости устройства благодаря исключению отказавших ОИН из сети за счет дополнительных связей между ними. Анализ предложенных НС показал, что более эффективным является использование однослойной сети.

3. Создан оригинальный метод самомаршрутизации сигналов внутри однослойной НС, который обеспечивает параллельную обработку входных сигналов на всех этапах работы АЦП НС. Разработаны структура ОИН и МФУУ в ней для управления процессом самомаршрутизации сигналов. Для реализации предложенных структурных схем всех блоков ОИН созданы функциональные модели в программной среде MultiSim.

4. Разработаны аналитическая и имитационная модели для определения ВВХ АЦП НС в зависимости от начальных параметров сети, исправности ОИН и от положения ранее сформированных ИАЦП, а также их взаимного расположения. Модели, разработанные в программном комплексе AnyLogic, способны в автоматическом режиме проводить серии экспериментов, собирая результаты при изменяющихся в заданном диапазоне параметрах АЦП НС.

5. Создана методика расчета оптимальных параметров для проектирования самомаршрутизирующегося АЦП НС в зависимости от технических требований к измерительному каналу методом однокритериальной поисковой оптимизации, где целевой функцией является минимизация аппаратных затрат, а основными параметрами выступают количество ОИН и дополнительных связей между ними.

6. Предложенная методика использована для внедрения на АО «ОДК-СТАР» в МАИК САИ АА 16-канального самомаршрутизирующегося АЦП НС, что позволило сократить аппаратные затраты на реализацию МАИК на 20% и увеличить надежность по сравнению с использованным ранее оборудованием.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, индексируемых в международной базе SCOPUS:

1. Katsko, E. V. An autocontrol system based on neurons in a self-routing analogue converter / E. V. Katsko, A. I. Posyagin, A. A. Yuzhakov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85. – No 11. – P. 703-707.

2. Makagonov, N. G. The structure and operating algorithm of a commutator in the neural network of a self-routing analog-to-digital converter / N. G. Makagonov, A. I. Posyagin, A. A. Yuzhakov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No 11. – P. 670-674.

3. Review of analog-To-digital converter based on neural network with multilayer ring architecture / A. F. Vasbieva, A. V. Eltyshev, A. I. Posyagin, A. A. Yuzhakov // Proceedings of 2017 XX IEEE international conference on soft computing and

measurements (SCM), Saint-Petersburg, 24–26 мая 2017 года. – Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. – P. 638-640.

Публикации в рецензируемых журналах ВАК:

4. Посягин, А.И. Разработка аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети / А.И. Посягин, А.А. Южаков // *Электротехника*. – 2012. – №11. – С. 18а-24.

5. Посягин, А.И. Разработка двухслойной нейронной сети для самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети / А.И. Посягин, А.А. Южаков // *Электротехника*. – 2013. – №11. – С. 10-13.

6. Посягин, А.И. Самомаршрутизация сигналов в аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети / А.И. Посягин, А.А. Южаков // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2014. – Т. 57. – №5. – С. 38-43.

7. Елтышев, А.В. Анализ имитационной модели нейронной сети самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя / А.В. Елтышев, А.И. Посягин, А.А. Южаков // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2015. – №10. – С. 21-25.

8. Васбиева, А.Ф. Структура основного измерительного нейрона в самомаршрутизирующемся аналого-цифровом преобразователе / А.Ф. Васбиева, Л.М. Онискива, А.И. Посягин, А.А. Южаков // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2015. – Т.13. – №9. – С. 3-8.

9. Елтышев, А. В. Построение новой архитектуры для нейросетевого аналого-цифрового преобразователя с использованием многоуровневого кольца / А. В. Елтышев, А. И. Посягин, А. А. Южаков // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2017. – № 6. – С. 15-19.

В других изданиях:

10. Posyagin, A.I., Review of self-routing analog-to-digital converter based on neural network / Posyagin A.I., Yuzhakov A.A. // *Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности*. – 2013. – Т. 1. – С. 112-115.

11. Посягин, А.И. Самомаршрутизация сигналов в аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети / А.И. Посягин, А.А. Южаков // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2014. – Т. 57. – №5. – С. 38-43.

12. Посягин, А.И. Парадигма построения самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети / Посягин А.И., Южаков А.А. // В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2014. – С. 7159-7165.

13. Васбиева, А.Ф. Обзор принципов маршрутизации сигналов в аналого-цифровом преобразователе на основе однослойной нейронной сети / А.Ф. Васбиева, А.И. Посягин, А.А. Южаков // *Труды II Российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной*

радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О.В. Лосева. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. – 2015. – С. 331-334.