

ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Южаков А.А.

Пермь – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	11
1.1. Анализ существующих разработок аналого-цифровых преобразователей на основе нейронных сетей.....	11
1.2. Обоснование выбора метода аналого-цифрового преобразования для реализации потоковой динамической архитектуры	15
1.3. Анализ возможности использования искусственной нейронной сети для АЦП ПДА	23
1.4. Обоснование выбора метода маршрутизации сигналов.....	31
1.5. Обоснование выбора системы управления для самомаршрутизирующегося АЦП НС и постановка задачи исследования	36
1.6. Выводы	39
2. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ САМОМАРШРУТИЗИРУЮЩЕГОСЯ АЦП И АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ ОСНОВНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО НЕЙРОНА	41
2.1. Определение математической модели и активационной функции основного измерительного нейрона.....	41
2.2. Построение математической модели для системы самомаршрутизации сигналов по нейронной сети	43
2.2.1. Многослойная нейронная сеть.....	44
2.2.2. Однослойная нейронная сеть	49
2.3. Разработка общей архитектуры и выделение этапов работы самомаршрутизирующегося АЦП НС	53
2.4. Разработка структуры ОИН для однослойной НС.....	60
2.4.1. Разработка структуры измерительной части ОИН для проведения аналого-цифрового преобразования.....	61
2.4.2. Разработка структуры местного фрагментарного устройства управления ОИН для однослойной НС	64
2.4.3. Разработка структуры блока контроля ОИН для определения исправности остальных блоков	73
2.4.4. Разработка структуры входных и выходных ключей ОИН, обеспечивающих маршрутизацию сигналов внутри НС	76
2.5. Оценка аппаратурных затрат на реализацию структуры ОИН в зависимости от параметров АЦП НС	78
2.6. Моделирование АЦП НС и получение временных характеристик его работы	82

2.6.1. Разработка модели АЦП НС в программной среде MultiSim.....	82
2.6.2. Разработка макета МФУУ ОИН в программной среде Intel Quartus	87
2.6.3. Сопоставление аппаратных затрат на реализацию АЦП НС с помощью разработанных моделей и макета	92
2.7. Выводы	98
3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПОД ЗАДАННУЮ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ.....	100
3.1. Выбор среды моделирования для построения аналитической и имитационной моделей нейронной сети.....	100
3.2. Разработка аналитической модели нейронной сети с помощью теории систем массового обслуживания	103
3.2.1. Построение графа векторной модели СМО формирования ИАЦП в самомаршрутизирующемся АЦП НС.....	103
3.2.2. Модель системы массового обслуживания формирования ИАЦП в самомаршрутизирующемся АЦП НС в среде моделирования AnyLogic.....	107
3.3. Разработка имитационной модели нейронной сети с помощью агентного подхода к моделированию.....	112
3.4. Сравнительный анализ аналитической и имитационной моделей, проверка адекватности результатов.....	116
3.5. Методика определения параметров АЦП НС для реализации устройства под заданное время безотказной работы	125
3.6. Выводы	128
4. САМОМАРШРУТИЗИРУЮЩИЙСЯ АЦП НС В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ АГРЕГАТОВ.....	130
4.1. Характеристики объекта автоматизации	130
4.2. Разработка самомаршрутизирующегося 16-ти канального АЦП НС	133
4.3. Анализ результатов модернизации САИ АА при использовании самомаршрутизирующегося АЦП НС.....	144
4.4. Выводы	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ А	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ В	167

ВВЕДЕНИЕ

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 компонентов (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, повысив 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 ОИН (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 аппаратные 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 161 страниц машинописного текста, 88 рисунков и 26 таблиц, список использованной литературы из 98 наименований, приложения на 8 страницах.

1. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

1.1. Анализ существующих разработок аналого-цифровых преобразователей на основе нейронных сетей

Применение нейронных сетей (НС) является перспективным направлением для разработки аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [1-7] за счет гибкой структуры, которая может изменяться в зависимости от внешних факторов, влияющих на точность и скорость обработки сигналов. Также НС позволяет создавать системы с высокой отказоустойчивостью за счет реконфигурации сети при возникновении отказов в отдельных ее частях [7-9]. Рассмотрим некоторые из существующих на сегодняшний день вариантов реализации архитектур АЦП НС.

Предложенная Локтюхиным В.Н. и Челебаевым С.В. НС представляет собой двухслойную сеть с двумя входными сигналами, измеряемым и опорным, активационная функция такой сети представляет собой «упрощенную» сигмоиду, что позволяет получить линейную, дробно-линейную и ступенчатую функции активации, необходимых для построения сети преобразователя, в том числе с различными типами нейронов в одном слое, что позволяет строить эффективные аппроксиматоры в виде гетерогенных сетей [10]. Обучение НС происходит по обучающей выборке, в которой равномерно распределены эмпирические данные в диапазоне измеряемой величины [11]. При помощи этой выборки осуществляется получение весовых коэффициентов между нейронами на разных слоях сети, которые позволяют аппроксимировать возникающие нелинейные искажения в отдельных нейронах при проведении измерения.

Реализация предложенной Локтюхиным В.Н. и Челебаевым С.В. структуры АЦП НС может быть выполнена с применением программируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС) с использованием каскада однослойных персептронов (Рисунок 1.1) [12]. Каждый каскад преобразователя состоит из двух нейронов распределительного слоя и двух взаимосвязанных нейронов выходного слоя. Первый нейрон выходного слоя имеет линейную функцию активации, а второй – пороговую. С выхода первого нейрона снимается аналоговая частичная сумма S , а с выхода второго нейрона – двоичная цифра β соответствующего разряда.

Обучение такой сети происходит по итерационному алгоритму Розенблатта [11, 13] для каждого каскада в отдельности, что позволяет корректировать дрейфовую составляющую погрешности преобразования, возникающую вследствие неидеальности характеристик

аналоговых элементов ПАИС. Также для снижения погрешности преобразования авторами предлагается использовать каскады предварительного усиления сигнала для снижения ошибки в младших значащих разрядах за счет увеличения весовых коэффициентов между отдельными каскадами преобразователя. В связи с недостаточной емкостью ПАИС для увеличения разрядности АЦП используется несколько микросхем, реализующих по три каскада преобразователя [11-12].

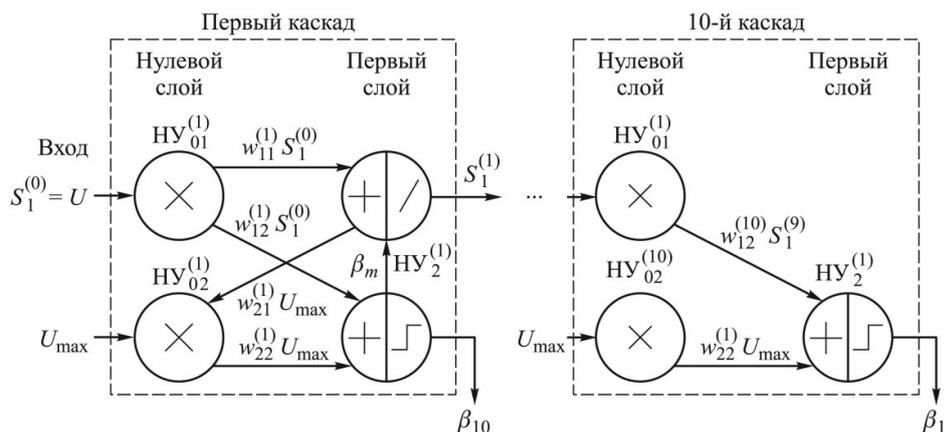


Рисунок 1.1 – АЦП НС в виде каскада однослойных перцептронов.

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 [10].

Для АЦП НС на однослойных перцептронах главным достоинством можно выделить значительное снижение погрешности измерения за счет возможности обучения НС, что позволяет корректировать весовые коэффициенты сети в ходе работы преобразователя. Также к достоинствам можно отнести:

- масштабируемость предложенной структуры благодаря однотипности каскадов;
- высокое быстродействие на этапе измерения;
- инвариантность к форме представления входного сигнала;
- невысокие аппаратные затраты на реализацию структуры, возможность использования современных ПАИС.

Но у этой структуры можно выделить и ряд существенных недостатков, основным из которых является не решенный вопрос отказоустойчивости, когда возникновение отказа в одном из нейронов делает измерение сигнала невозможным, а также:

- существенные временные задержки на подстройку схемы при изменении весовых коэффициентов;
- невозможность измерения нескольких входных сигналов, используя ресурсы одной НС;

- при изменении динамического диапазона измеряемого сигнала требуется подстройка весовых коэффициентов.

В работах Daronte P. и Grimaldi D. [4, 13, 14] 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 [13].

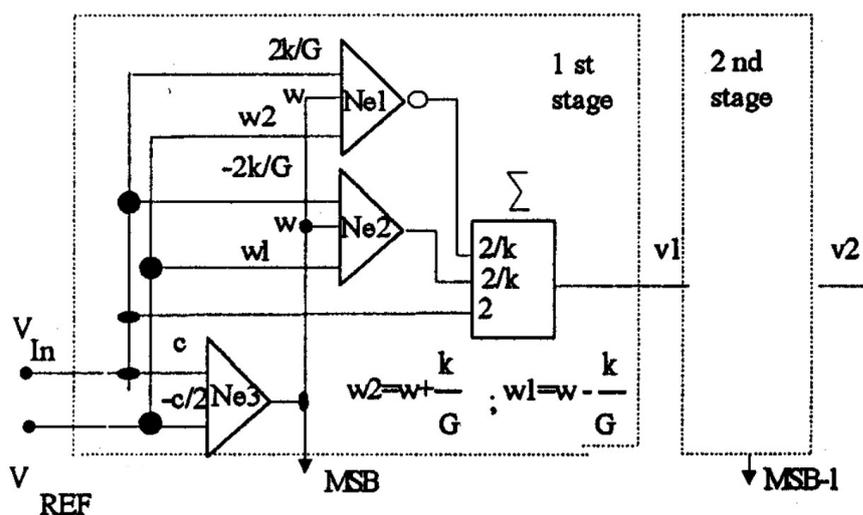


Рисунок 1.2 – АЦП НС в виде каскада двухслойных персептронов.

Структура АЦП представляет собой каскад двухслойных персептронов, каждый из которых включает в себя компаратор для получения цифрового значения текущего разряда, а также аналоговые сумматоры, позволяющие получить входное напряжение для следующего каскада. При этом выходное напряжение формируется таким образом, чтобы получить на следующем разряде значение соответствующее коду Грея (Рисунок 1.2) [13]. Весовые коэффициенты в таком случае подбираются заранее в каждом каскаде и зависят от положения каскада в преобразователе, а НС является детерминированной. Для реализации такой структуры используются операционные усилители, охваченные матрицей сопротивлений, задающих определенное смещение весового коэффициента [14].

Для АЦП НС в кодах Грея основным преимуществом является отсутствие централизованной системы управления, что позволяет не привязывать процесс измерения к внешней тактовой частоте, кроме того такая структура отличается:

- наибольшим быстродействием за счет прямого распространения аналогового сигнала с детерминированными весовыми коэффициентами;
- использование кода Грея позволяет выявлять ошибки на этапе обработки результатов измерения и исключать неверные отсчеты;

позволяет менять динамический диапазон измеряемых сигналов. Кроме того, к такой структуре возможно применение кодов «золотой пропорции» [17], что в свою очередь позволит дополнительно повысить отказоустойчивость АЦП.

Адаптивный АЦП ПДА в отличие от остальных решений может распределять ресурсы НС между входными сигналами, что позволяет использовать один преобразователь для одновременного измерения нескольких аналоговых сигналов, кроме того:

- выделение простейшего одноразрядного преобразователя в виде нейрона позволяет проектировать даже очень большие НС, просто увеличивая количество нейронов;
- удобство изменения разрядности АЦП для измеряемого сигнала за счет использования ПДА;
- возможность увеличения точности измерения за счет кодов «золотой пропорции».

Главным недостатком адаптивного АЦП ПДА является наличие централизованной системы управления преобразованием, которая значительно снижает отказоустойчивость такой структуры, в связи с этим также можно выделить:

- невозможность парирования отказов в шинах данных, которые приведут к неверным результатам измерения;
- отказ в шине управления приводит к невозможности измерения одного из входных сигналов;
- увеличение аппаратных затрат на реализацию структуры для организации системы управления, особенно с ростом количества нейронов.

В результате анализа была поставлена задача разработать новую архитектуру АЦП НС на базе адаптивного АЦП ПДА, как наиболее удачной для параллельного измерения множества сигналов, которая позволяет устранить представленные недостатки, сохраняя при этом достоинства.

1.2. Обоснование выбора метода аналого-цифрового преобразования для реализации потоковой динамической архитектуры

Для преобразования любого аналогового сигнала в цифровую форму необходимо выполнить три основные операции: дискретизацию, квантование и кодирование [1, 18, 19].

Дискретизация – представление непрерывного аналогового сигнала последовательностью его значений. Эти отсчеты берутся в моменты времени, отделенные друг от друга интервалом, который называется интервалом дискретизации. Величину, обратную интервалу между отсчетами, называют частотой дискретизации. Очевидно, что чем меньше

интервал дискретизации и, соответственно, выше частота дискретизации, тем меньше различия между исходным сигналом и его дискретизированной копией. Точность измерения может быть выполнена только в случае, если частота дискретизации по крайней мере в 2 раза превышает ширину полосы частот исходного аналогового сигнала (это условие определяется известной теоремой Котельникова) [18-19].

$$F_{\text{дискр}} \geq 2f_c, \quad (1.1)$$

где $F_{\text{дискр}}$ – частота дискретизации аналого-цифрового преобразования, а f_c – максимальная частота ограничивающая сигнал. Если это условие не выполняется, то дискретизация сопровождается необратимыми искажениями.

Квантование представляет собой замену величины аналогового отсчета сигнала ближайшим значением из набора фиксированных величин – уровней квантования. Другими словами, квантование – это округление величины отсчета. Уровни квантования делят весь диапазон возможного изменения значений сигнала на конечное число интервалов – шагов квантования. Расположение уровней квантования обусловлено шкалой квантования. В настоящее время используются как равномерные, так и неравномерные шкалы.

Цифровое кодирование. Квантованный сигнал, в отличие от исходного аналогового, может принимать только конечное число значений. Это позволяет представить его в пределах каждого интервала дискретизации числом, равным порядковому номеру уровня квантования. Для кодирования удобно применять двоичный код. Если квантованный сигнал может принимать N значений, то число двоичных символов в каждом кодовом слове:

$$q = \log_2 N$$

Кодовые слова можно передавать в параллельной или последовательной формах. Для передачи в параллельной форме надо использовать q линий связи. Символы кодового слова одновременно передаются по линиям в пределах интервала дискретизации. Для передачи в последовательной форме интервал дискретизации надо разделить на q тактов. В этом случае символы слова передаются последовательно по одной линии, причем на передачу одного символа слова отводится один такт.

Для проведения аналого-цифрового преобразования известно большое количество различных методов, каждый из которых позволяет улучшить один из параметров АЦП, при этом остальные параметры, как правило, принимаются в качестве ограничений и их значение устанавливается равным некоторой постоянной величине.

Параллельные АЦП прямого преобразования, полностью параллельные АЦП, содержат по одному компаратору на каждый дискретный уровень входного сигнала [18]. В любой момент времени только компараторы, соответствующие уровням ниже уровня входного

сигнала, выдают на своем выходе сигнал превышения. Сигналы со всех компараторов поступают либо прямо в параллельный регистр, тогда обработка кода осуществляется программно, либо на аппаратный логический шифратор, аппаратно генерирующий нужный цифровой код в зависимости от кода на входе шифратора. Данные с шифратора фиксируются в параллельном регистре. Частота дискретизации параллельных АЦП, в общем случае, зависит от аппаратных характеристик аналоговых и логических элементов, а также от требуемой частоты выборки значений.

Параллельные АЦП прямого преобразования – самые быстрые, но обычно имеют разрешение не более 8 бит, так как влекут за собой большие аппаратные затраты. Например, для 8 разрядного параллельного АЦП только компараторов требуется:

$$C_{\text{комп}} = 2^q - 1 = 2^8 - 1 = 255,$$

где q – разрядность АЦП. АЦП этого типа имеют очень большой размер кристалла микросхемы, высокое энергопотребление, и могут выдавать кратковременные ошибки на выходе. Часто используются для видео или других высокочастотных сигналов, а также широко применяются в промышленности для отслеживания быстро изменяющихся процессов в реальном времени [19].

Параллельно-последовательные АЦП прямого преобразования, частично последовательные АЦП, сохраняя высокое быстродействие позволяют значительно уменьшить количество компараторов

$$C_{\text{комп}} = k * \left(2^{q/k} - 1 \right),$$

где k — число параллельных АЦП прямого преобразования), требующееся для преобразования аналогового сигнала в цифровой. При 8-ми битах и 2-х АЦП требуется:

$$C_{\text{комп}} = k * \left(2^{q/k} - 1 \right) = 2 * \left(2^{8/2} - 1 \right) = 30$$

Каскадные параллельно-последовательные АЦП содержат в своем составе k параллельных АЦП прямого преобразования [20]. Второй, третий и т. д. параллельные АЦП служат для уменьшения ошибки квантования первого параллельного АЦП путем оцифровки этой ошибки. На первом шаге производится грубое преобразование (с низким разрешением). Далее определяется разница между входным сигналом и аналоговым сигналом, соответствующим результату грубого преобразования (со вспомогательного ЦАП, на который подается грубый код). На втором шаге найденная разница подвергается преобразованию, и полученный код объединяется с грубым кодом для получения полного цифрового значения. АЦП этого типа медленнее параллельных АЦП прямого преобразования, имеют высокое разрешение и небольшой размер корпуса. Для увеличения скорости выходного оцифрованного

потока данных в параллельно-последовательных АЦП прямого преобразования применяется конвейерная работа параллельных АЦП, которая позволяет выдавать значения полученных отсчетов не целиком, а по мере прохождения сигнала через параллельные АЦП.

Конвейерная работа АЦП может также сократить аппаратные задержки на реализацию АЦП [21]. за счет того, что вместо нескольких параллельных АЦП возможно использовать один, а уточнение производить за счет того что на вход этого АЦП будет подаваться разница между входным сигналом и результатом грубой оценки, полученной на предыдущем этапе работы АЦП и сохраненной в отдельном регистре. Но необходимо учитывать, что при таком подходе увеличивается время, требуемое на проведение измерения, что уменьшает частоту дискретизации сигнала:

$$C_{\text{комп}} = \left(2^{q/k} - 1 \right)$$

$$F_{\text{дискр}} = \frac{F_{\text{дискр0}}}{k}$$

где $F_{\text{дискр0}}$ – частота дискретизации параллельного АЦП.

Последовательные АЦП прямого преобразования, полностью последовательные АЦП ($q = k$), медленнее параллельных АЦП прямого преобразования и немного медленнее параллельно-последовательных АЦП прямого преобразования, но позволяют максимально сократить аппаратные затраты на реализацию АЦП [22]:

$$C_{\text{комп}} = k * \left(2^{q/k} - 1 \right) = q * \left(2^{q/q} - 1 \right) = q = 8$$

Из полученной формулы видно, что количество компараторов, требуемых для реализации последовательных АЦП равно количеству разрядов в АЦП (для 8-ми разрядного – это 8 компараторов).

Если к работе последовательного АЦП прямого преобразования применить конвейерный подход, то можно получить схема АЦП, которая будет содержать всего лишь один компаратор. Такая архитектура получила название АЦП последовательного приближения [19].

АЦП последовательного приближения или АЦП с поразрядным уравниванием [23] содержит компаратор, вспомогательный ЦАП и регистр последовательного приближения. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой за q шагов, где q – разрядность АЦП. На каждом шаге определяется по одному биту искомого цифрового значения, начиная от старшего значащего разряда (СЗР) и заканчивая младшим значащим разрядом (МЗР). АЦП этого типа обладают одновременно высокой скоростью и хорошим разрешением. Последовательность действий по определению очередного бита заключается в следующем: на вспомогательном ЦАП выставляется аналоговое значение, образованное из битов, уже определенных на

предыдущих шагах; бит, который должен быть определен на этом шаге, выставляется в 1, более младшие биты установлены в 0. Полученное на вспомогательном ЦАП значение сравнивается с входным аналоговым значением. Если значение входного сигнала больше значения на вспомогательном ЦАП, то определяемый бит получает значение 1, в противном случае 0. Таким образом, определение итогового цифрового значения напоминает двоичный поиск и каждый шаг требует 2 такта работы синхронизирующего генератора. Интервал дискретизации АЦП последовательного приближения получается равен:

$$T_{\text{дискр}} = 2 * q * t_{\text{CLK}}$$

$$F_{\text{дискр}} = \frac{1}{T_{\text{дискр}}},$$

где t_{CLK} – длительность одного импульса тактового генератора, использующегося для синхронизации всех узлов схемы.

Для реализации метода поразрядного взвешивания можно использовать различные схемные решения, но наиболее часто используемое – это применение матрицы R-2R [22, 24]. Матрица R-2R по сути представляет собой ЦАП, который в зависимости от значения эталонного напряжения и состояния ключей, соответствующих значениям разрядов, формирует уравнивающее напряжение для компаратора, который сравнивает его со входным сигналом (Рисунок 1.4).

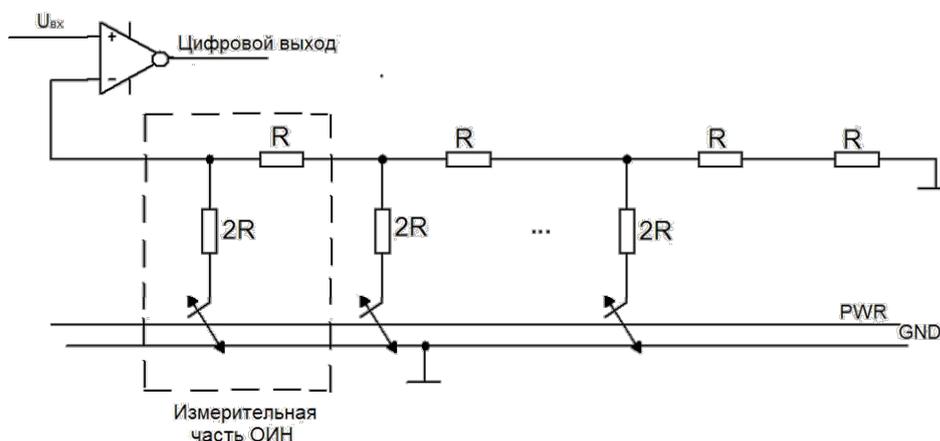


Рисунок 1.4 – Схема матрицы R-2R, где $U_{\text{вх}}$ – входное аналоговое напряжение, PWR – шина эталонного напряжения, GND – шина заземления

Выделенный на рисунке 1.4 звено матрицы отвечает за один разряд АЦП. Соединяя звенья в цепочку можно получить последовательность произвольной длины, которая будет соответствовать разрядности АЦП. «Вес» разряда, то есть величина уравнивающего напряжения, зависит от положения звена в АЦП. В матрице R-2R «вес» каждого последующего

разряда равен половине «веса» предыдущего, таким образом, чем дальше звено от начала матрицы, тем меньше «вес» разряда.

Для работы матрицы R-2R требуется задать эталонное напряжение, которое будет определять максимально возможную амплитуду измеряемых сигналов, «вес» старшего звена матрицы будет равняться половине этой величины. Подключение звена к шине эталонного питания увеличивает уравнивающее напряжение на величину «веса» данного звена, а подключение его к шине заземления обеспечивает баланс матрицы и корректное определение «веса» последующих звеньев, не увеличивая при этом уравнивающее напряжение.

Например, если сформирован 4-х разрядный АЦП, эталонное напряжение равно 10 В, а входное 7 В, то преобразование будет происходить следующим образом: на первом такте старший разряд в АЦП, соответствующий 5 В, примет значение «1» и на вход компаратора поступит уравнивающее напряжение в 5 В. Сравнив входное и уравнивающее напряжения компаратор сообщит, что входное больше, таким образом, на втором такте старший разряд сохранит свое значение. На третьем такте начнет свою работу второй разряд в АЦП и примет значение «1», уравнивающее напряжение увеличится до 7,5 В. Компаратор сделает вывод, что входное напряжение теперь меньше уравнивающего, и на четвертом такте звено, соответствующее второму разряду в АЦП, вернет свое значение в «0». По такому же алгоритму будут действовать остальные звенья в матрице, а значит, к концу восьмого такта будет сформировано значение отсчета. Процесс преобразования наглядно демонстрирует график, приведенный на рисунке 1.5. По графику также можно определить значение цифрового эквивалента, соответствующего входному сигналу 1011.

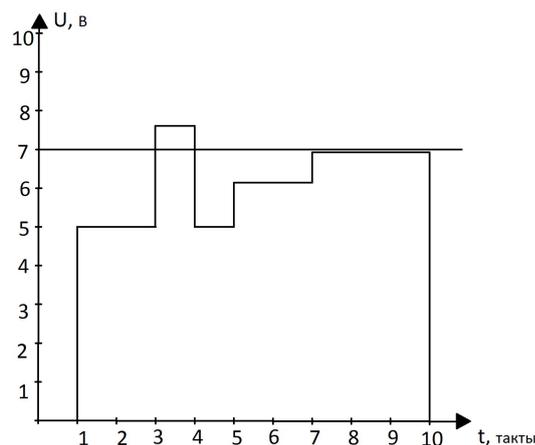


Рисунок 1.5 – График работы 4-х разрядного АЦП на этапе осуществления преобразования

Анализируя описанные выше методы построения АЦП для реализации эффективного преобразователя на основе нейронной сети, в качестве метода для создания новой архитектуры был выбран метод поразрядного взвешивания, так как матрица R-2R дает возможность гибко

изменять все основные параметры АЦП за счет изменения количества звеньев в матрице и эталонного напряжения поданного на нее, что позволяет создать измерительный нейрон как основной элемент нейронной сети.

При этом каждое звено может быть и первым, и последним в матрице, поэтому необходимо предусмотреть наличие балансного сопротивления, которое необходимо для правильного распределения потенциалов в матрице и обеспечивает деление напряжения пополам последним звеном матрицы. Исходя из этих условий сформирован единичный измерительное звено (ИК) (Рисунок 1.6), который является основой разрабатываемой архитектуры АЦП.

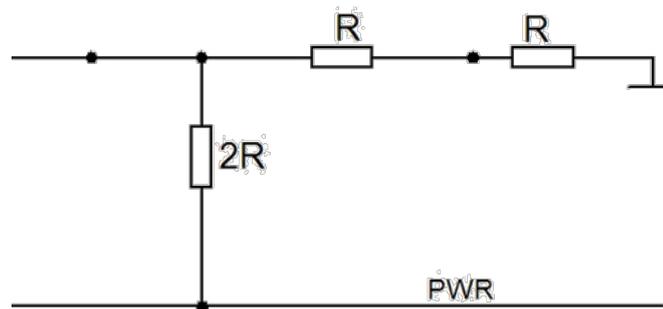


Рисунок 1.6 – Единичный измерительный компонент

Так как заранее неизвестно сколько звеньев матрицы необходимо будет объединить в АЦП для удовлетворения заданным параметрам преобразования, то любой ИК может занимать 3 положения в матрице, для этого требуется ввести в схему ИК два дополнительных ключа, для входного и выходного сигналов (Рисунок 1.7).

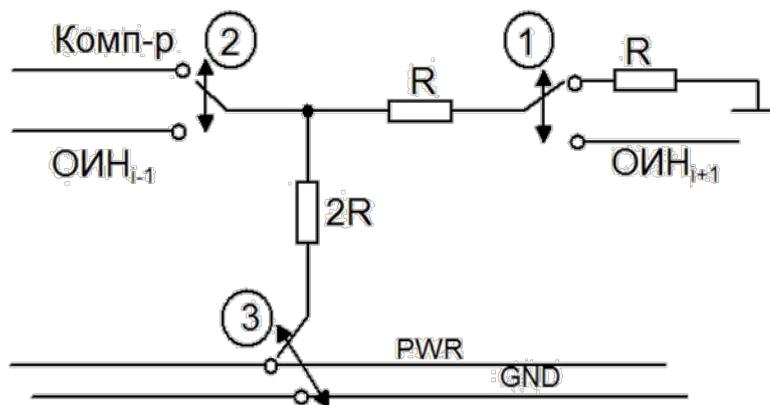


Рисунок 1.7 – ИК с возможностью изменения положения в матрице R-2R.

Необходимо уточнить, что ключ 3 зависит не от положения ИК в матрице R-2R, он отвечает за добавление “веса” разряда к уравновешивающему напряжению, поступающему с матрицы R-2R на соответствующий вход компаратора. Если этот ключ замкнут на GND, то ИК

не увеличивает общее уравнивающее напряжение матрицы R-2R, в противном случае потенциал в точке А увеличивается на величину, зависящую от положения ИК в матрице:

$$U_i = \frac{U_{эм}}{2^i}$$

Если ИК занимает промежуточное положение в матрице (Рисунок 1.8), то ключ 2 соединяется с ИК_{*i-1*}, а ключ 1 с ИК_{*i+1*}, соединяя таким образом текущее звено матрицы R-2R с предыдущим и следующим звеньями. При этом потенциал в точке А будет зависеть от положения ИК в матрице и положения ключа №3.

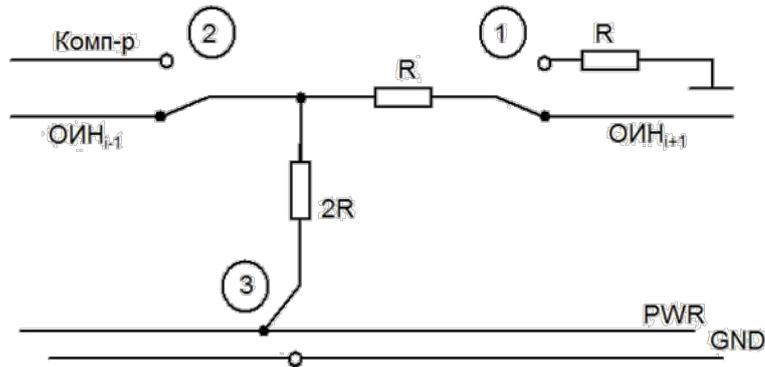


Рисунок 1.8 – Промежуточное положение ИК в матрице R-2R

Если ИК занимает положение последнего звена в матрице (Рисунок 1.9), то к нему должна быть подсоединена ветка с сопротивлением R на землю, то есть ключ 1 замкнут на землю через сопротивление R. Ключ 2 соединяется с ИК_{*i-1*}, а данный ИК отвечает за формирование МЗР в АЦП, при поразрядном взвешивании его значение определяется в последнюю очередь.

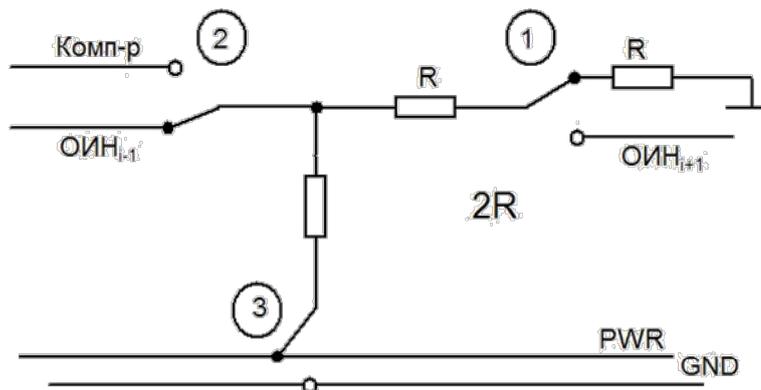


Рисунок 1.9 – ИК в положении последнего звена матрицы R-2R

Третье состояние, если ИК – первый в матрице R-2R, значит он должен соединить матрицу с отрицательным входом компаратора, за что отвечает ключ 2. А ключ 1 будет замкнут

на выход следующего звена (Рисунок 1.10). При таком положении ИК отвечает за формирование СЗР и с него начинается работа АЦП.

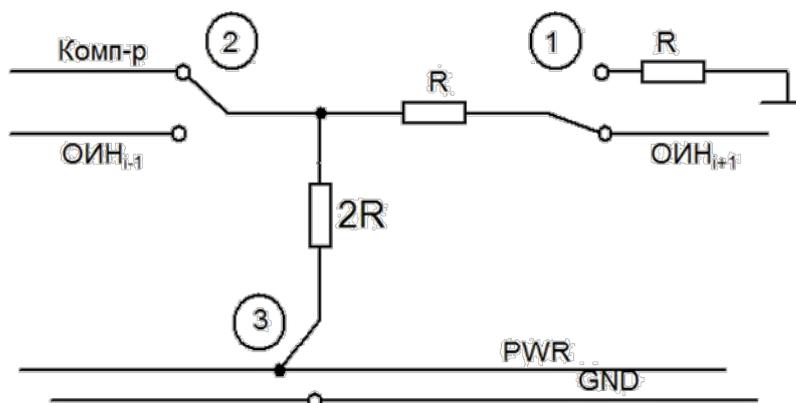


Рисунок 1.10 – ИК в положении первого звена матрицы R-2R

Выделенный ИК позволяет обеспечить адаптивность архитектуры АЦП НС к требуемой точности измерения, когда количество соединенных ИК определяет разрядность, с которой будет проводиться преобразование. Следующей задачей для реализации архитектуры АЦП НС стала разработка топологии самой сети, которая будет позволять объединять необходимое количество ИК, при этом обеспечивая возможность использовать ресурсы сети для параллельного измерения нескольких аналоговых сигналов.

1.3. Анализ возможности использования искусственной нейронной сети для АЦП ПДА

При рассмотрении любого аппаратно реализуемого устройства можно выделить две основные модели, к которым будет сводиться его структура: конечный автомат [25-26] (фиксированная структура устройства) и автомат с настраиваемой структурой (АНС) [27] (структура устройства меняется в процессе его эксплуатации). Конечные автоматы являются на данный момент более используемыми устройствами [25-26], что связано в первую очередь с более простой реализацией данных устройств и наличием большого количества готовых проектировочных решений. АНС, напротив, являются более прогрессивным решением, особенно с учетом современных тенденций к максимальной универсализации и гибкости разрабатываемых устройств с целью удовлетворения максимального количества конечных

потребителей [5, 27]. В АНС путем передачи специальной информации о настройке задается требуемая логическая структура в зависимости от решаемой задачи, причем важной особенностью является то, что задание структуры осуществляется аппаратным способом, т.е. путем изменения связей между компонентами. Принципиальным отличием АНС от конечных автоматов с фиксированной структурой является то, что при существовании алгоритмов с большим числом одновременно выполняемых операций и при их росте со сложностью задачи, за счет наращивания количества компонентов, АНС не имеют теоретического предела по быстродействию [5, 7].

АНС может быть представлен в виде двух частей (Рисунок 1.11). С помощью настроечного автомата P по информации извне по определенным функциям F_λ и F_δ задается структура рабочего автомата Φ , т.е. соответствующие функции выходов λ_i и переходов δ_i из допустимого множества функций и переходов. В соответствии с заданной структурой автомата Φ входная информация X перерабатывается в выходную Y . Путем задания соответствующей входной настроечной информации V осуществляется задание новой структуры.

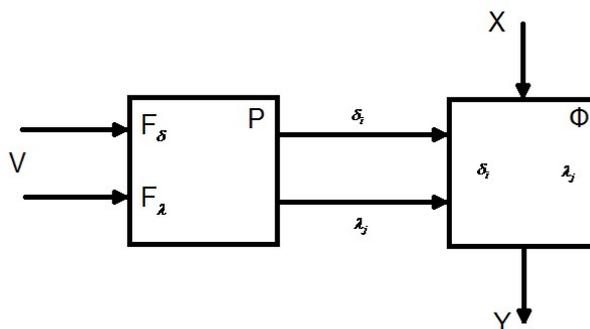


Рисунок 1.11 – Структура АНС

В работе АНС различают фазы настройки и функционирования.

Под фазой настройки понимается процесс задания функций переходов и выходов для автомата Φ путем подачи на входы автомата P определенной последовательности входных параметров V . Настройку автомата можно производить в процессе решения задачи, подобные структуры называются потоковыми динамическими архитектурами (ПДА) [7, 15, 16].

Под фазой функционирования понимается процесс переработки входных сигналов X в выходные сигналы Y при заданных с помощью автомата P функциях переходов δ_i и выходов λ_j . Основу построения АНС составляют три основных принципа: переменности, параллельности, однородности [5, 7].

Переменность. Надежность, гибкость и структурная универсальность (возможность создания для каждой задачи соответствующей структуры) средств обработки обеспечивается

аппаратно, за счет изменения связей между компонентами δ_i и автоматных функций самих компонентов λ_j .

Параллельность. Можно получить значительное увеличение производительности, выполняя операции одновременно на разных устройствах. Использование принципа параллельного выполнения операций позволяет увеличивать производительность одного устройства за счет увеличения числа компонентов в нем, что позволяет расширять множества X и Y для рабочего автомата Φ .

Однородность. Однородные структуры, т.е. использование одинаковых компонентов и однотипных связей между ними, обеспечивает простоту технологии изготовления устройств АНС. Кроме того, требование максимально возможной однородности является необходимым условием при создании сложных устройств с высокой отказоустойчивостью, тогда АНС получает возможность заменять отказавшие компоненты исправными и при достаточном резерве можно увеличивать время безотказной работы устройства до бесконечности.

Таким образом, АНС, построенные на вышеперечисленных принципах, состоят из одинаковых и однотипно соединенных друг с другом универсальных компонентов с аппаратным изменением автоматных функций самих компонентов, а также связей между ними. Одним из вариантов такого АНС может быть аппаратно созданная искусственная нейронная сеть [9].

Искусственные нейронные сети – это одно из направлений развития средств вычислительной техники, в основе которого лежит идея создания искусственных интеллектуальных устройств по образу и подобию человеческого мозга. В основу теории искусственных нейронных сетей положена идея построения математического нейрона - устройства, моделирующего нейрон мозга человека [8, 28]. Математический нейрон представляет собой пороговый элемент с несколькими входами и одним выходом. Одни из входов нейрона оказывают возбуждающее действие, другие - тормозящее. У. Мак-Каллок и В. Питтс [28, 29] предложили конструкцию сети из математических нейронов и показали, что такая сеть в принципе может выполнять числовые и логические операции.

На сегодняшний день НС широко применяются в системах обработки изображений [30], в авиации (в задачах управления летательным аппаратом и его подсистемами) [31], в системах идентификации личности [32], в решении задач обработки бортовых данных объектов космической техники [33], в решении алгебраических задач [34], в системах принятия решений [35] и др. Наряду с этим, в последнее время прослеживаются тенденции на развитие направления применения ИНС, связанного с измерением и аналого-цифровым преобразованием сигналов. [9, 16].

Искусственный нейрон имитирует в первом приближении свойства биологического нейрона. На вход искусственного нейрона поступает некоторое множество сигналов, каждый из которых является выходом другого нейрона. Каждый вход умножается на соответствующий вес, аналогичный синаптической силе, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона. На рисунке 1.12 представлена модель, реализующая эту идею [33]. Множество входных сигналов, обозначенных $x_1, x_2 \dots x_n$ поступает на искусственный нейрон. Эти входные сигналы, в совокупности обозначаемые вектором X , соответствуют сигналам, приходящим в синапсы биологического нейрона. Каждый сигнал умножается на соответствующий вес $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_n$ (Множество весов в совокупности обозначается вектором W) и поступает на суммирующий блок, обозначенный Σ . Каждый вес соответствует «силе» одной синаптической связи. Суммирующий блок, соответствующий телу биологического элемента, складывает взвешенные входы алгебраически, создавая выход, который мы будем называть NET . В векторных обозначениях это может быть компактно записано следующим образом: $NET = XW$. С помощью порогового элемента (ПЭ) формируется выходная функция ($F(NET)$).

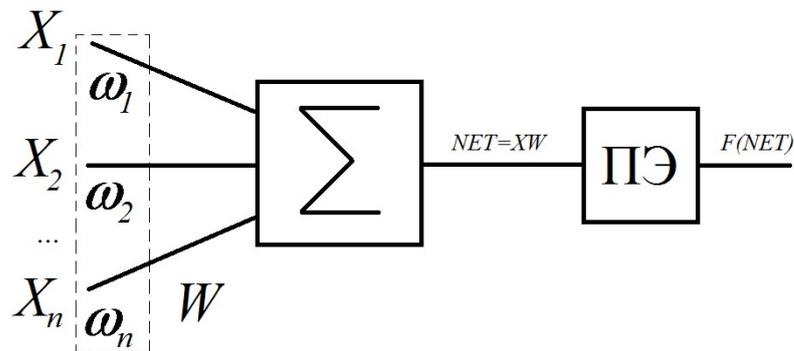


Рисунок 1.12 – Искусственный нейрон

Сигнал NET далее, как правило, преобразуется активационной функцией F и дает выходной нейронный сигнал OUT . Активационная функция может быть обычной линейной функцией $OUT = K(NET)$, где K – постоянная пороговой функции; $OUT = 1$, если $NET > T$, $OUT = 0$ в остальных случаях, где T – некоторая постоянная пороговая величина, или же функция, более точно моделирующая нелинейную передаточную характеристику биологического нейрона и предоставляющая нейронной сети большие возможности [34].

На рисунке 1.13 блок, обозначенный F , принимает сигнал NET и выдает сигнал OUT . Если блок F сужает диапазон изменения величины NET так, что при любых значениях NET значения OUT принадлежат некоторому конечному интервалу, то F называется «сжимающей» функцией.

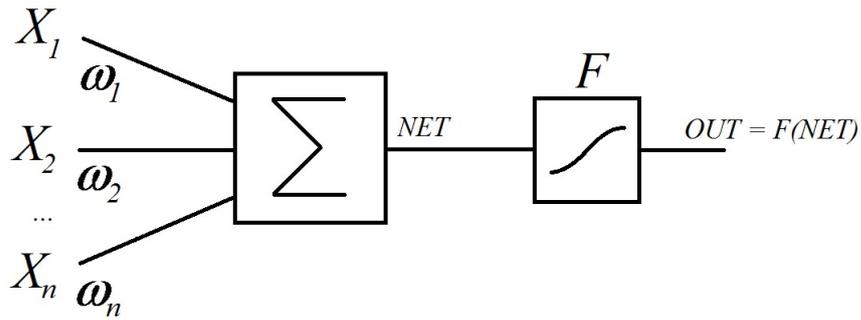


Рисунок 1.13 – Искусственный нейрон с активационной функцией

В качестве «сжимающей» функции часто используется логистическая или «сигмоидальная» (S-образная) функция, показанная на рисунке 1.14. Эта функция математически выражается как

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Таким образом,

$$OUT(NET) = \frac{1}{1 + e^{-NET}}$$

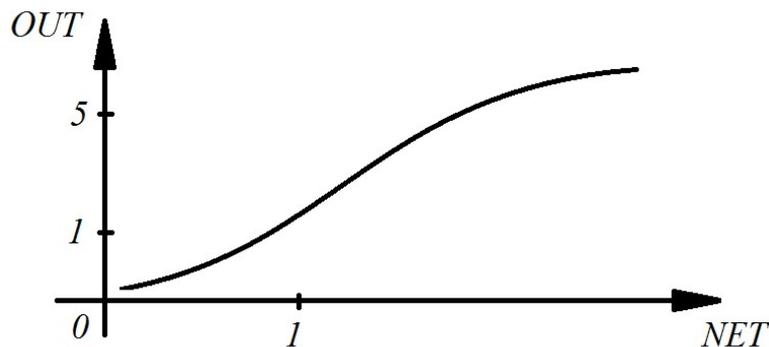


Рисунок 1.14 – Сигмоидальная функция активации

По аналогии с электронными системами активационную функцию можно считать нелинейной усилительной характеристикой искусственного нейрона. Коэффициент усиления вычисляется как отношение приращения величины OUT к вызвавшему его небольшому приращению величины NET . Он выражается наклоном кривой при определенном уровне возбуждения и изменяется от малых значений при больших отрицательных возбуждениях (кривая почти горизонтальна) до максимального значения при нулевом возбуждении и снова уменьшается, когда возбуждение становится большим положительным. Подобная нелинейная характеристика решает дилемму шумового насыщения [33]. Слабые сигналы нуждаются в большом сетевом усилении, чтобы дать пригодный к использованию выходной сигнал. Однако

усилительные каскады с большими коэффициентами усиления могут привести к насыщению выхода шумами усилителей (случайными флуктуациями), которые присутствуют в любой физически реализованной сети. Сильные входные сигналы в свою очередь также будут приводить к насыщению усилительных каскадов, исключая возможность полезного использования выхода. Центральная область логической функции, имеющая большой коэффициент усиления, решает проблему обработки слабых сигналов, в то время как области с падающим усилением на положительном и отрицательном концах подходят для больших возбуждений. Таким образом, нейрон функционирует с большим усилением в широком диапазоне уровня входного сигнала.

Нередко, особенно в цифровых системах в качестве активационной функции используют пороговую функцию (Рисунок 1.15) [36]. Эта функция является кусочно-заданной и математически описывается как

$$F(NET) = \begin{cases} 0, & \text{при } NET < P \\ 1, & \text{при } NET \geq P \end{cases}$$

где P – это некоторый порог аргумента, при достижении которого происходит скачок. Применительно к нейрону этот порог называется порогом активации и возбуждение нейрона происходит в тот момент, когда сумма входных сигналов достигает этого порога активации

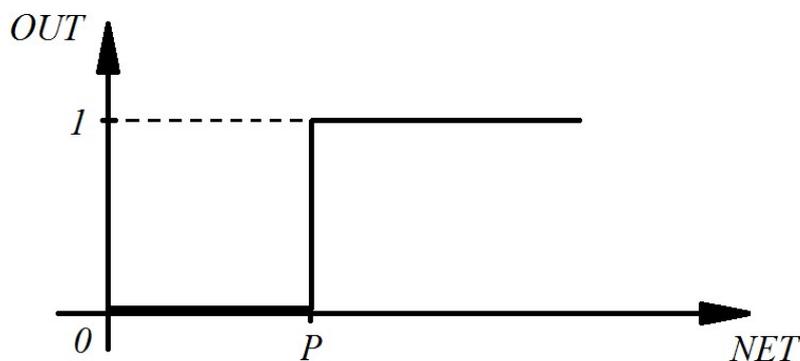


Рисунок 1.15 – Пороговая функция активации

Существуют и другие виды активационных функций, но даже из рассмотренного материала видно, что нейрон сам по себе очень эффективный элемент и может быть полезен при построении АНС.

Но наиболее полно те или иные свойства проявляются при соединении нейронов в сеть, при этом можно добиться параллельности обработки информации, что значительно увеличит скорость обработки и достоверность получаемой после обработки системой данных.

Простейшая сеть состоит из группы нейронов, образующих слой, как показано на рисунке 1.16 [36]. Отметим, что входные сигналы слева распределяются по влиянию на разные

нейроны. Распределение не считается слоем, так как не выполняется никаких вычислений. Вычисляющие нейроны обозначены квадратами. Каждый элемент из множества входов X отдельным весом соединен с каждым искусственным нейроном. Например, первый вход соединен с n нейронами с весами $\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1n}$. А каждый нейрон выдает взвешенную сумму входов дальше. Множество выходных сигналов обозначено Y . В искусственных и биологических сетях многие соединения могут отсутствовать, на данном рисунке все соединения проведены в целях показать максимально возможное количество соединений. В данном примере приведена однослойная НС, это значит, что в нее входит только один слой нейронов, с которых информация сразу поступает на выход.

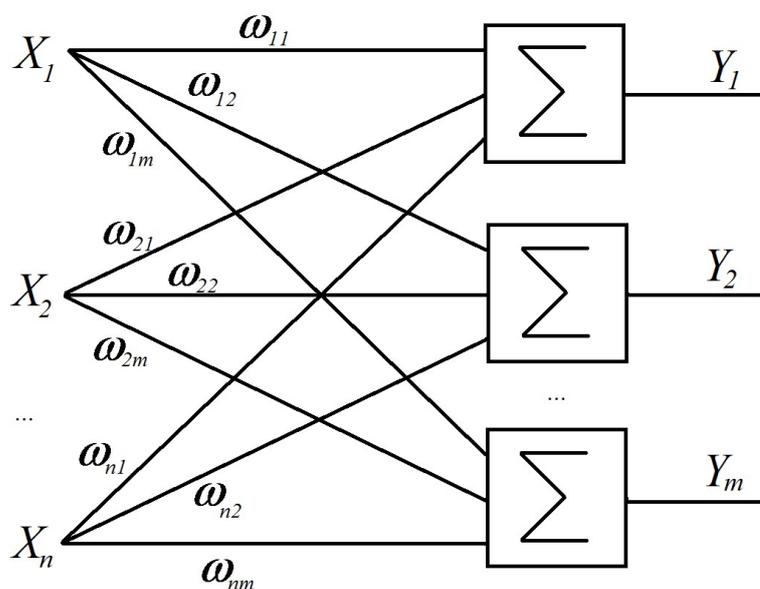


Рисунок 1.16 – Однослойная нейронная сеть

Конечно, существует возможность создавать НС с большим числом слоев и хотя существуют сети множества конфигураций, послойная организация нейронов имитирует слоистые структуры различных отделов мозга. Оказалось, что такие многослойные сети обладают большими мощностями и возможностями, чем однослойные, и в последние годы интерес проявляется и к многослойным НС. Но при реализации многослойной структуры НС необходимо помнить о частичном нарушении принципа однородности АНС, так как нейроны, принадлежащие к разным слоям уже не обладают унифицированной структурой по отношению друг к другу и, соответственно, нейроны первого слоя не смогут заменить собой нейроны второго слоя [36].

Многослойные сети образуются каскадами слоев. Выход одного слоя является входом для последующего слоя. Подобная сеть с двумя слоями показана на рисунке 1.17 и изображена со всеми соединениями [8, 33, 36, 37]. Здесь m входных сигналов, n нейронов в первом слое, p

нейронов во втором слое. Выходы второго слоя являются выходами нейронной сети в целом. Для каждого слоя имеется свой массив весовых коэффициентов, так как идет речь о разных влиятельных способностях нейронов и вообще о разных слоях с разными функциями.

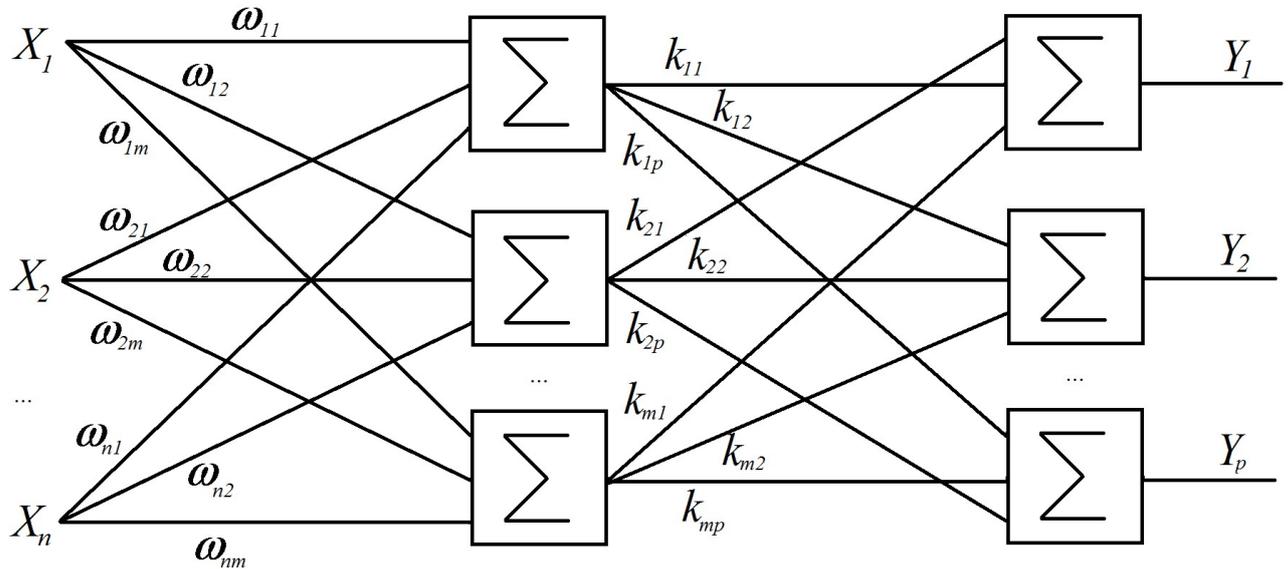


Рисунок 1.17 – Двухслойная нейронная сеть

Обобщая можно сказать, что нейронная сеть – это система из элементарных вычислительных нейронов, объединенных в группы, называемые слоями, с разными функциями и соединенными между собой.

Подобно нейронам головного мозга, нейроны в искусственной нейронной сети при передаче отдельного сигнала будут объединяться в цепочки по определенным правилам и в зависимости от конкретных условий в нейронной сети, таких как работоспособность нейронов, их готовность к выполнению операции. Далее под понятием «нейронная сеть» мы будем подразумевать именно искусственную нейронную сеть, используемую для разработки аналого-цифрового преобразователя.

По характеру организации взаимосвязей нейронные сети разбиваются в основном на два класса [33, 36, 37]: случайные и детерминированные. Если связи между нейронами сети случайные, то такая сеть называется случайной или стохастической. Разновидностью стохастических сетей являются вероятностные сети. В подобных сетях процессы переработки информации имеют вероятностный характер. Функцию или поведение стохастической сети невозможно предсказать заранее.

Если в сети связи и взаимодействие нейронов predeterminedены и описываются известными математическими соотношениями, то такая сеть называется детерминированной. Функция такой сети вполне предсказуема. АЦП представляет собой структуру с

детерминированным взаимодействием нейронов и математически однозначной их взаимосвязью.

Также нейронные сети можно разделить на НС прямого распространения сигнала и НС с обратными связями [37]. НС прямого распространения имеют большее быстроедействие, но имеют существенные ограничения в обучении сети. НС с обратными связями имеют огромные возможности в применении различных алгоритмов обучения сети, но для настройки всех весовых коэффициентов требуется время. Так как разрабатываемый АЦП НС должен обладать большим быстроедствием для параллельной обработки всех входных сигналов, то подойдет сеть прямого распространения.

Кроме того, НС делятся по характеру задержки возникающей в нейронах: с мгновенной передачей сигнала в нейроне и с конечной скоростью передачи сигналов в нейроне (с задержкой) [36, 39]. АЦП поразрядного взвешивания как уже говорилось выше является пошаговым алгоритмом, соответственно, для его реализации требуется НС с задержками.

Выбранные параметры НС позволят реализовать архитектуру АЦП НС с возможностью реконфигурации сети под конкретный запрос на измерение входных аналоговых сигналов, как по количеству измеряемых сигналов, так и по требуемой разрядности. Следующим этапом разработки АЦП НС является реализация метода маршрутизации сигналов внутри НС с тем, чтобы нейроны были способны самостоятельно объединяться друг с другом и формировать индивидуальный АЦП (ИАЦП).

1.4. Обоснование выбора метода маршрутизации сигналов

Маршрутизация – это процесс определения маршрута данных в сетях связи [40]. Это понятие в первую очередь связывают с коммутацией пакетов данных при передаче данных через локальные или глобальные компьютерные сети. Но в общем случае задача коммутации каких-либо данных или сигналов возникает при проектировании большинства электронного устройства [40]. Особенно большую роль методы маршрутизации играют в устройствах распределенных вычислений [41], когда необходимо некоторый ограниченный объем вычислительных ресурсов разделить между параллельно выполняемыми задачами. Главная цель применения маршрутизации в данном случае обеспечить минимизацию аппаратных затрат за счет того, что один и тот же вычислительный ресурс используется для решения задач, поступающих с различных внешних источников с разной интенсивностью. При этом в

идеальном случае скорость выполнения задачи должна обеспечивать обработку текущей задачи и освобождать ресурс для обработки следующей задачи еще до ее прихода.

В первую очередь маршрутизацию делят на программную и аппаратную [42]. Программная маршрутизация осуществляется за счет использования внешнего устройства, в котором реализованы соответствующие методы, позволяющие направлять поток данных входящего запроса на вычисление к конкретному вычислительному ресурсу. Например, организация майнинга криптовалюты и создание вычислительного пула [43], когда вычислительный ресурс разделен между пользователями, возможно даже очень удаленными друг от друга в пространстве. При этом существует программное обеспечение, позволяющее синхронизировать работу всей системы в целом [43]. Преимуществом программной маршрутизации является возможность использовать стандартные устройства, доступные на рынке, при этом выполнять с их помощью нестандартные задачи, яркий пример майнинговые фермы на видеокартах. Существенным недостатком в нашем случае является необходимость во внешнем управлении, которое предполагает наличие некоторого устройства, которое будет определять работоспособность и отказоустойчивость всей системы в целом.

Аппаратная маршрутизация осуществляется самим вычислителем, на локальном уровне за счет специальных правил, по которым информация с каждого из входов попадает в определенную часть устройства, где происходит ее обработка. Примером такой маршрутизации могут быть многоядерные (англ. multi-core) процессоры, когда внутри процессора присутствует несколько простых процессоров-вычислителей, объединенных общей шиной памяти и арбитром, который распределяет между ними поступающие задачи [44]. Такой подход к организации вычислений позволил прекратить наращивание мощности и скорости обработки процессора за счет увеличения тактовой частоты, что приводило к повышению энергозатрат и значительному росту тепловыделения, а значит удорожанию реализации мощных устройств. Многоядерный процессор наоборот позволяет снизить тактовую частоту, но при этом увеличить вычислительную мощность за счет параллельных вычислений на каждом из «ядер» [44, 45]. Основное достоинство аппаратной маршрутизации заключается в том, что методы, используемые для распределения потоков данных, реализованы внутри того же кристалла, что и вычислительные ресурсы, так называемые однокристальные системы (англ. System-on-a-Chip, SoC) или цифровые сигнальные процессоры (англ. Digital Signal Processor, DSP) [45]. Поэтому было решено остановиться на аппаратной реализации маршрутизации для АЦП НС.

После определения способа реализации маршрутизации необходимо выбрать метод маршрутизации, который будет использоваться для построения системы управления в АЦП НС. Существует 3 основных типа методов применяемых для аппаратной маршрутизации

сигналов внутри системы: таблично-контролируемая маршрутизация, иерархическая динамическая маршрутизация и самомаршрутизация [46-48].

Таблично-контролируемая маршрутизация подразумевает наличие в каждом узле связи таблицы с возможными маршрутами, в соответствии с которой узел будет пересылать пакет данных [46]. В зависимости от конкретного метода маршрутизации таблицы могут строиться централизованно, передавая информацию о каждом узле в устройство определяющее маршрут, достоинством такого метода является эффективность маршрута (так как известны все доступные маршруты, то несложно выбрать «идеальный»), но при масштабировании сети, маршрутизация таким образом становится невозможной из-за резко возрастающего количества доступных маршрутов и невозможности хранить и передавать информацию о каждом из них. Также таблицы могут строиться в каждом узле автономно, в зависимости от состояния соседних узлов, при этом глубина построения (собирается ли информация о соседях соседей и на сколько уровней распространяется это взаимодействие) может варьироваться в зависимости от конкретного метода. В таком случае невозможно гарантировать, что выбранный маршрут станет минимальным из возможных, но при этом значительно уменьшается количество служебной информации передаваемой в сети между отдельными ее узлами. Общий недостаток таблично-контролируемых методов маршрутизации в том, что узлам сети постоянно необходимо обмениваться служебной информацией для построения таблиц, а также хранить эти таблицы. Таблично-контролируемая маршрутизация больше всего подходит для случаев, когда сеть является статичной и маршруты передачи информации меняются редко и незначительно, например, локальные сети промышленных предприятий или офисных помещений [46].

Иерархическая динамическая маршрутизация – одно из перспективных направлений для динамических сетей, когда состав входящих в сеть элементов постоянно меняется [47]. Основным отличием от других методов является организация внутри сети кластеров, которые организуются автоматически в зависимости от заданных в сети правил. Кластер по существу представляет собой подсеть, объединяющую некоторое количество узлов, при этом за построение маршрута внутри кластера отвечает один из узлов, выбранный произвольно или по некоторым правилам в зависимости от конкретного метода. Между кластерами и внутри них маршрутизация может осуществляться, в том числе и по таблично-контролируемым методам. Главным достоинством иерархической маршрутизации является скорость реагирования сетей с таким методом маршрутизации на изменения состояния входящих в нее элементов или линий передачи между ними. Такие методы маршрутизации нашли свое применение в сетях передачи данных для мобильных устройств или устройств нацеленных на Интернет вещей [47].

Отдельно можно выделить методы самомаршрутизации сигналов при передаче данных между узлами сети [48], которые отличаются тем, что при организации маршрута узел сети передает сигнал следующему узлу по определенным правилам приоритета, заложенным в самом узле. При этом основной выигрыш заключается в минимизации обмена служебной информацией между узлами и отсутствии необходимости хранения информации о доступных маршрутах, так как по существу маршрут строится «на ходу» при передаче информации от текущего узла следующему. Главной сложностью при построении сетей с самомаршрутизацией сигналов является задача предусмотреть в топологии сети возможность связать любые два узла независимо от состояния других узлов и линий связи между ними [48]. Для реализации АЦП НС самомаршрутизация сигналов внутри сети является наиболее подходящей для организации системы управления, потому что позволит значительно снизить аппаратные затраты на реализацию нейронов, так как минимизирует количество служебных связей между ними.

Для организации системы с самомаршрутизацией сигналов очень важным является выбор топологии сети, потому что от этого будет непосредственно зависеть доступная мощность сети и возможности объединения вычислительных ресурсов. Для описания топологии удобнее всего использовать теорию графов, которые позволяют изобразить сеть наглядно, а также использовать известные математические доказательства для получения сетей с определенными свойствами [49]. В общем случае сеть можно представить в виде узлов (вершины графа) и линий передачи данных (ребра графа), которые показывают возможность одного узла связаться с другим (Рисунок 1.18).

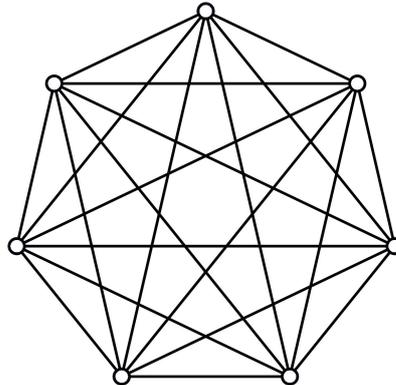


Рисунок 1.18 – Представление сети в виде полносвязного графа

На рисунке 1.18 сеть представлена в виде полносвязного графа, когда любой из узлов может обратиться к любому другому, это идеальный случай для организации самомаршрутизации сигналов, так как, получив входной сигнал, узел сети может отправить его любому другому какие бы правила не были придуманы для этого. Но в реальном устройстве

практически невозможно реализовать полносвязные сети при достаточно большом количестве узлов, например, для АЦП НС такое количество вполне может достигать до 100 и больше узлов.

Таким образом, при проектировании топологии сети необходимо строить неполносвязные графы, и при этом сигнал должен иметь возможность попасть из одного узла в другой с как можно меньшей задержкой. Для этого применяются различные топологии, например, топологии, применяемые для построения сетей: общая шина, звезда, кольцо [50]. Остальные возможные топологии, как правило, являются соединением данных типов и представляют собой гибридные топологии, которые позволяют снизить количество связей, но при этом сохранить связность между отдельными узлами сети. Одним из самых популярных вариантов организации является топология дерева, когда узлы разделяются на разные уровни и соединяются между собой по топологии звезда (Рисунок 1.19). Свою популярность такая топология заслужила благодаря возможности быстрого масштабирования, а также за счет возможности определять различные приоритеты для каждого из уровней дерева [46, 50]. Основным недостатком топологии дерева для реализации АЦП НС является неоднородность сети, которая возникает как раз из-за деления узлов по уровням, что противоречит в нашем случае основной идее создания архитектуры, в которой все элементы представляют собой универсальные измерительные компоненты (см. пп. 1.2 и 1.3).

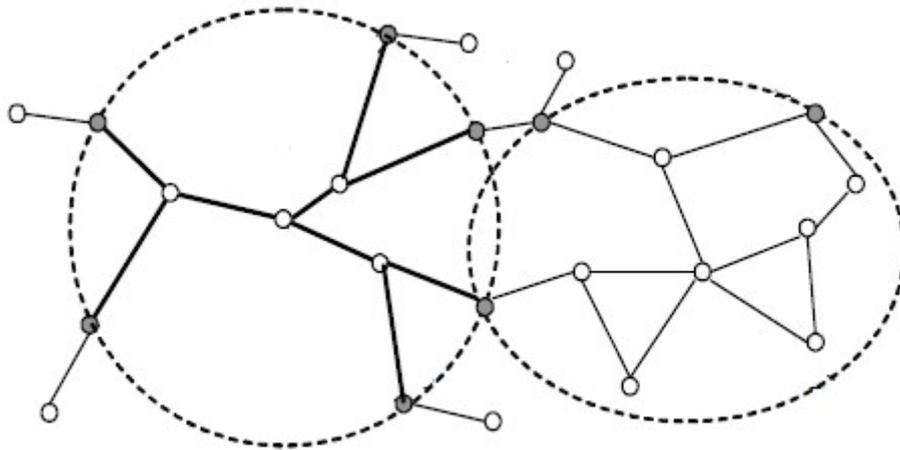


Рисунок 1.19 – Представление сети в виде графа дерева

В работах [9, 16] для реализации адаптивного АЦП ПДА использовалась топология общей шины (Рисунок 1.3), которая позволяет минимизировать аппаратные затраты и максимально упростить метод маршрутизации сигналов. Но такая топология имеет существенный недостаток, состоящий в том что при возникновении отказа самой шины (например, замыкание на корпус) нарушается работа всего устройства в целом и либо уменьшается количество вычислительных ресурсов, либо проведение измерения становится невозможным. Чтобы устранить этот недостаток и сохранить при этом универсальность

нейронов в сети, предлагается использовать кольцевую топологию сети, но при этом необходимо отметить, что кольцо не дотягивает по уровню отказоустойчивости до топологии дерева. Для увеличения отказоустойчивости можно использовать мультикольцо (Рисунок 1.20), которое представляет собой кольцевую топологию с дополнительными связями между отдельными узлами сети, например через один, через два, и т.д. [48]. Мультикольцо позволяет использовать узлам сети не только основную связь с соседними элементами, но и в случае отказа или занятости одного из узлов переходить на резервную линию, повышая отказоустойчивость системы соответственно количеству дополнительных путей обхода отказавшего элемента.

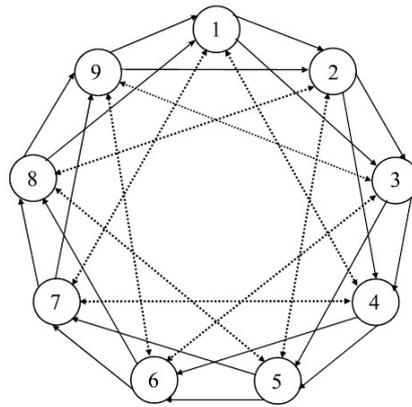


Рисунок 1.20 – Двумерное троичное мультикольцо

Таким образом, на основании проведенного анализа современных решений для организации системы управления соединением компонентов в АЦП НС решено использовать аппаратный метод самомаршрутизации сигналов с топологией сети в виде мультикольца. Следующим этапом необходимо определить тип системы управления по степени ее централизации.

1.5. Обоснование выбора системы управления для самомаршрутизирующегося АЦП НС и постановка задачи исследования

Для реализации системы управления в АЦП НС необходимо определить подходящий для этого тип системы управления, и одним из важнейших параметров будет степень централизации системы. В настоящий момент выделяют два основных класса систем управления по степени централизации [41, 51, 52]:

- централизованные или сосредоточенные;

- децентрализованные или распределенные.

Централизованные системы отличаются тем, что для управления используется определенное устройство, в котором агрегируется вся поступающая информация от объекта управления (ОУ) и на базе этой информации вырабатывается управляющее воздействие, передаваемое на исполнительные элементы [51]. Системы с централизованным управлением выгодно применять к ОУ с небольшим количеством получаемых параметров, так как качество принимаемых решений в таких системах наилучшее, благодаря тому, что центральное устройство управления (ЦУУ) получает максимально полную информацию об ОУ, а значит, полностью контролирует его состояние и может предсказать результат управления. Но при усложнении структуры ОУ, увеличении передаваемой информации и управляющих воздействий система с ЦУУ неизбежно достигнет предела возможностей обработки сигналов [41, 51]. Даже если увеличить вычислительную мощность ЦУУ, то возникнут затруднения с пропускной способностью каналов передачи информации, что опять же сделает управление невозможным. Кроме того, существенным недостатком централизованных систем управления является их низкая отказоустойчивость, возникновение отказа в ЦУУ приведет к отказу всей системы целиком. Примеры систем с централизованным управлением – системы управления коммунальным снабжением, регулированием дорожного движения, уличным освещением.

Для устранения недостатков ЦУУ предложены распределенные системы управления (PCY). В PCY принятие решения обеспечивается не на уровне всей системы, а в каждом ее блоке по отдельности, при этом может присутствовать «головная станция», в которой собирается статистика о состоянии всей системы в целом, а также задаются уставочные параметры для ОУ [41]. Для улучшения качества управления блоки PCY могут обмениваться между собой служебной информацией, но главными плюсами этой системы являются применение менее мощных процессоров в блоках PCY, более равномерное распределение нагрузки на сеть, увеличение отказоустойчивости (возникновение отказа в одном из блоков PCY или даже «головной станции» не приводит к выходу всей системы, а уменьшает ее возможности). Помимо положительных аспектов применения PCY существуют и недостатки, например, усложнение структуры и методов маршрутизации информации между узлами сети, но основной минус PCY заключается в значительном увеличении аппаратных ресурсов, которые требуются для ее реализации. Тем не менее, PCY получили значительное распространение в среде управления самыми различными технологическими процессами, от изготовления туалетной бумаги до регулирования перекачки газа и нефти по магистральным трубопроводам [41].

В целом удешевление производства микроконтроллеров делает проблему увеличения аппаратных затрат не столь актуальной, а развитие программируемых логических

контроллеров (ПЛК), позволяющих подключать их практически к любому оборудованию и объединять в сети на базе известных и распространенных промышленных интерфейсов, делает проектирование РСУ не столь дорогим и сложным процессом [41, 52]. Это обстоятельство делает РСУ очень эффективным решением для создания современных систем управления, но в случае АЦП НС, который является SoC устройством, использование РСУ не является оптимальным вариантом, так как мощность интегральной схемы (ИС) для реализации SoC определяет ключевые параметры итогового устройства. Во-первых, от мощности ИС зависит экономическая рентабельность производства кристаллов, а во-вторых, она влияет на массогабаритные показатели и уровень тепловыделения устройства, что как было сказано выше, является актуальной проблемой для внедрения на миниатюрных объектах управления, таких как беспилотные летательные аппараты (БПА) или мобильные устройства и т.п.

Для снижения аппаратных затрат в случае применения РСУ предлагается обратиться к опыту использования фрагментарных систем управления. Фрагментарная система управления подразумевает наличие связей между управляющими элементами и их объединение в рабочую группу для принятия какого-либо решения [53]. Особенность фрагментарного подхода в том, что при реализации управления часть функций остается в блоках РСУ, но при этом отдельный блок не способен выполнить ее в полном объеме. Для осуществления полноценного управления такой системе управления необходимо объединить несколько блоков и сформировать местное фрагментарное устройство управления (МФУУ), которое позволит обрабатывать информацию и генерировать управляющие воздействия. Кроме того, необходимость объединения узлов сети для осуществления управления коррелирует с основным свойством АЦП НС – объединением нейронов (измерительных компонентов) для формирования ИАЦП (см. п. 1.3). Поэтому для реализации АЦП НС предлагается использовать вариант системы с МФУУ.

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 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: $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_0$; $P_1 \geq P_0$; $C_1 \leq C_0$.

1.6. Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие научные результаты:

1. Выполнен анализ имеющихся разработок в сфере АЦП НС, который показал, что в основу разрабатываемой структуры необходимо взять адаптивный АЦП ПДА, так как эта структура позволяет максимально эффективно использовать ресурсы НС и обрабатывать несколько входных сигналов одновременно. В оригинальной самомаршрутизирующейся архитектуре АЦП НС необходимо реализовать задачи, которые позволят повысить отказоустойчивость, не увеличивая критично аппаратные затраты на реализацию каждого нейрона связанные с централизованной системой управления за счет разработки местной системы управления.

2. Проведен анализ основных методов построения аналого-цифрового преобразования и выбран метод поразрядного взвешивания с помощью матрицы R-2R для реализации самомаршрутизирующегося АЦП НС, который максимально применим для построения нейронной сети преобразователя. Из структуры матрицы R-2R выделено единичный измерительный компонент, который может быть положен в основу построения измерительного нейрона (разряда АЦП).

3. Рассмотрены допустимые варианты построения искусственных нейронных сетей и выбрана для реализации АЦП НС детерминированная сеть прямого распространения с задержкой в каждом нейроне.

4. Анализ методов маршрутизации сигналов в сети позволил выбрать аппаратный метод самомаршрутизации сигналов с мультикольцевой топологией сети, который позволяет уменьшить количество служебной информации, передаваемой в сети, а также увеличить отказоустойчивость АЦП НС за счет дополнительных связей между нейронами.

5. Рассмотрена классификация систем управления по степени централизации и обоснован выбор использования местного фрагментарного устройства управления для реализации АЦП

НС, которое позволяет сократить аппаратные затраты за счет разделения элементов системы управления между измерительными нейронами.

2. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ САМОМАРШРУТИЗИРУЮЩЕГОСЯ АЦП И АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ ОСНОВНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО НЕЙРОНА

2.1. Определение математической модели и активационной функции основного измерительного нейрона

Исходя из вышеизложенных положений (см. гл. 1), для основного измерительного нейрона (ОИН) выбрана следующая математическая модель (Рисунок 2.1). Входными сигналами ОИН являются COMP – сигнал с компаратора, определяющий результат сравнения входного аналогового сигнала с текущим уравнивающим напряжением, и OIN_i – сигнал активации данного ОИН, который определяется на этапе настройки НС за счет формирования матрицы R-2R заданной длины на определенном участке НС (этап формирования индивидуальных АЦП будет рассмотрен ниже). Также ОИН на один из его входов поступает сигнал выхода OUT_i , соответствующий значению определяемого с помощью данного ОИН разряда, это необходимо для сохранения состояния ОИН до конца измерения текущего отсчета аналогового напряжения. Последний сигнал приходящий в ОИН, это сигнал сброса RES, который оказывает тормозящее воздействие на ОИН, переводя его в изначальное (свободное) состояние.

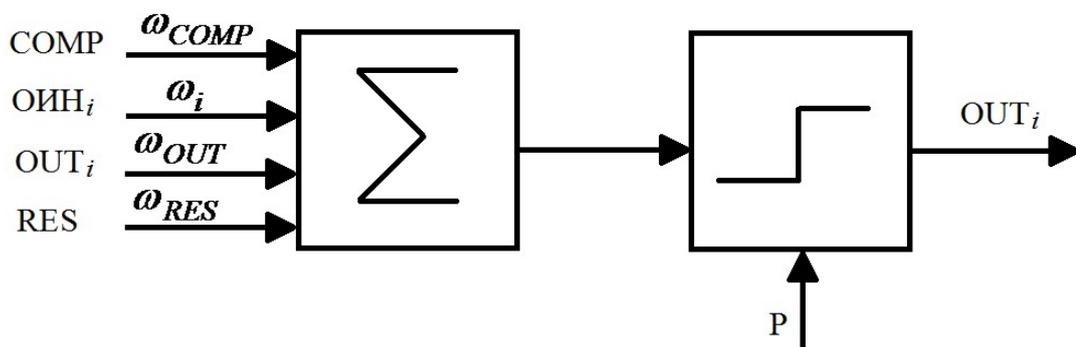


Рисунок 2.1 – Математическая модель ОИН на этапе функционирования АЦП

Данная модель ОИН соответствует этапу функционирования АНС и описывает в первую очередь работу АЦП поразрядного взвешивания. Это значит, что весовой коэффициент сигнала COMP равен 1, а весовой коэффициент OIN_i , определяющий порядок срабатывания

текущего ОИН в сформированном АЦП и зависящий от положения ИК в матрице R-2R, является переменным во времени и может быть представлен графиком (Рисунок 2.2)

$$\omega_{COMP} = 1$$

$$\omega_i = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_i \\ 1, & \text{при } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0, & \text{при } t > t_{i+1} \end{cases},$$

где t – это время измерения текущего отсчета аналогового сигнала, точкой начала отсчета t_0 является завершение этапа настройки НС (формирования индивидуального АЦП); t_i – время срабатывания текущего ОИН, которое зависит от положения ОИН $_i$ в сформированной матрице R-2R; t_{i+1} – время срабатывания следующего ОИН.

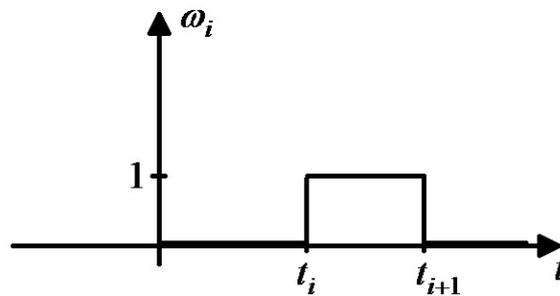


Рисунок 2.2 – График зависимости ω_i от времени

Необходимо также отметить, что в соответствии с алгоритмом работы АЦП поразрядного взвешивания, который был приведен выше, каждый ИК матрицы R-2R срабатывает в течение двух тактов, то есть:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i = 2t_{CLK}$$

Тогда можно определить время срабатывания каждого ОИН в зависимости от его положения в матрице R-2R:

$$t_i = t_0 + \Delta t * i = t_0 + i * 2t_{CLK} = t_0 + 2it_{CLK} \quad (2.1)$$

По аналогии с весовым коэффициентом ω_i , весовой коэффициент ω_{OUT} также зависит от времени срабатывания данного компонента матрицы в общей структуре АЦП, а весовой коэффициент сигнала сброса является постоянным и равен -2, так как по завершении измерения текущего отсчета происходит асинхронный сброс всех нейронов к начальному состоянию:

$$\omega_{RES} = -2$$

$$\omega_{OUT} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_{i+1} \\ 2, & \text{при } t \geq t_{i+1} \end{cases}$$

В качестве активационной функции будет использоваться пороговая функция, так как в зависимости от значения входных сигналов ОИН может принимать значения «0» или «1», что соответствует значению разряда, за который данный ОИН отвечает в сформированной структуре матрицы R-2R. Порог данной функции P равняется 2. Таким образом, возбуждение ОИН возможно только на временном отрезке $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ и только в случае, если поступили сигналы $ОИН_i$ и $COMP$, т.е. если ОИН включен в структуру сформированного индивидуального АЦП. Так как $\Delta t = 2t_{CLK}$, то на первом такте однозначно произойдет возбуждение ОИН, а на втором ОИН либо останется в возбужденном состоянии, либо вернется в пассивное, в зависимости от сигнала $COMP$. В зависимости от того, остался ли ОИН в возбужденном состоянии к моменту времени $t = t_{i+1}$ произойдет сохранение его состояния. Когда измерение текущего отсчета аналогового сигнала в индивидуальном преобразователе будет завершено, поступит сигнал RES , который переведет ОИН в изначальное состояние.

2.2. Построение математической модели для системы самомаршрутизации сигналов по нейронной сети

Важным для АЦП НС с описанной выше моделью ОИН является система самомаршрутизации сигналов внутри НС, за счет которой будет осуществляться настройка весовых коэффициентов, т.е. формирование индивидуального АЦП (ИАЦП) для конкретного входного сигнала с определенной разрядностью, которая определяется отдельно. Формирование ИАЦП является по сути объединением определенного количества звеньев матрицы R-2R из общего массива ОИН, которые доступны в НС.

При разработке самомаршрутизации в сети необходимо в первую очередь учесть, что АЦП НС должен обладать следующими важными свойствами:

- структура обеспечивает возможность менять количество разрядов для формируемых ИАЦП в некотором заданном диапазоне $(q_{\min}; q_{\max})$;
- структура должна быть многовходовой, т.е. количество одновременно обрабатываемых входных сигналов равняется n , число которых может быть сколько угодно большим, но задано изначально;
- структура может содержать некоторое количество обходных связей s между ОИН, которые позволяют исключать из НС отказавшие ОИН, т.е. должна быть s -отказоустойчивой.

Таким образом, НС должна содержать в себе систему, способную определить состояние ОИН и отправить соответствующие сигналы к определенным ОИН, которые будут задействованы в ИАЦП. Для описания этой системы используются математические модели нейрона ориентированные на две структуры НС: многослойной и однослойной.

2.2.1. Многослойная нейронная сеть

Первым предложенным способом для реализации системы самомаршрутизации явилась идея добавления дополнительного слоя в структуру НС (многослойная нейронная сеть) – слоя коммутаторов (Км) [54], что позволяет собирать информацию о состоянии ОИН и на ее основе распределять поступающие заявки на формирование ИАЦП между ними.

На рисунке 2.3 представлена структура многослойной самомаршрутизирующейся нейронной сети. Нейроны разделены на входной слой, два скрытых слоя и выходной слой. Входной и выходной слои выступают в качестве интерфейсов ввода-вывода и практически не участвуют в работе преобразователя. Нейроны первого скрытого уровня, или коммутаторы (Км) отвечают за реализацию алгоритмов самомаршрутизации сигналов и образования ИАЦП внутри нейронной сети. Нейроны второго скрытого уровня, или основные измерительные нейроны (ОИН), представляют собой одноразрядные АЦП, объединяя которые возможно получить ИАЦП заданной разрядности. Между собой все нейроны связаны аналоговыми и цифровыми каналами, а также логически с помощью специальных флагов, которые обеспечивают корректную работу устройства.

Отказоустойчивость схемы обеспечивается созданием дополнительных связей между нейронами второго скрытого слоя. Таким образом, ОИН предоставляется возможность выбрать между несколькими подключенными к нему нейронами. Выбор происходит с учетом работоспособности и приоритета нейронов, наивысший приоритет при этом отдается ОИН, непосредственно следующему за данным. На представленной схеме реализована одноотказоустойчивая структура, при отключении любого из ОИН схема полностью сохраняет свои функции, но при отказе в двух последовательных ОИН возможности по формированию индивидуальных АЦП существенно сократятся, хотя в целом схема сохранит работоспособность.

Так как все ОИН последовательно связаны друг с другом, то есть они в целом образуют замкнутое кольцо. Каждый из них может соответствовать как первому в ИАЦП разряду, так и последнему, поэтому необходимо предусмотреть возможность для подключения любого

входного сигнала к любому из ОИН, а также подключение выходов ОИН к любому выходному нейрону.

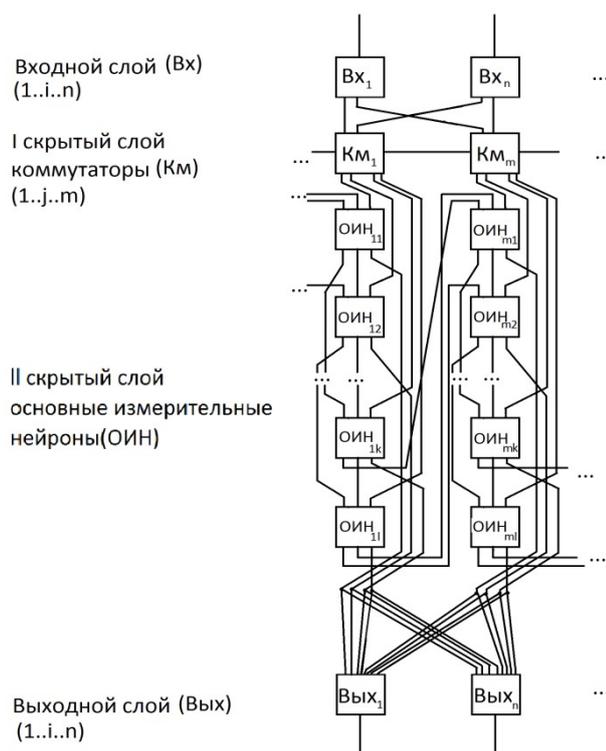


Рисунок 2.3 – Структурная схема многослойной нейронной сети. n – количество входных сигналов, m – количество Км, l – количество ОИН, подключенных к одному Км.

Соединение на уровне «ОИН – выходной нейрон» реализовано по принципу полносвязного графа, так как на этом уровне не требуется использования большого количества каналов связи.

При подключении входного нейрона к сети ОИН приходится использовать дополнительный слой Км в первую очередь потому, что при подключении входного нейрона заранее неизвестно в какой части НС удастся разместить ИАЦП заданных размеров. Км предназначены для решения этой задачи, за счет сбора информации о состоянии ОИН и в тоже время на основе собранной информации они принимают решение о том, какой из ОИН станет первым в формируемом ИАЦП. Данные о состоянии ОИН поступают в Км с двух направлений: во-первых, ОИН непосредственно подключенные к данному Км (такие ОИН будем называть собственными) сообщают ему о своей работоспособности; во-вторых, между Км существуют «горизонтальные» связи, по которым информация передается между соседними Км.

Построим математическую модель для ОИН на этапе формирования ИАЦП (Рисунок 2.4), она будет дополнять уже представленную выше модель ОИН на этапе проведения аналого-цифрового преобразования и содержать дополнительный выход ОИН.

В предложенной модели представлены следующие сигналы, поступающие на вход ОИН:

- сигналы (OIN_{i-1} ; OIN_{i-s}) – сигналы активации предыдущих ОИН с учетом наличия s дополнительных связей между ОИН;
- сигнал СЗР (старший значащий разряд) – служебный сигнал, поступающий от Км и определяющий первый ИК в матрице R-2R;
- сигнал МЗР (младший значащий разряд) – служебный сигнал, поступающий от Км и определяющий последний ИК матрицы R-2R.

Выходной сигнал OIN_i определяет собственное состояние нейрона, его участие в формируемом ИАЦП.

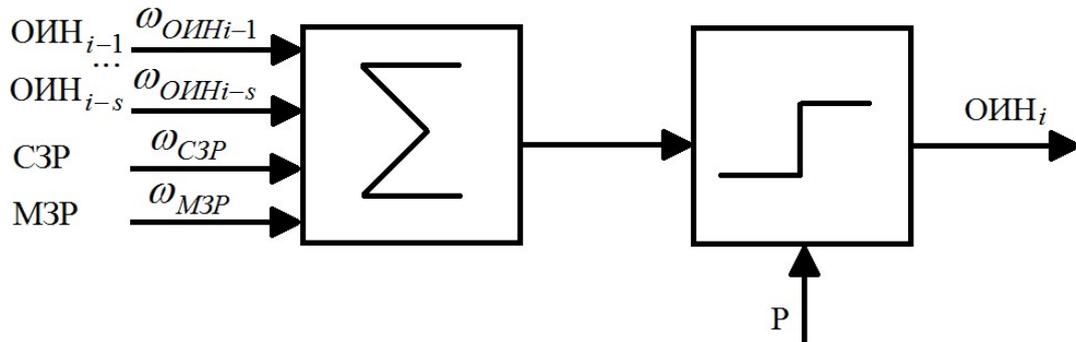


Рисунок 2.4 – Математическая модель ОИН на этапе формирования ИАЦП для многослойной НС

Весовые коэффициенты для входных сигналов определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_{OINi-1} &= 1 \\ &\dots \\ \omega_{OINi-s} &= 1 \\ \omega_{СЗР} &= 1 \\ \omega_{МЗР} &= -s \end{aligned}$$

В качестве активационной функции также используется пороговая функция, но порог данной функции не является постоянным, его можно представить в виде кусочно-заданной функции, зависящей от параметра g , который определяет исправность ОИН и, соответственно, возможность его использования для формирования ИАЦП.

$$P = \begin{cases} 1 & \text{при } g = 1 \\ s + 1 & \text{при } g = 0 \end{cases},$$

где $g = 1$ в случае, если ОИН исправен, а $g = 0$, если в ОИН обнаружена неисправность (методы с помощью которых возможно определить значение параметра g будут рассмотрены ниже).

Таким образом, при поступлении входного сигнала с любого из подключенных предыдущих ОИН или сигнала СЗР от Км происходит активация данного нейрона, если он

исправен, и к ИАЦП добавляется еще один ИК матрицы R-2R. Только в случае, когда ОИН получил сигнал МЗР, активация не произойдет, что ограничит объединение ИК в матрицу R-2R и завершит этап формирования ИАЦП.

Построим модель Км, которая обеспечивает его работу в системе маршрутизации сигналов (Рисунок 2.5). Для этого необходимо обеспечить три выходных сигнала, два из которых будут отправлены к ОИН (СЗР и МЗР), а оставшийся необходим для передачи следующему Км.

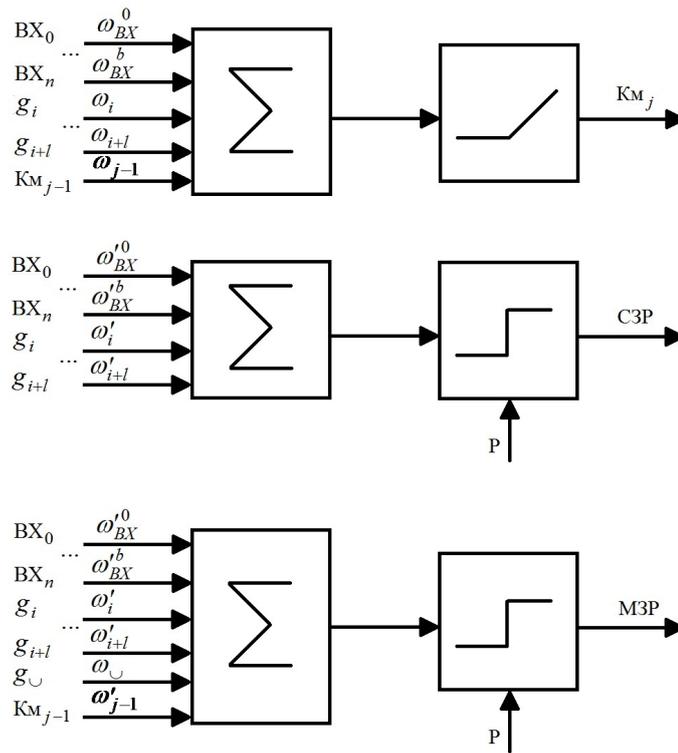


Рисунок 2.5 – Математическая модель Км для маршрутизации сигналов на этапе формирования ИАЦП

Входными сигналами для Км являются $((BX_0^0; BX_0^b); (BX_n^0; BX_n^b))$, где $(BX_0^0; BX_0^b)$ – это заявка на формирование ИАЦП определенной разрядности из диапазона $(q_{\min}; q_{\max})$, переданная в виде двоичного кода разрядностью b

$$b = \log_2 q_{\max}$$

При этом в АЦП может быть n входных сигналов, поэтому количество входных двоичных чисел определяется количеством этих сигналов $(BX_0; BX_n)$. Кроме того, в Км поступает сигнал с предыдущего Km_{j-1} , если Km_{j-1} требуются дополнительные ОИН помимо собственных. Также Км собирает информацию о собственных ОИН, за счет поступления от них сигналов $(g_i; g_{i+l})$, где g_i – это информация о первом собственном ОИН, а g_{i+l} – это

информация о последнем собственном ОИН. Весовые коэффициенты всех поступающих в Км сигналов отличаются в зависимости от того, на какой из сумматоров они поступают, коэффициенты входных сигналов и сигналов с предыдущего Км распределены следующим образом:

$$\begin{array}{cccccc} \omega_{BX0}^0 = 1 & \omega_{BXn}^0 = 1 & \omega_{BX0}'^0 = -1 & \omega_{BXn}'^0 = -1 & \omega_{j-1} = -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{BX0}^b = 2^b & \omega_{BXn}^b = 2^b & \omega_{BX0}'^b = -2^b & \omega_{BXn}'^b = -2^b & \omega_{j-1}' = -1 \end{array}$$

Для сигналов $(g_i; g_{i+l})$ весовые коэффициенты различны в зависимости от того на какой из сумматоров они подаются, кроме того, существует дополнительный сигнал $g_{\cup} = g_i \cup g_{i+1} \cup \dots \cup g_{i+l}$, который необходим Км для определения возможности размещения ИАЦП только на собственных ОИН

$$\begin{array}{ccc} \omega_i = -1 & \omega_i' = 1 & \\ \dots & \dots & \omega_{\cup} = 1 \\ \omega_{i+l} = -1 & \omega_{i+l}' = 1 & \end{array}$$

Для получения сигналов СЗР и МЗР используются пороговые функции активации со значением порога $P=1$, а для получения сигнала Км_{j+1} используется линейная функция $F(NET)$, которую можно представить графиком на рисунке 2.6.

$$F(NET) = \begin{cases} 0, & \text{при } NET < 0 \\ NET, & \text{при } NET \geq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

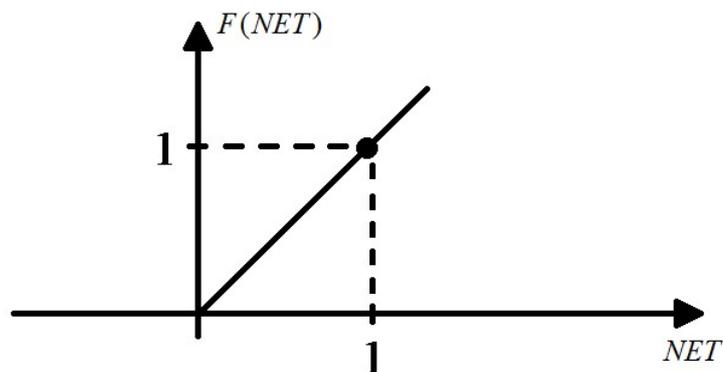


Рисунок 2.6 – Линейная функция возбуждения $F(NET)$ для формирования сигнала Км_{j+1}

Таким образом, самомаршрутизация на основе предложенного метода и модели Км работает следующим образом:

- в случае поступления заявки от входного сигнала, он в первую очередь определяет, может ли разместить ее на собственных ОИН, и генерирует сигнал СЗР для ОИН;

- после этого он вычисляет недостающее количество ОИН, которые ему необходимо затребовать от соседнего K_m_{j+1} за счет тормозящего действия сигналов ОИН ($g_i; g_{i+1}$) и линейной активационной функции (2.2) и передает их следующему K_m_{j+1} ;
- в случае поступления заявки от предыдущего K_m_{j-1} и невозможности ее размещения, операция повторяется. Если для размещения заявки от входного нейрона или K_m_{j-1} достаточно собственных ОИН, происходит генерация сигнала МЗР.

Так как каждый из K_m может генерировать только по одному сигналу СЗР и МЗР, то на структуру НС накладывается следующее ограничение: количество собственных ОИН, подключенных к K_m не может превышать q_{\min} .

Разработка модели многослойной архитектуры НС показала, что возможно организовать самомаршрутизацию сигналов внутри НС и формировать ИАЦП произвольной длины с минимальной задержкой за счет линейной функции (2.2). Но в ходе реализации математических моделей в виде функциональных узлов были определены следующие проблемы:

- высокие аппаратные затраты на реализацию коммутаторов по отношению к реализации ОИН;
- необходимость модернизации структуры K_m для повышения отказоустойчивости, за счет введения дополнительных обходных связей между K_m по аналогии с ОИН, что приводит к еще большим аппаратным затратам и снижению общей надежности K_m ;
- опасность возникновения отказа в K_m , так как это влечет за собой потери доступа к целому ряду ОИН, являвшихся собственными для данного K_m и возможно находившихся в исправном состоянии.

Для устранения указанных проблем была разработана модель однослойной самомаршрутизирующейся нейронной сети [55].

2.2.2. Однослойная нейронная сеть

Для устранения проблем самомаршрутизации сигналов, возникающих в многослойной НС, описанных выше, было решено модернизировать модель ОИН для того, чтобы маршрутизация сигналов происходила за счет самих ОИН (Рисунок 2.7) и не требовала создания вспомогательного слоя нейронов (K_m). При этом модель работы ОИН на этапе проведения аналого-цифрового преобразования, также описанная выше, не была изменена.

Поэтому все модели, приведенные в данном разделе, касаются только этапа настройки структуры АНС (формирования ИАЦП в НС).

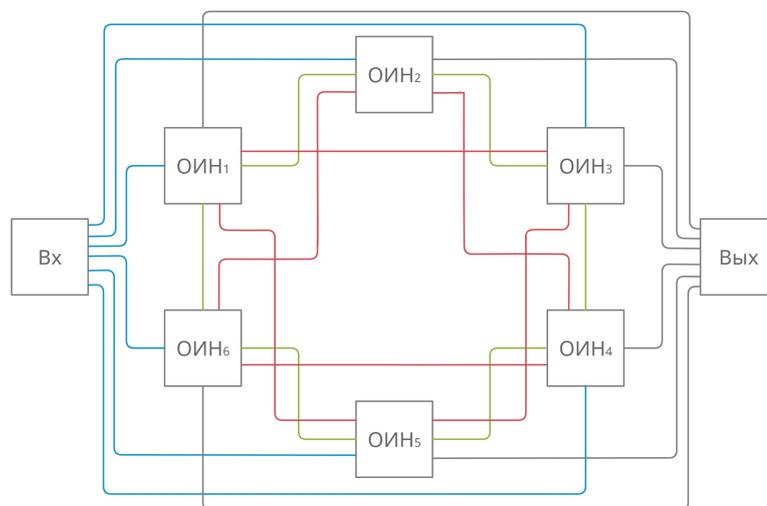


Рисунок 2.7 – Пример однослойной НС с одним входным и выходным нейронами и 6 ОИН в скрытом слое и одной дополнительной связью между ними

Во-первых, было решено, что заявка на формирование ИАЦП будет представлена не двоичным кодом, а в виде непрерывного сигнала «1», по длительности соответствующего количеству требуемых разрядов для проведения аналого-цифрового преобразования, т.е. ОИН в первую очередь получая сигнал от входного нейрона будет осуществлять преобразование параллельного двоичного позиционного кода в последовательный двоичный непозиционный код:

$$BX = a_0 a_1 \dots a_b$$

$$BX^* = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ 1, & \text{при } 0 \leq t \leq t_{\text{ex}} \\ 0, & \text{при } t > t_{\text{ex}} \end{cases} \quad (2.3)$$

где $t_{\text{ex}} = (a_0 * 2^0 + a_1 * 2^1 + \dots + a_b * 2^b) * t_{\text{CLK}}$ – время, по количеству тактов соответствующее значению поступившей на вход заявки в виде двоичного кода разрядности b .

Используя это преобразование и полученный сигнал BX^* , была разработана математическая модель ОИН на этапе формирования ИАЦП (Рисунок 2.8), генерирующая сигнал ОИН_i , определяющий задействован ли данный ОИН в ИАЦП. Входными сигналами для сумматора будут $(\text{ОИН}_{i-1}; \text{ОИН}_{i-s})$, показывающие уровень возбуждения предыдущих по отношению к данному ОИН, также с этих ОИН поступают сигналы $(g_{i-1}; g_{i-s})$, описанные выше. Кроме того, ОИН удерживает возбужденное состояние, пока не поступит сигнал DESTР, указывающий на завершение обработки текущего входного аналогового сигнала и вызывающий разрушение сформированного ИАЦП.

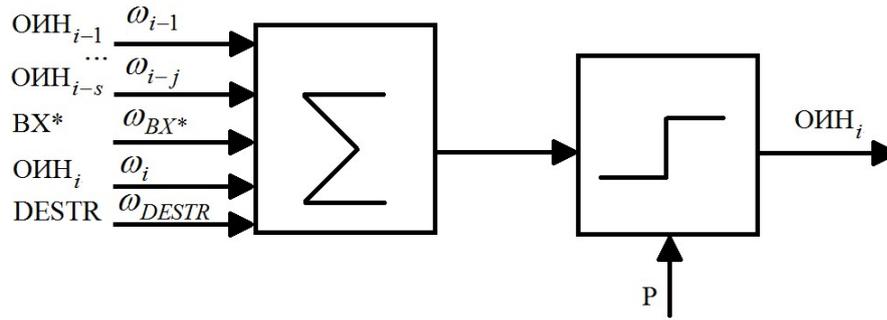


Рисунок 2.8 – Математическая модель ОИН на этапе формирования ИАЦП для однослойной НС

Весовые коэффициенты для сигналов (ОИН_{*i-1*}; ОИН_{*i-s*}) зависят от времени и положения ОИН относительно друг друга, а определяются с помощью сигналов (*g*_{*i-1*}; *g*_{*i-s*}) по следующей формуле:

$$\omega_{i-j} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_{i-j} \\ s - f_j(t), & \text{при } t \geq t_{i-j} \end{cases}$$

где ω_{i-j} – весовой коэффициент для сигнала ОИН_{*i-j*}, поступающего от нейрона с номером *i-j*; t_{i-j} – это время поступления сигнала ОИН_{*i-j*}; $f_j(t)$ – функция зависимости данного весового коэффициента от времени, которая определяется как кусочно-заданная и может быть представлена графиком на рисунке 2.9.

$$f_j(t) = \begin{cases} s, & \text{при } t \leq t_{i-j} \\ \frac{(g_{i-1} + g_{i-2} + \dots + g_{i-j}) * t_{CLK}}{t - t_{i-j}}, & \text{при } t_{i-j} < t < t_{i-j} + (g_{i-1} + g_{i-2} + \dots + g_{i-j}) * t_{CLK} \\ s, & \text{при } t \geq t_{i-j} + (g_{i-1} + g_{i-2} + \dots + g_{i-j}) * t_{CLK} \end{cases}$$

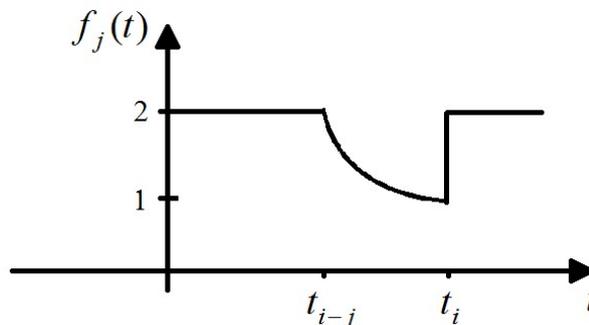


Рисунок 2.9 – График функции $f_j(t)$

Таким образом, весовые коэффициенты создают временную задержку $t_{зад} = (g_{i-1} + g_{i-2} + \dots + g_{i-j}) * t_{CLK}$ для возбуждения сигнала ОИН_{*i*} в один такт, что приведет к

разнице между сигналом ОИН_{*i*} и сигналом ВХ* на один такт, поэтому последний возбужденный ОИН не сможет передать свой сигнал дальше, так как следующему ОИН не хватит длительности поступающего сигнала ОИН_{*i-j*} для возбуждения собственного сигнала ОИН_{*i*}. Сигналы ($g_{i-1}; g_{i-s}$) позволяют учесть состояния предыдущих ОИН в НС, в которых мог возникнуть отказ, тогда необходимо уменьшить время задержки, так как сигнал ОИН_{*i-j*} по сути будет являться сигналом ОИН_{*i-j+1*}, так как «расстояние» между исправными ОИН сокращается за счет исключения неисправного ОИН из состава НС. Для остальных сигналов весовые коэффициенты являются постоянной величиной.

$$\begin{aligned}\omega_{BX^*} &= s \\ \omega_i &= s \\ \omega_{DESTR} &= -2s\end{aligned}$$

Активационная функция для данной модели также как и в случае многослойной сети будет пороговой с переменным значением порога, который позволит исключить срабатывание неисправных ОИН:

$$P = \begin{cases} 1 & \text{при } g_i = 1 \\ s + 1 & \text{при } g_i = 0 \end{cases}$$

В отличие от многослойной НС данная сеть лишена недостатков вызванных наличием дополнительного слоя Км: понижение надежности НС из-за отсутствия обходных связей между Км, а также потерей части работоспособных ОИН при возникновении отказа в одном из Км. Но применение однослойной НС вызывает ряд собственных проблем для реализации АЦП на ее основе:

- на этапе формирования ИАЦП возникает дополнительная временная задержка $t_{зад}$ на подключение каждого ОИН из-за формирования последовательности единиц (2.3), что в итоге ограничивает быстродействие АЦП, увеличивая общее время на преобразование аналогового сигнала:

$$T_{АЦП} = T_{ФИАЦП} + NT_{оискр} = qt_{зад} + N * 2qt_{CLK} = 2(N + 1)qt_{CLK}, \quad (2.4)$$

где $T_{АЦП}$ – время проведения аналого-цифрового преобразования поступившего аналогового сигнала, $T_{ФИАЦП}$ – время на формирование ИАЦП для поступившего аналогового сигнала, N – количество измеряемых отсчетов поступившего аналогового сигнала.

- значительное увеличение аппаратных затрат на реализацию ОИН, что снижает возможное количество размещаемых ОИН в рамках одного кристалла (сравнительный анализ многослойной и однослойной НС будет проведен ниже), а также снижает надежность ОИН как отдельного функционального элемента;

Для решения этих проблем можно использовать сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), способные работать на сверхвысоких частотах тактового генератора (ГГц), что будет представлено далее в четвертой главе.

2.3. Разработка общей архитектуры и выделение этапов работы самонастраивающегося АЦП НС

Основными блоками в структуре самонастраивающегося АЦП НС являются: блок компараторов, схема вычисления требуемой разрядности для каждого аналогового сигнала и, собственно, сама нейронная сеть [56] (Рисунок 2.10).

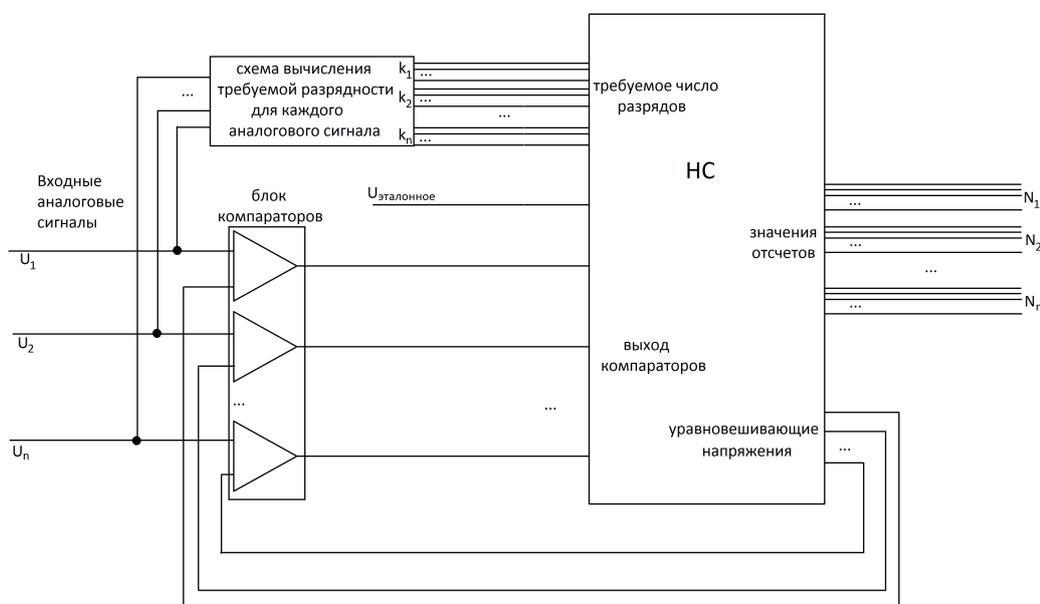


Рисунок 2.10 – Структура самонастраивающегося АЦП НС

В АЦП НС поступает некоторое количество аналоговых сигналов, которые в итоге будут преобразованы в соответствующие цифровые сигналы. Для каждого входного сигнала имеется свой компаратор. Важно отметить, что на данном этапе одному входу соответствует один единственный компаратор, но в принципе можно реализовать систему распределения одного сигнала на несколько компараторов и, таким образом, добиться параллельности проведения аналого-цифрового преобразования с целью увеличения быстродействия. Кроме того, необходимо отметить, что компараторы вынесены за пределы самой НС, и подают на нее сигнал со своего выхода, получаемый за счет сравнения входного сигнала с уравновешивающим напряжением, которое генерируется в НС.

Схема вычисления требуемой разрядности для каждого аналогового сигнала необходима для того, чтобы оптимально распределить ресурсы нейронной сети (данная задача не входит в проблематику диссертационной работы). Вычисленное количество разрядов по каждому входному сигналу поступает в НС в виде двоичного кода разрядностью k_i [57], это определяет количество ОИН, объединяемых в ИАЦП для этого входного сигнала. В зависимости от величины аналоговых сигналов, а также требований к информационно-измерительной системе, таких как скорость обработки сигналов и точность измерений, схема вычисления требуемой разрядности выдает конкретное количество разрядов, требуемое в ИАЦП, с помощью которого удастся провести аналого-цифровое преобразование, удовлетворяющее заданным параметрам.

Выход НС представляет собой параллельный двоичный позиционный код соответствующей разрядности. Кроме того, для НС задается сигнал $U_{\text{эталонное}}$ – эталонное напряжение, определяющее распределение значений уравнивающего напряжения, генерируемого матрицей R-2R и, соответственно, ограничивающее максимально возможную амплитуду измеряемых сигналов.

В рамках диссертационного исследования рассматривается только построение структурных блоков НС, так как это основная часть структуры АЦП НС. Подбор компараторов зависит в первую очередь от параметров входных сигналов и максимально возможных уравнивающих напряжений [58], а в качестве схемы измерения требуемой разрядности можно применить некоторые готовые решения [18, 39, 59].

Работа НС АЦП не зависимо от ее типа, может быть разделена на 3 этапа: формирование ИАЦП, проведение аналого-цифрового измерения, разрушение ИАЦП.

Первым этапом работы является этап формирования ИАЦП, на котором используются принципы самомаршрутизации сигналов, описанные выше. Входной сигнал (k_i), указывающий какое количество разрядов должно быть в формируемом ИАЦП, поступает на входной нейрон.

Далее в многослойной НС входной нейрон, ориентируясь на значения статусных регистров K_m , переправляет данный входной сигнал на K_m , удовлетворяющий условию: значение его статусного регистра больше или равно количеству запрашиваемых разрядов для ИАЦП. Затем K_m сообщает собственным свободным ОИН, что они объединяются в ИАЦП, выбирает среди них старший разряд, а количество разрядов ИАЦП, которое он не может реализовать с помощью собственных ОИН, отправляет в виде запроса следующему K_m . Таким образом, в сети ОИН резервируется участок по длине соответствующий требуемой разрядности ИАЦП и имеющий старший и младший ОИН. При этом через K_m к младшему ОИН передается информация об условном номере входного нейрона. Таким образом, старший ОИН своими входами присоединяется к K_m , передающему сигналы от входного нейрона, а младший ОИН своими выходами присоединяется к выходному нейрону, условный номер которого

соответствует номеру входного нейрона. После этого выходной нейрон посылает сигнал готовности входному и это говорит о завершении этапа формирования ИАЦП.

Все сигналы передаваемые нейронами между слоями и внутри них, между соседними Км и соседними ОИН, представлены на рисунке 2.11, кроме сигналов, отвечающих за измерение сигналов, приведены также сигналы, требуемые для сбора информации о состоянии НС [60].

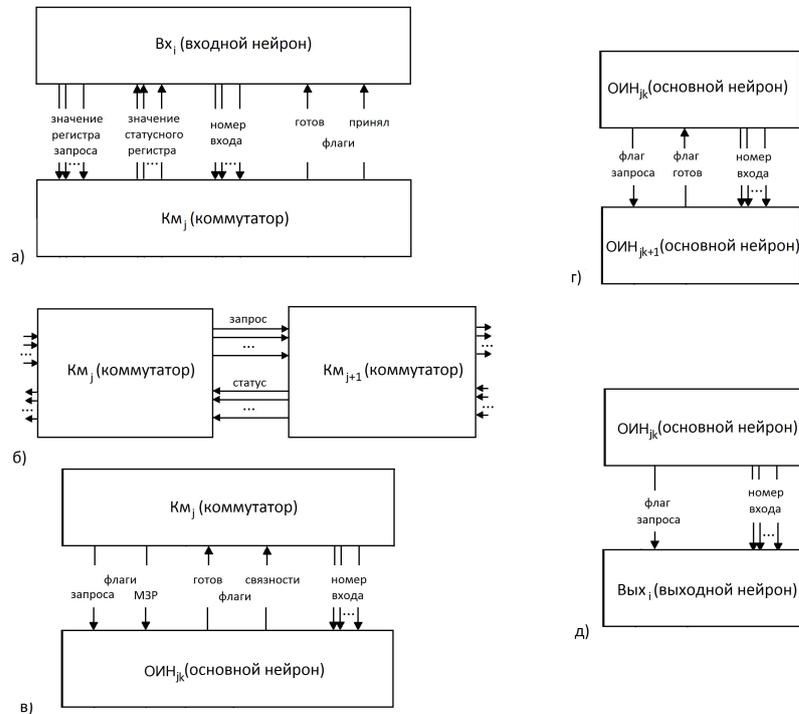


Рисунок 2.11 – Служебные сигналы маршрутизации и сбора информации о состоянии НС в многослойной НС.

Расчет количества собственных доступных ОИН проводится внутри каждого Км в отдельности, т.к. для каждого Км число доступных ОИН, в общем случае, будет отличаться. Доступность ОИН определяется посредством двух статусных флагов: флага готовности и флага связности. Флаг готовности генерируется внутри нейрона и сообщает о том, что в данный момент нейрон не занят и исправен. Занятость нейрона подразумевает, что нейрон уже включен в состав какого-либо ИАЦП и, следовательно, не может быть задействован при создании нового ИАЦП.

Если в ОИН произошел отказ и он не может быть задействован в ИАЦП, то он сообщает об этом предыдущему ОИН, а тот в свою очередь переключает свои выходы на следующий ОИН. Чтобы учесть отказ двух последовательных ОИН (в случае одноотказоустойчивой схемы это приводит к разрыву в общей последовательности всех ОИН, и, соответственно, к сокращению возможностей по формированию ИАЦП) в схему добавлен дополнительный флаг «связности», который ОИН передает Км в случае если у него существует возможность подключения хотя бы к одному из последующих ОИН. Флаг связности является функцией от

состояния собственного флага готовности и флагов готовности подключенных следующих ОИН. Количество подключенных ОИН определяется числом дополнительных связей между нейронами.

Причем каждый Км, помимо собственных свободных и исправных ОИН, считает доступными все ОИН, до которых отсутствует разрыв связности. Разрыв связности подразумевает наличие ОИН, флаг связности которого равен нулю. Для учета всех доступных ОИН, включая не собственные, используются счетчики, распределенные по всем Км, что позволяет избегать центральной системы управления, которая значительно понизила бы отказоустойчивость АЦП НС, так как при возникновении отказа в центральном коммутаторе, дальнейшее функционирование устройства было бы невозможно. Результатом работы этих счетчиков и являются статусные регистры каждого Км [60-61].

Для однослойной НС дело обстоит иначе: в этом случае функции Км перераспределяются между ОИН, т.е. каждый нейрон сам должен решать задачи, связанные с управлением маршрутизацией сигнала и взаимодействием с другими нейронами при образовании ИАЦП. Каждый из них, опираясь на информацию приходящую только от соседних ОИН в режиме реального времени должен определить собственную роль в процессе формирования и работы ИАЦП. С этой целью был разработан оригинальный алгоритм, организованный по принципу "эхо-локации", сигналы маршрутизации при этом показаны на рисунке 2.12.

Идея этого алгоритма была позаимствована из механизма ориентирования летучих мышей, определяющих расстояние до ближайших объектов по отраженному от них эхо. В нашем же случае "эхо" представляет собой некий сигнал, передаваемый между нейронами. Будем разделять этот сигнал на два типа: "эхо-запрос" и "эхо-ответ". "Эхо-запросом" будем считать сигнал, идущий от нейрона его отправившего по кольцу в прямом направлении. "Эхо-ответом" же будем считать сигнал в обратном направлении, идущий к ОИН, который отправил "эхо-запрос". Сигнал "эхо-запрос" представляет собой последовательность из некоторого числа логических «1». При выходе из ОИН-источника его длина равна максимально возможной разрядности заявки для формирования ИАЦП. Проходя через каждый последующий нейрон, "эхо-запрос" уменьшает свою длину на единицу, при этом инициализирует генерацию "эхо-ответа" в случае, если данный ОИН исправен и не участвует в других ИАЦП. Таким образом, "эхо-запрос" существует до тех пор, пока он не пройдет количество ОИН равное его изначальной длине либо не встретит разрыв между ОИН. "Эхо-ответ" является импульсом логической единицы, длиной в один такт, и в процессе движения к ОИН – источнику "эхо-запроса" – через промежуточные нейроны не претерпевает изменений. ОИН-источник

производит подсчет количества пришедших "эхо-ответов", которое получается равно числу ОИН свободных для образования ИАЦП, начиная с ОИН-источника.

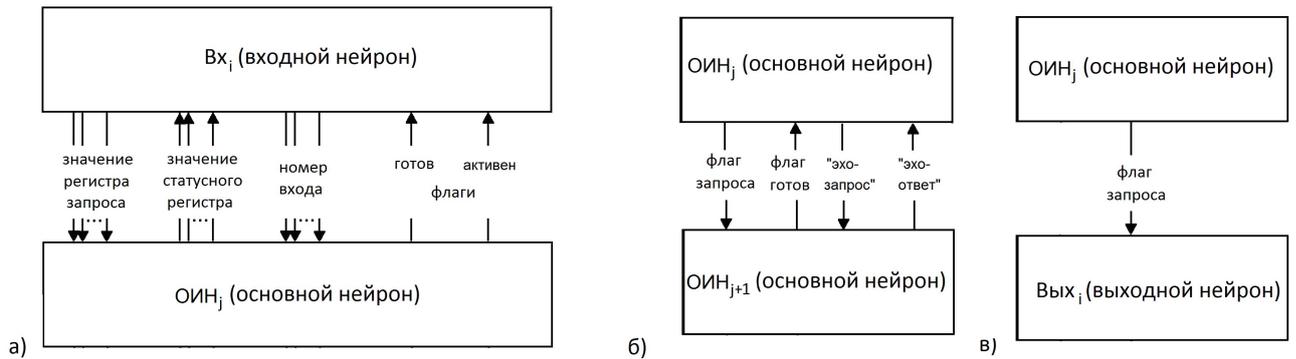


Рисунок 2.12 – Служебные сигналы маршрутизации и сбора информации о состоянии НС в однослойной НС.

ОИН-источник «эхо-запроса» будем называть активным, все остальные пассивными. При этом существует два вида активных ОИН: первый – временно активный ОИН – это нейрон, посылающий «эхо-запросы» не постоянно, а с некоторой случайной частотой, заложенной изначально в структуру ОИН. Второй тип активных ОИН – вынужденно активный ОИН – посылает «эхо-запросы» постоянно. Это связано с тем, что при размещении в НС хотя бы одного ИАЦП либо при появлении в кольце ОИН разрыва, который невозможно обойти с помощью дополнительных связей, приоритетным становится формирование следующего ИАЦП, начиная непосредственно с ближайшего к разрыву работоспособного нейрона. Таким образом, не допускается разделение массива последовательных исправных и свободных ОИН на мелкие участки до и после сформированных ИАЦП. За счет данного принципа обеспечивается более рациональное распределение ресурсов НС между формируемыми ИАЦП.

Временно активные ОИН включаются в работу независимо друг от друга, в соответствии со своим внутренним счетчиком. Процесс включения ОИН в работу можно рассматривать как случайный равномерный поток, поэтому в НС всегда присутствует несколько временно активных ОИН. Временно активные ОИН по команде внутреннего счетчика осуществляют однократную "эхо-локацию" и, если это необходимо, используют полученную информацию для размещения ИАЦП, а затем продолжают работу, возвращаясь в пассивное состояние, до следующего срабатывания внутреннего счетчика. Вынужденно активные ОИН отправляют новый "эхо-запрос" каждый раз, как только заканчивается передача "эхо-ответов", инициированных предыдущим "эхо-запросом". Это необходимо, так как наличие в них актуальной информации о возможности размещения ИАЦП в последующих нейронах является

наиболее приоритетной задачей, потому что новый ИАЦП в первую очередь желательно разместить через вынужденно активные ОИН.

При поступлении запроса на создание ИАЦП некоторой разрядности система, состоящая из множества независимых нейронов, должна выбрать наиболее рациональное положение в НС для размещения ИАЦП. Под рациональностью понимается, что в случае наличия двух не равных областей свободных нейронов, в каждой из которых содержится достаточное для размещения поступившей заявки количество ОИН, система выберет ту, в которой количество ОИН ближе к требуемой разрядности размещаемого ИАЦП. Тогда при поступлении следующей заявки на размещение ИАЦП система сможет разместить ИАЦП большей разрядности.

Решение задачи такого рационального выбора осложняется тем фактом, что в процессе своей работы нейроны не имеют возможности запросить информацию о максимальной разрядности ИАЦП, который могут разместить другие нейроны. Для решения данной задачи была использована идея о конкуренции между нейронами за получение заявки. При поступлении новой заявки на размещение ИАЦП некоторой разрядности каждый активный ОИН вступает в борьбу за размещение заявки на доступных ему нейронах. Борьба осуществляется следующим образом: активный ОИН запускает внутренний вычитающий счетчик импульсов, начальное значение которого устанавливается равным разнице между требуемой разрядностью ИАЦП и количеством доступных ОИН. Далее счетчик каждого активного ОИН уменьшает собственное значение на единицу. При достижении нуля, ОИН информирует об этом входной нейрон. Борьбу за размещение ИАЦП выигрывает тот нейрон, счетчик которого обнулится первым. После чего ИАЦП будет сформирован через выигравший нейрон, а все остальные активные ОИН получают отказы [65].

Входной нейрон исполняет роль информатора активных нейронов о поступающих заявках на размещение ИАЦП и их разрядности. А также направляет соответствующие сигналы в ОИН, победивший в борьбе за размещение ИАЦП, то есть не осуществляет никаких вычислений.

Победивший в борьбе ОИН, запускает сигнал «эхо-запрос» длиной, соответствующей требуемой разрядности ИАЦП по тем же каналам, которые используются для определения количества доступных ОИН методом «эхо-локации», но вместе с ним сигнализирует следующему ОИН о том, что идет не опрос о состоянии, а непосредственно формирование ИАЦП с помощью специального флага «запрос». Следующий ОИН, получая одновременно «эхо-запрос» и флаг «запрос» не отправляет «эхо-ответ», а подключает свои измерительные каналы к предыдущему ОИН и передает «эхо-запрос» дальше также уменьшая его длительность на единицу. Кроме того, после сигнала «эхо-запрос», отправленного победившим в борьбе за размещение заявки ОИН, в этот же канал этот ОИН посылает последовательность

единиц, соответствующую по длине номеру входного нейрона. Это делается для того, чтобы последний в сформированном ИАЦП ОИН, получив этот сигнал мог определить к какому из выходных нейронов ему необходимо подключить измерительные каналы. Выходной нейрон также, как и в случае многослойной сети, получив сигнал от одного из ОИН, передает сигнал «готовности» на входной нейрон, что знаменует собой завершение этапа формирования ИАЦП.

Второй этап работы АЦП – это непосредственное осуществление преобразования. На этом этапе задействована только матрица $R-2R$, сформированная из единичных ИК в ОИН, которые связаны общей тактовой частотой. Управление порядком срабатывания ОИН осуществляется с помощью специального флага метки, который вырабатывается входным нейроном сразу после завершения формирования ИАЦП и передается между ОИН с задержкой на два такта в каждом. Приход метки в выходной нейрон означает окончание обработки очередного отсчета, позволяет считать полученное в сдвиговом регистре значение и передать во входной нейрон команду на начало обработки следующего отсчета. Перед тем как запустить новую метку, входной нейрон дает команду на асинхронный сброс всех ОИН в ИАЦП в состояние «0», что необходимо для дальнейшей корректной обработки следующего отсчета.

Преобразование проводится за $2k_i$ тактов. Это связано с тем, что ОИН, объединенные в ИАЦП срабатывают поочередно, при этом каждый ОИН работает два такта. На первом такте ОИН принимает значение «1», что увеличивает значение уравнивающего напряжения с выхода нейронной сети на величину соответствующую порядку ОИН в ИАЦП. Значение этого уравнивающего напряжения поступает на вход компаратора, а результат сравнения с компаратора возвращается в нейронную сеть. Далее результат сравнения компаратора распространяется без задержек в ИАЦП, достигает выше указанного ОИН, и в зависимости от значения, полученного на компараторе, ОИН либо остается в «1», если уравнивающее напряжение меньше входного, и возвращается в «0» в противном случае.

Результаты срабатывания каждого ОИН передаются в виде последовательности «0» и «1» по сформированной для этого в ИАЦП цифровой шине и попадают в выходной нейрон, где накапливаются в сдвиговом регистре и считываются в определенный момент времени, когда обработка очередного отсчета окончена.

Завершающий этап работы АЦП – это разрушение сформированного ИАЦП после исчезновения входного сигнала. В многослойной сети это достигается в результате снятия всех флагов запросов от входного нейрона и Км, а также между Км. В свою очередь Км освобождают свои ОИН, снимая флаги СЗР и МЗР, что сразу же отражается на состоянии соответствующих статусных регистров в Км. Таким образом, система возвращается в начальное состояние и появляется возможность для формирования новых ИАЦП через освободившиеся ОИН.

В однослойной НС разрушение ИАЦП достигается за счет передачи сигнала разрушения ИАЦП, который распространяется без задержки по всем ОИН, входящим в ИАЦП и приводит к сбросу их флагов «запроса», таким образом, исчезновение этого сигнала приводит к деактивации ОИН и они возвращаются в начальное состояние.

Далее в диссертации будут представлены результаты разработки структурных схем ОИН, реализующих однослойную нейронную сеть, так как она явилась более выгодной структурой для организации АЦП НС с точки зрения аппаратных затрат, что будет представлено ниже (см. п. 2.4). При этом структура измерительной части ОИН, которая является основным элементом АЦП, является универсальной и не зависит от типа НС.

2.4. Разработка структуры ОИН для однослойной НС

Учитывая все требования, отмеченные в пунктах 1.2, 2.1 и 2.2 а также особенности подключения звена матрицы R-2R и алгоритм работы ИАЦП, была разработана структура ОИН (Рисунок 2.13). Структура состоит из трех основных блоков: местного фрагментарного устройства управления (МФУУ), блока контроля и измерительной части. Входные и выходные ключи реализуют принципы самомаршрутизации сигналов.



Рисунок 2.13 – Общая структура ОИН

На измерительную часть подаются все необходимые сигналы для корректной работы матрицы R-2R, которые будут отмечены ниже. Между основными блоками также существуют взаимосвязи, позволяющие им обмениваться сигналами для организации управления и самоконтроля ОИН.

В МФУУ поступает служебный сигнал метки, сигналы готовности соседних нейронов, а также сигналы, обеспечивающие самомаршрутизацию на этапе формирования ИАЦП: заявка

входного нейрона, «эхо-запрос» и флаг занятости. Также МФУУ формируются сигналы для формирования ИАЦП: «эхо-ответ», флаги активности и захвата. Кроме того, МФУУ связан со входными и выходными ключами и определяет их состояние для подключения ОИН к другим нейронам.

Диагностику в структуре ОИН выполняет блок контроля, который ведет мониторинг состояния нейрона, а именно МФУУ и измерительной части и выдает флаг готовности, который направляется в соседние нейроны для исключения неисправных ОИН из сети.

2.4.1. Разработка структуры измерительной части ОИН для проведения аналого-цифрового преобразования

Измерительная часть ОИН – это звено матрицы R-2R (см. п. 1.2), поэтому в первую очередь необходимо предусмотреть в структуре СБИС матрицу сопротивлений R, которые будут разделены по отдельным ОИН и соединяться при помощи аналоговых ключей, способных пропускать определенные токи. Такие ключи предлагается организовать при помощи МДП-транзисторов с изолированным затвором (Рисунок 2.14). МДП-транзистор нашел широкое применение в сверхбольших интегральных схемах (СБИС) [62] и работает в режиме ключа: при нулевом напряжении затвора транзистор закрыт, при положительном напряжении затвора – открыт. Выбор МДП-транзисторов для изготовления СБИС связан со многими положительными качествами МДП-транзистора по сравнению с биполярными и полевыми транзисторами [62, 63]:

- низкое энергопотребление (так как в нем нет управляющих p-n переходов, то в закрытом состоянии МДП-транзистор не пропускает ток и потребление равно нулю);
- высокое быстродействие (время, требующееся для открытия и закрытия канала, значительно меньше, чем у биполярного транзистора, так как отсутствуют паразитные диффузионные емкости p-n перехода);
- относительная простота производства (МДП-транзистор в интегральном исполнении по планарной технологии представляется более простой конструкцией, чем биполярный транзистор, так как нет необходимости изготовления «тонкой» базы, а также тройного легирования для получения области эмиттера).

Для разработки измерительной части оговорим схему преобразования. Этап проведения преобразования начинается с того, что после прихода сигнала готовности ИАЦП от выходного нейрона во входной, в нем формируется служебный сигнал метки длительностью один такт,

который передается между ОИН и хранится в каждом по 2 такта. Вначале метка попадает в ОИН старшего разряда, по первому такту после ее прихода ОИН переходит в состояние «1». На второй такт ОИН оценивает значение выхода компаратора, если оно равно «1» (входное напряжение больше уравнивающего), то ОИН сохраняет свое значение, в противном случае возвращается в состояние «0». Далее метка переходит в следующий ОИН, где процедура повторяется. По приходу метки на выходной нейрон, он передает ее обратно входному нейрону, сохраняя при этом значение сдвигового регистра, в котором к этому моменту содержатся все значения полученных разрядов. Входной нейрон, получив метку, генерирует сигнал сброса, который возвращает все ОИН в состояние «0» и запускает новую метку для формирования следующего отсчета [57].

Таким образом, в измерительной части ОИН можно выделить 2 блока с определенными функциями: в первом происходит формирование и сохранение значения разряда, во втором – включение звена матрицы R-2R, но блоки взаимосвязаны (Рисунок 2.14). Разделение на два блока в первую очередь связано с тем, что в каждом из них формируется последовательность элементов разного типа: цифровой и аналоговый тракты. Аналоговым трактом является последовательность связанных сопротивлений R. В одном случае тракт выводится на отрицательный вход компаратора, в другом – продолжается до следующего ОИН. Для корректной работы матрицы R-2R необходимо определить эталонное напряжение PWR, соответствующее максимальному значению измеряемого сигнала.

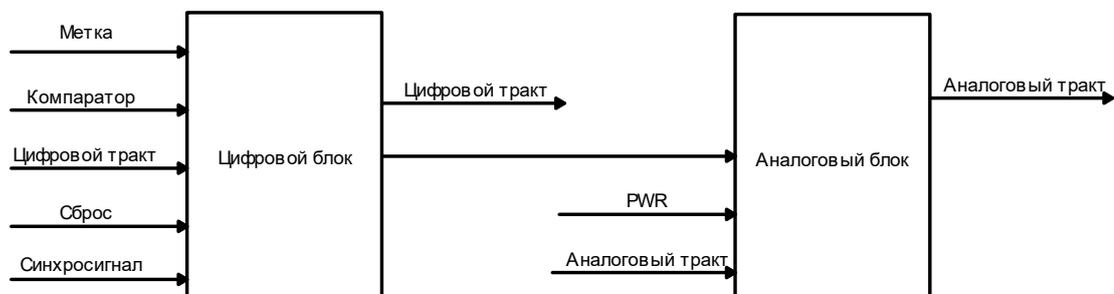


Рисунок 2.14 – Структура измерительной части ОИН

Цифровой тракт отвечает за сбор информации с измерительной части ОИН и представляет собой сдвиговый регистр, часть которого распределена между ОИН в качестве отдельных D-триггеров, а «хвост» находится в выходном нейроне НС, в нем накапливается полное значение отсчета. А с приходом в выходной нейрон сигнала метки, что означает конец формирования отсчета, это значение сохраняется в параллельном регистре для дальнейшего использования и передачи микроконтроллеру.

Рассмотрим подробнее схему цифрового блока (Рисунок 2.15): элементы задержки в данной схеме – D-триггеры, синхронизируемые по переднему фронту. Сигнал CLK необходим

для синхронизации работы триггеров. Цифровой блок отвечает за управление ключом № 3 в общей схеме ИК матрицы R-2R, изображенной на рисунке 1.10, а также выход сигнала на цифровой тракт. Поступление сигнала метки M_1 в МФУУ означает, что наступила очередь данного ОИН сформировать разряд для измеряемого сигнала и на выходе цифрового блока Ctrl возникает сигнал «1», что говорит о добавлении соответствующего уравнивающего напряжения матрицей R-2R.

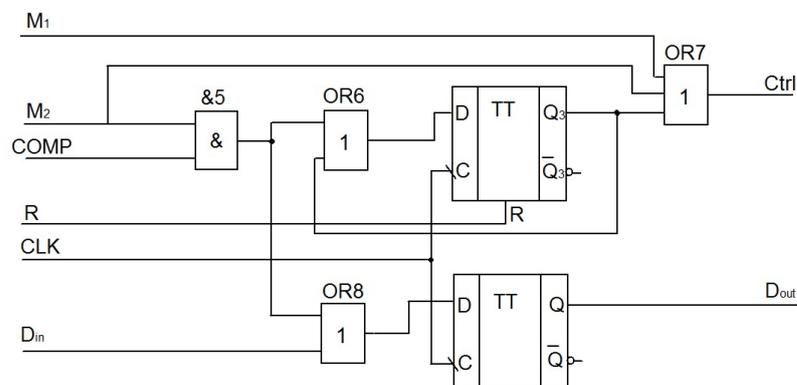


Рисунок 2.15 – Структура цифрового блока измерительной части ОИН

На следующий такт, что определяется сигналом M_2 , в ОИН происходит запоминание этого значения в D-триггере, который хранит его до тех пор, пока не поступит сигнал сброса (окончание формирования отсчета). В зависимости от значения выхода компаратора это значение, либо устанавливается в «1», либо остается в «0», при этом для того, чтобы измерение проходило определенное количество тактов, используем элемент 3-ИЛИ с выходом Ctrl, управляющим ключом в аналоговом блоке.

Одновременно с сохранением значения разряда в D-триггере, ОИН осуществляет передачу этого значения в цифровой тракт, организованный на втором в D-триггере. В первую очередь отметим, что до тех пор, пока на ОИН не приходит сигнал метки, ОИН транслирует сигналы цифрового тракта D_{in} предыдущего нейрона на следующий нейрон в ИАЦП D_{out} . Когда на элемент 2-И поступает выход компаратора и метка, задержанная на 2 такта из МФУУ, на цифровой тракт выводится сигнал с компаратора.

Аналоговый блок (Рисунок 2.16) управляется цифровым блоком. Если Ctrl = «1», то на ИК матрицы R-2R подается напряжение с шины эталонного напряжения PWR, а если Ctrl = «0», то с шины заземления. Как только метка приходит в ОИН, ИК матрицы R-2R подводит эталонное напряжение к аналоговому тракту, который подключен на отрицательный вход компаратора, при этом значение эталонного напряжения делится на соответствующую величину в зависимости от положения ОИН в ИАЦП. Аналоговый тракт при этом соединяется

через сигналы `key_out` и `key_in`, которые с помощью системы управления, входных и выходных ключей ОИН, формируется в ИАЦП, эта процедура будет рассмотрена ниже

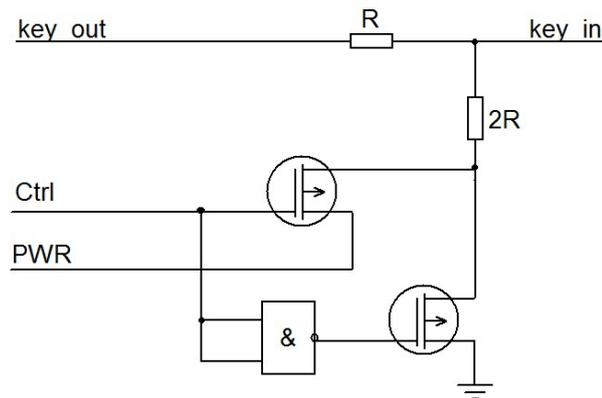


Рисунок 2.16 – Структура аналогового блока измерительной части ОИН

Для того чтобы синхронизировать работу ИАЦП, необходимо ввести дополнительный блок – систему управления. Как было отмечено в п. 1.5 для АЦП НС предлагается использовать распределенную между всеми нейронами в сети систему управления, что позволит при отказе одного из них сохранять работоспособность АЦП НС в целом, но такое решение требует больших аппаратных затрат на обеспечение управления в каждом ОИН. Для снижения ресурсоемкости системы управления предлагается вариант, основанный на применении местных фрагментарных устройств управления (МФУУ). Управление остается распределенным между узлами, но в то же время полноценное управление возможно только при объединении нескольких нейронов в ИАЦП. Такая структура является наиболее перспективной для нейронных сетей, так как использование однотипных нейронов облегчает разделение между ними функций управления.

2.4.2. Разработка структуры местного фрагментарного устройства управления ОИН для однослойной НС

В первую очередь МФУУ требуется для того, чтобы привязать работу измерительной части к общей тактовой частоте и выделить в ней два такта, которые отведены для работы конкретного разряда. Очередность срабатывания ОИН задается с помощью специального служебного сигнала метки, описание которого было приведено выше. Для того чтобы выделить 2 такта в работе измерительной части ОИН, используем элементы задержки (Рисунок 2.17). Так как на этапе проведения аналого-цифрового измерения на сформированном ИАЦП, модель

ОИН не зависит от вида НС (см. п. 2.1 и 2.3), то основная схема управления ОИН для проведения аналого-цифрового преобразования является общей для однослойной и многослойной НС.

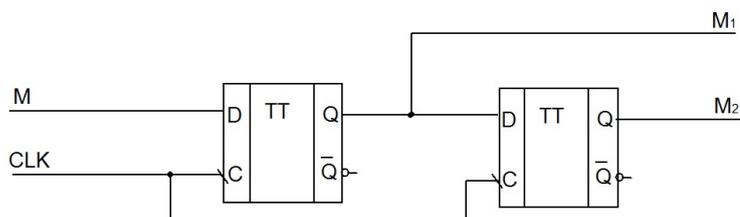


Рисунок 2.17 – Структура МФУУ ОИН для проведения аналого-цифрового преобразования

Остальные функции МФУУ зависят от выбранного типа НС, в данной работе будут приведены структурные блоки для однослойной НС, о чем говорилось выше. МФУУ ОИН включает в себя также элементы управления самомаршрутизацией сигналов в НС и отвечает за формирование ИАЦП заданной разрядности в зависимости от поступившей заявки. Для этого в МФУУ включены следующие дополнительные элементы (Рисунок 2.18): определитель состояния, управление ИАЦП, генераторы «эхо-запроса» и «эхо-ответа», а также счетчики внутренней активности, вычитающе-декрементирующий и счетчик «эхо-ответов».

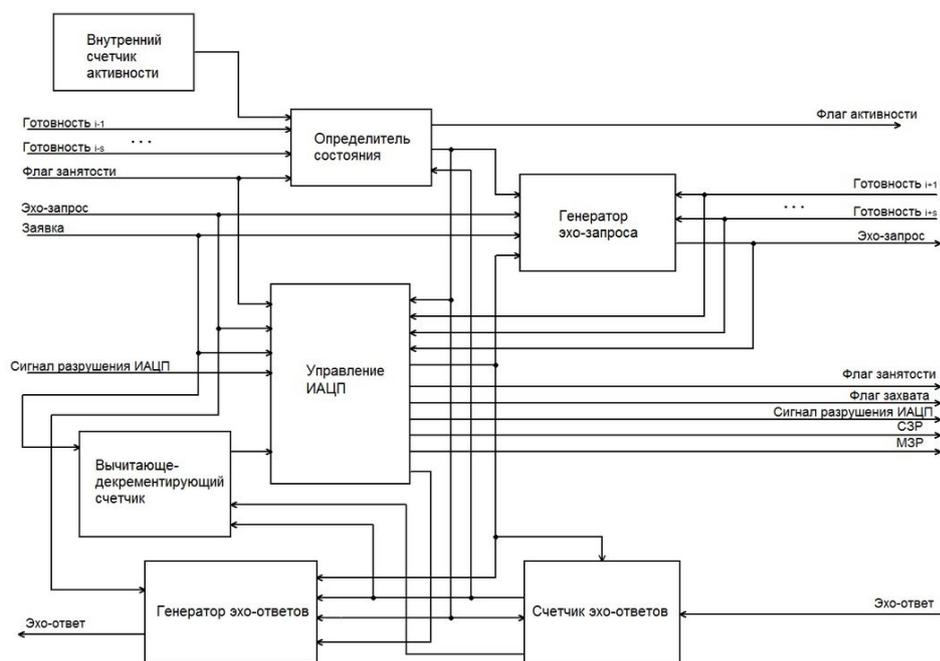


Рисунок 2.18 – Общая структура МФУУ ОИН для однослойной НС

Основными блоками в данной структуре являются определитель состояния и управление ИАЦП, так как именно они отвечают за формирование и в дальнейшем разрушение ИАЦП. Перед тем, как сформировать ИАЦП заданной разрядности, необходимо убедиться в наличии

необходимого количества ОИН на данном участке НС, которое удовлетворит поступившей заявке на формирование ИАЦП. Эта задача решается при помощи алгоритма «эхо-локации», описанного выше, при этом определитель состояния принимает решение о том, в каком состоянии находится данный ОИН: активном (вынужденном или временном) или пассивном (см. п. 2.3). Состояние определяется в зависимости от состояния предыдущих ОИН, так как если данный ОИН находится в положении первого исправного нейрона после разрыва в цепочке ОИН, то он будет вынужденно активным ОИН (триггер D11.1, он же представляет собой флаг активности). При этом не важно чем вызван этот разрыв: неисправностью предыдущих нейронов либо размещением перед данным ОИН другого ИАЦП, поэтому входными для определителя состояния (Рисунок 2.19) являются флаги готовности и занятости предыдущих ОИН. Триггер D11.2 характеризует собой активное состояние ОИН, не зависимо от того находится он в вынужденном или временном активном состоянии (по сигналу timer от некоторого внутреннего счетчика, который определяет периодичность перехода ОИН во временно активное состояние).

Если эти флаги находятся в состоянии «0», то состояние ОИН считается вынужденно активным, это приводит к установке флага активности в «1», а также к тому, что поступление сигнала сброса состояния от счетчика «эхо-ответов» вызывает генерацию нового «эхо-запроса», не меняя состояния ОИН. Если хотя бы одна из пар этих сигналов выдает сигнал «1», то ОИН находится в пассивном состоянии, пока не появится сигнал с внутреннего счетчика активности, который переведет данный ОИН во временно активное состояние, когда произойдет однократная генерация «эхо-запроса», а поступление сигнала сброса от счетчика «эхо-ответов» переведет ОИН обратно в пассивное состояние. Во временно активном состоянии флаг активности в «1» не устанавливается, так как он предназначен для входного нейрона и определяет приоритет вынужденно активных нейронов перед временно активными, если существует возможность формирования ИАЦП через несколько ОИН.

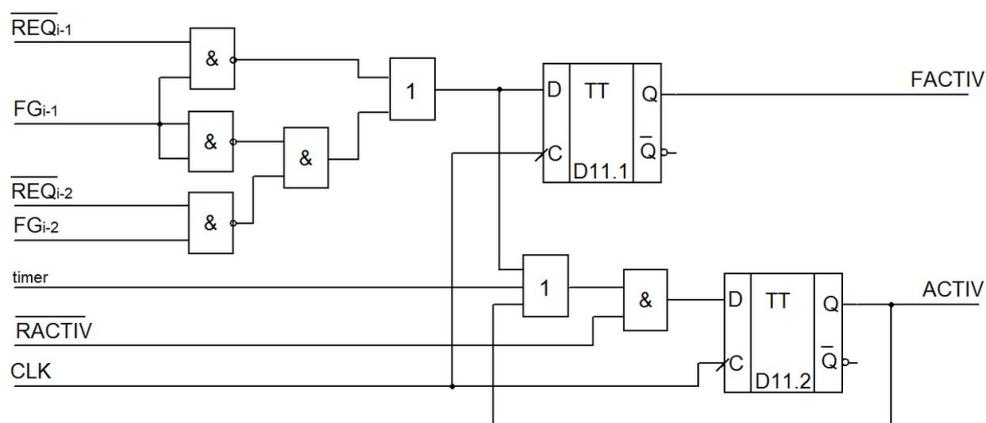


Рисунок 2.19 – Структура определителя состояния МФУУ ОИН

Находясь в активном состоянии определитель состояния запускает генератор «эхо-запроса» (Рисунок 2.20), устанавливая значения триггеров в схеме преобразования параллельного позиционного кода в последовательный непозиционный код в «1».

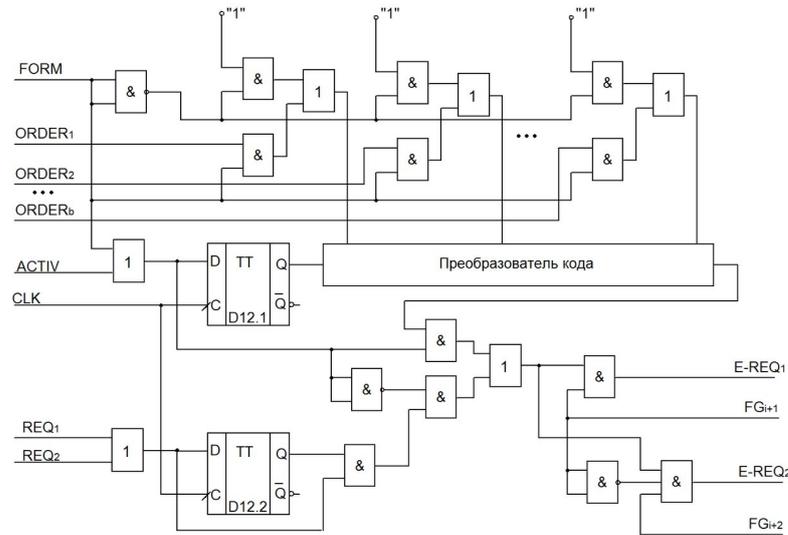


Рисунок 2.20 – Структура генератора «эхо-запроса» МФУУ ОИН

Таким образом, генератор «эхо-запроса» отправит последовательность «1», соответствующую максимально возможной разрядности формируемых ИАЦП следующему ближайшему исправному ОИН. При этом если данный ОИН приступит к формированию ИАЦП, то вместо максимальной разрядности в схему преобразования параллельного кода в последовательный поступит требуемая разрядность формируемого ИАЦП, поэтому генератор «эхо-запроса» имеет двойное назначение в системе управления самомаршрутизацией сигналов НС. Запуск преобразователя кода происходит при помощи триггера D12.1, при этом сброс этого триггера останавливает передачу последовательности «1». Если ОИН находится в пассивном состоянии, то генератор «эхо-запроса» транслирует «эхо-запрос» предыдущего ОИН дальше также к ближайшему исправному ОИН, при этом происходит потеря одной единицы в передаваемой последовательности, за счет задержки, реализованной на триггере D12.2.

Для определения количества доступных ОИН для формирования ИАЦП помимо генератора «эхо-запросов» требуется генератор «эхо-ответов» (Рисунок 2.21), который при поступлении «эхо-запроса» генерирует «эхо-ответ» в виде импульса «1» длиной один такт, благодаря схеме, организованной на двух триггерах D13.1 и D13.2. При этом, как только прекратит поступать последовательность единиц «эхо-запроса» значение триггера D13.1 сбросится в ноль, что приведет к возвращению генератора в начальное состояние и при поступлении нового «эхо-запроса» он снова отправит импульс «1» длиной в один такт. Кроме генерации собственного «эхо-ответа» схема передает импульсы «эхо-ответа», поступающие от

следующих после данного ОИН, только если источником «эхо-запроса» является не этот ОИН. Для определения направления передачи «эхо-ответов» используется сигнал «эхо-запроса», поступивший от одного из предыдущих ОИН, при этом триггер, хранящий эту информацию (D13.3 и D13.4), будет сброшен в «0», когда от счетчика «эхо-ответов» поступит сигнал сброса.

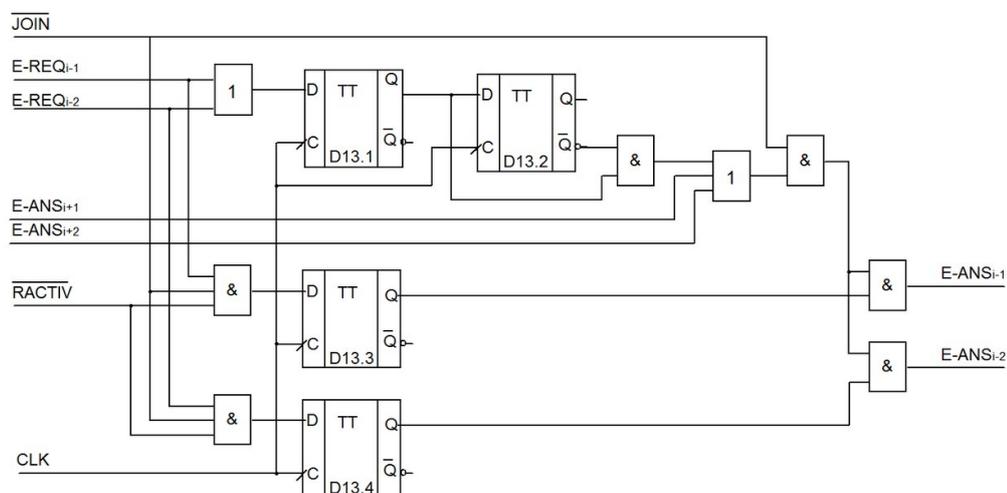


Рисунок 2.21 – Структура генератора «эхо-ответа» МФУУ ОИН

Счетчик «эхо-ответов» (Рисунок 2.22) представляет собой обыкновенный инкрементирующий счетчик на Т-триггерах (D14.3, D14.4 до D14.2+b), который увеличивает свое значение каждый раз при поступлении сигнала «эхо-ответа» от одного из следующих ОИН. При этом разрешающим сигналом для подсчета сигналов «эхо-ответа» является сигнал определителя состояния, показывающий, что ОИН находится в активном состоянии.

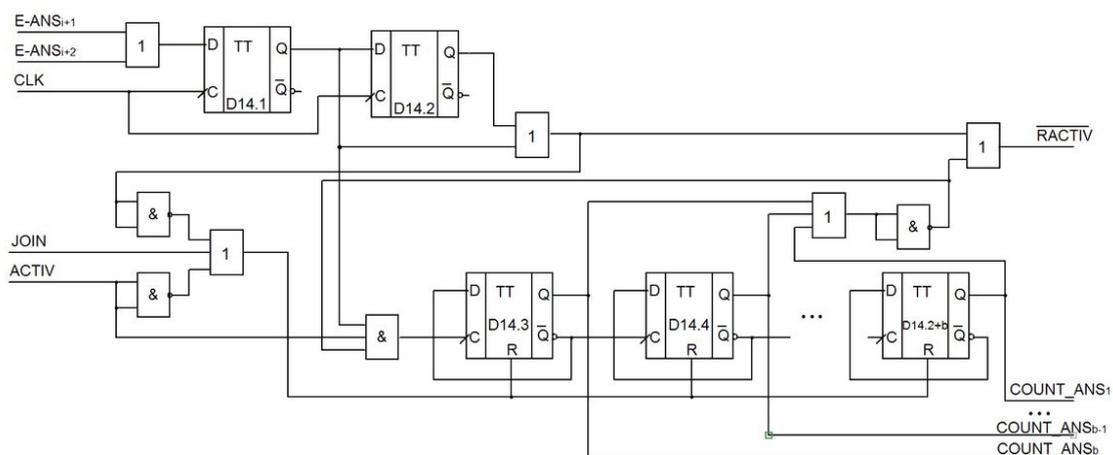


Рисунок 2.22 – Структура счетчика «эхо-ответов» МФУУ ОИН

Также счетчик «эхо-ответов» генерирует сигнал сброса для схем определителя состояний и генератора «эхо-ответов» в том случае, если на его вход прекращают поступать сигналы «эхо-ответов» от следующих ОИН, это происходит в случае, если в течении двух

тактов не поступает ни одного сигнала «эхо-ответа», так как точно известно, что последовательность «эхо-ответов» состоит из неопределенного числа импульсов длиной в один такт каждый, но между каждым из них поступает сигнал «0». Поэтому как только в последовательности «эхо-ответов» встречается два «0» подряд, это означает, либо «эхо-запрос» исчерпал всю свою длительность, либо встретил на своем пути непреодолимый разрыв в цепи ОИН. Для проверки последовательности «эхо-ответов» используются триггеры D14.1 и D14.2

Значение самого счетчика «эхо-ответов» поступает на вычитаемый вход вычитающе-декрементирующего счетчика (Рисунок 2.23), который представляет собой параллельную схему вычитания из значения входной заявки значения счетчика «эхо-ответов» с последующим сохранением результата в декрементирующий счетчик из Т-триггеров (D15.5- D15.5b) по сигналу от схемы управления ИАЦП. Разрешающим сигналом для декрементирующего счетчика является инвертированный сигнал сброса, поступающий от счетчика «эхо-ответов», это связано с тем, что в случае поступления дополнительных «эхо-ответов» в данный ОИН необходимо учесть это в системе самомаршрутизации. Триггеры D15.1 и D15.2 принимают сигнал BATTLE, означающий приход входящей заявки на формирование ИАЦП в активный ОИН и позволяющие сохранить результат вычитания в декрементирующий счетчик. Триггеры D15.3 и D15.4 формируют сигнал WIN, который говорит об обнулении декрементирующего счетчика и возможной победе данного ОИН в борьбе за формирование ИАЦП (см. п. 2.3).

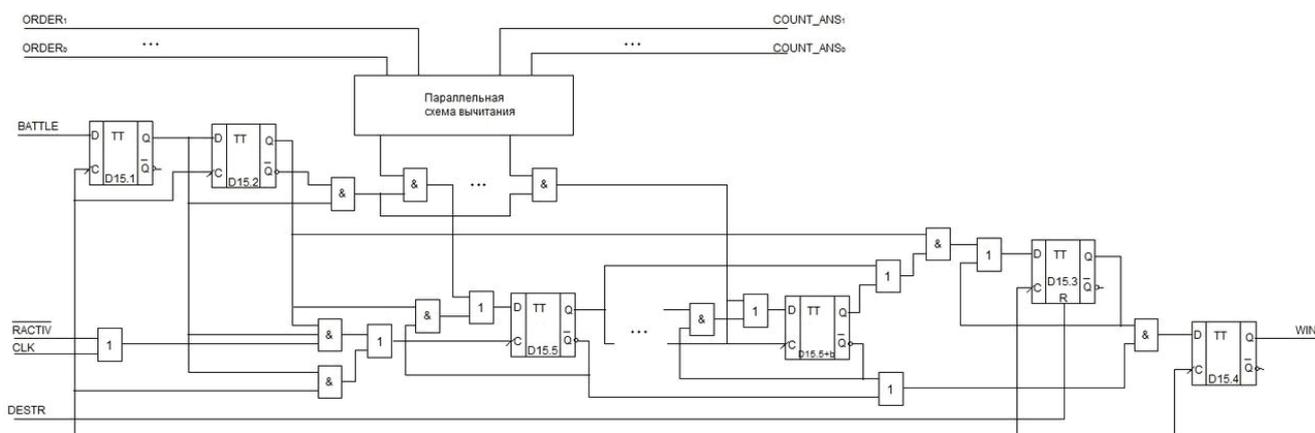


Рисунок 2.23 – Структура вычитающе-декрементирующего счетчика МФУУ ОИН

Анализ блоков системы управления показал, что в каждом из них используется счетчик, построенный на D-триггерах, при этом разрядность счетчиков определяется максимальной допустимой разрядностью формируемых ИАЦП. Наличие таких счетчиков в каждом из нейронов приводит к значительному росту аппаратных затрат на реализацию ОИН, при этом используются в процессе работы только те счетчики, что расположены в активном ОИН, а в пассивных эти триггеры никак не используются. Для того чтобы уменьшить аппаратные затраты на реализацию МФУУ, счетчики были разбиты на составные компоненты, для примера

приведем счетчик в блоке «эхо-запроса» (Рисунок 2.24), рассчитанный на максимальную разрядность формируемого ИАЦП $q_{\max} = 15$. В структуре выделены система установки начального значения для счетчика, сам декрементирующий счетчик и система защиты от переполнения счетчика.

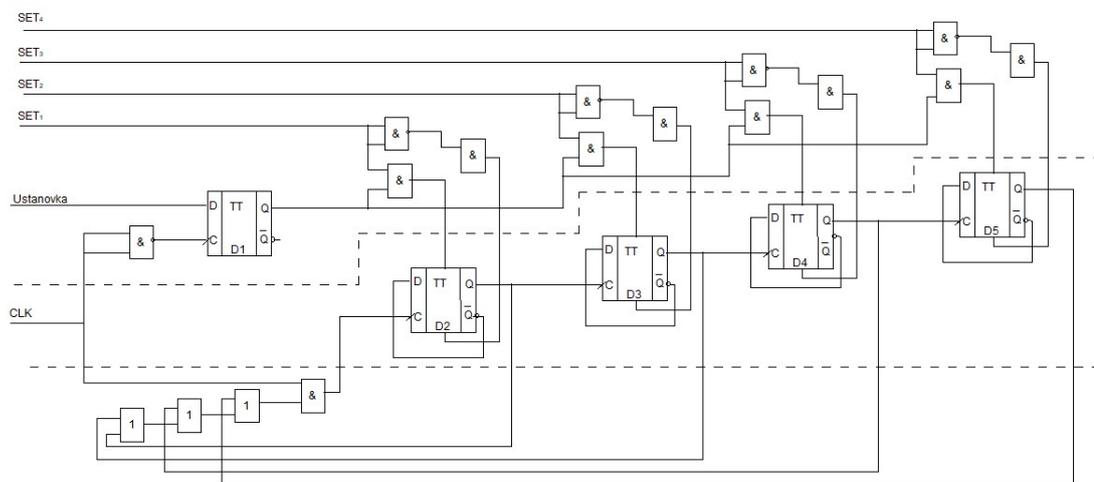


Рисунок 2.24— Структура счетчика в блоке «эхо-запроса»

Так как на любом этапе работы АЦП НС происходит объединение нескольких ОИН, а их минимальное количество определено заранее q_{\min} , то для того чтобы не дублировать счетчик в каждом нейроне, решено выделить в каждом счетчике единичный фрагмент (Рисунок 2.25). Единичный фрагмент также состоит из системы задания начального значения, одного триггера для счетчика, и системы защиты от переполнения. Для объединения единичных фрагментов в законченные счетчики разработана структура блока управления объединением фрагментов счетчиков (Рисунок 2.26), которая состоит из системы определения порядка срабатывания (количество триггеров соответствует минимально возможной разрядности ИАЦП q_{\min}), системы определения последнего ОИН для счетчика, а также флага активности для счетчиков.

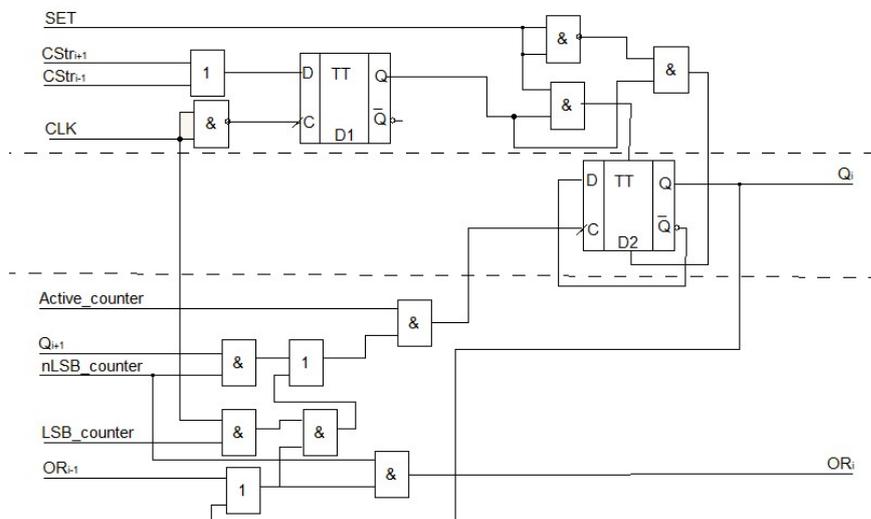


Рисунок 2.25 – Структура единичного фрагмента для счетчика в блоке «эхо-запроса»

Объединение фрагментов происходит следующим образом, сигнал SZR от активного ОИН поступает в блок управления объединением, где определяется порядок срабатывания за счет задержки этого сигнала в триггерах в верхней части, показанной на рисунке 2.26. Когда сигнал поступает в следующий ОИН, длительность задержки уменьшается на единицу, таким образом в последнем ОИН (в данном случае в четвертом) сигнал задержки составит один такт и будет сформирован сигнал LSB_counter, который останавливает формирование счетчика, после чего начинается работа объединенного счетчика и передается соответствующий флаг активности счетчика в систему управления ОИН.

Аналогичные единичные фрагменты были разработаны для счетчиков в других блоках на рисунке 2.19. Разделение счетчиков между ОИН позволяет уменьшить аппаратные затраты на реализацию каждого ОИН в среднем на 20%, чем больше значение q_{\min} , тем больше экономия ресурсов, что подтверждено построенными моделями в системе моделирования MultiSim, представленных в п. 2.6.3. Дополнительный блок управления объединением фрагментов счетчиков можно представить в общей структуре МФУУ ОИН на рисунке 2.27.

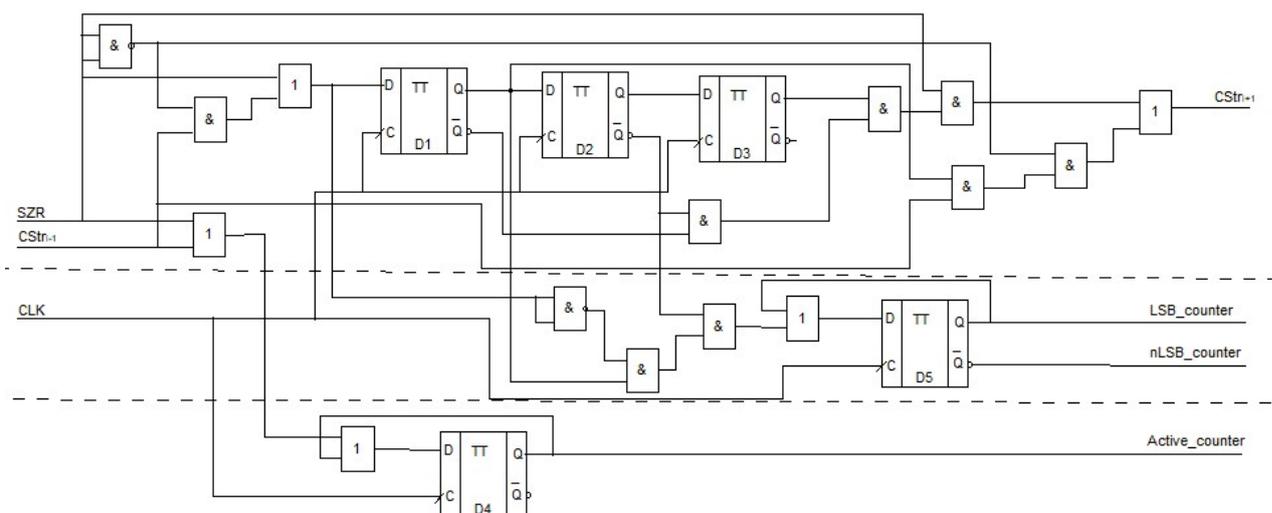


Рисунок 2.26 – Структура блока управления объединением фрагментов счетчиков

Если в МФУУ поступает заявка от входного сигнала или флаг занятости от одного из предыдущих ОИН, то начинает работать схема управления ИАЦП (Рисунок 2.28), которая непосредственно отвечает за формирование ИАЦП. В данном случае возможны два варианта работы этой схемы: данный ОИН получает заявку от входного нейрона и находится в активном состоянии, то есть вступает в борьбу за формирование ИАЦП, начиная с данного ОИН (см. п. 2.3), либо от одного из предыдущих ОИН поступает флаг занятости и одновременно «эхо-запрос», что является для данного ОИН сигналом присоединения к уже формируемому ИАЦП совместно с предыдущими ОИН.

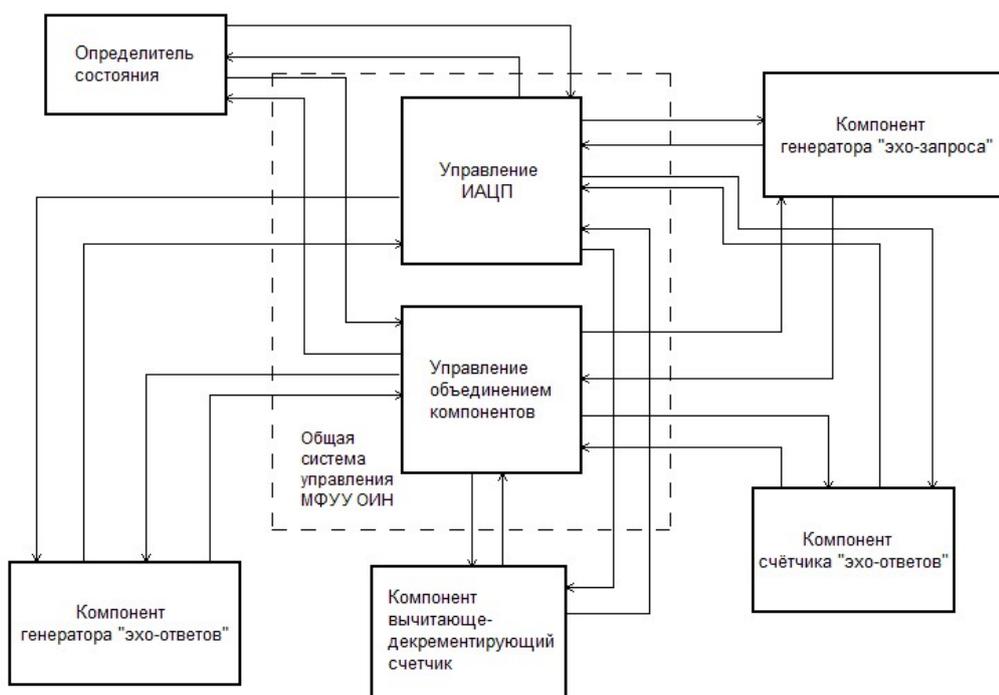


Рисунок 2.27 – Структура МФУУ ОИН с учетом разделения счетчиков между ОИН с выделением отдельных единичных фрагментов

В случае, когда данный ОИН вступает в борьбу за формирование ИАЦП в качестве старшего разряда, схема управления ИАЦП генерирует сигнал BATTLE (D16.1) в вычитающе-декрементирующий счетчик, который разрешает записать значение разницы между заявкой входного нейрона и счетчиком «эхо-ответов» в декрементирующий счетчик. После этого схема управления ИАЦП ожидает от него ответа WIN, когда все разряды декрементирующего счетчика станут равны нулю, тогда схема управления посылает сигнал FORM в генератор «эхо-запроса» (D16.2), который записывает в триггеры преобразователя параллельного кода в последовательный значения заявки входного нейрона. Одновременно с этим схема управления выставляет значение флага занятости для ближайшего исправного ОИН в «1» (D16.6 и D16.7), чтобы он реагировал на «эхо-запрос», как на команду к присоединению в ИАЦП. Также в этот момент выставляется флаг захвата, для входного нейрона, чтобы тот снял заявку с входов других ОИН, кроме этого, и СЗР, который служит для управления входными ключами ОИН (тот же триггер D16.2). Кроме того, после установки данных флагов схема управления ИАЦП готова сгенерировать сигнал разрушения ИАЦП DESTR (D16.3 и D16.4), который приведет к сбросу всех ОИН, которые будут входить в формируемый ИАЦП. Генерация сигнала разрушения ИАЦП произойдет как только пропадет сигнал заявки от входного нейрона.

В другом случае, когда от одного из предыдущих ОИН поступает флаг занятости и одновременно с ним «эхо-запрос», данный ОИН осуществляет присоединение к формируемому ИАЦП. Для этого он устанавливает флаг занятости в «1», при этом, если с выхода его

собственного генератора «эхо-запроса» на следующий такт не придет единица, то дополнительно данный ОИН установит флаг МЗР в «1», так как отсутствие дальнейшего «эхо-запроса» означает окончание формирования ИАЦП, т.е. данный ОИН будет последним в сформированном ИАЦП. Флаг МЗР управляет выходными ключами ОИН, которые направляют сигналы цифрового тракта и метки вместо следующего ОИН к выходному нейрону, а также подключают последнее сопротивление R в матрицу для ее балансировки, после чего можно переходить к проведению аналого-цифрового преобразования. На этапе разрушения ИАЦП, сигнал DESTР, сгенерированный старшим разрядом, будет без задержек распространяться между всеми остальными ОИН входящими в него до последнего, который не сможет передать его дальше из-за блокирующего элемента, зависящего от значения флага МЗР.

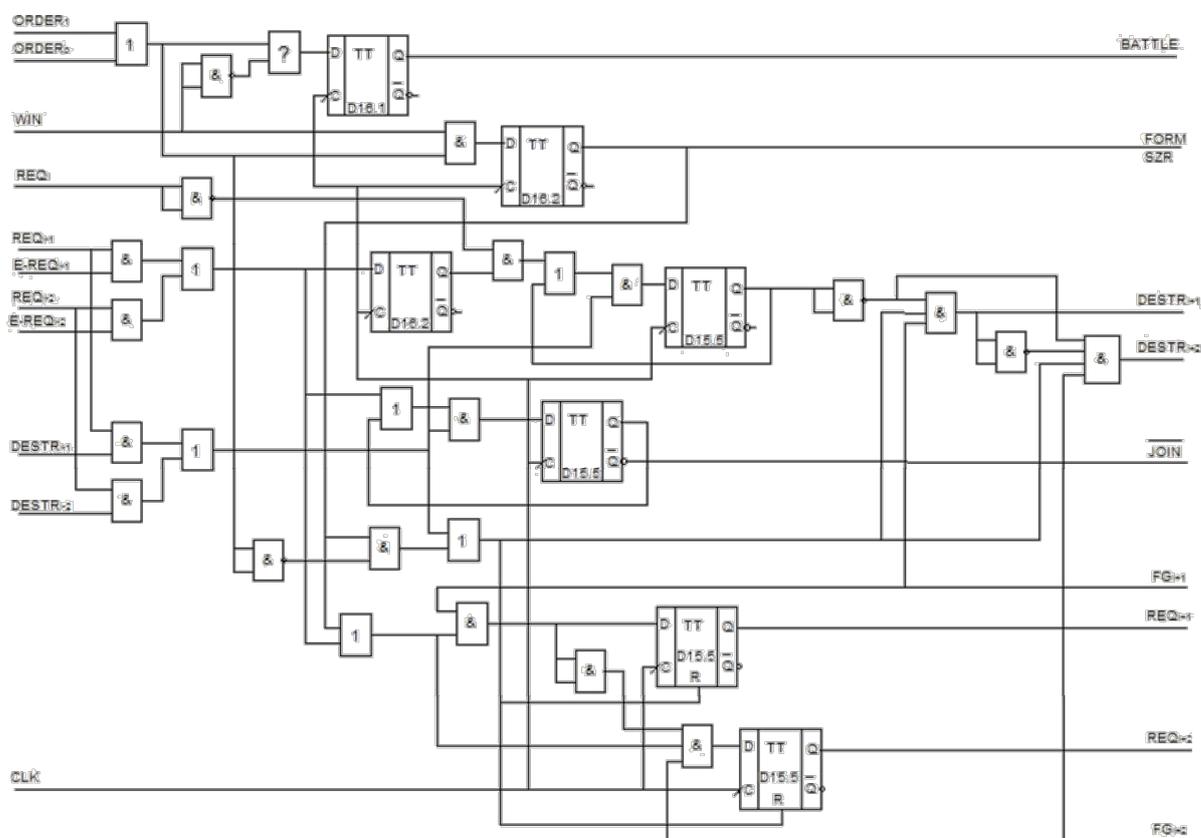


Рисунок 2.28 – Структура управления формированием ИАЦП МФУУ ОИН

2.4.3. Разработка структуры блока контроля ОИН для определения исправности остальных блоков

Для того чтобы маршрутизация в НС проходила должным образом, а ИАЦП формировался на действительно работоспособных ОИН, необходимо сформировать и передать

информацию о состоянии ОИН. Для этого используется схема внутреннего контроля, которая генерирует служебный сигнал – флаг готовности, который несет в себе информацию о работоспособности ОИН (Рисунок 2.29).

Построению схемы контроля измерительной части ОИН и МФУУ предшествовало несколько задач: определение модели дефектов и ее построение, определение запрещенных состояний и составление таблицы дефектов.



Рисунок 2.29 – Блок контроля

За основу была принята константная модель дефектов [64] для структурно-логических схем, в которой рассматриваются не функции элементов, а только линии связи. В такой модели предполагается, что в любой линии связи может возникнуть константный сигнал (как «0», так и «1») вследствие обрыва связи или короткого замыкания. В данной работе рассматривались только одиночные константные дефекты, т.к. их появление наиболее вероятно [65, 66].

Для примера возьмем модель дефектов цифровой части измерительного блока (Рисунок 2.17) при значении сигнала с выхода компаратора равном «1» (Таблица 2.1). С помощью подобных моделей необходимо определить состояния системы, при которых определяются всевозможные дефекты.

Таблица 2.1 – Обнаруживаемые одиночные константные дефекты для Q_3 .

Дефекты	Такты				
	0	1	2	3	4
$M_1 (=0)$				+	+
$M_1 (=1)$		+	+		
$\&_5 (=0)$				+	+
$\&_5 (=1)$		+	+		
$OR_6 (=0)$				+	+
$OR_6 (=1)$		+	+		
$Q_3 (=0)$				+	+
$Q_3 (=1)$	+	+	+		

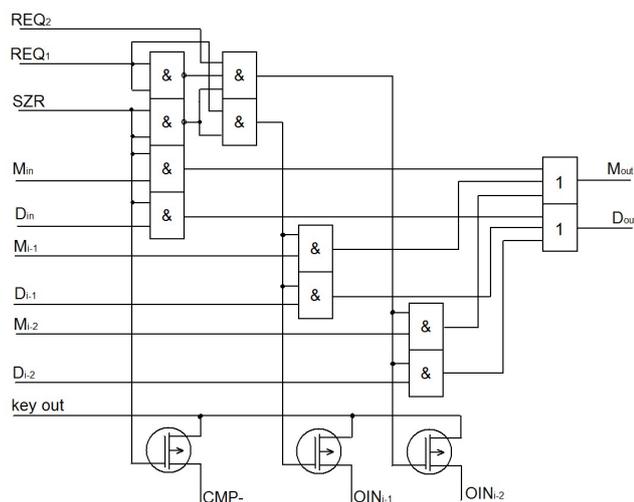


Рисунок 2.32 – Структура входных ключей с одной дополнительной связью

Флаги запросов REQ, поступающие от предыдущих ОИН, а также флаг SZR взаимоблокируют друг друга, то есть при наличии флага SZR, значения флагов REQ не имеет значения и также приоритет для подключения отдается ближайшему из предыдущих ОИН. Такая схема заложена во избежание конфликтов при построении ИАЦП, которые могут возникнуть в результате появления константных дефектов в одном из ОИН.

Выходные ключи работают аналогично входным, но управляющим для них является флаг MZR, генерируемый МФУУ (Рисунок 2.33). Этот флаг указывает на то, что ОИН занимает последнее место в ИАЦП, а значит необходимо подключить балансное сопротивление, которое оканчивает матрицу R-2R (см. п. 1.2), а цифровой тракт и сигнал метки направить в выходной нейрон, где будет собираться информация о результатах аналого-цифрового преобразования. При добавлении дополнительных связей аналогично входным ключам в схеме выходных ключей (Рисунок 2.34) появятся дополнительные элементы, учитывающие флаги готовности, приходящие от следующих за данным ОИН. При этом также реализована схема взаимоблокировки, которая позволяет избежать конфликтов при образовании ИАЦП, наибольший приоритет при этом отдается флагу MZR, затем флагу готовности следующего ОИН, через один и так далее в зависимости от количества дополнительных связей в НС.

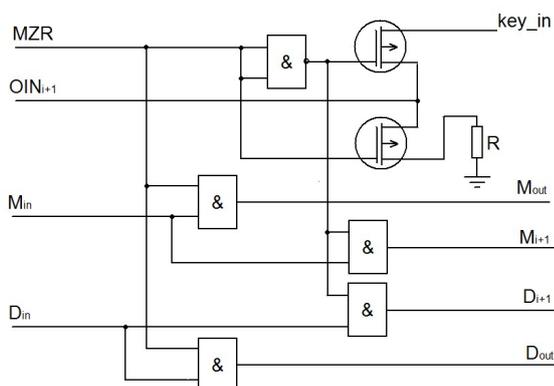


Рисунок 2.33 – Структура выходных ключей

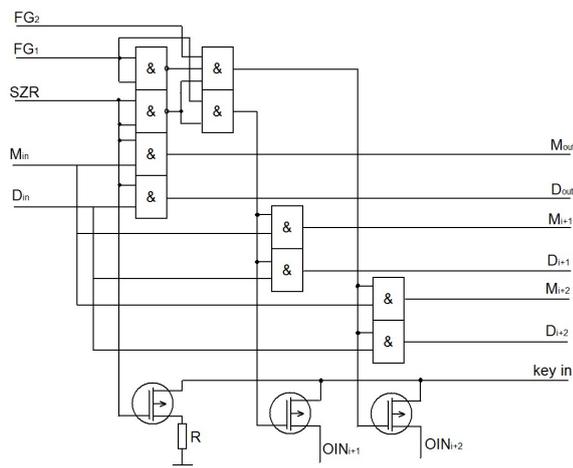


Рисунок 2.34 – Структура выходных ключей с одной дополнительной связью

Разработанные структуры блоков ОИН обеспечивают построение требуемой архитектуры АЦП НС и необходимы для реализации функциональных моделей преобразователя, а также для оценки аппаратурных затрат, требуемых для реализации одного ОИН.

2.5. Оценка аппаратурных затрат на реализацию структуры ОИН в зависимости от параметров АЦП НС

Для того чтобы оценить аппаратурные затраты на реализацию НС, необходимо рассчитать количество элементов, требуемых для реализации одного ОИН, (см. п. 2.3). В качестве базиса был выбран базис на 2И-НЕ элементах, как наиболее часто применяемый для создания СБИС [62, 68]. Все элементы структурных блоков ОИН (см. пп. 2.4.1 – 2.4.4) были переведены в базис 2И-НЕ с помощью законов дискретной математики и схемотехники, к примеру:

- элемент 2И состоит из 2 элементов 2И-НЕ;
- элемент 2ИЛИ состоит из 3 элементов 2И-НЕ;
- элемент 3И состоит из 2 элементов 2И, следовательно, из 4 элементов 2И-НЕ;
- элемент 3ИЛИ состоит из 2 элементов 2ИЛИ, следовательно, из 6 элементов 2И-НЕ;
- D-триггер состоит из 9 элементов 2И-НЕ;
- элемент «исключающее ИЛИ» состоит из 5 элементов 2И-НЕ.

После этого были проведены расчеты количества элементов в каждом из блоков структуры ОИН (Рисунок 2.13), расчеты приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета количества элементов 2И-НЕ для реализации ОИН

Блок структурной схемы	Количество элементов 2И-НЕ
Измерительная часть (Рисунок 2.14)	15
МФУУ (Рисунок 2.18)	493
• Определитель состояния (Рисунок 2.19)	24
• Генератор «эхо-запросов» (Рисунок 2.20)	95
• Генератор «эхо-ответов» (Рисунок 2.21)	59
• Счетчик «эхо-ответов» (Рисунок 2.22)	57
• Вычитающе-декрементирующий счетчик (Рисунок 2.23)	142
• Управление ИАЦП (Рисунок 2.28)	116
Блок контроля (Рисунок 2.30)	61
Входные ключи (Рисунок 2.31)	15
Выходные ключи (Рисунок 2.33)	9
Итого	593

Таблица 2.2 построена с учетом того, что в НС нет дополнительных связей и рассчитана на один входной сигнал, с максимальным количеством разрядов – 16. Эти значения будем считать базовыми для реализации АЦП НС. Получение базового количества элементов позволяет анализировать изменение аппаратурных затрат в зависимости от изменения параметров АЦП НС, например, если увеличивать количество дополнительных связей s в НС (увеличивать отказоустойчивость), то можно рассчитать необходимое количество элементов для реализации ОИН для разного количества этих связей (Таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Результаты расчета количества элементов 2И-НЕ для реализации ОИН с различным количеством дополнительных связей в НС

Блок структурной схемы	Количество дополнительных связей НС s			
	1	2	3	4
Измерительная часть	20	31	44	69
МФУУ	592	625	701	777
• Определитель состояния	29	34	39	44
• Генератор «эхо-запросов»	102	111	123	135
• Генератор «эхо-ответов»	74	90	108	124
• Счетчик «эхо-ответов»	60	63	66	69

• Вычитающе-декрементирующий счетчик	142	142	142	142
• Управление ИАЦП	148	185	223	263
Блок контроля	89	126	185	245
Входные ключи	32	46	68	89
Выходные ключи	20	31	44	69
Итого	753	859	1042	1249
Увеличение аппаратных затрат по отношению к базовому ОИН, %	21	42	69	102

Коэффициент b определяется исходя из затрат на базовый ОИН, которые обозначим величиной C_1 . Коэффициент a можно определить по графику относительного роста аппаратных затрат на реализацию ОИН в зависимости от количества дополнительных связей в НС, при этом коэффициент будет тем точнее, чем больше количество связей будет смоделировано.

$$a = \frac{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta C_i}{s_i}}{100} = 0.23$$

Тогда:

$$C = f(s) = 0,23C_1s + C_1$$

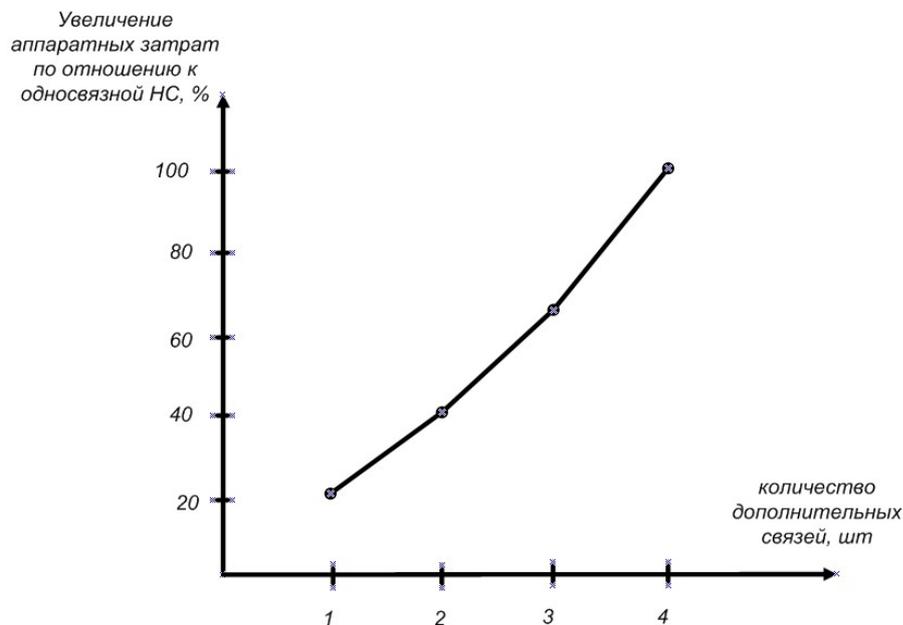


Рисунок 2.35 – График зависимости увеличения аппаратных затрат по отношению к односвязной НС от количества дополнительных связей между ОИН

Таким образом, анализируя блоки структуры ОИН, были определены параметры АЦП НС, от которых зависит величина аппаратурных затрат на реализацию одного ОИН:

1. количество дополнительных связей между ОИН – s ;
2. количество источников заявок в НС (количество аналоговых входов АЦП) – n ;
3. максимальная разрядность ИАЦП – q_{\max} .

Соответственно были получены аппроксимирующие функции для каждой из этих зависимостей:

1. $C_s = f(s) = 0,23C_1s + C_1$
2. $C_n = f(n) = 0,08C_1n + C_1$
3. $C_q = f(q_{\max}) = 0,03C_1 \log_2 q_{\max} + C_1$

Кроме того, при проведении анализа был сделан вывод о том, что данные параметры не зависимы друг от друга и общую функцию аппаратурных затрат на один ОИН можно представить в виде суперпозиции из функций зависимостей C от отдельных параметров, с учетом того, что базовые затраты есть величина постоянная для всех приведенных выше функций.

$$\begin{aligned} C_{\text{ОИН}} = f(s, n, q_{\max}) &= 0,23C_1s + 0,08C_1n + 0,03C_1 \log_2 q_{\max} + C_1 = \\ &= C_1(0,23s + 0,08n + 0,03 \log_2 q_{\max} + 1) \end{aligned}$$

Учитывая, что все основные аппаратурные затраты НС приходятся в первую очередь на реализацию скрытого слоя ОИН, то общие аппаратурные затраты на НС, а также на весь самомаршрутизирующийся АЦП НС в целом, с учетом того, что НС составляет порядка 90% от всей необходимой аппаратной мощности устройства, можно с некоторым допущением представить в виде зависимости от двух параметров: количества нейронов – N , и аппаратурных затрат на один ОИН – $C_{\text{ОИН}}$.

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

Таким образом минимальные аппаратурные затраты на реализацию базовой нейронной сети составят $C_{\Sigma} = NC_1$, при этом количество нейронов в таком случае не может быть однозначно определено только по величине аппаратурных затрат, поэтому требуется ввести дополнительный критерий оптимальности построения НС и оценить вероятность безотказной работы АЦП НС, что будет рассмотрено в следующей главе.

2.6. Моделирование АЦП НС и получение временных характеристик его работы

Для оценки временных характеристик АЦП НС, а также оценки аппаратурных затрат решено создать модели его функциональных элементов в разных средах схемотехнического моделирования, которые позволяют получать временные диаграммы работы триггеров, по которым возможно оценить задержки, возникающие в схеме на всех этапах работы НС:

- формирование ИАЦП;
- проведение аналого-цифрового преобразования;
- разрушение ИАЦП.

Для моделирования были выбраны программная среда MultiSim, которая обладает широкими возможностями, как цифровых элементов, так и аналоговых схем. А также Intel Quartus, которая использована для создания в дальнейшем прототипа АЦП НС. Для создания прототипа использована имеющаяся на кафедре «Автоматика и телемеханика» программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) фирмы Intel, интегрированная с тестовой платой, которая позволяет менять конфигурацию ПЛИС под конкретную решаемую задачу. Для реализации аналоговых компонентов матрицы R-2R спроектирована отдельная плата расширения, которая связана с ПЛИС при помощи параллельного шлейфа.

2.6.1. Разработка модели АЦП НС в программной среде MultiSim

Разработка любого радиоэлектронного устройства включает физическое или математическое моделирование. Физическое моделирование связано с большими материальными затратами, так как требует изготовления макетов и их трудоемкое исследование, особенно сильно это сказывается при разработке СБИС, производство которых требует не только высоких материальных затрат, но и значительного времени для производства опытного образца. Кроме того, чисто физическое моделирование просто невозможно из-за сложности разрабатываемого устройства, то есть даже незначительная ошибка в реализованной СБИС приведет к необходимости полностью переделывать опытный образец, что опять же значительно увеличивает временные и материальные затраты. В этом случае прибегают к

математическому моделированию с использованием средств и методов вычислительной техники, которые позволяют достаточно гибко вносить коррективы в разрабатываемые функциональные схемы, отработать различные варианты работы будущей СБИС, чтобы выявить недостатки в логике работы, а также оценить временные характеристики проектируемого устройства.

Для реализации модели АЦП НС в первую очередь среда моделирования должна поддерживать иерархическую структуру схем и подсхем, достаточно мощную базу логических, аналоговых элементов и симуляцию в реальном масштабе времени [69, 70]. Кроме того, важен удобный интерфейс программной среды, что обеспечивает экономию времени и позволяет выделить определенные процессы, происходящие на различных этапах работы АЦП НС. Также возможность наглядного представления функциональных схем позволяет оперативно определять причины возможных отказов или некорректной работы некоторых элементов и эффективно дорабатывать функциональные схемы по ходу моделирования.

Программа Multisim Electronics Workbench канадской компании Interactive Image Technologies [71] предназначена для схемотехнического проектирования электронных схем и содержит практически все основные элементы электрических цепей. Multisim предоставляет большой набор инструментов для моделирования в своей среде электронных схем, их тестирования и отладки, исследования и анализа, а также расчета процессов, протекающих в электрических цепях. Multisim 12.0 сочетает в себе профессиональные возможности с простотой работы интерфейса программы. Это идеальный инструмент не только для учебного, но и для промышленного производства, а также проведения исследовательских изысканий [70, 71].

Кроме того, программой обеспечивается моделирование смешанных аналого-цифровых устройств, текстовое описание цифровых устройств на языках высокого уровня VHDL и Verilog, их моделирование и синтез СБИС разного уровня. С каждой версией база элементов пополняется, уменьшается количество ошибок моделирования [71-73]. Для первичного моделирования и отладки логики работы основных функциональных блоков разрабатываемого устройства возможностей этой программной среды будет вполне достаточно.

Как было сказано выше (см. п. 2.3), основу АЦП НС составляет непосредственно нейронная сеть, основным элементом которой является ОИН, поэтому в первую очередь были смоделированы функциональные блоки структурной схемы ОИН (Рисунок 2.13). В результате была получена общая функциональная схема ОИН (Рисунок 2.36), состоящая из трех функциональных блоков: внутренней части ОИН (измерительная часть ОИН с добавлением части МФУУ), входных и выходных ключей, связывающих отдельные ОИН в ИАЦП.

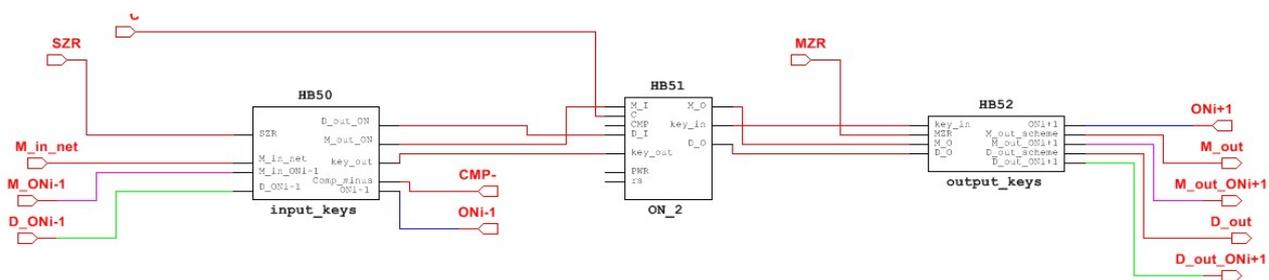


Рисунок 2.36 – Общая функциональная схема модели ОИН в среде MultiSim

Основными сигналами, передаваемыми между ОИН являются: служебный сигнал метки M_in и M_out , который определяет порядок срабатывания ИК матрицы R-2R в ИАЦП; сигнал цифрового тракта D_in и D_out , создающий между ОИН в ИАЦП цифровой канал для передачи значений всех разрядов каждого измеряемого отсчета; а также сигнал аналогового тракта $ONi-1$ и $ONi+1$, который представляет собой аналоговое уравнивающее напряжение, и через входные ключи старшего ОИН в ИАЦП передается на соответствующий вход компаратора. Сигналы SZR и MZR определяют положение данного ОИН в ИАЦП, соответственно первое и последний ИК в матрице R-2R, либо промежуточный ИК в случае отсутствия данных сигналов.

Внутренняя часть ОИН, задействованная для проведения аналого-цифрового преобразования состоит из 4 D-триггеров (Рисунок 2.37): два из которых представляют собой часть МФУУ (Рисунок 2.17), отвечающие за передачу сигнала метки и определяющие порядок срабатывания ИК матрицы R-2R, за который отвечает данный ОИН; и два триггера, которые реализуют измерительную часть ОИН (Рисунок 2.14). Один из триггеров хранит состояние ОИН после срабатывания компаратора и определения значения соответствующего разряда в текущем отсчете, а второй отвечает за передачу всех значений отсчета по сформированному цифровому тракту, который представляет собой сдвиговый регистр, распределенный между ОИН и выходным нейроном.

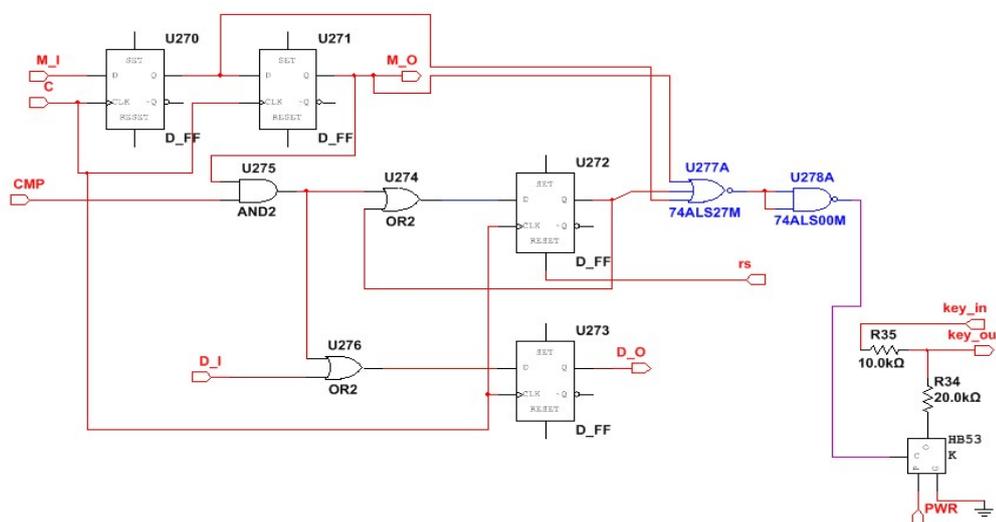


Рисунок 2.37 – Функциональная схема внутренней части модели ОИН в среде MultiSim

Для построенной модели ОИН получена следующая временная диаграмма срабатывания основных триггеров (Рисунок 2.38), на которой показано, что служебный сигнал метки задерживается в ОИН два такта, проходя через триггеры M1 и M2. Сигнал M1 переводит ИК матрицы R-2R в возбужденное состояние (сигнал Ctrl), добавляя уравнивающее напряжение, соответствующее положению данного ОИН в ИАЦП. Затем сигнал M2 сохраняет сигнал Ctrl в состоянии «1», а кроме того, является разрешающим для записи значения текущего разряда в триггер Q3. Значение разряда определяется состоянием выхода компаратора COMP, также это значение записывается в триггер цифрового тракта и передается следующему ОИН (сигнал D_out). Для примера приведена временная диаграмма работы первого ОИН в ИАЦП, поэтому на вход цифрового тракта не поступают никакие сигналы, изменение состояния триггеров цифрового тракта в промежуточных ОИН будет показано ниже.

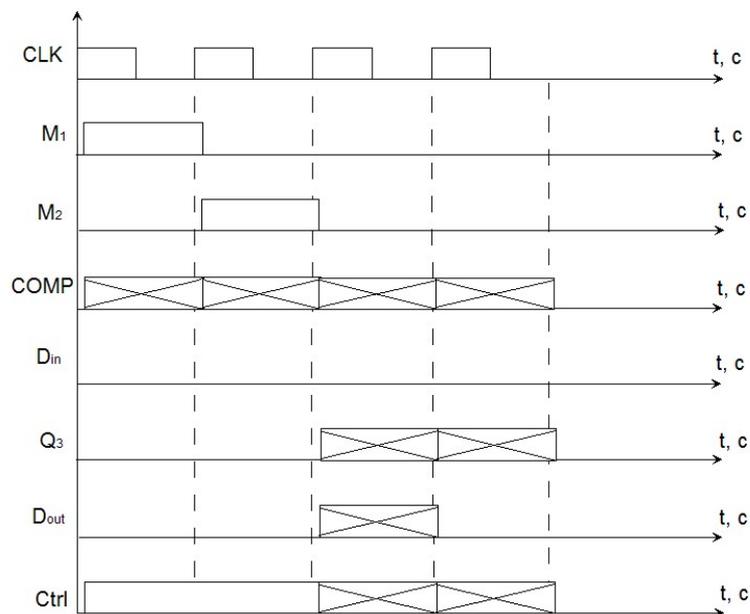


Рисунок 2.38 – Временная диаграмма работы внутренней части модели ОИН

Основой ОИН является ИК матрицы R-2R, которое подключается, либо к шине эталонного питания, которое определяет максимально возможную амплитуду измеряемого аналогового сигнала, либо к шине заземления, что соответствует добавлению определенного уравнивающего напряжения на второй вход компаратора, значение которого определяется положением ИК матрицы R-2R в ИАЦП. Переключение ИК между шинами эталонного питания и заземления происходит за счет аналогового ключа (НВ53К), организованного на двух комплиментарных МДП-транзисторах (Рисунок 2.39). Когда один из ключей находится в проводящем состоянии, второй за счет инвертора всегда находится в закрытом состоянии. Важно отметить, что данные транзисторы должны быть подобраны с учетом наименьшего их

сопротивления постоянному току, а также из расчета на максимальный ток, зависящий от величины эталонного напряжения, а также сопротивления матрицы:

$$I_{\max} = \frac{U_{эм}}{R} \quad (4.1)$$

При этом необходимо стабильность дифференциального сопротивления канала в МДП-транзисторе в том числе и при очень малых токах исток-сток, так как максимальный ток, протекающий в цепи старшего ИК матрицы (4.1), может сильно отличаться от тока, протекающего в младшем ИК матрицы и зависит от разрядности сформированного ИАЦП:

$$I_{\min} = \frac{U_{эм}}{R * 2^q} \quad (4.2)$$

Исходя из условий (4.1) и (4.2) в разработанной модели АЦП НС были использованы модели МДП-транзисторов 2N6659.

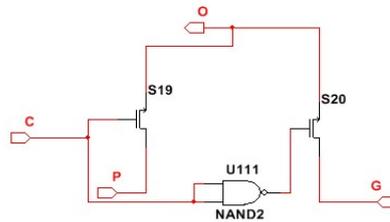


Рисунок 2.39 – Функциональная схема аналогового ключа модели ОИН (элемент НВ53К) в среде MultiSim

Цифровой тракт является, по сути, сдвиговым регистром некоторой конечной длины, который передает последовательность «0», в определенные моменты времени, подменяя один из передаваемых бит значением разряда, полученным с помощью текущего ОИН. При этом так как каждый последующий ОИН сперва должен передать бит разряда, полученный от предыдущего ОИН, то этот процесс хорошо сочетается с двухтактным алгоритмом самого аналого-цифрового преобразования. Для примера приводится временная диаграмма работы цифрового тракта для 4-х разрядного ИАЦП (Рисунок 2.40), где значения Q_4 соответствуют выходу цифрового тракта каждого из четырех ОИН, а $T_1 - T_4$ – это значения триггеров в выходном нейроне, которые являются окончанием распределенного между ОИН сдвигового регистра.

Временная диаграмма на рисунке 2.40 демонстрирует наличие дополнительной задержки, которая необходима для запоминания значения отсчета в регистр-защелку, которая находится в выходном нейроне и позволяет сохранить значение отсчета для вывода его на внешний выход АЦП НС, в то время как ИАЦП может произвести сброс матрицы R-2R и приступить к измерению следующего отсчета. Наличие дополнительной задержки приводит к

увеличению времени получения значения одного отсчета и соответственно общего времени аналого-цифрового преобразования по сравнению с (2.4):

$$T_{АЦП} = T_{ФИАЦП} + m(T_{дискр} + T_{сохр}) = qt_{зад} + m(2qt_{CLK} + 2t_{CLK}) = 2((m+1)q+1)t_{CLK} \quad (2.5)$$

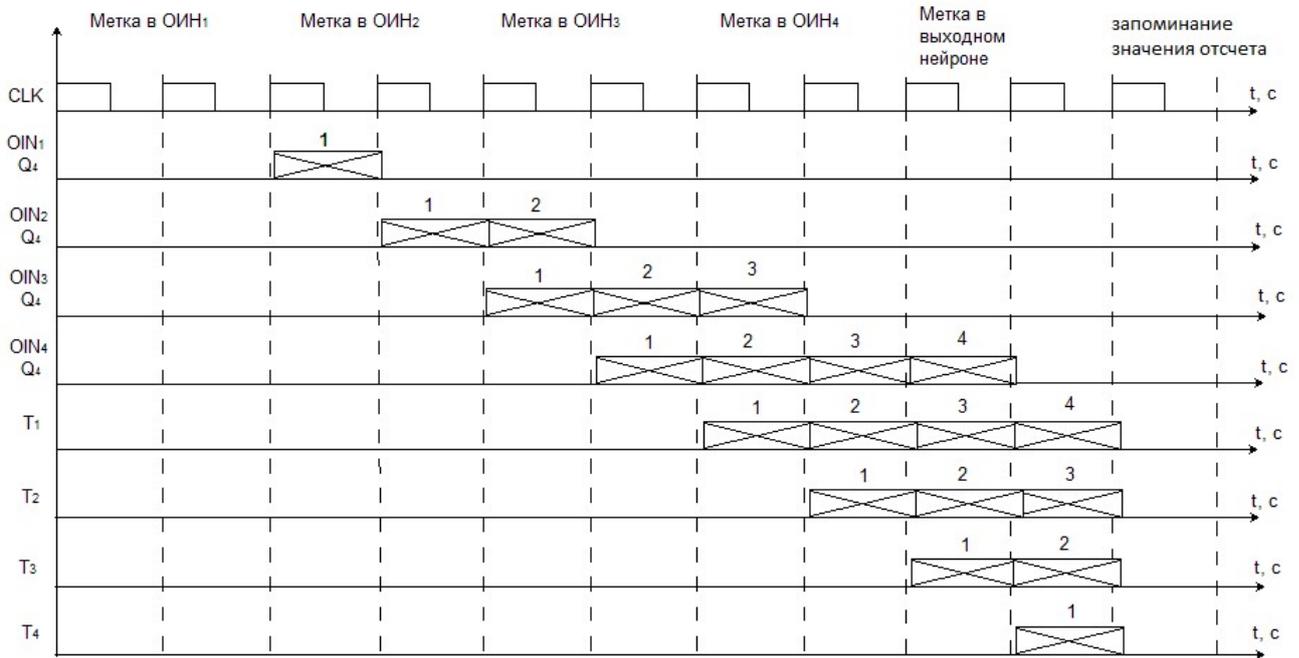


Рисунок 2.40 – Временная диаграмма цифрового тракта в 4-х разрядном ИАЦП

2.6.2. Разработка макета МФУУ ОИН в программной среде Intel Quartus

Для получения временных характеристик работы АЦП НС с учетом этапа формирования ИАЦП необходимо смоделировать работу системы самомаршрутизации сигналов и построить физический макет АЦП НС. Для этого было решено создать прототип устройства на основе имеющейся ПЛИС фирмы Intel Cyclone II и отладочной платы, позволяющей менять ее конфигурацию, а также разработанной платы расширения, на которой реализованы матрица R-2R и компараторы для сравнения входного сигнала с уравновешивающим напряжением.

Программное обеспечение Intel Quartus предоставляет полную мультиплатформенную среду проектирования, которая может быть легко перенастроена под конкретные требования. Это идеальная среда для проектирования на основе ПЛИС законченных систем на кристалле (SOPS) [73-75]. Программное обеспечение Intel Quartus включает в себя средства для всех фаз проектирования с применением ПЛИС.

Проектирование функциональной схемы ПЛИС предполагает использование либо стратегии восходящего, либо нисходящего проектирования. И та и другая стратегии подразумевают использование поведенческих и структурных описаний модулей. При структурном описании модуль представляется в виде совокупности взаимосвязанных компонентов более низкого уровня в иерархии описаний. При поведенческом же описании задается алгоритм работы модуля [75, 76].

Восходящее проектирование применимо в том случае, когда для создаваемого устройства имеется детальное структурное описание, выполненное в элементном базисе, имеющемся в распоряжении разработчика СБИС. Таким образом, в процессе проектирования разработчик сначала создает модули нижнего уровня в иерархии описаний, а затем — модуль верхнего уровня.

Стратегия нисходящего проектирования применяется в том случае, когда задан алгоритм работы (поведенческое описание) создаваемого устройства и набор системных требований (максимальная тактовая частота работы, задержка распространения сигналов от входов до выходов, потребление энергии, стоимость и т. д.). При этом поведенческое описание может быть как формализованным (блок-схема алгоритма, граф, таблица переходов и выходов и т. д.), так и неформализованным (словесное описание). Реализация нисходящего проектирования базируется на итерационном выполнении структурной декомпозиции. Таким образом, в процессе проектирования разработчик опускается с верхнего уровня иерархии описаний, уровня СБИС, к нижним уровням.

Следует отметить, что стратегия нисходящего проектирования имеет преимущества по временным затратам на разработку, а восходящее проектирование предполагает более высокое качество проработки проекта [77]. Так как в нашем случае уже разработаны функциональные схемы структурных блоков ОИН, то для проектирования будет использоваться именно стратегия восходящего проектирования, которая позволит также соблюсти модульность структуры и обеспечит масштабируемость разработки.

Как говорилось выше, для создания физической модели АЦП НС необходимо разделить цифровую и аналоговую части, это связано с тем, что для создания модели предлагается использовать имеющуюся ПЛИС, которая содержит в своей структуре только логические вентили. Для разделения структуры АЦП НС на цифровую и аналоговую части была разработана специальная плата расширения, на которой размещается компаратор и матрица сопротивлений R-2R, разделенная электронными ключами на отдельные ИК (см. п. 1.2 и 2.3). При этом изменение состояния ключей осуществляется за счет МФУУ, реализованного на базе ПЛИС. Для их реализации выбрана интегральная схема ADG633, которая представляет собой 3 электронных ключа и соответствует аналоговой части одного ОИН, к ней добавлено ИК

матрицы R-2R с дополнительным балансным сопротивлением, которое позволяет сделать ОИН последним в матрице с целью ее симметрирования. В качестве компаратора используется AD790JNZ, который является прецизионным и обладает хорошими характеристиками быстродействия.

При проектировании цифровой части АЦП НС в структуре ПЛИС основное внимание уделялось структуре МФУУ (см. п. 2.4.2), так как основные аппаратурные затраты связаны именно с этим блоком в структуре ОИН, и он же отвечает за формирование ИАЦП, которое является важным этапом в работе АЦП НС. Как было сказано выше, МФУУ для формирования ИАЦП реализует алгоритм «эхо-локации», когда за счет отправления сигнала «эхо-запрос» и получения сигналов «эхо-ответ» ОИН вычисляет максимально возможную разрядность ИАЦП, который может быть сформирован, если положение СЗР займет данный ОИН. Функциональные схемы и алгоритмы, описанные в п. 2.4, спроектированы в программе Intel Quartus, в которой проведено моделирование процесса формирования ИАЦП. Описание отдельных блоков МФУУ производилось на языке VHDL для возможности масштабирования модели ОИН в зависимости от параметров АЦП НС (количество входных сигналов, количество дополнительных связей между ОИН, количество ОИН в сети, минимальная и максимальная разрядности формируемых ИАЦП). После чего была спроектирована схема МФУУ в виде графического файла (Рисунок 2.41), соответствующая структурной схеме приведенной в п. 2.4.2 (Рисунок 2.18)

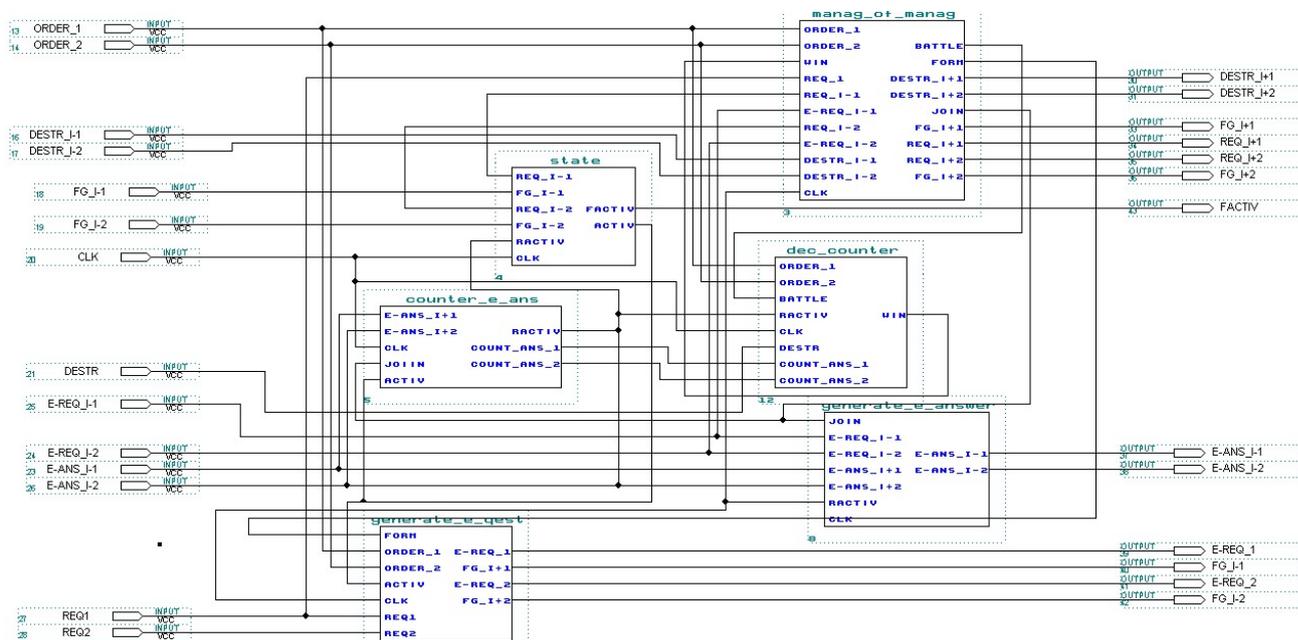


Рисунок 2.41 – Модель МФУУ в среде Intel Quartus

Алгоритмы работы отдельных фрагментов МФУУ соответствуют описанным выше (см. п. 2.4), при этом они описаны таким образом, чтобы при изменении основных параметров АЦП НС их структура автоматически подстраивалась под новые требования. Единственным

ограничением на данном этапе является перестройка графической схемы, так как в ней появляются дополнительные входные и выходные сигналы.

Разработка данной модели позволила получить временную диаграмму для этапа формирования ИАЦП в НС за счет объединения заданного количества ОИН (Рисунок 2.42). Например, при объединении трех ОИН на вход «эхо-запроса» первого ОИН подается последовательность из трех логических «1», на следующем такте данная последовательность передается следующему ОИН, при этом генерируется флаг запроса REQ1 и т. д. При этом каждый ОИН сокращает последовательность на одну «1», создавая задержку, что приводит к тому, что последний ОИН в формируемом ИАЦП гарантировано получит последовательность из одной «1», это вызовет генерацию данным ОИН флага MZR, который переключит выход цифрового тракта ИАЦП на выходной нейрон, а также подключит матрицу R-2R к балансному сопротивлению. Подключение ОИН к выходному нейрону знаменует собой завершение этапа формирования ИАЦП, после которого возможно переходить к этапу проведения аналого-цифрового преобразования (см. п. 2.3).

Также можно отметить, что сигналы запросов являются постоянными в процессе проведения измерения сигнала, до тех пор, пока в МФУУ не поступит сигнал DESTP, который приведет к асинхронному сбросу триггеров, удерживающих ОИН в активном состоянии, и разрушению ИАЦП, и, соответственно, освобождению ОИН.

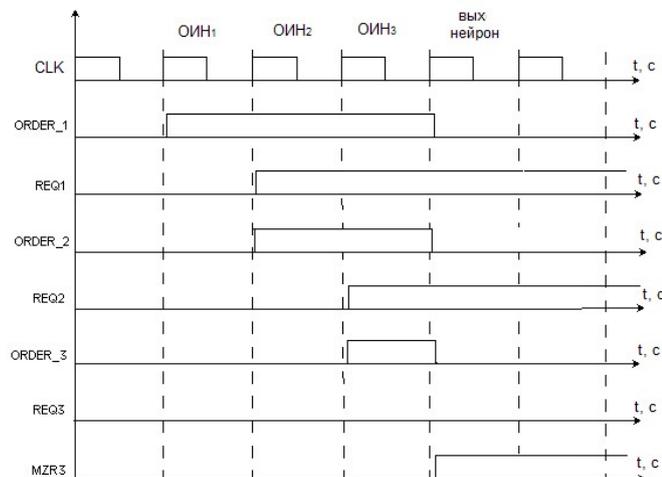


Рисунок 2.42 – Временная диаграмма формирования ИАЦП

Таким образом, время, требуемое для формирования ИАЦП, можно выразить формулой:

$$T_{\text{ИАЦП}} = (q + 1)t_{\text{CLK}} \quad (2.6)$$

Формула (2.6) показывает, что формирование ИАЦП требует дополнительного времени для объединения ОИН, выбранных для измерения конкретного входного сигнала, что,

естественно, сказывается на общем времени, требуемом для проведения аналого-цифрового преобразования поступившего входного сигнала, с учетом (2.5):

$$T_{АЦП} = T_{ФИАЦП} + m(T_{дискр} + T_{сопр}) = (q + 1)t_{CLK} + m * (2qt_{CLK} + 2t_{CLK}) = 2((m + 1)q + 1)t_{CLK} \quad (2.7)$$

Кроме МФУУ, в среде Intel Quartus были разработаны другие блоки структурной схемы ОИН (Рисунок 2.13), в которых также на языке VHDL были описаны алгоритмы работы цифрового блока измерительной части (Рисунок 2.15), блока контроля (Рисунок 2.30), а также входных и выходных ключей ОИН (Рисунки 2.31 и 2.33). В виде графического описания модель ОИН в среде Intel Quartus изображена на рисунке 2.43. В итоге, используя встроенный симулятор, были смоделированы НС с различными начальными параметрами, которые показали соответствие временных характеристик АЦП НС с формулами (2.5), (2.6) и (2.7).

Благодаря полученным зависимостям (2.5) и (2.7), получена формула для оценки интервала дискретизации при измерении входного сигнала:

$$T_{дискр} = \frac{t_{форм} + mt_{изм}}{m} = \frac{(q + 1)t_{CLK} + m(2q + 2)t_{CLK}}{m} = \left(\frac{2m + 1}{m}q + \frac{2m + 1}{m} \right) t_{CLK} \quad (2.8)$$

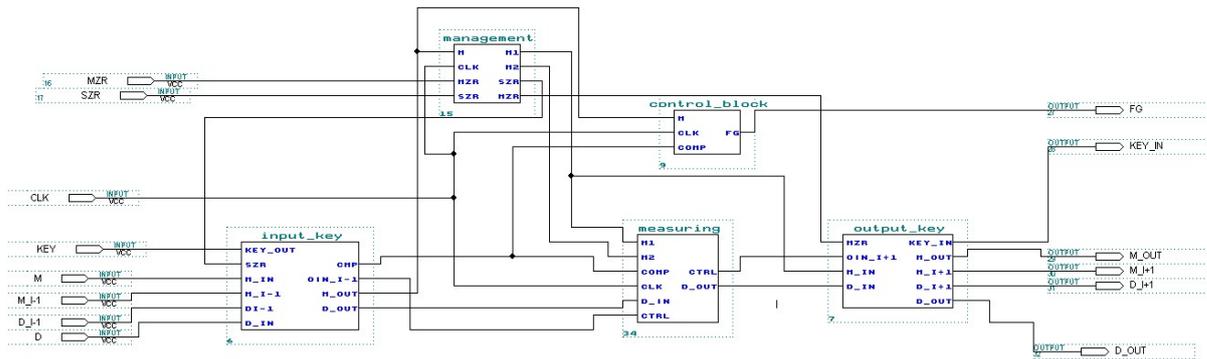


Рисунок 2.43 – Модель структуры ОИН в среде Intel Quartus

Анализируя выражение (2.8) можно отметить, что при увеличении количества отсчетов, получаемых с помощью сформированного ИАЦП, будет уменьшаться интервал дискретизации и при значительном увеличении этого количества, в пределе будет равен:

$$T_{дискр} = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{2m + 1}{m}q + \frac{2m + 1}{m} \right) t_{CLK} = (q + 1)2t_{CLK} \quad (2.9)$$

Таким образом, если с помощью сформированного ИАЦП входной сигнал будет измеряться в течении достаточно длительного времени (2.9), то частота дискретизации будет ограничена только выбранным методом поразрядного взвешивания, и вносимая дополнительная задержка за счет применения АЦП НС будет соответствовать измерению одного дополнительного разряда в стандартном АЦП поразрядного взвешивания.

Помимо определения временных затрат на самомаршрутизацию при формировании ИАЦП макет АЦП НС позволяет также оценить аппаратурные затраты на реализацию физического прототипа.

2.6.3. Сопоставление аппаратурных затрат на реализацию АЦП НС с помощью разработанных моделей и макета

Модель АЦП НС, построенная в среде MultiSim, позволяет получить максимально подробное представление о функциональных схемах, используемых для реализации структуры ОИН и разработанного метода самомаршрутизации сигналов в сети. Анализ схем на таком низком уровне позволяет точно оценивать аппаратурные затраты и их относительное изменение при модернизации структуры ОИН или в целом АЦП НС. В качестве примера можно привести результаты моделирования МФУУ ОИН для формирования ИАЦП в двух вариантах: при использовании счетчиков в каждом ОИН и при разделении счетчиков на фрагменты между ними (см. п. 2.4.2). Для этого были построены модели ОИН для обоих вариантов и, используя возможности среды моделирования, в автоматическом режиме рассчитаны аппаратурные затраты на реализацию АЦП НС с различными конфигурациями ключевых параметров (см. п. 2.5): количество входных сигналов, максимальная разрядность формируемых ИАЦП, количество дополнительных связей между ОИН. Базовая структура сети, взятая за отправную точку (выделена в таблицах приведенных ниже):

- количество входных сигналов – $n = 10$;
- количество ОИН в НС – $N = 160$;
- максимальная разрядность ИАЦП – $q_{\max} = 16$;
- количество дополнительных связей – $s = 0$.

Изменение количества входных сигналов (Таблица 2.4 и рисунок 2.44) влияет на структуру входных и выходных ключей, увеличивая количество триггеров, определяющих состояние ОИН (куда подключены схемы на входе и выходе) и увеличивая количество комбинационных связей в самих ключах (см. пп. 2.4.2 и 2.4.4). Увеличение на каждый входной сигнал составляет в среднем 0,95% для МФУУ без разделения счетчиков, и 1,01% для МФУУ с разделением, так как основа структуры ОИН не меняется, и влияние количества входных сигналов не сильно сказывается на общих аппаратурных затратах. При этом МФУУ с разделением счетчиков показывает снижение аппаратурных затрат относительно МФУУ без разделения в среднем на 15,1%.

Таблица 2.4 – Аппаратурные затраты на цифровую часть АЦП НС в зависимости от количества входных аналоговых сигналов (тысяч логических вентилях 2И-НЕ)

n	Аппаратурные затраты		
	МФУУ со счетчиками в каждом из ОИН	МФУУ с разделенными на фрагменты счетчиками между ОИН	Относительное уменьшение
1	104,3	87,1	0,1649
2	105,4	88,2	0,1633
4	107,5	90,3	0,1602
6	109,7	92,4	0,1571
8	111,8	94,6	0,1541
10	114	96,7	0,1512
12	116,1	98,9	0,1484
14	118,3	101	0,1457
16	120,4	103,2	0,1431
18	122,5	105,3	0,1407
20	124,7	107,4	0,1384

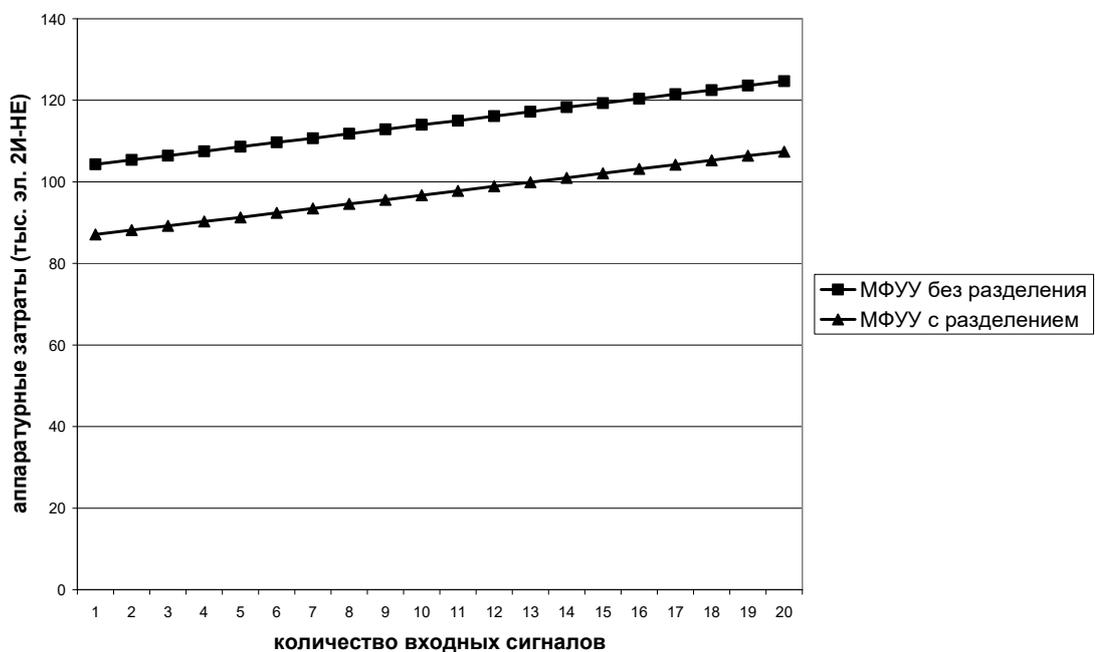


Рисунок 2.44 – График аппаратурных затрат на АЦП НС в зависимости от количества входных аналоговых сигналов

Количество дополнительных связей на два порядка сильнее влияет на изменение аппаратных затрат АЦП НС (Таблица 2.5 и рисунок 2.45), так как добавление связи между ОИН увеличивает не только количество входных и выходных ключей, но и меняет структуру МФУУ в ОИН, сказываясь на количестве служебных флагов для управления самомаршрутизацией сигналов. В случае, когда все счетчики МФУУ сосредоточены в одном ОИН, в среднем добавление каждой дополнительной связи увеличивает аппаратные затраты на 26,8%. При разделении счетчиков МФУУ между ОИН рост аппаратных затрат на добавление каждой дополнительной связи составляет в среднем 23,1%. Относительное уменьшение аппаратных затрат при реализации схемы с разделенными счетчиками в МФУУ составляет в среднем 20,3%. При этом наблюдается тренд на увеличение относительной разницы в аппаратных затратах на реализацию этих двух вариантов при одинаковых параметрах АЦП НС, что говорит о том, что применение разделенной МФУУ является эффективным решением, а в больших сетях становится еще более выгодным.

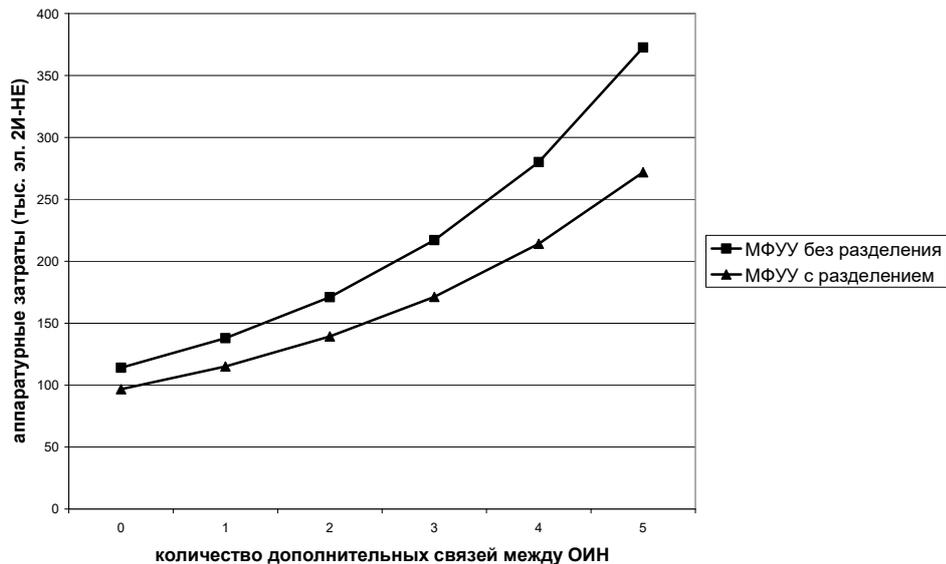


Рисунок 2.45 – График аппаратных затрат на АЦП НС в зависимости от количества дополнительных связей между ОИН

Таблица 2.5 – Аппаратурные затраты на цифровую часть АЦП НС в зависимости от количества дополнительных связей (тысяч логических вентилей 2И-НЕ)

s	Аппаратурные затраты		
	МФУУ со счетчиками в каждом из ОИН	МФУУ с разделенными на фрагменты счетчиками между ОИН	Относительное уменьшение
0	114	96,7	0,1512

1	137,9	115,1	0,1652
2	171	139,3	0,1854
3	217,1	171,3	0,2111
4	280,1	214,1	0,2356
5	372,5	271,9	0,27

Наиболее интересная зависимость получается при исследовании влияния на аппаратурные затраты максимальной разрядности формируемых ИАЦП. Эта величина определяет количество разрядов в используемых счетчиках ОИН, соответственно в случае неразделенных счетчиков каждый разряд добавляет в структуре МФУУ не только 5 триггеров (по количеству используемых счетчиков), но и дополнительные связи внутри системы управления, которые связывают все части между собой. Разделение счетчиков между ОИН в данном случае приводит к тому что, изменение разрядности счетчика увеличивает структуру ОИН на один триггер (дополнительная задержка при объединении фрагментов МФУУ в полноценную систему управления), и при этом никоим образом не затрагивает функции и структуру самих фрагментов. Рост аппаратурных затрат не является равномерным и происходит скачкообразно в момент увеличения размерности счетчика (Таблица 2.6 и рисунок 2.46). Это связано с тем, что максимальная разрядность задается в виде двоичного позиционного кода, и как только кончаются возможные комбинации для кодирования, увеличение максимальной разрядности требует дополнительный разряд и соответственно резко увеличивает аппаратурные затраты.

Таблица 2.6 – Аппаратурные затраты на цифровую часть АЦП НС в зависимости от максимальной разрядности формируемых ИАЦП (*тысяч логических вентилях 2И-НЕ*)

q_{\max}	Аппаратурные затраты		
	МФУУ со счетчиками в каждом из ОИН	МФУУ с разделенными на фрагменты счетчиками между ОИН	Относительное уменьшение
4	75,4	51,2	0,3211
6	75,4	73,1	0,0306
8	114	73,1	0,3584
10	114	96,7	0,1512
12	114	96,7	0,1512
14	114	96,7	0,1512
16	114	96,7	0,1512
18	160,4	96,7	0,3972

20	160,4	120,2	0,2507
22	160,4	120,2	0,2507
24	160,4	120,2	0,2507
26	160,4	120,2	0,2507
28	160,4	120,2	0,2507
30	160,4	120,2	0,2507
32	212,7	120,2	0,4349
34	212,7	120,2	0,4349
36	212,7	146,1	0,3134

Анализ полученных результатов показал, что увеличение максимальной разрядности формируемых ИАЦП в системе со счетчиками в каждом ОИН увеличивает аппаратные затраты в среднем на 46,7 % при добавлении каждого последующего разряда в счетчике. Для системы с разделенными между ОИН счетчиками увеличение аппаратных затрат в среднем составило 30,2 % на каждый последующий разряд счетчика. Относительное уменьшение аппаратных затрат на МФУУ с разделенными счетчиками при той же конфигурации сети составило 25,8 %. Дополнительный эффект от разделения счетчиков заключается в том, что при формировании ИАЦП часть ОИН, в которых объединяются счетчики МФУУ, уже включены в формируемый ИАЦП, а это позволяет уменьшить число запрашиваемых для измерения нейронов. Это значит при одной и той же размерности счетчиков АЦП НС с разделенными счетчиками позволяет управлять большим количеством разрядов для измерения (Рисунок 2.46).

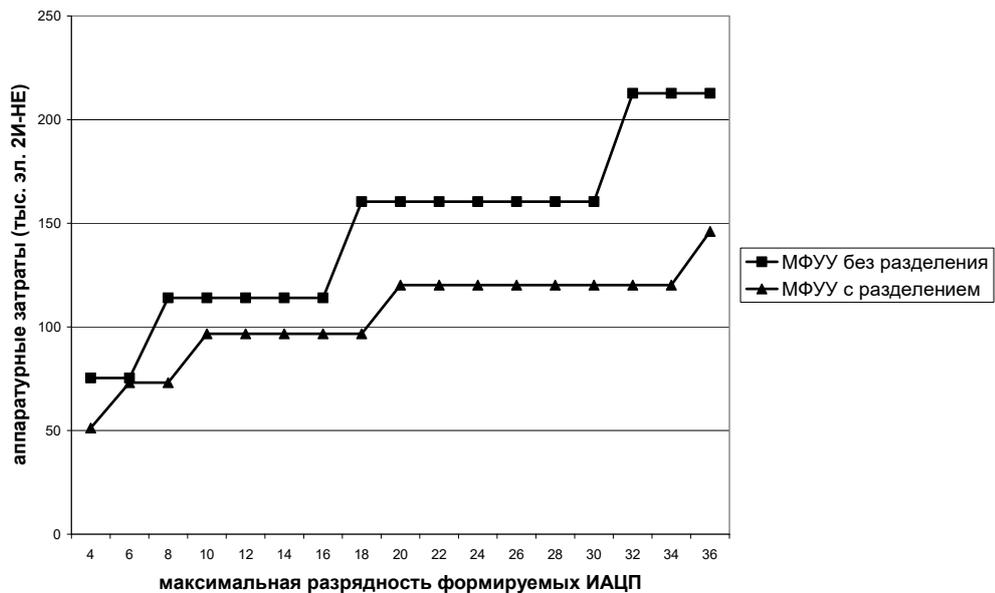


Рисунок 2.46 – График аппаратных затрат на АЦП НС в зависимости от максимальной разрядности формируемых ИАЦП

По итогам моделирования МФУУ ОИН с разделенными счетчиками сделан вывод об эффективности применения такой системы управления, так как во-первых, происходит снижение аппаратурных затрат на 15-25 % по сравнению с МФУУ без разделения счетчиков, а во-вторых, одинаковая размерность счетчиков позволяет управлять бóльшим количеством ОИН за счет того, что ОИН, в которых происходит объединение фрагментов счетчиков, также будут участвовать в проведении измерения.

Таблица 2.7 – Аппаратурные затраты на цифровую часть АЦП НС в зависимости от количества дополнительных связей (*тысяч логических вентилях 2И-НЕ*)

Количество дополнительных связей НС s	Аппаратурные затраты при 160 ОИН				
	0	1	2	3	4
Расчетные аппаратурные затраты (см. п. 2.5)	94,9	112,5	138,1	170,5	213,5
Результаты моделирования проекта в MultiSim	96,7	115,1	139,3	171,3	214,1
Экспериментальные аппаратурные затраты (после компиляции проекта Intel Quartus)	97,1	116,5	140,8	172,5	215,9
Относительное отклонение от расчетных, %	2,3	3,5	1,9	1,2	1,1

Таблица 2.8 – Аппаратурные затраты на цифровую часть АЦП НС в зависимости от количества ОИН в НС (*тысяч логических вентилях 2И-НЕ*)

Количество ОИН в НС n	Аппаратурные затраты при односвязной НС			
	160	240	320	400
Расчетные аппаратурные затраты (см. п. 2.5)	94,9	142,4	189,8	237,3
Результаты моделирования проекта в MultiSim	96,7	144,1	192,2	239,6
Экспериментальные аппаратурные затраты (после компиляции проекта Intel Quartus)	97,1	145,3	193,2	240,1
Относительное отклонение от расчетных, %	2,3	2,1	1,8	1,2

Эти выводы сделаны на основе анализа модели функциональных схем, построенных в первую очередь с помощью графических модулей в MultiSim, а значит, они не являются универсальными для создания готовых устройств, так как их невозможно использовать напрямую при проектировании СБИС или для программирования ПЛИС. Для создания прототипа АЦП НС потребовалось использовать универсальные языки описания функциональных схем для проектирования ПЛИС/СБИС, например VHDL (см. п. 2.6.2). Полученный макет АЦП НС, созданный в среде Intel Quartus на языке VHDL, функционально

совпадает с построенной в MultiSim моделью, то есть выполняет те же самые функции по самомаршрутизации сигналов, формированию ИАЦП, проведению измерения. Достоинством описания схемы языком VHDL является лучшая читабельность и простота масштабирования при необходимости, но есть и существенный недостаток, а именно, компиляция проекта перед загрузкой непосредственно в ПЛИС, что означает возможную переконфигурацию схемы в зависимости от алгоритмов компилятора [69]. Для того чтобы понять отличия между макетом и моделью АЦП НС было принято решение оценить аппаратурные затраты на реализацию АЦП НС с одинаковыми параметрами в разных средах моделирования.

Оценка аппаратурных затрат, которые требуются для реализации спроектированного в программной среде Intel Quartus макета АЦП НС, произведенная после компиляции проекта, показала, что количество используемых логических вентилях для реализации проекта в ПЛИС отличается от расчетного не более чем на 5% в зависимости от количества ОИН в НС и количества дополнительных связей между ними (Таблицы 2.7 и 2.8). Данное увеличение аппаратурных затрат можно объяснить тем, что при расчетах в п. 2.5 не учитывались затраты на входной и выходной нейроны, а использовались только затраты на реализацию схем блоков ОИН. Тем не менее экспериментальная проверка показывает, что основную часть аппаратурных затрат представляют собой именно ОИН, а остальные элементы НС играют вспомогательную роль и не требуют большого количества логических вентилях для реализации.

Представленный анализ аппаратурных затрат показывает, что в первую очередь мощность проектируемой СБИС для реализации АЦП НС будет зависеть от количества ОИН и количества дополнительных связей между ними, а значит необходимо внимательно подходить к подбору этих параметров.

2.7. Выводы

В рамках проведенных исследований были решены следующие задачи и получены научные результаты:

1. Предложена математическая модель ОИН, используемого для проведения аналого-цифрового преобразования методом поразрядного взвешивания. Для модели определены весовые коэффициенты входных сигналов и активационная функция. Полученная модель и выражение (2.1) позволили сделать вывод о времени необходимом для проведения измерения.

2. Разработаны две структуры нейронной сети (НС), с помощью которых возможно организовать предложенные методы самомаршрутизации сигналов в сети ОИН и сформировать

ИАЦП заданной разрядности. Для разработанных НС созданы математические модели нейронов, которые используются на этапе формирования ИАЦП. Анализ функций (2.2) и (2.3) показал, что в многослойной НС формирование ИАЦП будет происходить с меньшей задержкой. Сформулированы достоинства и недостатки разработанных НС, влияющие на быстродействие, отказоустойчивость и аппаратурные затраты АЦП НС на основе этих сетей.

3. Спроектирована архитектура самомаршрутизирующегося АЦП НС, состоящая из трех блоков, основным из которых является нейронная сеть. Разработан алгоритм функционирования АЦП НС, состоящий из трех этапов: формирование ИАЦП, проведение аналого-цифрового преобразования и разрушение ИАЦП.

4. Сформулированы принципы и предложены методы самомаршрутизации сигналов в НС для многослойной сети при помощи дополнительного слоя коммутаторов, а также для однослойной сети при помощи метода «эхо-локации».

5. Разработана структура ОИН, реализующая математические модели для всех этапов работы АЦП НС. Разработаны структуры блоков ОИН, реализующие однослойную НС.

6. Получена зависимость аппаратурных затрат на реализацию НС и всего АЦП в целом $C_{\Sigma} = f(N, s, n, q_{\max})$ в функции параметров АЦП НС.

7. Построены функциональная модель АЦП НС в программной среде схемотехнического моделирования MultiSim и макет в среде Intel Quartus, которые позволяют получать временные характеристики АЦП НС в широких диапазонах входных параметров и ограничены только вычислительной мощностью ЭВМ.

8. Рассчитанные аппаратурные затраты на реализацию АЦП НС в зависимости от различных параметров показали, что ключевые параметры для определения мощности СБИС – это количество ОИН и количество дополнительных связей между ними.

9. Отклонение между предложенной зависимостью аппаратурных затрат (теоретический расчет) и результатами, полученными по реализованному макету, не превышает 5%, что объясняется компиляцией проектов с учетом входных и выходных нейронов.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПОД ЗАДАННУЮ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ

3.1. Выбор среды моделирования для построения аналитической и имитационной моделей нейронной сети

Основное внимание в данной работе уделяется НС, т.к. именно она будет обеспечивать основную долю отказоустойчивости устройства, которая имеет зависимость от количества расположенных в ней ОИН. Очевидно, что с увеличением количества ОИН возрастает отказоустойчивость АЦП, но при этом возникает проблема увеличения как аппаратурных, так и финансовых затрат на сборку АЦП.

Как правило, заказчика интересует гарантированный срок безотказной работы прибора с учетом приемлемой стоимости. Чтобы достичь компромисса между стоимостью и отказоустойчивостью, необходимо оценить зависимость количества ОИН от начальных параметров аналого-цифрового преобразователя, при заданной вероятности отказа:

- числа входных сигналов;
- числа дополнительных связей между ОИН;
- минимальной и максимальной разрядности, требуемой входной заявкой;
- интенсивностью входного потока.

Чаще всего, задачи такого рода решаются с помощью аналитического (математического) моделирования [78, 79]. Чтобы удостовериться в правильности модели, необходимо проверить ее на адекватность путем сравнения результатов, полученных аналитической моделью, с результатами наработки разрабатываемого устройства [80].

Процесс анализа наработки реального АЦП требует больших финансовых и временных затрат, что крайне не выгодно для проведения анализа. С целью сокращения перечисленных затрат используется проверка на адекватность с помощью построения дополнительной имитационной модели [80-82].

Имитационное моделирование подразумевает симуляцию (имитацию) системы посредством компьютерной реализации ее математической модели. Также стоит отметить, что оно дает возможность промоделировать большой отрезок реального времени (несколько месяцев, лет) за несколько секунд или минут в режиме модельного времени [82-84]. В настоящее время существует много различных сред (систем) имитационного моделирования,

рассмотрим самые популярные общецелевые системы моделирования AnyLogic, GPSS и Arena относительно простоты и гибкости написания алгоритма.

Система моделирования GPSS (General Purpose Simulation System) [85] разработана для моделирования дискретных систем. Язык программирования основан на теории систем массового обслуживания. GPSS содержит стандартный набор объектов, с помощью которых строится модель: динамические; операционные; аппаратные; статистические; вычислительные; запоминающие; группирующие.

Динамические объекты (или транзакты) соответствуют заявкам в СМО. Каждому транзакту присвоено произвольное количество параметров, содержащих в себе информацию об этом транзакте. В процессе моделирования транзакты «генерируются» и «уничтожаются» с учетом логики модели. Эксперимент в GPSS проходит путем перемещения транзактов от одних блоков к другим, аналогично продвижению заявки в СМО.

Благодаря структуре написания модели в GPSS в виде последовательностей команд (блоков), отвечающих за конкретную функцию, разработчик может подробно прописать логику работы модели, что доходчиво описывает действия над транзактом в данном месте программы. Но с другой стороны, для описания систем, требующих сложный алгоритм модели, такая структура усложняет как ориентирование во всей программе, так и манипуляцию популяцией параметров транзакта и всей системы, требуя полностью их прописывать в программу. По этим причинам проектирование модели разрабатываемого АЦП будет весьма проблематично, т.к. для сбора статистики необходимо будет оперировать начальными параметрами для каждого прогона модели.

Среда разработки Arena [86], разработанная компанией Systems Modeling Corporation, применяется во многих реальных системах благодаря возможности создавать адекватные подвижные компьютерные модели. Также, система моделирования Arena обладает удобным объектно-ориентированным интерфейсом, что увеличивает наглядность по сравнению с GPSS.

Arena предоставляет следующие возможности: средства для работы с данными; электронные таблицы; базы данных; ODBC; OLE; поддержку формата DFX; подробную систему интерактивной помощи; демонстрационные примеры моделей. В отличие от GPSS, Arena имеет возможность оптимизации эксперимента (осуществить серию прогонов с дальнейшим осуществлением анализа полученных результатов) с помощью Scenario Manager.

Система моделирования AnyLogic [87] представляет собой среду разработки моделей с помощью графических элементов, которыми являются активные объекты, с использованием объектно-ориентированного языка Java, что обеспечивает наглядность и понимание алгоритма. Активные объекты имеют внутреннюю структуру и алгоритм поведения, кроме того, они могут содержать в себе другие активные объекты в качестве своих элементов, которые могут быть

связаны между собой. На поведение активного объекта могут оказывать влияние внешние события, это отображается в виде последовательности изменений поведения во времени.

AnyLogic позволяет создавать модели для систем любого масштаба: от микромоделей, в которых учитываются все возможные параметры каждого объекта, до макромоделей, которые характеризуются глобальными процессами на длительных отрезках времени, без учета (или с частичным учетом) параметров отдельного объекта, т.к. в качестве элемента моделирования рассматривается популяция объектов. Также поддерживаются методы системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования с возможностью создания модели путем комбинирования перечисленных методов, что позволяет значительно увеличить точность моделирования.

Анализ рассматриваемых программных сред для моделирования (Таблица 3.1) показал, что для создания имитационной модели самомаршрутизирующегося АЦП НС наиболее удобной будет программная среда AnyLogic в первую очередь благодаря удобству работы с масштабируемыми системами. В нашем случае потребуется создать модель единичного элемента – ОИН, с помощью которых затем можно будет строить самомаршрутизирующиеся АЦП НС любой сложности.

Таблица 3.1 – Сравнение некоторых программных сред для моделирования

Характеристики	Среда разработки		
	GPSS	Arena	AnyLogic
Наглядность визуальной разработки	низкая	средняя	высокая
Сложность разработки (больших систем)	высокая	средняя	низкая
Масштабируемость (простота манипуляции количеством элементов)	низкая	средняя	высокая
Мощность (отношение сложности разработки к возможности)	низкая	средняя	высокая

Поскольку AnyLogic позволяет создавать модель разными способами, следует выбрать один из них, при этом учитывая возможность задания гибкой логики для работы модели, которая бы описывала принципы поведения ОИН на всех этапах работы АЦП, при этом большее значение будет иметь этап формирования ИАЦП, так как именно на этом этапе

определяется отказоустойчивость НС в зависимости от основных параметров сети. Для этой цели больше всего подходит метод агентного моделирования, так как обладает необходимым динамическим поведением по сравнению с дискретно-событийным методом [88-89]. Также каждый агент имеет свою программную реализацию, т.е. агент зависит не только от событий заявки, но и от поведения других элементов (заявок, агентов) системы [90], что в свою очередь подходит для описания логики формирования ИАЦП, описания параметров и жизненного цикла ОИН [83].

3.2. Разработка аналитической модели нейронной сети с помощью теории систем массового обслуживания

3.2.1. Построение графа векторной модели СМО формирования ИАЦП в самомаршрутизирующемся АЦП НС

Для построения аналитической модели АЦП НС с целью получения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) его работы возможно использовать элементы теории систем массового обслуживания (СМО), а саму НС представлять в виде системы массового обслуживания СМО [78, 79, 91, 92].

Расчеты, производимые с помощью теории СМО, делятся на следующие этапы:

- задание начальных условий системы;
- определение вида СМО;
- составление графа состояний;
- выполнение требуемых расчетов.

За основу модели была взята упрощенная НС (Рисунок 3.1), структура которой представляет собой кольцо из последовательно соединенных ОИН без дополнительных связей. Была построена базовая модель, которая имеет следующие начальные параметры:

- количество обслуживающих ОИН $N = 4$;
- максимальное количество входных заявок $n = 2$;
- разрядность входной заявки (возможное количество ОИН, требуемое заявкой) $m = (1; 2)$.

Необходимо отметить, что первичная оценка количества обслуживающих ОИН вычисляется путем произведения максимальной разрядности q_{max} на максимальное количество входных заявок n , т.е. $N=q_{max}n$.

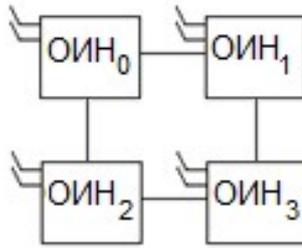


Рисунок 3.1 – Упрощенная структура НС

Аналитическая модель самомаршрутизирующегося нейросетевого АЦП предназначена для получения приблизительной оценки количества требуемых ОИН для реализации АЦП, исходя из параметров требуемых заказчиком. Эта оценка поможет задать начальные параметры для имитационной модели, которая позволит проверить сможет ли такая структура удовлетворить требуемой отказоустойчивости. Моделирование происходит с помощью теории систем массового обслуживания (СМО) [92]. СМО представляет собой систему уравнений, каждое из которых описывает текущее состояние системы и число таких уравнений зависит от числа этих состояний.

Чтобы аналитически описать модель разрабатываемого АЦП с помощью теории СМО, необходимо проанализировать свойства входного потока и дисциплину обслуживания заявок. Изучив систему поступления входных заявок в НС можно сделать следующие выводы о свойствах входного потока:

- входной поток является неоднородным, т.к. каждая из входных заявок может запрашивать любое количество обслуживающих нейронов, в зависимости от ее разрядности, из диапазона, при этом вероятности поступления этих заявок в НС одинаковы;
- отсутствует последствие предыдущей заявки на текущую;
- ординарность потока говорит о том, что за элементарный промежуток времени $\Delta t \rightarrow 0$ предел вероятности возникновения двух и более событий так же стремится к нулю;
- поток стационарен, т.к. возникновение события не зависит от времени.

Также стоит отметить, что отсутствует возможность дообслуживания заявки, которая получила отказ в обслуживании или произошла поломка ОИН, занятого обслуживанием данной заявки. Таким образом, аналитическая модель разрабатываемого АЦП может быть представлена в виде векторной СМО с отказами (Рисунок 3.2) [92].

Данный граф состоит из 7 возможных состояний, которые показывают сколько заявок находится в НС в данный момент и сколько каждая из них требует нейронов для обработки. Так, состояние $\bar{x}_4(1,1)$ соответствует наличию в сети одной заявки, требующей для ее обслуживания 1 ОИН, и одной заявки, требующей 2 ОИН. Состояние $\bar{x}_0(0,0)$ соответствует начальному состоянию СМО, при котором заявки в системе отсутствуют.

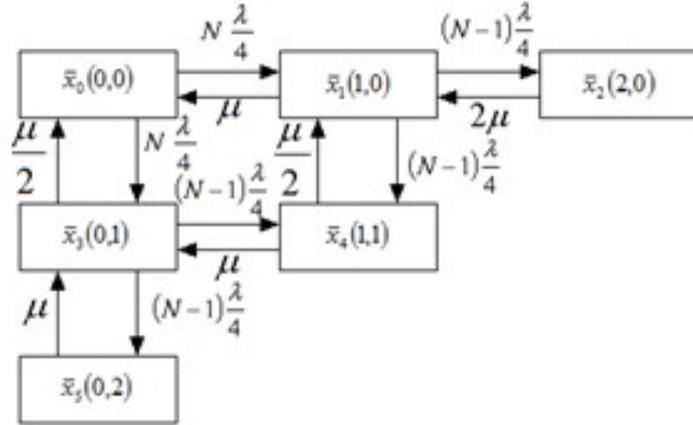


Рисунок 3.2 – Граф векторной модели СМО

Переход из состояния в состояние происходит по интенсивности поступления заявок λ или по интенсивности обслуживания заявки μ , находящейся в сети, в зависимости от события, которое произошло в данный момент. Интенсивность входного потока, в силу его неоднородности, представляет собой суперпозицию интенсивностей поступления заявок через каждый входной канал $\left(\lambda = \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} \right)$. В свою очередь, интенсивность поступления заявок через входной канал так же является суперпозицией интенсивностей поступления заявок $\left(\lambda = \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4} \right)$. Стоит заметить, что на представленном выше графе интенсивность входного потока относительно начального состояния равна $N \frac{\lambda}{4}$, т.к. в данном состоянии все N каналов свободны и с приходом новых заявок интенсивность будет соответственно уменьшаться. Интенсивность обслуживания, исходя из кольцевой структуры НС, находится по формуле

$$\mu_m = \frac{k_m \mu_k}{m},$$

где k_m — количество заявок, каждая из которых обслуживается m нейронами, $\mu_k = \frac{1}{t_{узк}}$,

где $t_{узк}$ — время измерения (обработки) одного ОИН [92].

С учетом возникновения в ОИН отказов с конкретной интенсивностью, наша система будет рассматриваться как сеть СМО [78, 92, 94], содержащая в себе макросостояния, которые представляют собой отдельные графы состояний СМО с тем или иным числом работоспособных обслуживающих приборов.

Сеть массового обслуживания, представленная в Приложении А, получена следующим образом: сначала был построен граф для полностью исправной системы, затем с учетом перехода (отказа в одном из нейронов) в следующее макросостояние, строился граф для $N-1$ приборов вплоть до макросостояния, в котором система лишится всех работоспособных ОИН.

Граф для полностью исправной системы (приложение А1) состоит из состояний, которые показывают, сколько заявок, требующих различное число приборов для обслуживания, находятся в системе. Графы остальных макросостояний соответствуют графу полностью исправной системы, это является следствием того, что в нашей СМО состояние системы показывает сколько заявок именно находятся в ней, т.е. возможны переходы в состояния с отказом.

Чтобы перейти в следующее макросостояние должен отказать один из нейронов, интенсивность данного перехода будет определяться как произведение интенсивности отказа $\lambda_{отк}$ на количество исправных нейронов НС N , т.е. $N\lambda_{отк}$ для перехода из первого макросостояния, $(N-1)\lambda_{отк}$ для следующего перехода и т.д. Переход при отказе ОИН из любого состояния текущего макросостояния происходит в то же состояние следующего макросостояния, так как с возникновением отказа в занятом нейроне заявка, которую обслуживал этот нейрон, остается в системе, но обработка ее невозможна, система выдает отказ.

Чтобы перейти к дальнейшим расчетам граф (Рисунок 3.2) должен быть разбит на несколько линейных графов, которые начинаются от общего нулевого состояния $\bar{x}_0(0,0)$, из-за наличия цикла из состояний, таким образом, расчет вероятности отказа в обслуживании для преобразованного графа производится путем решения нескольких систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) со следующими начальными условиями:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n p_i &= 1 \\ p_0(0) &= 1 \\ p_i(0) &= 0 \end{aligned}$$

Выражение $\sum_{i=0}^n p_i = 1$ является нормировочным условием и говорит о том, что сумма вероятностей наступления всех состояний графа равно 1. Начальные условия $p_0(0) = 1$ и

$p_i(0) = 0$, при $i = 1 \div S$ показывают, что в начальный момент времени система свободна. Величиной S называется число возможных состояний системы. Каждая СЛАУ будет состоять из числа уравнений, соответствующего числу состояний в данном линейном графе.

Результатом будет являться сумма вероятностей переходов в состояния, в которых входная заявка получает отказ в обслуживании. При этом с помощью СЛАУ можно получить только вероятности отказа в одном конкретном макросостоянии, например:

- 1) НС с одним неисправным ОИН (приложение А2)

$$P_{отк} = p(\bar{x}_{11}) = \frac{2\lambda^2(2\lambda\mu + 6\mu^2)}{88\lambda\mu^2 + 51\lambda\mu^2 + 9\lambda^3 + 48\mu^3}$$

- 2) НС с двумя последовательно расположенными неисправными ОИН (приложение А3)

$$P_{отк} = p(\bar{x}_{16}) + p(\bar{x}_{17}) = \frac{4\lambda^2(2\lambda\mu + 6\mu^2)}{88\lambda\mu^2 + 51\lambda\mu^2 + 9\lambda^3 + 48\mu^3};$$

- 3) НС с двумя неисправными ОИН, расположенными через один исправный (приложение А4)

$$P_{отк} = p(\bar{x}_{21}) + p(\bar{x}_{22}) + p(\bar{x}_{23}) = \frac{4\lambda\mu(2\lambda + 6\mu)(2 + \lambda)}{88\lambda\mu^2 + 51\lambda\mu^2 + 9\lambda^3 + 48\mu^3}.$$

Решение данных уравнений само по себе является трудозатратным процессом, который можно автоматизировать с помощью специальных автоматизированных средств обработки и решения СЛАУ [94, 95]. Но при этом необходимо помнить, что с ростом значений начальных параметров НС увеличиваются граф СМО и количество СЛАУ, что в свою очередь увеличивает временные затраты моделирования. Кроме того, для учета связей между отдельными макросостояниями потребуется проведение еще более сложных математических преобразований [94]. Результаты моделирования с помощью векторного графа и системы СЛАУ будут представлены дальше в п. 3.4. Для решения проблемы построения и расчетов для каждого набора входных параметров была разработана аналитическая модель СМО самомаршрутизирующегося АЦП НС в среде имитационного моделирования AnyLogic.

3.2.2. Модель системы массового обслуживания формирования ИАЦП в самомаршрутизирующемся АЦП НС в среде моделирования AnyLogic

Для упрощения расчетов аналитической СМО, связанных с необходимостью составления СЛАУ, а также сложностями при построении СМО, требующих дополнительных временных затрат, было решено создать модель СМО АЦП НС в среде моделирования

AnyLogic, которая позволила бы автоматизировать принципы построения СМО и алгоритмы моделирования известные из теории СМО с помощью ЭВМ [95].

На рисунке 3.3, с применением графического интерфейса AnyLogic, представлена модель графа СМО (Рисунок 3.2). Графические блоки s00, s10 и т.д. соответствуют состояниям $\bar{x}_0(0,0)$, $\bar{x}_1(1,0)$ и т.д., переходы между блоками осуществляются по заданным интенсивностям, идентичным интенсивностям перехода в аналитической модели. При этом присутствует элемент стартовой позиции работы модели в диаграмме состояний «statechart», обеспечивающий начальное условие для решения СЛАУ, в котором говорится, что в начальный момент времени система находится в состоянии s00.

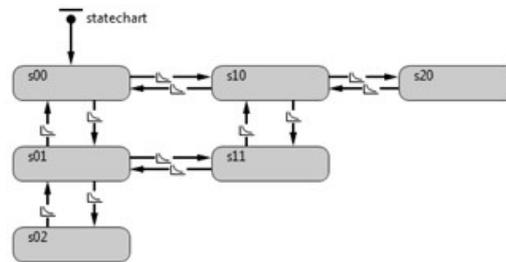


Рисунок 3.3 – Представление модели АЦП НС в среде моделирования AnyLogic в виде графа модели СМО

Расчет вероятности отказа в обслуживании входной заявке представляет собой отношение времени, в котором система находилась в состоянии отказа (в соответствующих графических блоках модели), ко всему времени моделирования. Определение блоков, в которых система находится в состоянии отказа, происходит за счет анализа структуры НС, нахождения положения исправных и неисправных ОИН, и присвоения данным блокам специального параметра.

Однако разработанная модель не имеет очень важной функции масштабирования графа, что, с увеличением значений начальных параметров, влечет за собой большие временные затраты на проектирование графа с помощью элементарных блоков и задания всех интенсивностей. Решение данной задачи было достигнуто с разработкой усовершенствованной модели СМО АЦП НС (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Представление усовершенствованной модели СМО АЦП НС в виде иерархии агентов AnyLogic

Представленная структура модели СМО, которая учитывает взаимодействие некоторого множества узлов СМО и потоков заявок, циркулирующих между ними. В данной модели агент main является СМО АЦП НС и содержит в себе агент mySystems (аналог графа СМО для конкретного состояния ОИН в НС), который, в свою очередь, включает в себя агента myMicroSys (аналог состояний графа СМО).

При запуске моделирования агент main генерирует агента mySystems, в котором происходят вычисления числа состояний в графе и их начальные параметры (Рисунок 3.5). После генерации соответствующего числа состояний графа (популяции агентов myMicroSys) и присвоения им начальных параметров происходит определение соседних состояний для каждого из них и задаются интенсивности переходов между ними.

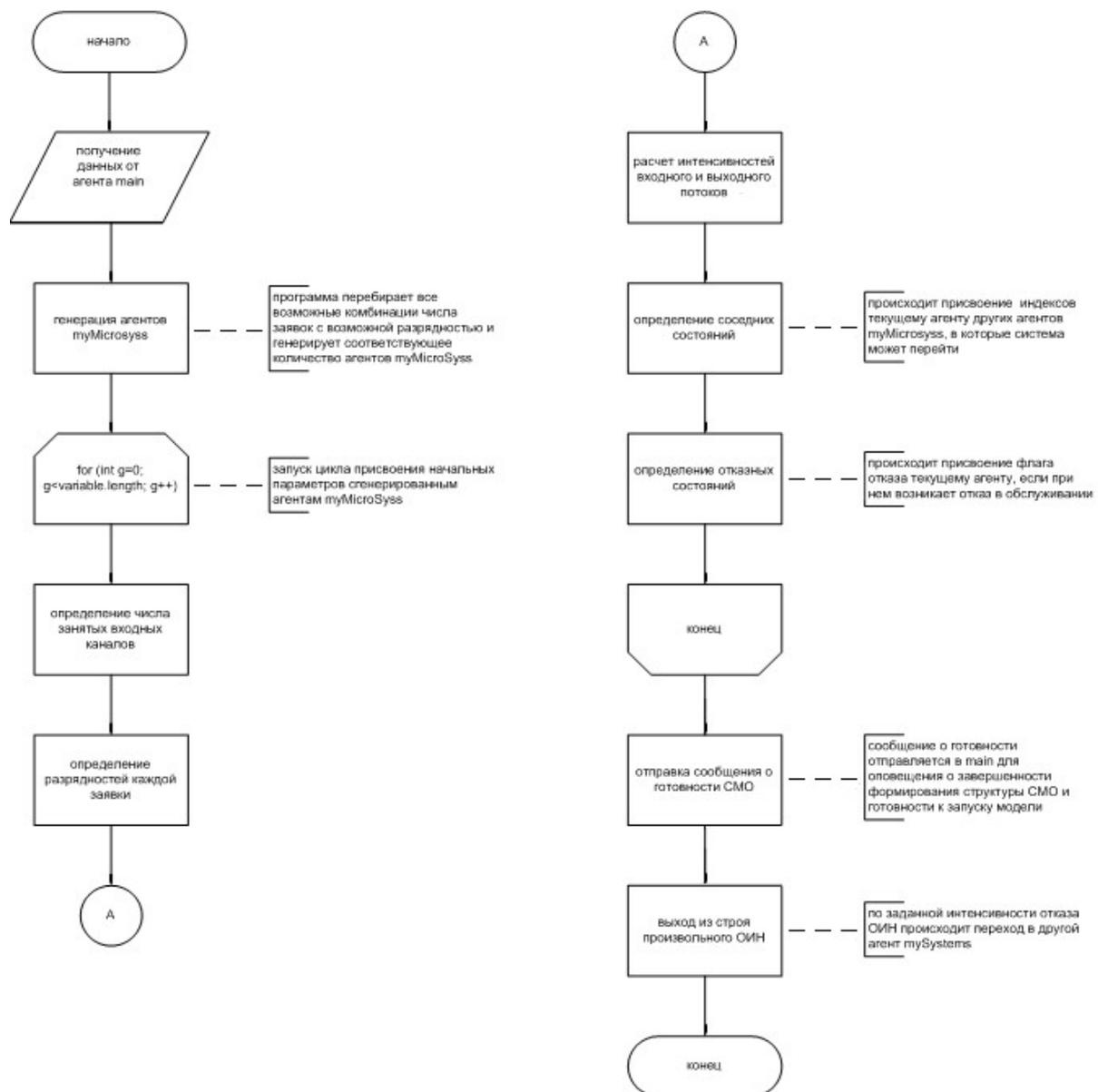


Рисунок 3.5 – Схема алгоритма работы агента MySystems

После генерации агентов MySystems в агенте main запускается моделирование (Рисунок 3.6), во время которого собирается информации о попадании системы в состояние отказа, когда она не может разместить новую заявку на формирование ИАЦП с учетом количества исправных и не занятых ОИН, а также их взаимного расположения. При этом данные моделирования в заранее заданных характерных точках экспортируются в файл Excel для того, чтобы иметь возможность построить график функции $P_{отк}(t)$. Для сбора информации о вероятности отказа используется отношение времени, которое система находилась в состоянии отказа к полному времени моделирования. Также в агенте main реализован алгоритм изменения различных параметров модели СМО для того, чтобы автоматизировать процесс сбора информации о характеристиках системы, без необходимости каждый раз задавать и изменять параметры моделирования.

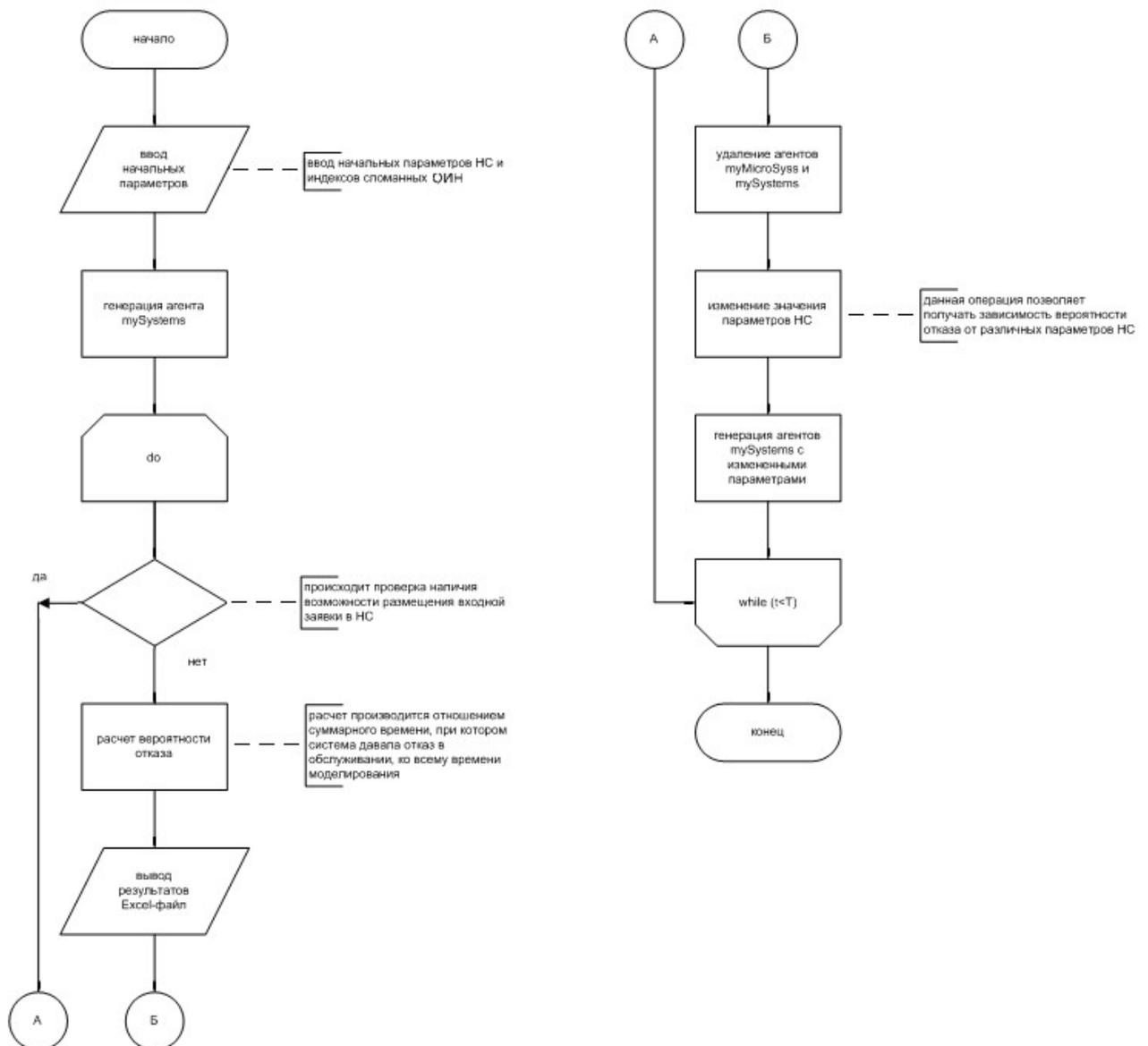


Рисунок 3.6 – Схема алгоритма работы агента main

Во время моделирования осуществляются переходы между агентами MyMicroSys (Рисунок 3.7) с заданными интенсивностями, что соответствует приходу и обработке входных заявок. Кроме того, происходят переходы между агентами MySystems (Рисунок 3.5), что соответствует возникновению отказа в ОИН и работе системы без участия этих ОИН в процессе формирования ИАЦП. Расчет вероятности отказа в обслуживании входной заявке происходит идентично первой модели СМО в агенте main (Рисунок 3.6), поэтому требуется фиксировать время, проведенное системой в каждом конкретном состоянии и добавлять его к счетчику агента main в случае, если в данном состоянии происходит отказ в обработке заявки.



Рисунок 3.7 – Схема алгоритма работы агента MyMicroSys

Полученные результаты с помощью автоматизированной модели для различных состояний НС (приведены ниже в п. 3.4) показали недостаток чисто аналитического подхода к

расчету ВВХ, который заключается в том, что при моделировании невозможно отследить порядок прихода заявок на измерение входных аналоговых сигналов. Это приводит к неточности расчета, так как при наличии достаточного количества свободных ОИН модель всегда сможет разместить новую заявку на формирование ИАЦП, тогда как в реальном устройстве ее размещению могут помешать уже сформированные ИАЦП. Для решения этой проблемы была разработана имитационная модель АЦП НС, позволяющая учитывать не только количество заявок в системе, но и их расположение в сети, и на основе этой информации получать представление о возможностях формирования ИАЦП.

3.3. Разработка имитационной модели нейронной сети с помощью агентного подхода к моделированию

Как было сказано выше, за основу базовой модели была выбрана упрощенная структура нейронной сети, последовательно соединенных в кольцо ОИН. Имитационная модель такой НС должна реализовывать следующие функции: появления заявок в НС; формирование ИАЦП; удаление заявок и разрушения ИАЦП; обслуживание заявок; возникновение отказов в ОИН с заданной интенсивностью.



Рисунок 3.8 – Представление имитационной модели АЦП НС в виде иерархии агентов

Для наглядности и удобства работы с объектами программы, структура модели была представлена в виде иерархии агентов (Рисунок 3.8). Агент main является агентом верхнего уровня, т.к. он включает в себя другие агенты (myNeurons и myMessages) и обеспечивает их взаимодействие. Кроме того, в агенте main присутствует оператор события generateMessages, который представляет собой входной поток заявок, имеющих пуассоновское распределение, но при этом, оператор имеет ограничение в генерации заявок, т.е. одновременно не может быть сгенерировано заявок больше, чем задано для АЦП НС входов. Также присутствуют дополнительные счетчики для сбора статистики и анализа некоторых параметров системы,

такие как: счетчик поступивших в систему заявок, счетчик заявок получивших отказ в обслуживании, когда не хватает ОИН для обработки заявки, вероятность отказа, счетчик отказов, наступивших при возникновении отказа в ОИН, занятого обработкой заявки в данный момент и другие.

Агент myMessages описывает входную заявку присущими ей параметрами, а также реализовывает размещение заявок в НС (формирование ИАЦП) и их удаление (разрушение ИАЦП). Заявка имеет следующие параметры: разрядность; время жизни соответствует времени, требуемому для обработки данной заявки (проведение аналого-цифрового преобразования); отказ присваивается заявке, если произошел отказ в размещении заявки в НС или отказ при ее обслуживании, используется для подсчета вероятности отказа.

В этом агенте прописан алгоритм размещения заявок в НС (Рисунок 3.9), которая подразумевает, что каждый ОИН может стать входным (с него может начинаться формирование ИАЦП) и заявки размещаются друг за другом последовательно. В случае, когда при формировании ИАЦП один из выбранных нейронов оказался неисправным, заявка начинает искать свободные исправные нейроны после отказавшего.

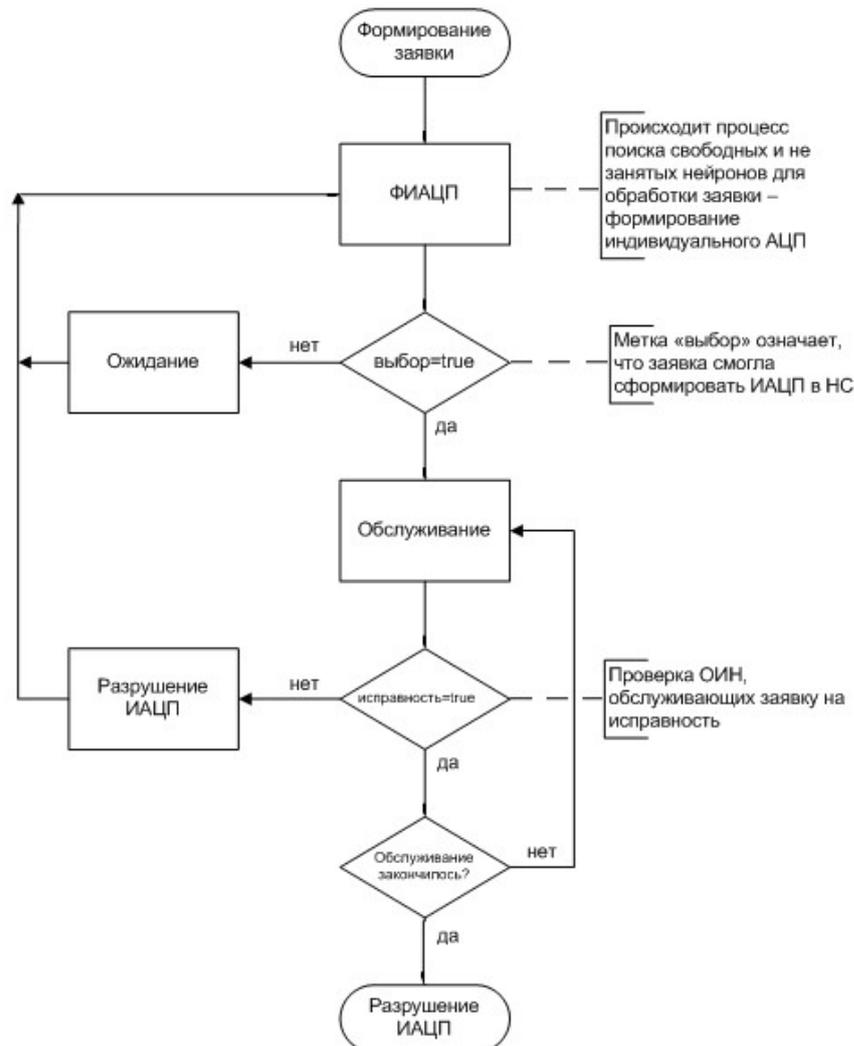


Рисунок 3.9 – Схема алгоритма работы агента myMessages

Операция удаление уничтожает заявку в системе и освобождает занимаемые ей нейроны, то есть является аналогом разрушения сформированного ИАЦП. Этот процесс применяется как для обслуженной заявки, так и для заявки находившейся в очереди, время жизни которой истекло.

Началом алгоритма является генерация заявки оператором события `generateMessages` агента `main`. В агенте `myMessages` случайным образом присваиваются параметры заявки.

После генерации заявки начинается этап формирования ИАЦП, который разделен на две операции: поиск свободных и исправных ОИН и присвоение этим нейронам состояния занятости. Первая операция представляет собой цикл, ограниченный количеством ОИН в НС. Каждому ОИН в популяции агентов `myNeurons` присваиваются параметры класса `MyNeuron` с номером заявки, при этом происходит проверка на незанятость и исправность нейрона. Если условие выполняется, то номер ОИН присваивается переменной `rand` и начинается следующий цикл, размерностью которого является разрядность, т.е. проверка по тому же условию остальных ОИН, следующих за данным. В противном случае проверяется следующий нейрон по главному циклу. В случае если, удалось разместить заявку в НС, то ее метке «выбор» присваивается логическое значение «true», если же нет, то «false». Если заявку удалось разместить, то всем ОИН в сформированном ИАЦП присваивается статус занятости.

После этапа формирования ИАЦП, в зависимости от значения метки «выбор», заявка переходит в обслуживание или в ожидание, где она находится до истечения времени ее жизни, т.е. до конца аналого-цифрового преобразования. Возможен такой случай, когда возникает отказ в нейроне, занятом обслуживанием, тогда ИАЦП с отказавшим ОИН разрушается, и заявка уходит в ожидание. После завершения этапа обслуживания происходит процесс разрушения ИАЦП.

Отказом в обслуживании является пребывание заявки в состоянии ожидания, которое свидетельствует о том, что в НС не хватает свободных и исправных нейронов для формирования ИАЦП заданной разрядности. Так как, вообще говоря, АЦП НС – это система реального времени, то наличие отказов в системе является одной из самых важных ее характеристик, поэтому при моделировании как основной изучаемый параметр принята именно вероятность отказа.

Агент `myNeurons` отвечает за описание параметров ОИН и реализует алгоритм перехода в отказавшее состояние. Нейроны имеют следующие параметры: номер; исправность; занятость. Алгоритм работы ОИН представляет собой изменение состояния нейрона от исправного к неисправному, выбор происходит случайным образом с заданной интенсивностью по алгоритму, представленному на рисунке 3.10. Все ОИН могут находиться в трех состояниях: исходное состояние (ОИН исправен и свободен); рабочее состояние (нейрон исправен и занят

обслуживанием одной из заявок); конечное состояние (ОИН переходит в неисправное состояние и более не участвует в работе АЦП НС).

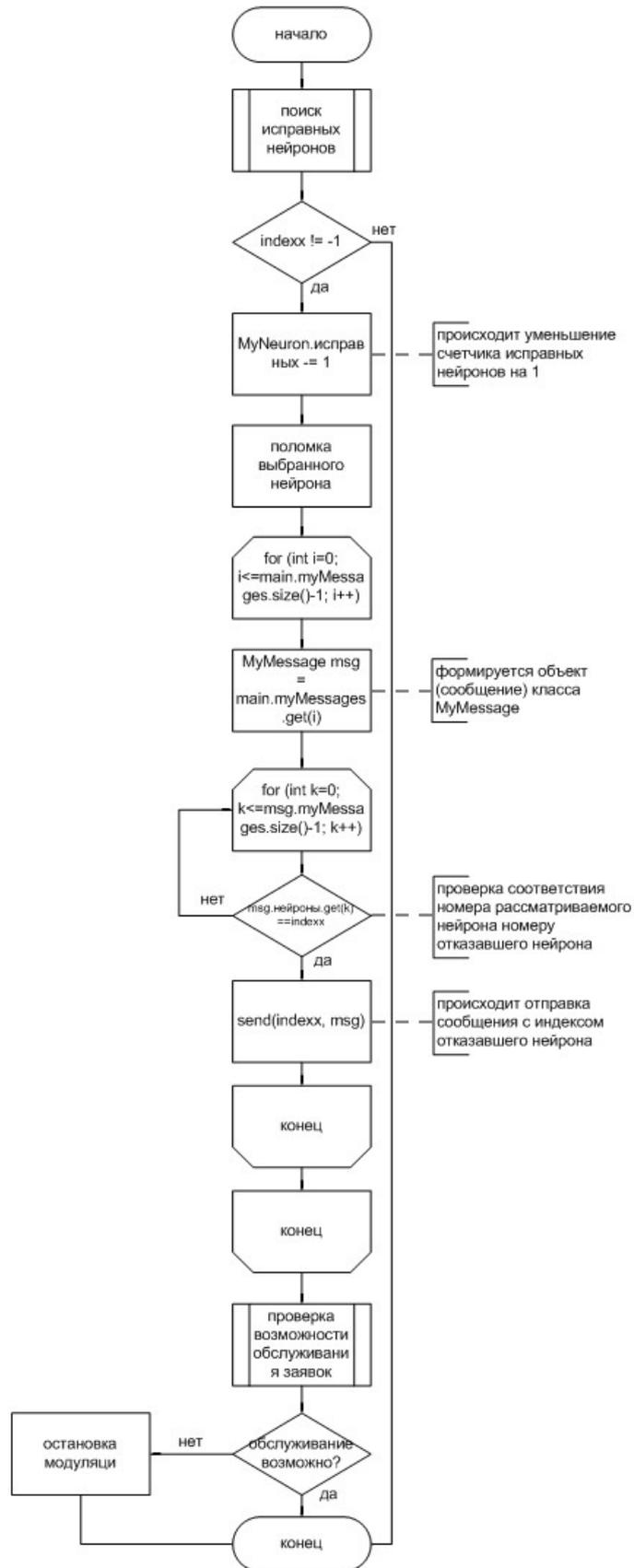


Рисунок 3.10 – Схема алгоритма перехода ОИН в отказавшее состояние

Переход одного из ОИН в отказавшее состояние описывает следующий алгоритм (Рисунок 3.10): сперва определяются все возможные исправные ОИН, затем переменной `indexx` присваивается номер случайного ОИН из найденных. Если переменной `index` присваивается значение `-1`, то это означает, что исправных нейронов больше не осталось и моделирование завершается. Затем происходит уменьшение счетчика исправных нейронов на 1, а выбранному ОИН устанавливается значение `false` для параметра «исправность».

После перехода наступает поиск заявки с отказавшим ОИН. Данный поиск состоит из двух подциклов: подцикл поиска заявок, присутствующих в системе в данный момент, т.е. проверяются все обрабатываемые заявки на наличие неисправных нейронов; подцикл поиска среди ОИН, обслуживающих конкретную заявку, неисправных.

В случае если среди обслуживающих заявку ОИН найден неисправный ОИН, то выполняется команда `send(indexx, msg)`, которая формирует сообщение с номером отказавшего нейрона. Это сообщение отправляется объекту `msg`, находящемуся в агенте `myMessages`. Если отказавший нейрон не был занят обслуживанием, то никакого сообщения не формируется.

Завершающим этапом алгоритма является проверка на возможность формирования ИАЦП минимальной разрядности. Система продолжит работать в том случае, если в НС можно разместить заявки с минимальной разрядностью, в противном случае симуляция останавливается, так как АЦП НС больше не способна обработать ни одной новой заявки на формирование ИАЦП.

В результате моделирования (будут представлены ниже в п. 3.4) получены ВВХ самомаршрутизирующегося АЦП НС, которые учитывают не только наличие в сети отказавших ОИН, но и расположение ИАЦП относительно друг друга, что может послужить дополнительным фактором, приводящим к отказу в измерении. Разработанная имитационная модель положена в основу методики для расчета оптимальных характеристик для АЦП НС, что будет рассмотрено ниже.

3.4. Сравнительный анализ аналитической и имитационной моделей, проверка адекватности результатов

Для анализа адекватности разработанных моделей АЦП НС была выбрана базовая модель НС, описанная выше, для которой были построены аналитическая и имитационная модели. Основным измеряемым параметром является вероятность отказа в обработке входной

заявки, изменяемыми параметрами являются интенсивность поступления входных заявок, интенсивность их обработки (аналог тактовой частоты генератора АЦП НС), количество входных каналов, количество ОИН, минимальная и максимальная возможные разрядности формируемых ИАЦП.

В качестве примера используем зависимость вероятности отказа от интенсивности поступления входных заявок и смоделируем приведенные выше состояния СМО, соответствующие определенным состояниям АЦП НС базовой модели: НС с одним неисправным ОИН, НС с двумя последовательно расположенными неисправными ОИН и НС с двумя неисправными ОИН, расположенными через один исправный. Результаты аналитического моделирования и моделирования с помощью графической и усовершенствованной аналитической моделей СМО АЦП НС, реализованных в AnyLogic, приведены в виде графиков на рисунке 3.11 и таблице 3.2

Для проверки адекватности моделей предлагается использовать критерий согласия Пирсона (критерий χ^2) [96, 97], т.к. его можно применять для различных распределений, в то время как остальные критерии применяются в основном для нормального распределения. Как и любой другой критерий (например, Колмогорова, Смирнова и т.д.), критерий Пирсона устанавливает на принятом уровне значимости принадлежность статистики (эмпирических частот), собранной во время наблюдения, к функции распределения, по которой получена теоретическая статистика (теоретические частоты). Система будет считаться адекватной, если критерий наблюдения будет меньше критической точки ($\chi_{набл}^2 < \chi_{кр}^2(\alpha; k)$), где α — уровень значимости, $k=s-1-r$ — степень свободы (s — число групп выборки, r — число параметров, от которых зависит предполагаемое распределение выборки). Для пуассоновского распределения, по которому оценивают параметр λ , величина r равна 1. Число групп свободы s равно 10, поэтому $k=8$.

Критерий наблюдения вычисляется по формуле [97]:

$$\chi_{набл}^2 = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n_i},$$

которая показывает, что с увеличением разницы между эмпирической и теоретической частотами увеличивается сам критерий, при этом стремится к критической точке критерия (с учетом того, что модель адекватна). $\chi_{граф}^2$

Следуя порядку действий, представленному в [97], составим таблицу частот и выполним требуемые расчеты для рассмотренных ранее частных случаев НС (Таблицы 3.2 – 3.4).

Таблица 3.2 – Определение χ^2 для моделирования НС с одним отказавшим нейроном

Интенсивность входного потока λ , c^{-1}	Вероятность отказа			Критерий Пирсона	
	Векторный граф СМО	Графическая модель в AnyLogic	Усовершенствованная модель AnyLogic	$\chi^2_{граф}$, * 10^{-6}	$\chi^2_{усовер}$, * 10^{-6}
0	0	0	0	0	0
0,1	0,005	0,005	0,005	0	0
0,2	0,021	0,021	0,021	0	0
0,3	0,041	0,041	0,042	0	23,8
0,4	0,061	0,061	0,061	0	0
0,5	0,082	0,082	0,082	0	0
0,6	0,101	0,101	0,102	0	9,8
0,7	0,117	0,118	0,117	8,5	8,5
0,8	0,131	0,131	0,131	0	0
0,9	0,145	0,146	0,146	6,8	0
1	0,158	0,158	0,159	0	6,3

Таблица 3.3 – Определение χ^2 для моделирования НС с двумя последовательно отказавшими нейронами

Интенсивность входного потока λ , c^{-1}	Вероятность отказа			Критерий Пирсона	
	Векторный граф СМО	Графическая модель в AnyLogic	Усовершенствованная модель AnyLogic	$\chi^2_{граф}$, * 10^{-6}	$\chi^2_{усовер}$, * 10^{-6}
0	0	0	0	0	0
0,1	0,015	0,015	0,015	0	0
0,2	0,047	0,048	0,047	20,8	21,3
0,3	0,086	0,087	0,086	11,5	11,6
0,4	0,125	0,126	0,126	7,9	0
0,5	0,163	0,163	0,163	0	0
0,6	0,199	0,199	0,199	0	0
0,7	0,233	0,233	0,233	0	0
0,8	0,264	0,264	0,265	0	3,8
0,9	0,293	0,294	0,293	3,4	3,4
1	0,32	0,32	0,32	0	0

Таблица 3.4 – Определение χ^2 для моделирования НС с двумя отказавшими нейронами через один исправный

Интенсивность входного потока λ , с^{-1}	Вероятность отказа			Критерий Пирсона	
	Векторный граф СМО	Графическая модель в AnyLogic	Усовершенствованная модель AnyLogic	$\chi^2_{\text{граф}}$, * 10^{-6}	$\chi^2_{\text{усовер}}$, * 10^{-6}
0	0	0	0	0	0
0,1	0,166	0,166	0,166	0	0
0,2	0,284	0,284	0,284	0	0
0,3	0,371	0,372	0,372	2,7	0
0,4	0,438	0,438	0,438	0	0
0,5	0,49	0,49	0,491	0	2
0,6	0,532	0,532	0,533	0	1,9
0,7	0,566	0,566	0,567	0	1,8
0,8	0,595	0,595	0,596	0	1,7
0,9	0,619	0,62	0,619	1,6	1,6
1	0,64	0,641	0,64	1,6	1,6

Увеличение количества нейронов позволяет уменьшить вероятность отказа, например если увеличить в данной системе количество нейронов до 5, то вероятность отказа при одном неисправном нейроне окажется нулевой (пятый нейрон избыточен изначально). А вероятность отказа при двух неисправных нейронах также снизится. Причем использование усовершенствованной аналитической модели позволяет получить выборку для сети с обновленными параметрами примерно за 5 минут, из которых около минуты занимает ввод данных, остальное – это время работы ЭВМ над моделированием сети и вывод результата. На построение графа для нового состояния сети уходит на порядок больше времени, плюс для обработки и решения полученной из графа СЛАУ необходимо внести данные в программный пакет для автоматизации расчетов (использовался модуль MathCAD), в итоге на «ручной» расчет потребовалось порядка 20 минут. Графики вероятностей полученных для сети из 5 нейронов, приведены на рисунке 3.12.

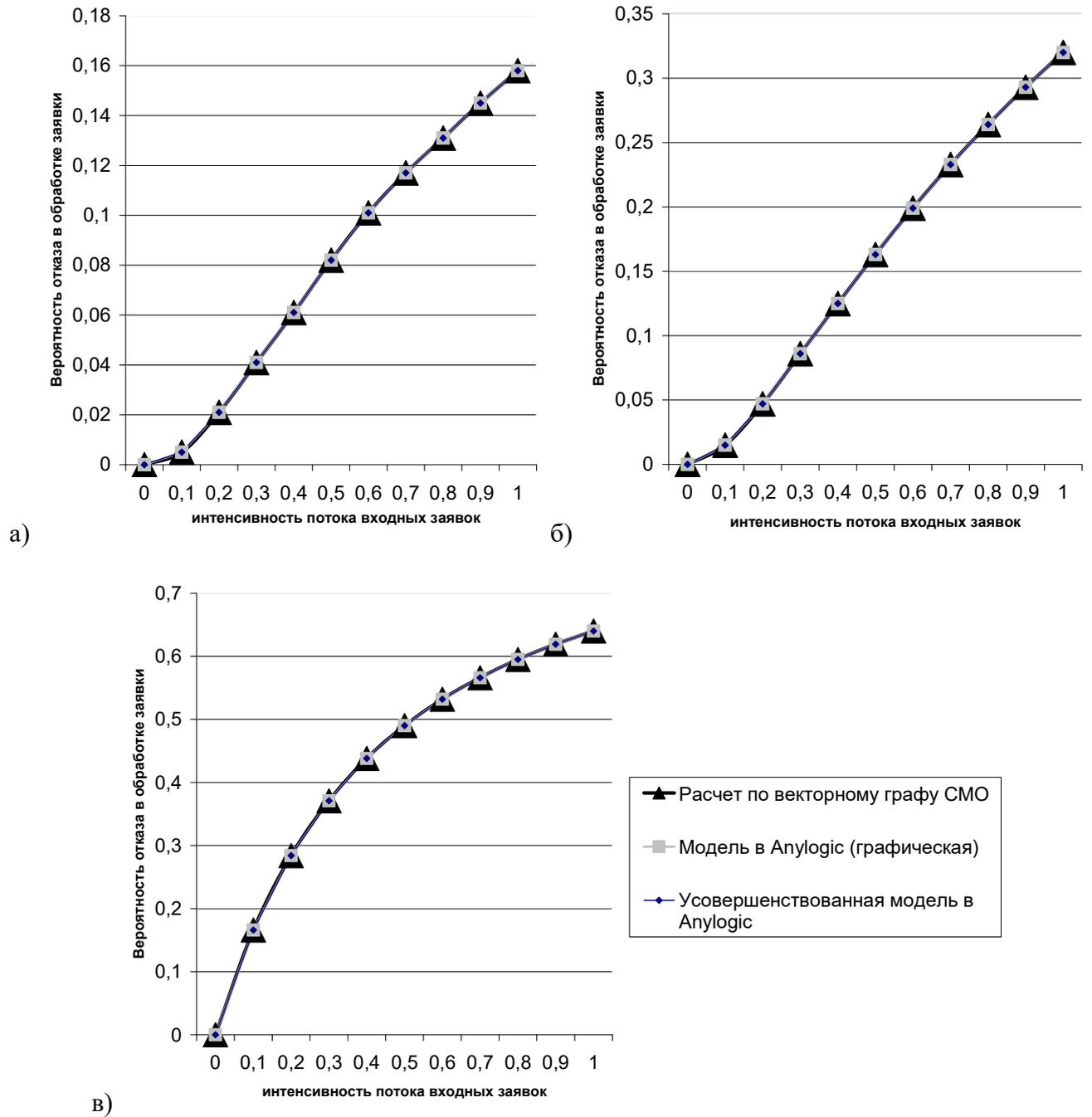


Рисунок 3.11 – Графики зависимости вероятности отказа от интенсивности входного потока для рассматриваемых примеров СМО АЦП НС (а — НС с одним неисправным нейроном, б — НС с двумя последовательно расположенными неисправными нейронами, в — НС с двумя неисправными нейронами, расположенные через один исправный)

Графики и расчеты критерия Пирсона показывают полную идентичность результатов моделирования, что позволяет говорить о том, что была получена аналитическая модель СМО АЦП НС, позволяющая выполнять моделирование идентичное аналитическим расчетам со значительно меньшими временными затратами. Это связано с тем, что по сути для построения

аналитических моделей в AnyLogic использовался тот же математический аппарат, что и при расчетах через векторный граф и СЛАУ. Главным достоинством является возможность за счет усовершенствованной аналитической модели рассчитывать граф с широким диапазоном входных параметров АЦП НС, а также добавлена возможность автоматического перебора одного из параметров в заданных пределах для получения сразу серии экспериментов. Например, перебор количества ОИН в НС, чтобы найти количество, удовлетворяющее заданным параметрам, что будет использовано в приведенной ниже методике.

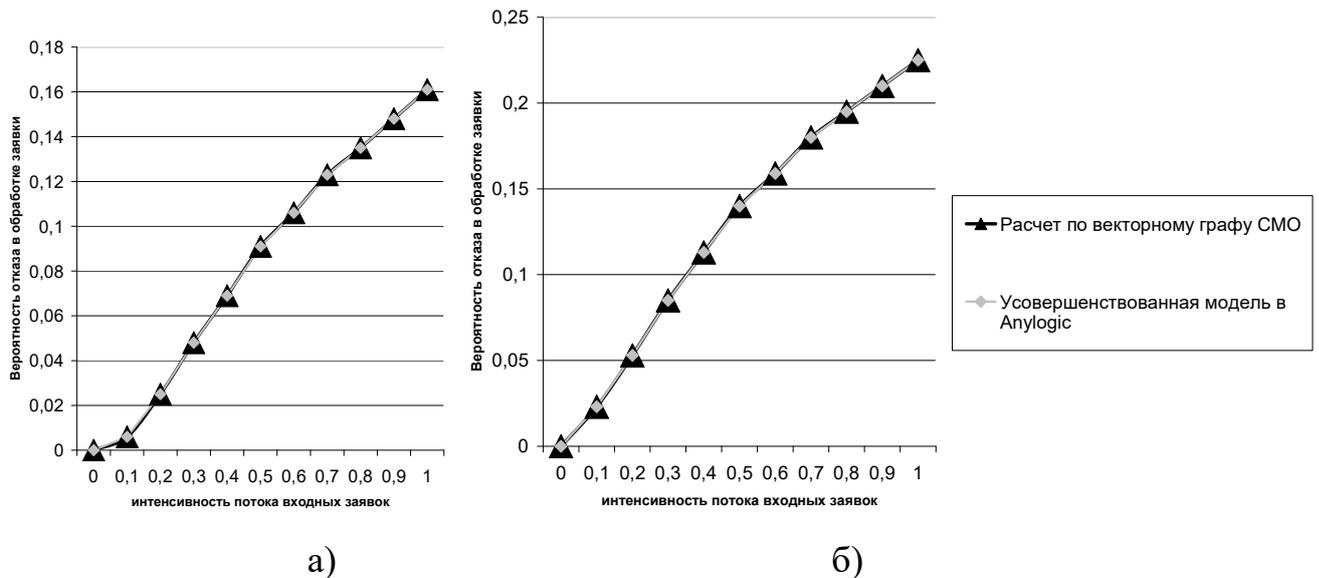


Рисунок 3.12 – Графики зависимости вероятности отказа от интенсивности входного потока для АЦП НС, состоящей из 5 ОИН (а — НС с двумя последовательно расположенными неисправными нейронами, б — НС с двумя неисправными нейронами, расположенные через один исправный)

После проверки адекватности аналитической модели СМО АЦП НС, проверим адекватность имитационной модели АЦП НС. В качестве примера приведем анализ двух наиболее различных состояний СМО: НС с двумя последовательно расположенными неисправными ОИН и НС с двумя неисправными ОИН, расположенными через один исправный, с оценкой адекватности моделирования по методу Пирсона. Получаем значения вероятности отказа при значении λ в диапазоне от 0 с^{-1} до 1 с^{-1} с шагом $\Delta\lambda=0,1 \text{ с}^{-1}$, при постоянном значении $\mu=0,5 \text{ с}^{-1}$ (Таблицы 3.5 и 3.6)

По данным таблиц можно построить графики результатов моделирования (Рисунок 3.13), на которых видна разница в результатах, демонстрируемых аналитической и имитационной моделями, в первую очередь это связано с тем, что имитационная модель более точно воспроизводит алгоритм формирования ИАЦП, в то время как аналитическая модель

может показать только теоретическую возможность размещения заявок в НС с конкретными параметрами.

Таблица 3.5 – Результаты аналитического и имитационного моделирования НС с двумя последовательно отказавшими нейронами

Интенсивность входного потока λ , c^{-1}	Вероятность отказа $P_{отк}$	
	Аналитическая модель	Имитационная модель
0	0	0
0,1	0,015	0
0,2	0,047	0,022
0,3	0,086	0,061
0,4	0,125	0,098
0,5	0,163	0,13
0,6	0,199	0,156
0,7	0,233	0,178
0,8	0,264	0,195
0,9	0,293	0,21
1	0,32	0,222

Таблица 3.6 – Результаты аналитического и имитационного моделирования НС с двумя отказавшими нейронами через один исправный

Интенсивность входного потока λ , c^{-1}	Вероятность отказа $P_{отк}$	
	Аналитическая модель	Имитационная модель
0	0	0
0,1	0,166	0,157
0,2	0,284	0,29
0,3	0,371	0,398
0,4	0,438	0,478
0,5	0,49	0,536
0,6	0,532	0,578
0,7	0,566	0,61
0,8	0,595	0,633
0,9	0,619	0,652
1	0,64	0,667

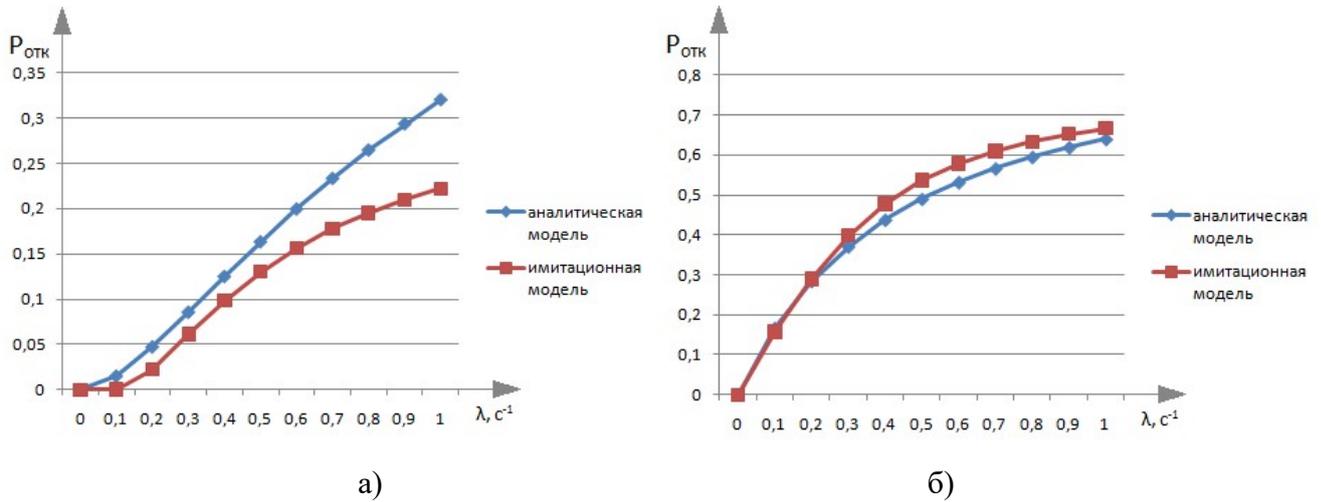


Рисунок 3.13 — Графики результатов моделирования (а — базовая НС с двумя последовательно отказавшими ОИН, б — базовая НС с двумя отказавшими ОИН через один исправный)

Таблица 3.7 – Определение χ^2 для моделирования НС с двумя последовательно отказавшими нейронами

i	n_i	n'_i	$n_i - n'_i$	$(n_i - n'_i)^2$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
1	0,000106	0,015123	-0,015020	0,000226	0,014912
2	0,022000	0,047337	-0,025340	0,000642	0,013562
3	0,061000	0,085612	-0,024610	0,000606	0,007076
4	0,098000	0,125000	-0,027000	0,000729	0,005832
5	0,130000	0,163265	-0,033270	0,001107	0,006778
6	0,156000	0,199446	-0,043450	0,001888	0,009464
7	0,178000	0,233195	-0,055190	0,003046	0,013064
8	0,195000	0,264463	-0,069460	0,004825	0,018245
9	0,210000	0,293345	-0,083350	0,006946	0,023680
10	0,222000	0,320000	-0,098000	0,009604	0,030013
Σ	1,272106	1,746787	—	—	0,142624

Исходя из полученных данных в таблице 3.7, критерий $\chi^2_{набл} = 0,142624$. Критическая точка $\chi^2_{кр}(\alpha; k)$ с уровнем значимости $\alpha=0,89$ находится по справочной таблице [88], и равна 2,56. Таким образом, выполняется условие $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}(\alpha; k)$, модели адекватны. Для определения точности воспользуемся средней относительной ошибкой:

$$\chi^2_{набл} = \frac{1}{N} \sum \frac{|n_i - n'_i|}{n_i} * 100\%$$

Для случая с последовательно отказавшими нейронами точность составляет 6,5%. Рассмотрим случай для НС с двумя отказавшими нейронами через один исправный.

Таблица 3.8 – Определение χ^2 для моделирования НС с двумя отказавшими нейронами через один исправный

i	n_i	n'_i	$n_i - n'_i$	$(n_i - n'_i)^2$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
1	0,157000	0,166352	-0,009350	0,000088	0,000526
2	0,290000	0,284024	0,005976	0,000036	0,000126
3	0,398000	0,370987	0,027013	0,000730	0,001967
4	0,478000	0,437500	0,040500	0,001640	0,003749
5	0,536000	0,489796	0,046204	0,002135	0,004359
6	0,578000	0,531856	0,046144	0,002129	0,004003
7	0,610000	0,566330	0,043670	0,001907	0,003367
8	0,633000	0,595041	0,037959	0,001441	0,002421
9	0,652000	0,619285	0,032715	0,001070	0,001728
10	0,667000	0,640000	0,027000	0,000729	0,001139
Σ	4,999000	4,701170	—	—	0,023386

Исходя из полученных данных в таблице 3.8, критерий $\chi^2_{набл} = 0,023386$. Критическая точка $\chi^2_{кр}(\alpha; k)$ с уровнем значимости $\alpha=0,89$ находится по справочной таблице [97], и равна 2,56. Таким образом, выполняется условие $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}(\alpha; k)$, модели адекватны с точностью 3,5%.

Как показали приведенные примеры, а также значительное количество моделирований с изменением в том числе и других параметров НС, модели показывают хороший уровень адекватности, что позволяет использовать их для решения обратной задачи при разработке АЦП НС, когда необходимо определить параметры НС под заданный уровень вероятности отказа в обслуживании заявки, требуемый заказчиком. Кроме того, моделирование показывает, что функция отказов может быть аппроксимирована и приведена к виду экспоненциальной зависимости. Ниже будет представлена методика определения параметров АЦП НС с использованием аналитической и имитационной моделей.

3.5. Методика определения параметров АЦП НС для реализации устройства под заданное время безотказной работы

Основными параметрами, которые используются при моделировании с помощью представленных выше аналитической (см. п. 3.2,) и имитационной (см. п. 3.3) моделей делятся на два основных типа: количественные и численные. К количественным относятся параметры, изменение значения которых влияет на результат моделирования и на структуру модели — масштабируют ее. К таким параметрам относятся:

- количество источников заявок в НС (количество аналоговых входов АЦП) — n ;
- количество ОИН — N ;
- количество дополнительных связей между ОИН — s .

Численные параметры системы отличаются от количественных тем, что не влияют на структуру модели, а только влияют на ее поведение. К таким параметрам относятся:

- минимальная разрядность ИАЦП — q_{min} ;
- максимальная разрядность ИАЦП — q_{max} ;
- интенсивность входного потока (учитывает частоту поступления новых входных сигналов, а также частоту и амплитуду изменения самих входных сигналов, которая приводит к изменению требуемой разрядности измерения и формирования новых или дополнительных ИАЦП) — λ_{ex} ;
- интенсивность обработки заявок (учитывает тактовую частоту генератора СБИС, на которой производится аналого-цифровое преобразование, и количество разрядов в ИАЦП, которые требуются для аналого-цифрового преобразования) — $\mu_{обр}$;
- интенсивность отказов ОИН (учитывает время наработки на отказ элементов СБИС, которая используется для проектирования устройства, а также структурно-логические схемы элементов системы) — $\lambda_{ОИН}$.

Изменяя эти параметры можно получить некоторую функцию вероятности отказа НС в обработке поступающим заявкам на формирование ИАЦП:

$$P_{отк} = f(n, N, s, q_{min}, q_{max}, \lambda_{ex}, \mu_{обр}, \lambda_{ОИН}, t)$$

Необходимо также отметить, что функция вероятности отказа АЦП НС может быть представлена в виде экспоненциального распределения во времени, так как поток входных заявок является простейшим пуассоновским потоком (см. п. 3.2):

$$P'_{отк}(t) = 1 - e^{-\lambda_{отк}t},$$

где $P'_{отк}(t)$ – теоретическая вероятность отказа в обработке заявки, $\lambda_{отк}$ – интенсивность наступления отказов в обработке заявок.

Зная плотность вероятности наступления отказа можно рассчитать среднее время наработки на отказ [93]:

$$T = \frac{1}{\lambda_{отк}}$$

Таким образом, задав требуемое время наработки на отказ, например, минимально возможное время между обслуживанием устройства или срок гарантийного обслуживания и т.п., можно оценить значение вероятности отказа на различных участках временного интервала $t \in (0; \infty)$. Тогда требуемая функция $P'_{отк}(t)$ будет представлена графиком на рисунке 3.14. Фактическую функцию $P_{отк}(t)$ (Рисунок 3.15) можно получить, используя полученные модели, как функцию от остальных параметров моделирования, представляющую вероятностно-временные характеристики (ВВХ) системы.

$$P_{отк}(t) = f(n, N, s, q_{\min}, q_{\max}, \lambda_{вх}, \mu_{обр}, \lambda_{ОИИ}) \quad (3.1)$$

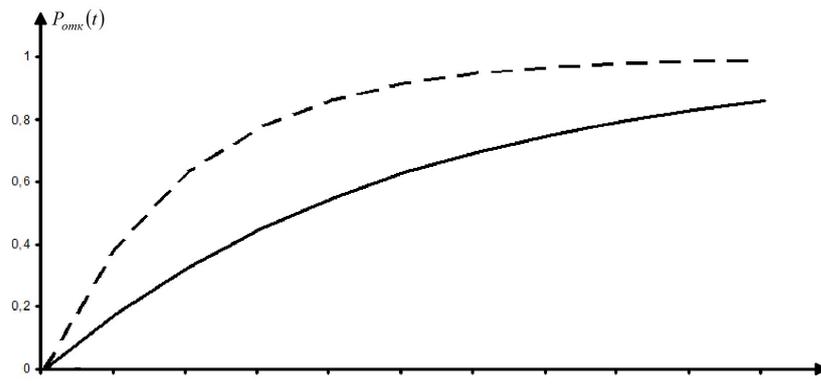


Рисунок 3.14 – Графики функций вероятности возникновения отказа в НС: $P'_{отк}(t)$ – пунктирная линия и $P_{отк}(t)$ – сплошная линия.

ВВХ является одним из критериев оптимальности АЦП НС, но помимо этого требуется учитывать второй критерий – аппаратные затраты на реализацию НС, которые можно представить в виде следующей функции (см. п. 2.5):

$$C = f(n, N, s, q_{\max}) \quad (3.2)$$

Для реализации задачи многокритериальной оптимизации применим метод поисковой оптимизации [97], при этом для получения целевой функции воспользуемся методом частного критерия [97-98], то есть в качестве целевой функции примем критерий аппаратных затрат (3.2), а критерий ВВХ (3.1) примем в качестве ограничения системы. Это удобно, т.к. зная

желаемое время наработки на отказ, можно ограничить время моделирования до интервала $t_{\text{мод}} \in (0; T)$, и получить ограничение для функции $P_{\text{отк}}(t)$, в виде

$$\begin{aligned} P_{\text{отк}}(T) &\leq P'_{\text{отк}}(T) \\ P_{\text{отк}}(T) &\leq 1 - e^{-\lambda_{\text{отк}} T} \end{aligned}$$

В качестве управляемых параметров примем параметры N и s , так как, в первую очередь, именно они определяются разработчиком, в то время как остальные – как правило, определяются заказчиком. При этом необходимо отметить, что данные параметры являются дискретными и принадлежат следующим интервалам, зависящим от максимального количества используемых разрядов, а также общего объема аппаратурных ресурсов Q_{max} , который определяется, исходя из выбранной СБИС для проектировки устройства:

$$\begin{aligned} N &\in \left[nq_{\text{min}}; \frac{Q_{\text{max}}}{C_{\text{ОИН}}} \right) \\ s &\in \left[0; \frac{Q_{\text{max}}}{C_{\text{ОИН}} N + C_s s} \right) \end{aligned}$$

где $C_{\text{ОИН}}$ – аппаратурные затраты на реализацию одного ОИН, C_s – аппаратурные затраты на реализацию одной дополнительной связи.

Таким образом, целевая функция оптимизации становится однокритериальной, а на критерии оптимальности накладываются следующие ограничения:

$$F = \min_{(N;s)} C = \min_{(N;s)} f(n, N, s, q_{\text{max}}) \quad (3.3)$$

$$0 \leq P_{\text{отк}}(T) \leq 0.0063 \quad (3.4)$$

$$nq_{\text{min}} C_{\text{ОИН}} \leq C \leq Q_{\text{max}} \quad (3.5)$$

Учитывая все сказанное выше, алгоритм поисковой оптимизации для АЦП НС будет выглядеть следующим образом:

1. Задание начальных неуправляемых параметров для моделирования НС.
2. Задание начальной точки управляемых параметров для моделирования $(N_0; s_0)$.
3. Моделирование АЦП НС с помощью аналитической модели СМО для проверки ограничения (3.4).
4. Увеличение параметра N до тех пор, пока не будет выполнено ограничение (3.4), либо не будет достигнуто N_{max} .
5. Возвращение НС к состоянию $(N_0; s_i)$, где s_i - это значение параметра s на текущем шаге моделирования.
6. Увеличение значения s на единицу и переход к пункту 3, пока не будет достигнуто s_{max} .
7. Моделирование НС с помощью имитационной модели для всех пар значений $(N_j; s_k)$, которые удовлетворяли условию (3.4) при использовании аналитической модели на предыдущих этапах моделирования (3-6) при данных параметрах НС.

8. Расчет целевой функции (3.3) для всех значений $(N_j; s_k)$, которые подтвердили выполнение условия (3.4) в пункте 7, проверка условия (3.5).

9. Нахождение оптимального значения $(N_{opt}; s_{opt})$ по полученным значениям функции (3.3) исходя из условия минимальных аппаратных затрат.

Если при помощи данного алгоритма не удастся обнаружить оптимальные значения параметров N и s , то необходимо расширить границы управляемых параметров за счет увеличения Q_{max} (подбора другой СБИС для реализации АЦП НС). В обратной ситуации, например, при $(N_{opt}; s_{opt})$ аппаратные затраты составляют $C = \frac{Q_{max}}{2}$ или меньше, имеет смысл уменьшить Q_{max} , выбрав менее мощную и, соответственно, экономически более выгодную СБИС. Кроме того, если это необходимо заказчику, можно провести более глубокий анализ, за счет изменения других параметров моделирования, таких как количество входных сигналов для преобразования или разрядность формируемых ИАЦП. Тогда потребуется добавить дополнительные этапы в алгоритм поисковой оптимизации, которые будут изменять дополнительные параметры АЦП НС.

Использование двух методов моделирования (этапы 3 и 7 алгоритма оптимизации) связано в первую очередь с тем, что имитационное моделирование связано со значительными вычислительными мощностями ЭВМ и временными затратами на работу модели. В тоже время работа аналитической модели занимает большое время только на этапе построения структуры СМО (см. п. 3.4), поэтому эмпирическим путем установлено, что время, затрачиваемое на аналитическое моделирование на порядок меньше, чем в имитационном моделировании. Дальнейшее увеличение начальных параметров НС делает разницу во времени моделирования еще более ощутимой. При этом использование только аналитической модели не допустимо из-за достаточно грубой оценки ВВХ, так как она не учитывает распределение уже сформированных ИАЦП в НС и возможные дополнительные отказы, возникающие из-за этого [84].

3.6. Выводы

Основные полученные научные результаты:

1. Выполнен анализ входного потока сигналов и построена аналитическая модель АЦП НС в виде векторной СМО, отражающая возможность формировать ИАЦП различной разрядности по заявке отдельно для каждого из входов. На основе данной аналитической модели построены две аналитические модели СМО АЦП НС в программе AnyLogic, одна из которых обеспечивает

автоматический расчет вероятности отказа заявке на измерение, а вторая дополнительно позволяет реализовать модель СМО, способную учитывать возникновение отказов в ОИН, что может сократить возможности НС по формированию ИАЦП.

2. Анализ программных сред и подходов к реализации имитационного моделирования НС позволил построить имитационную модель АЦП НС с агентным подходом к моделированию в программе AnyLogic. Данная имитационная модель также позволяет вести расчеты при наличии отказавших ОИН в НС. Кроме того, в модели учитывается наличие и расположение исправных и неисправных ОИН в НС, а также расположение сформированных заявок, что позволяет получить более точную ВВХ.

3. Проведен анализ адекватности моделей по критерию Пирсона, который показал, что модели адекватны (отклонение не более 5%). Однако время затрачиваемое на моделирование при помощи аналитической модели СМО АЦП НС на порядок меньше, чем при использовании имитационной модели.

4. Для проектирования АЦП НС определены критерии оптимальности устройств данного класса. Сформулирована целевая функция оптимизации по данным критериям методом частного критерия и разработан алгоритм поисковой оптимизации для получения устройства, удовлетворяющего заданным ВВХ с минимально возможными аппаратными затратами.

5. Предложена методика проектирования нейронной сети, позволяющая определить количество необходимых ОИН и дополнительных связей между ними, для обеспечения заданной отказоустойчивости и минимизации аппаратных затрат на ее реализацию.

4. САМОМАРШРУТИЗИРУЮЩИЙСЯ АЦП НС В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ АГРЕГАТОВ

В качестве подтверждения теоретических выкладок и результатов моделирования, представленных в предыдущих главах, был реализован и внедрен самомаршрутизирующийся АЦП НС в составе системы автоматизации испытаний авиационных агрегатов (САИ АА).

САИ АА реализована в современном аппаратурно-программном базисе с использованием средств компаний Siemens, HP, Analog Device, Octagon System. Система внедрена в опытную эксплуатацию на АО «ОДК-СТАР» г. Перми и прошла приемо-сдаточные испытания, подтвердившие высокие ее функциональные параметры. В приложении Б приведены документы, подтверждающие внедрение.

В настоящей главе приведен анализ результатов внедрения самомаршрутизирующегося АЦП НС, подтверждающий эффективность использования представленной архитектуры для обработки множественных сигналов при проведении испытаний.

4.1. Характеристики объекта автоматизации

В качестве объекта автоматизации используется разработанная ранее информационно-управляющая система (ИУС) САИ АА, которая внедрена на специальных стендах для испытаний и отладки топливно-регулирующей аппаратуры. К данной ИУС предъявляются следующие требования:

1. Большое количество измеряемых сигналов – 30.
2. Широкий выбор типа измеряемых сигналов: аналоговые, частотные, цифровые.
3. Высокая интенсивность измеряемых сигналов с большой вариативностью для различных источников.
4. Случайность моментов поступления измеряемого сигнала в ИУС.
5. Измерения проводятся в режиме «реального времени».
6. Повышенные требования к надежности и достоверности измерений.
7. Функционирование в зоне флуктуационных промышленных помех.

Существующая ИУС реализована в виде многоуровневой адаптивной информационно-управляющей системы [92]. Адаптивная ИУС предназначена для сбора, обработки, индикации

и хранения текущего состояния агрегата в условиях проведения испытания. Также ИУС позволяет выдавать управляющие воздействия при проведении регулировочных, контрольно-сдаточных, длительных и комплексных испытаний. Основной целью при модернизации ИУС является повышение эффективности проведения испытаний, а также сокращение затрат и уменьшение вероятности обработки входного сигнала при их проведении.

Структура испытательного стенда принадлежит к иерархическому сетевому типу (Рисунок 4.1) [93] и включает следующие блоки:

- рабочая станция (РС) на базе промышленного компьютера;
- монитор (М);
- принтер (Пр);
- источники бесперебойного питания;
- локальная промышленная сеть Profibus;
- набор цифровых индикаторов (ЦИ);
- информационно-управляющие контроллеры (K_1, K_2) типа S7-200 фирмы Siemens;
- измерительные устройства (ИУ);
- многопоточный адаптивный измерительный канал (МАИК);
- преобразующие устройства (ПУ);
- датчики (Д) – 30 ед.;
- исполнительные механизмы (ИМ) – 25 ед.

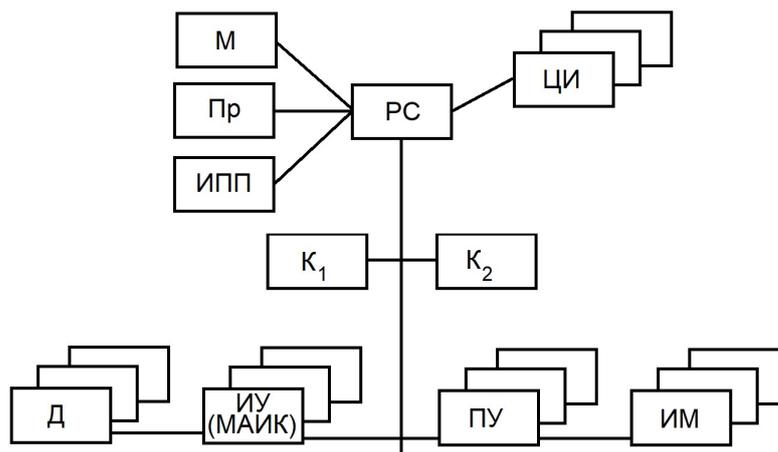


Рисунок 4.1 – Структура ИУС САИ АА

Высший уровень ИУС реализован на промышленном компьютере РС, предназначенном для решения задач обработки информации, организации и передачи данных на сервер сети предприятия (через Ethernet) и другие РС станций (через Profibus), отображения информации

(М, Пр, ЦИ), подготовки и проведения испытаний, формирования величин управляющих сигналов.

Второй уровень реализован на промышленных контроллерах S7-200 фирмы Siemens (K_1 , K_2). Каждый контроллер осуществляет концентрацию и диспетчеризацию информационных потоков, настройку нижнего уровня системы на выполнение конкретных задач испытаний, сбор диагностической информации.

Нижний уровень представляет собой набор ИУ и ПУ, обрабатывающих сигналы датчиков (Д) и исполнительных механизмов (ИМ). ИУ осуществляет измерение и преобразование аналоговых, частотных и дискретных сигналов, в том числе и с помощью МАИК. Архитектура ИУС основана на применении магистральных связей с использованием протокола Profibus. Можно выделить 3 режима в работе данной ИУС [93]:

- Первый режим – режим технологической подготовки испытаний (автоматизированная настройка). В этом режиме вся необходимая информация (типы датчиков и исполнительных механизмов, их тарировочные характеристики, функции преобразования измерительных и преобразующих устройств, параметры локальных регуляторов, параметры моделей управления и т.п.) вводятся исследователем в режиме диалога в РС, где осуществляется формирование нового образа задачи. В дальнейшем РС настраивает K_1 и K_2 на реализацию конкретного испытания, контроллеры в свою очередь, настраивают ИУ и ПУ.

- Второй режим – рабочее функционирование. При индикации исходная измерительная информация поступает от датчиков в виде соответствующих сигналов на входы ИУ. В МАИК производится адаптивное преобразование и предварительная обработка информации. Затем сообщение по протоколу Profibus поступает в контроллер K_1 . Контроллер осуществляет преобразование в физическое значение, дополняет служебной информацией и передает в РС. В РС информация обрабатывается: определяется среднее значение, реализуются косвенные измерения, осуществляется расчет модельных значений, параметров и т.д. Для оперативного наблюдения за ходом испытаний информация в символьной или графической форме поступает на монитор или цифровые индикаторы для оператора. При регистрации заданные параметры в течение определенного времени записываются в файл РС, откуда в дальнейшем, после обработки, выводятся на печать и дисплей или вводятся в информационно-поисковую систему (ИПС) сервера предприятия через локальную сеть Ethernet. Управление ходом испытания осуществляется с дисплея РС, для чего управляющие директивы вводятся в K_1 и K_2 , которые, в свою очередь, осуществляют реконфигурацию системы и настройку программного обеспечения. Из РС можно задать: этап испытания, число измеряемых и регистрируемых параметров, интервалы индикации и регистрации, продолжительность регистрации, форму и тип отображаемых данных и прочую служебную информацию.

- Третий режим – режим обработки информации. В этом режиме ранее зарегистрированная информация может быть получена в табличной, графической и текстовой форме. В дальнейшем информация может быть отпечатана на рабочем месте оператора или же передана в смежные системы (через Profibus) и в ИПС сервера предприятия (через Ethernet).

В процессе эксплуатации данных стендов был собран большой массив данных относительно поведения авиационных агрегатов во время проведения испытаний. За счет применения МАИК были достигнуты следующие результаты [94]:

- снижено количество регистрируемой информации без существенной потери точности;
- минимальный уровень относительной погрешности 0,1-2%, зависит от конкретного значения измеряемого параметра и величины его производной;
- многоканальность проводимых измерений позволила эффективно проводить измерения всех сигналов, используя меньший объем аппаратуры.

Существенным недостатком применяемого адаптивного АЦП ПДА для реализации МАИК является использование централизованной системы управления, которая варьирует количество измеряемых разрядов и связанное с ним время проведения измерения за счет подключения соответствующего количества нейронов к общей шине данных. Это снижает надежность всей ИУС как за счет отказа самой системы управления АЦП, так и за счет возникновения константной ошибки на конкретной шине данных.

Для устранения этих недостатков было предложено использовать самомаршрутизирующийся АЦП на основе однослойной нейронной сети и местное фрагментарное устройство управления, разнесенное по отдельным ОИН, который позволяет повысить надежность функционирования и обрабатывать заданное количество входных параметров, при этом используя разработанные методы самомаршрутизации для исключения влияния неисправных нейронов.

4.2. Разработка самомаршрутизирующегося 16-ти канального АЦП НС

Структура АЦП (Рисунок 4.2) включает в себя множество входных каналов X , в каждом из которых компаратор (К), анализатор активности канала (АА), и масштабирующий усилитель (МУ). Измерение проводится методом поразрядного взвешивания, при этом количество разрядов определяется количеством подключенных к каналу нейронов (Н) из измерительной нейронной сети (НС), содержащей N нейронов [95]. Количество измерительных нейронов, подключенных к каналу, задается при помощи устройства динамического приоритета (УДП) и

измерения было обусловлено количеством входных сигналов в исходном АЦП НС, выраженных в виде аналогового напряжения и требующих измерения. Другие сигналы, такие как ток или частота, не рассматривались в данном исследовании, хотя в общем случае эти сигналы можно также привести к напряжению и проводить измерение, используя представленную структуру АЦП НС для других видов входных аналоговых сигналов. Кроме того, благодаря высокому быстродействию АЦП НС с помощью 16 каналов можно проводить измерение большего количества аналоговых сигналов за счет уплотнения входного потока сигналов, что будет показано ниже.

Для реализации АЦП НС потребовалось разделить аналоговую и цифровую части на разные микросхемы, так как СБИС, содержащую в себе и те, и другие элементы в нужном количестве, в настоящее время промышленностью не производится. Поэтому цифровая часть схемы была реализована в рамках ПЛИС фирмы Intel. Для аналоговой части была изготовлена отдельная печатная плата, приведенная в приложении В, на которой была реализована аналоговая часть преобразователя. На рисунке 4.4 изображена отладочная плата для проверки аналоговой части.



Рисунок 4.4 – Отладочная плата для самонастраивающегося АЦП НС

Используя методику, представленную в п. 3.5 были определены основные параметры самонастраивающегося АЦП НС:

Этап 1: Задание начальных управляемых параметров для моделирования НС

1. Количество входных измеряемых сигналов, определено исходя из структуры МАИК и требований заказчика $n = 16$;

2. Максимально возможная разрядность ИАЦП, была определена заказчиком, исходя из предъявляемых требований к максимальной точности проводимых измерений и с учетом структуры МФУУ (см. п. 2.4.2) $q_{\max} = 19$;

3. Минимально возможная разрядность с учетом кодирования требуемого количества разрядов для ИАЦП в виде двоичного числа в МФУУ (см. п. 2.4.2) $q_{\min} = 4$;

4. Интенсивность потока входящих заявок каждого входного сигнала варьируется от 50 до 1500 Гц в зависимости от режима работы САИ АА, определяется типами датчиков используемых в ИУС, а также частотой их опроса в зависимости от этапа испытаний. Для моделирования было использовано максимально возможное значение, общая интенсивность входного потока заявок для СМО (см. п. 3.2) $\lambda_{\text{вх}} = 24\text{кГц}$;

5. Интенсивность обработки входящих заявок зависит от типа используемой СБИС, а конкретно от скорости срабатывания транзистора в ключевом элементе ОИН (см. п. 2.4.1). Использование современных ПЛИС фирмы Intel позволяет установить базовую частоту тактового генератора до 300 МГц для среднего ценового сегмента. С учетом времени, требуемого на формирование ИАЦП (2.7) и на само преобразование (2.5), для моделирования было использовано максимально возможное время обслуживания заявки $\mu_{\text{обр}} = 1,5\text{МГц}$;

6. Интенсивность возникновения отказов в ОИН в процессе эксплуатации зависит от времени наработки на отказ транзисторов в СБИС, с учетом их количества для реализации структуры ОИН для сети с выбранными параметрами составляет $\lambda_{\text{ОИН}} = 10^{-8} 1/\text{с}$.

7. Время наработки на отказ проектируемого устройства определяется заказчиком исходя из условия, что время фиксируется в момент первого отказа устройством в измерении поступающего сигнала. При проектировании самомаршрутизирующегося АЦП НС для САИ АА было выбрано время поверки испытательных стендов, а именно один год $T = 3.2 * 10^7 \text{с}$.

Этап 2: Задание начальной точки управляемых параметров для моделирования ($N_0; s_0$)

С учетом большой разницы между интенсивностями входящих заявок и их обработки вероятность одновременного обслуживания всех заявок с максимальной разрядностью стремится к нулю, поэтому в качестве начальной точки для моделирования необходимо взять количество ОИН заведомо меньшее. Для того чтобы задать начальную точку, определим количество ОИН в случае одновременного измерения всех входных сигналов с минимальной разрядностью при условии полностью исправной сети:

$$N_0 = nq_{\min} = 16 * 4 = 64$$

Также заданное небольшое время наработки на отказ, а также низкая интенсивность возникновения отказов в ОИН позволяет в качестве начальной точки для моделирования использовать сеть, не содержащую дополнительных связей.

$$s_0 = 0$$

Определение начальных параметров для моделирования также позволяет оценить аппаратные затраты, для выбора в первой итерации максимального объема аппаратных ресурсов для реализации АЦП НС с учетом моделируемых параметров. Сперва получаем минимально необходимую мощность СБИС для реализации структуры с начальными параметрами:

$$Q_{\min} = N_0 C_1 (0,23s_0 + 0,08n + 0,03 \log_2 q_{\max} + 1) = 118529$$

Затем увеличиваем в несколько раз, обращая при этом внимание на существующие в наличии СБИС и их мощность. При разработке АЦП НС для МАИК выбор был сделан в пользу доступных Intel Cyclone V 5CGXC7, с количеством логических элементов

$$Q_{\max} = 225\,920$$

Этапы 3-6: Моделирование АЦП НС с помощью аналитической модели СМО для проверки ограничения (3.4)

Вводим все полученные данные в разработанную аналитическую модель СМО (см. п. 3.2.2), а также задаем диапазон изменяемых параметров N и s , и шаг моделирования. Результаты моделирования, которые приведены в таблице 4.1, показывают, что добавление дополнительных ОИН при таком соотношении интенсивностей значительно эффективнее, чем наращивание дополнительных связей между ними. Часть значений для пар N и s имеют прочерк, потому что не удовлетворяют ограничению (3.5). В таблице выделены значения, удовлетворяющие условию (3.4)

Таблица 4.1 – Результаты моделирования самомаршрутизирующегося АЦП НС с помощью аналитической модели СМО в AnyLogic

s	N								
	64	75	85	95	105	115	125	135	142
0	0,9258	0,8526	0,6532	0,4582	0,1155	0,0052	0	0	0
1	0,9186	0,8149	0,5342	0,3196	0,0556	0,0011	0	–	–
2	0,9142	0,7756	0,4285	0,2143	0,0259	0	0	–	–
3	0,9114	0,7532	0,3359	0,1568	0,0101	0	–	–	–
4	0,9082	0,7387	0,2594	0,1156	0,0045	–	–	–	–
5	0,9056	0,7264	0,2195	0,1058	0,0038	–	–	–	–

Этап 7: Моделирование НС с помощью имитационной модели для всех пар значений $(N_j; s_k)$, которые удовлетворяли условию (3.4) при использовании аналитической модели на предыдущих этапах моделирования (3-6) при данных параметрах НС

Используем полученные на предыдущих этапах параметры для настройки имитационной модели, чтобы уточнить значения вероятностей при тех же параметрах, но с учетом процесса формирования ИАЦП, и их взаимного расположения (см. п. 3.3). Так как имитационное моделирование занимает значительно больше времени, то работа проводится только с параметрами, удовлетворившими условию (3.4) на предыдущем этапе. Полученные результаты, которые приведены в таблице 4.2, показывают, что вероятность меняется в сторону увеличения практически для всех пар N и s , что говорит о существенном влиянии расположении сформированных ИАЦП на формирование последующих, а значит «плотность» их размещения в сети должна быть как можно выше.

Таблица 4.2 – Результаты моделирования самомаршрутизирующегося АЦП НС с помощью имитационной модели СМО в AnyLogic

s	N							
	76	85	95	105	115	125	135	142
0	–	–	–	–	0,0104	0,0016	0	0
1	–	–	–	–	0,0051	0,0005	–	–
2	–	–	–	–	0,0023	0	–	–
3	–	–	–	–	0,0013	–	–	–
4	–	–	–	0,0126	–	–	–	–
5	–	–	–	0,0103	–	–	–	–

Этап 8: Расчет целевой функции (3.3) для всех значений $(N_j; s_k)$, которые подтвердили выполнение условия (3.4) в пункте 7, проверка условия (3.5)

После определения параметров самомаршрутизирующегося АЦП НС, при которых будут получены удовлетворительные ВВХ, проводим расчет аппаратных затрат для всех оставшихся пар N и s . Полученные результаты, представленные в таблице 4.3, позволяют сделать вывод о том, что для данной конфигурации АЦП НС добавление дополнительных ОИН более затратно, чем добавление дополнительной связи между ОИН.

Таблица 4.3 – Расчет аппаратурных затрат самомаршрутизирующегося АЦП НС

s	N							
	76	85	95	105	115	125	135	142
0	–	–	–	–	–	199950	215946	227143
1	–	–	–	–	196995	214125	–	–
2	–	–	–	–	210714	229037	–	–
3	–	–	–	–	224710	–	–	–
4	–	–	–	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–	–	–	–

Этап 9: Нахождение оптимального значения $(N_{opt}; s_{opt})$ по полученным значениям функции (3.3) исходя из условия минимальных аппаратурных затрат

По таблице 4.3 ищем значение удовлетворяющее условию (3.3) – минимально возможные аппаратурные затраты на реализацию самомаршрутизирующегося АЦП НС для МАИК САИ АА. Выделенное значение соответствует паре $N_{opt} = 115$ и $s_{opt} = 1$. При этом полученное значение в 197 тысяч логических вентилях возможно разместить в выбранной СБИС, а запас в 10 тысяч позволяет оставить возможность реализовать дополнительный функционал при необходимости. Для проверки полученных расчетов, на основе макета АЦП НС (см. п. 2.6.2) произведена компиляция проекта в Intel Quartus, которая показала возможность размещения рассчитанной структуры в ПЛИС Intel Cyclone V 5CGXC7.

Испытания спроектированного самомаршрутизирующегося АЦП НС в САИ АА показали, что с его помощью возможно проводить параллельные измерения входных сигналов с различной точностью измерения, которая задается программно через УДП. Для определения погрешности измерения были проведены тестовые запуски при подключении в качестве входных сигналов заранее известных величин с различным номиналом (Таблицы 4.4 – 4.6). При этом тесты были составлены в 3 направлениях: определение погрешности измерения при изменении номинала сигнала, при изменении частоты измерения и при изменении точности измерения.

В таблице 4.4 представлены результаты проведения испытаний при различных номиналах измеряемого напряжения (диапазон от 0 до 10 В, ограничен эталонным напряжением заданным для матрицы R-2R), при фиксированной частоте сигнала 150 Гц, и формировании ИАЦП на 10 разрядов. Погрешность измерения при этом не превысила 0,1%, что является хорошим результатом, а также выявлена зависимость увеличения погрешности с

уменьшением номинала измеряемого сигнала, это связано с тем, что в случае малой амплитуды сигнала, старшие разряды ИАЦП не содержат полезной информации, а передают сигнал логического «0». Для устранения этого эффекта предлагается в дальнейшем исследовать возможность реализации внутри НС различных эталонных напряжений для матрицы R-2R, либо организации во входных нейронах дополнительных усилителей. Это позволит увеличить точность преобразования за счет полноценного использования старших разрядов, а также сократить время на преобразование, за счет уменьшения разрядности ИАЦП, требуемой для той же точности.

Таблица 4.4 – Результаты измерения с помощью самомаршрутизирующегося АЦП НС в зависимости от номинала измеряемого напряжения

№	$U_{ном}, В$	$f_{ном}, Гц$	q	$U_{изм}, В$	$\varepsilon, \%$
1	0,01	150	10	0,01001	0,1
2	0,5	150	10	0,49991	0,018
3	1	150	10	1,00007	0,007
4	1,5	150	10	1,50012	0,008
5	2,5	150	10	2,49993	0,0028
6	5	150	10	4,99991	0,0018
7	7,5	150	10	7,50005	0,0007
8	10	150	10	9,99999	0,0001

Таблица 4.5 – Результаты измерения с помощью самомаршрутизирующегося АЦП НС в зависимости от частоты измеряемого напряжения

№	$U_{ном}, В$	$f_{ном}, Гц$	q	$U_{изм}, В$	$\varepsilon, \%$
1	5	50	10	4,99992	0,0016
2	5	75	10	4,99991	0,0018
3	5	100	10	4,99993	0,0014
4	5	150	10	4,99991	0,0018
5	5	250	10	4,99992	0,0016
6	5	450	10	4,99991	0,0018
7	5	950	10	4,99992	0,0016
8	5	1500	10	4,99991	0,0018

В таблице 4.5 представлены результаты проведения испытаний для сигналов с различной частотой. Амплитуда напряжения была задана на уровне 5 В, количество разрядов ИАЦП – 10. Диапазон частот измеряемого сигнала от 50 до 1500 Гц, в соответствии с частотными характеристиками датчиков, использующихся в САИ АА. Анализ результатов показывает, что частота измеряемых сигналов из заданного диапазона не влияет на точность измерения, это связано в первую очередь со скоростью проведения измерения, которая в результате применения СБИС, достигает порядка 1 МГц, что позволяет измерять и более высокочастотные сигналы.

В таблице 4.6 представлены результаты проведения испытаний при формировании ИАЦП с разной величиной разрядности от 4 до 18 разрядов. Измерение проводилось для номинального сигнала 5 В с частотой 150 Гц. Диапазон разрядностей выбран исходя из минимальной и максимальной разрядности ИАЦП, которые могут быть сформированы в спроектированном самомаршрутизирующемся АЦП НС. Как и следовало ожидать, увеличение количества разрядов в ИАЦП приводит к значительному снижению погрешности, вплоть до пяти порядков. Но стоит отметить, что рост количества разрядов приводит к увеличению времени измерения, и если на предыдущем этапе мы отметили, что для имеющихся в САИ АА датчиков частота измерения сигнала не влияет на погрешность в силу высокой скорости самого измерения на базе СБИС, то в данном случае количество разрядов влияет на занятость отдельных ОИН в ИАЦП. Таким образом, для АЦП НС растет вероятность попадания в состояние отказа поступающей заявке, когда ресурсов сети не хватит для формирования очередного ИАЦП, особенно в случае отказа части ОИН. Поэтому для операторов, настраивающих испытательный стенд, даны рекомендации оценивать требуемую точность измерения для различных датчиков.

Таблица 4.6 – Результаты измерения с помощью самомаршрутизирующегося АЦП НС в зависимости от количества разрядов в ИАЦП

№	$U_{ном}, В$	$f_{ном}, Гц$	q	$U_{изм}, В$	$\varepsilon, \%$
1	5	150	8	4,9961	0,078
2	5	150	10	4,99991	0,0018
3	5	150	12	4,99995	0,001
4	5	150	14	4,99998	0,0004
5	5	150	16	4,999998	0,00004
6	5	150	18	4,999999	0,00002

С целью экспериментальной проверки возможностей самомаршрутизирующегося АЦП НС работать в условиях максимальной нагрузки с частично неисправной сетью, в структуру ОИН был добавлен дополнительный блок, который принудительно по команде оператора может перевести ОИН в неисправное состояние. Это позволило смоделировать поведение устройства на длительном промежутке времени. В качестве оцениваемого параметра был выбран отклик сети на входящий сигнал, и оценивалась вероятность формирования ИАЦП с заданными параметрами для проведения измерения. При этом моделирование производилось с разной нагрузкой по входным сигналам, чтобы оценить этот параметр использовалась средняя оценка всех заявок в системе к максимально возможной:

$$W = \frac{\sum_{i=0}^n q_i \lambda_i}{n q_{\max} \lambda_{\max}} * 100\%$$

где W – относительная нагрузка на АЦП НС, q_i – разрядность формируемого ИАЦП для i -го входного сигнала, λ_i – интенсивность измерения i -го входного сигнала, n – количество входных сигналов, q_{\max} – максимальная разрядность ИАЦП, λ_{\max} – максимальная интенсивность измерения входных сигналов.

Таблица 4.7 – Вероятность обработки всех входных сигналов (P , в процентах) самомаршрутизирующегося АЦП НС в зависимости от относительной нагрузки на сеть (W) и количества отказавших ОИН (H)

H , шт.	W , %							
	20	40	50	60	70	80	90	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	97,6	95,2	93,7	91,4	88,4	84,2
20	100	98,5	94,6	89,6	86,6	83,5	77,9	72,6
30	99,1	96,7	89,5	84,5	79,5	75,4	69,9	62,5
40	97,5	92,6	85,2	79,6	73,9	68,6	62,5	54,9
50	92,1	87,5	81,5	76,4	70,6	65,4	58,6	51,2

В итоге были получены вероятности обработки всех входных сигналов самомаршрутизирующегося АЦП НС (таблица 4.7 и рисунок 4.5), которые демонстрируют возможность сети образовать ИАЦП при разной нагрузке сети W и разном количестве неисправных ОИН H . Для снижения влияния положения отказавших ОИН в сети, была проведена серия экспериментов для каждого состояния сети, при этом номера отказавших ОИН

задавались случайным образом, а затем результаты были усреднены. Анализ полученных зависимостей показывает высокую надежность спроектированного самомаршрутизирующегося АЦП НС, так как даже при отказе половины сети (50 из 115 ОИН) измерение продолжается и при невысокой нагрузке на сеть с большой вероятностью будет сформирован ИАЦП и получен результат (вероятность обработки всех входных сигналов более 90% при снижении интенсивности заявок на измерение до 20% от максимально возможной).

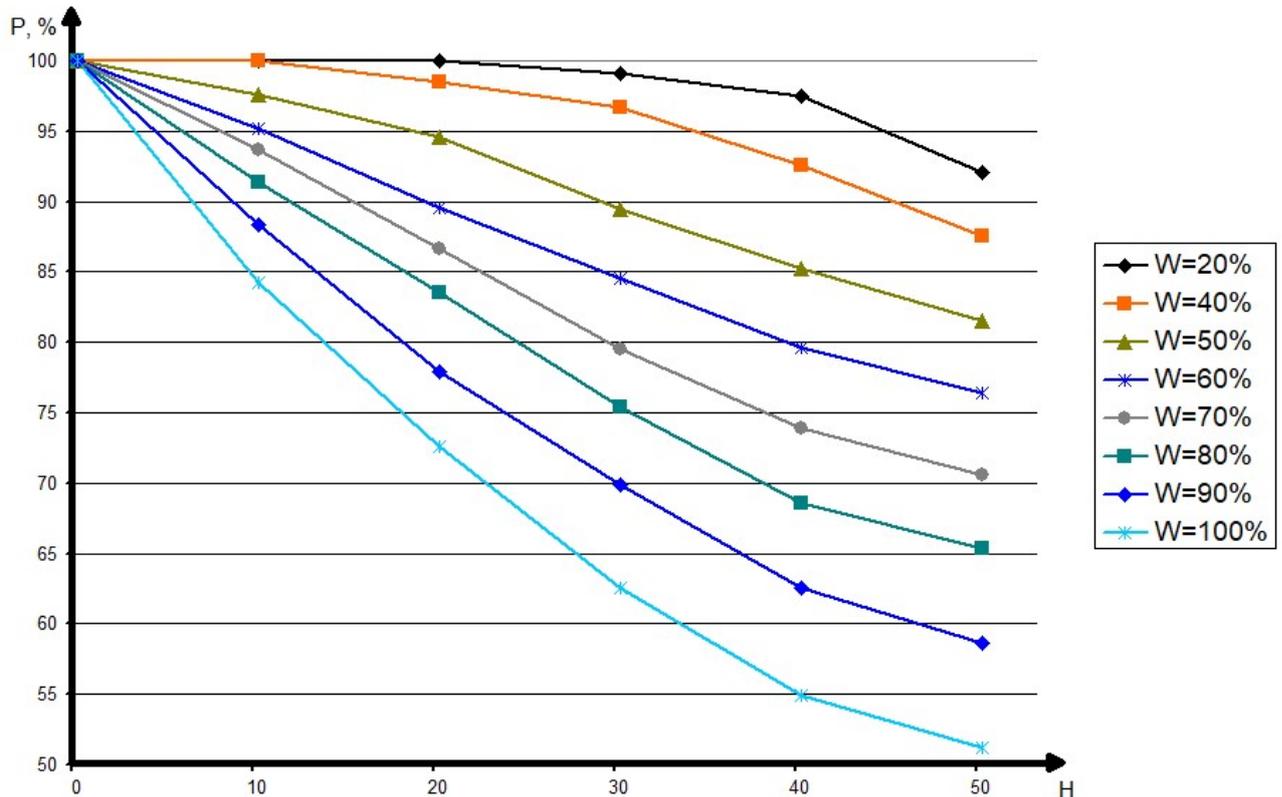


Рисунок 4.5 – Графики вероятности обработки всех входных сигналов (P) самомаршрутизирующегося АЦП НС в зависимости от нагрузки на АЦП НС (W) и количества отказавших ОИН (H)

Проведенные испытания показали, что самомаршрутизирующийся АЦП НС позволяет осуществлять параллельные измерения по 16 входным каналам с требуемой точностью (погрешность не превышает 0,1%), а также сохраняется возможность измерения в течение длительного времени. Необходимо оценить эффективность применения самомаршрутизирующегося АЦП НС в САИ АА по сравнению с предыдущим техническим решением.

4.3. Анализ результатов модернизации САИ АА при использовании самомаршрутизирующегося АЦП НС

Одним из наиболее приоритетных результатов модернизации является возможность значительно сократить аппаратные затраты на реализацию АЦП НС, для анализа эффективности этого сокращения при разных параметрах АЦП НС были смоделированы варианты для различных ансамблей входных сигналов. При моделировании ключевым параметром стала интенсивность входящих заявок, отражающая в первую очередь частоту опроса датчиков, что позволяет улучшать качество управления в ИУС САИ АА.

Таблица 4.8 – Аппаратурные затраты на адаптивный АЦП ПДА и самомаршрутизирующийся АЦП НС (тысяч логических вентилях 2И-НЕ)

$\lambda_{\text{вх}}, \text{кГц}$	Аппаратурные затраты		Относительное уменьшение, %
	адаптивный АЦП ПДА	самомаршрутизирующийся АЦП НС	
24	232,3	197	17,9
48	272,6	227,2	20,2
96	322,5	264,1	22,1
192	380,4	305,5	24,5
384	445,8	348,4	28,1

Результаты, приведенные в таблице 4.8 и на рисунке 4.6, даны по сравнению с применяемым на текущий момент адаптивным АЦП ПДА. Отмечено уменьшение аппаратных затрат на 20-30%, при этом увеличение интенсивности входных заявок на измерение ведет к неравномерному их росту. В первую очередь этот рост связан с дополнительными ИЭ, требуемыми для обработки растущего количества запросов в единицу времени. Кроме того, для адаптивного АЦП ПДА рост аппаратных затрат связан также с увеличением коммутационной матрицы в УУ, которое к тому же необходимо значительно изменять для каждой конфигурации нейронной сети [96]. Для самомаршрутизирующегося АЦП НС рост аппаратных затрат в основном связан именно с увеличением числа ОИН, которые при этом позволяют не менять структуру внутренней части сети. Поэтому в более мощных МАИК предпочтительнее использовать именно самомаршрутизирующийся АЦП НС.

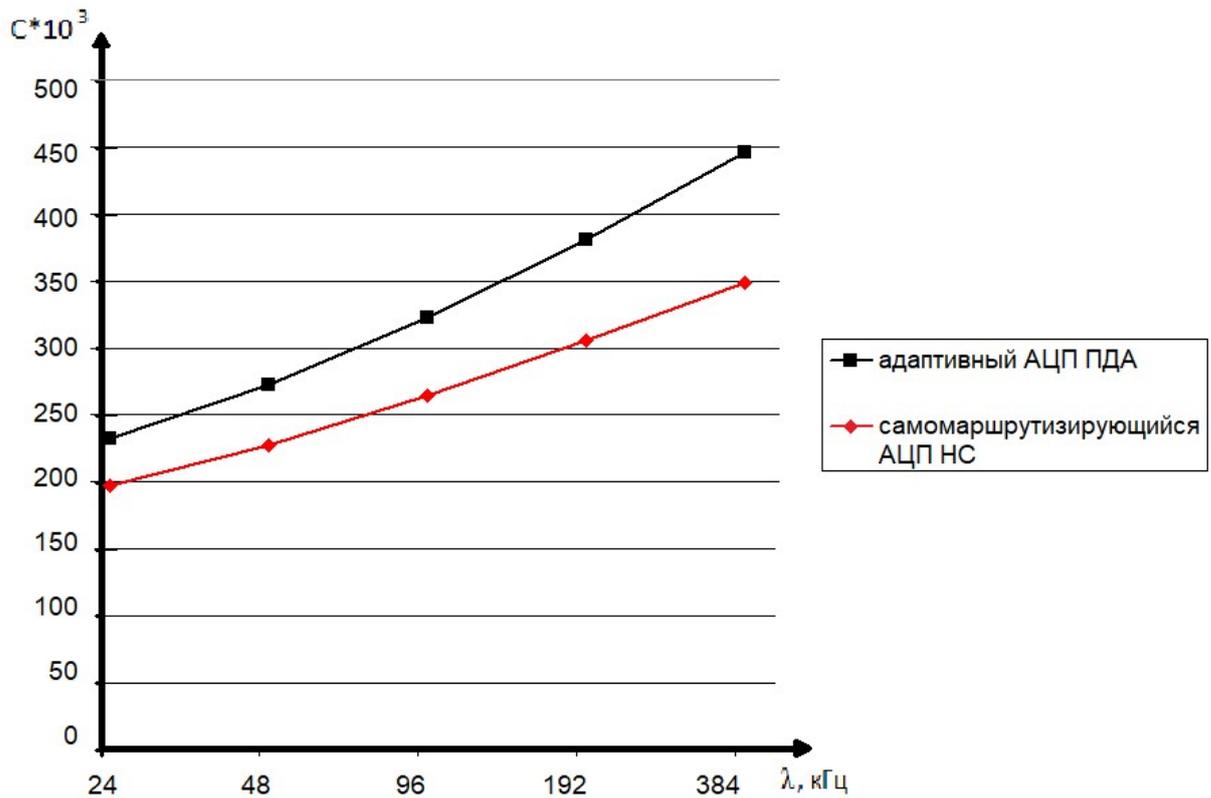


Рисунок 4.6 – Графики зависимости аппаратных затрат на реализацию адаптивного АЦП ПДА и самомаршрутизирующегося АЦП НС с МФУУ от интенсивности потока входных заявок

Для оценки вероятности обработки всех сигналов при возникновении отказа в адаптивном АЦП ПДА была смоделирована ситуация возникновения замыкания одной из шин, используемых для связи между ИЭ в сети. Для этого УУ (рисунок 4.2) было настроено таким образом, чтобы по шине управления в ИЭ поступал сигнал отключения не зависимо от поступления заявок на измерение сигнала из УДП, при этом не учитывалась возможность возникновения отказа самой шины управления. Как было сказано выше, это является основным недостатком ЦУУ, отказ в шине управления или схемах УУ приводит к отказу всего устройства в целом, поэтому вероятность обработки всех сигналов становится равной нулю. Для выбранного сравнения допустим, что надежность УУ и шины управления на порядок выше, чем остальных шин между ИЭ, тогда отключение одной из шин ИЭ будет уменьшать ресурс НС аналогично возникновению отказа в ОИН для самомаршрутизирующегося АЦП НС. Результаты сравнения вероятности обработки всех сигналов при возникновении отказов представлены в таблице 4.9 и на рисунке 4.7. Полученные графики ярко иллюстрируют эффективность применения МФУУ и самомаршрутизации сигналов, позволяя сохранять способность АЦП проводить измерения даже при отказе значительного количества ОИН.

Таблица 4.9 – Вероятности обработки всех входных сигналов для адаптивного АЦП ПДА и самомаршрутизирующегося АЦП НС в зависимости от количества отказавших ИЭ или ОИН

Количество отказавших ИЭ/ОИН, шт.	Вероятность обработки всех входных сигналов, %		Относительное увеличение, %
	адаптивный АЦП ПДА	самомаршрутизирующийся АЦП НС	
0	100	100	0
1	99,1	100	0,9
2	98,2	100	1,8
3	96,3	99,4	3,2
4	92,3	98,5	6,7
5	85,4	97,3	13,9
6	75,9	95,8	26,2
7	64,5	93,2	44,5
8	50,6	88,6	75,1

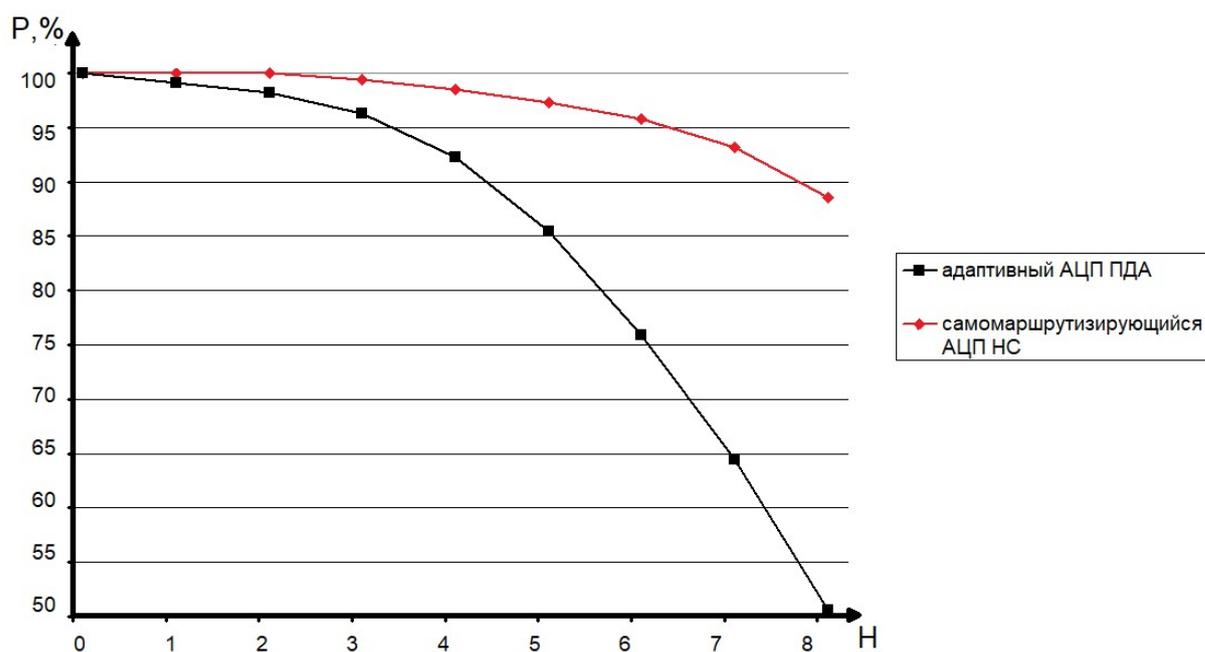


Рисунок 4.7 – Графики вероятности обработки всех входных сигналов для адаптивного АЦП ПДА и самомаршрутизирующегося АЦП НС в зависимости от количества отказавших ИЭ или ОИН

Дополнительная возможность, которая возникает при использовании самомаршрутизирующегося АЦП НС, связана с увеличением интенсивности потока входящих заявок и позволяет использовать ресурс НС для измерения одного и того же сигнала

параллельно с целью увеличения надежности системы за счет мажоритирования отсчетов. Для этого необходимо использовать уровень ИУС, где собирается и обрабатывается информация о состоянии стенда (контроллер K_1 на рисунке 4.1), которому требуется сообщить о дополнительной проверке отсчетов по определенным измерительным каналам в АЦП НС, это позволит осуществлять дополнительный контроль особо важных или ключевых параметров САИ АА. При этом структура самомаршрутизирующегося АЦП НС практически не изменяется, так как для реализации потребуется лишь добавить два дополнительных компаратора, включенных параллельно к одному из сигналов, а также два входных нейрона, которые будут передавать полученные значения в сеть, что вызывает незначительный рост аппаратных затрат (см. п. 2.6.3). Для подтверждения работоспособности этого подхода один из входных сигналов был замкнут на три входа спроектированного АЦП НС, а K_1 был настроен на сбор и отправку информации по этим измерительным каналам в виде общего пакета данных. Дальнейшая обработка на РС позволила получить таблицу 4.10, в которой отражена вероятность получения одинаковых отсчетов на всех трех ИАЦП в один момент времени с равной точностью в зависимости от количества измеряемых разрядов.

Таблица 4.10 – Вероятность получения одинаковых отсчетов и относительная погрешность между двумя отсчетами

количество разрядов в ИАЦП q	Вероятность получения равных отсчетов в ИАЦП, %	Относительное отклонение между двумя отсчетами, %
8	98,9	0,085
10	96,3	0,0021
12	91,8	0,0005
14	87,6	0,0001

Относительно высокая вероятность получить при мажоритировании разные отсчеты по разным измерительным каналам одного и того же сигнала объясняется несовершенством элементной базы, решающую роль играет номинал сопротивлений в матрице R-2R, а также сопротивление ключевых элементов. Поэтому с ростом количества разрядов увеличивается риск ошибки в младших разрядах преобразователя, так как их «вес» становится меньше и чувствительнее к отклонению от линейной характеристики, что также можно отследить по уменьшению относительного отклонения между отсчетами (Таблица 4.9).

В дальнейшем способ мажоритирования сигналов возможно использовать для системы самодиагностики ОИН за счет того, что скорость измерения позволяет в случае необходимости выделять некоторый ресурс сети для дополнительного измерения в сформированных ИАЦП с

возможностью определить и проверить место возникновения неисправности в том числе и в линиях связи между ОИН, а не только во внутренних цепях, что было представлено в п. 2.4.3.

Также для более эффективного использования методов самомаршрутизации требуется разработать единую СБИС для объединения цифровой и аналоговой частей АЦП НС. Кроме того, линии связи между ПЛИС и аналоговыми платами ограничивают мощность АЦП НС в зависимости от доступного количества входов/выходов ПЛИС и сами по себе являются наиболее вероятным местом возникновения отказа.

4.4. Выводы

В рамках разработки 16-ти канального самомаршрутизирующегося АЦП НС для САИ АА и его экспериментального исследования были получены следующие результаты:

1. Разработан и внедрен самомаршрутизирующийся 16-ти канальный АЦП НС в САИ АА. Опытный образец подтвердил обоснованность, правильность выбора и работоспособность, представленных в предыдущих главах методов самомаршрутизации и структурных блоков для ОИН в однослойной сети и имеет следующие экспериментально подтвержденные характеристики:

- количество измеряемых сигналов – 16,
- разрядность преобразователей при измерении лежит в диапазоне от 4 до 19,
- погрешность измерения не хуже 0,1%,
- время наработки на отказ – не менее 8000 час (экспертная оценка).

2. Применение методики проектирования самомаршрутизирующихся АЦП НС позволило определить оптимальные параметры для его реализации методом поисковой однокритериальной оптимизации с целевой функцией минимальных аппаратных затрат для различных ансамблей входных сигналов.

3. Сравнительный анализ самомаршрутизирующегося АЦП НС с адаптивным АЦП ПДА показал, что погрешность измерения практически неизменна, но значительно выросла отказоустойчивость, за счет дополнительных связей АЦП НС сохраняет высокую вероятность обработки всех входных сигналов, когда возникают отказы в части ОИН. Также удалось снизить аппаратные затраты на систему управления на 20-30%, что являлось одной из основных целей исследования.

4. Использование СБИС для реализации самомаршрутизирующегося АЦП НС позволяет увеличивать интенсивность потока входных заявок на измерение, что можно использовать для

мажоритирования при измерении критически важных сигналов либо увеличения частоты опроса датчиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 аппаратурных 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 аппаратурных 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельман, М.М. Аналого-цифровые преобразователи для информационно-измерительных систем. / М.М. Гельман. – М.: Изд-во стандарты, 1989. – 320 с.
2. Ракитин, Д. А. Обоснование выбора телекоммуникационных технологий для умного дома / Д. А. Ракитин, А. А. Железнов, В. П. Коцубинский // Молодёжь и современные информационные технологии: Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 09–13 ноября 2015 года / Под редакцией Т. Е. Мамоновой. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2016. – С. 20-21.
3. Denton, T. Automobile Electrical and Electronic Systems (Fifth edition). // Routledge. – 2017. – 700 p.
4. P. Daponte, L. De Vito, G. Mazzilli, F. Picariello, S. Rapuano and M. Riccio, Metrology for drone and drone for metrology: Measurement systems on small civilian drones // 2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace). – 2015. – P. 306-311.
5. Кальченко, С.Б. Динамическая архитектура и модульные вычислительные системы на БИС / В.А. Мельников, С.Б. Кальченко, В.С. Харченко // Зарубежная радиоэлектроника.– 1990. – № 1. – С. 63-84.
6. Матушкин Н.Н., Южаков А.А. Измерительные преобразователи на основе потоковой динамической архитектуры / Н.Н. Матушкин, А.А. Южаков // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1994. – №1. – С. 16-21.
7. Байдаров А.А. Адаптивный измеритель параметров гармонических сигналов как средство диагностики и анализа / А.А. Байдаров // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – №12. – т. 8. – С. 112-115.
8. Мкртчян С.О. Нейроны и нейронные сети (Введение в теорию нейронов и нейронных сетей) / С.О. Мкртчян. – М.: Энергия, 1971. – 232 с.
9. Южаков А.А. Интеллектуальные измерительные преобразователи на основе нейронных технологий / А.А. Южаков. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1993. – 280 с.
10. Локтюхин, В. Н. Принципы применения технологии искусственных нейронных сетей для проектирования преобразователей частотно-временных параметров сигналов в код / В. Н. Локтюхин, С. В. Челебаев // Датчики и системы. – 2006. – № 2. – С. 43-56.
11. Chelebaev, S. V. Application of simulation modeling for the analysis of neurons of converters of time-and-frequency parameters of signals in a digital code / S. V. Chelebaev, O. V. Melnik, Y. A. Chelebaeva // 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO

- 2018 - Including ECYPS 2018, Proceedings : 7, Budva, 10–14 июня 2018 года. – Budva, 2018. – P. 1-4.
12. Локтюхин, В. Н. Нейросетевые аналого-цифровые преобразователи с каскадным соединением гибридных нейронов / В. Н. Локтюхин, С. В. Челебаев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2008. – № 3-4. – С. 12-20.
 13. P. Daponte, D. Grimaldi. Artificial neural networks in measurements // Measurement, Volume 23. Issue 2. – 1998. – P. 93-115.
 14. Pasquale Daponte, Linus Michaeli. ADC & DAC modelling and testing // Measurement, Volume 40. Issue 5. – 2007. – P. 459-462.
 15. Матушкин Н.Н. Анализ и синтез структур адаптивных преобразователей / Н.Н. Матушкин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 1997. – 47 с.
 16. Матушкин, Н.Н. Измерительные системы на основе нейронных технологий / Н.Н. Матушкин, А.А. Южаков // Кибернетика и вуз: межвузов. сб. науч. тр. Томск: Томск, гос. ун-т. – 1994. – Вып. 28. – С. 92-97.
 17. Смирнов, Д. Н. Анализ измерения нейронного АЦП в кодах "золотой пропорции" / Д. Н. Смирнов // Электросвязь. – 2007. – № 8. – С. 20-22.
 18. Никамин, В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи / В.А. Никамин. – М.: КОРОНА принт, – 2016. – 224 с.
 19. Walt Kester, The Data Conversion Handbook // Elsevier/Newnes, 2005. – 953 p.
 20. Макаренко, В.Б. Быстродействующие сигма-дельта-АЦП для систем связи / В.Б. Макаренко // Электронные компоненты и системы. – 2010. – № 10. – С. 25-30
 21. Гуменюк, А. Конвейерный АЦП компании Миландр / А. Гуменюк // Компоненты и технологии. – 2014. – № 5(154). – С. 66-69.
 22. Rudy J. van de Plassche, CMOS Integrated Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters // The Springer International Series in Engineering and Computer Science, 2nd ed. 2003. – 583 p.
 23. Зворыкин, Л.Н. Цифровые устройства на комплиментарных МДП интегральных микросхемах. / А.Л. Ланцов, Л.Н. Зворыкин, И.Ф. Осипов. – М.: Радио и связь, 1983. – 271 с.
 24. Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. 4-ое изд., перераб. и доп. / Г.И. Волович. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 636 с.
 25. S. Sandberg, Homing and Synchronizing Sequences. // Model-Based Testing of Reactive Systems, ser. LNCS, vol. 3472. – Springer. 2005. – P. 5–33.
 26. Якубайтис Э.С. Асинхронные логические автоматы. / Э.С. Якубайтис. – Рига: Зинатне, 1996. – 158 с.

27. Shen J. P., Lipasti M. H. Modern processor design: fundamentals of superscalar processors. // Waveland Press, 2013. – 642 p.
28. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника. / Ф. Уоссермен – М.: Мир, 1992. – 184 с.
29. Charu C. Aggarwal, Neural Networks and Deep Learning // Springer, 2018 – 497 p.
30. Адамова, А. А. Методы и технологии машинного обучения и нейросетевых технологий в задачах компьютерного зрения / А. А. Адамова, В. А. Зайкин, Д. В. Гордеев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 25-39.
31. Елисов, Л.Н. Некоторые вопросы сеточного и нейросетевого моделирования задач управления авиационной безопасностью аэропорта / Л.Н. Елисов, Н.И. Овченков // Научный вестник МГТУГА. – 2017. – Том 20. – № 03. – С. 21-25.
32. Дружин, Д.С. Возможность использования нейронных сетей для идентификации личности / Д.С. Дружинин, М.А. Фролова // Дни российской науки – 2020. Тезисы докладов II Отраслевого научного форума. – 2020. – С. 62-65.
33. Нейрокомпьютеры в космической технике / В.В. Ефимов [и др.]; под ред. В. В. Ефимова. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
34. Комашинский, В. И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В. И. Комашинский, Д. А. Смирнов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2003. – 94 с.
35. Бэстенс, Д.-Э. Нейронные сети и финансовые рынки: принятие решений в торговых операциях. / Д.-Э. Бэстенс, В.-М. Ван ден Берг, Д. Вуд. – М.: ТВП, 1997. – 236 с.
36. Борисов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд / В.В. Борисов, В.В. Круглов. – М: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
37. Галушкин, А.И. Нейронные сети: основы теории. / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия–Телеком. – 2010. – 480 с.
38. Жданов, А.А. Автономный искусственный интеллект [Электронный ресурс] – 5-е издание (электронное). / А.А. Жданов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2020. – 359 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/135544> (Дата обращения: 20.09.2021).
39. Посягин, А.И. Разработка аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети / А.И. Посягин, А.А. Южаков // Электротехника. – 2012. – №11. – С. 18а-24.
40. Бройдо, В.Л. Вычислительные системы, сети и коммуникации. / В. Л. Бройдо. – СПб.: Питер. – 2003. – 688 с.
41. Andrew S. Tanenbaum, Maarten van Steen. Distributed systems. Principles and paradigms, 2nd edition // Pearson Education. – 2016. – 686 p.
42. Остроух, А.В. Проектирование информационных систем / А.В. Остроух, Н.Е. Суркова. – СПб: Лань. – 2019. – 164 с.

43. David Lee Kuo Chuen. Handbook of digital currency: bitcoin, innovation, financial instruments, and big data. // Academic Press. – 2015. – 588 p.
44. Kunle Olukotun, Lance Hammond, James Laudon. Chip multiprocessor architecture: techniques to improve throughput and latency // Morgan & Claypool publisher. – 2007. – 145 p.
45. Немудров, В. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. / В. Немудров, Г. Мартин. – М.: Техносфера, 2004. – 216 с.
46. Миночкин, А.И. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути ее решения. / А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Зв'язок. – 2006. – № 3. – С. 45-58
47. Кучерявый, А.Е. Самоорганизующиеся сети. / А.Е. Кучерявый, А.В. Прокопьев, Е.А. Кучерявый. – СПб.: Любавич, 2011. – 312 с.
48. Подлазов, В.С. Бесконфликтная самомаршрутизация для трехмерного полного мультикольца. / В. С. Подлазов // Проблемы управления. – 2018. – выпуск 4. – С. 54–60
49. Arlinghaus, S., Arlinghaus, W. C., Harary, F. Graph theory and geography: an interactive view. // Chichester: Wiley. – 2002. – 320 p.
50. Олифер, В. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. / В. Олифер, Н. Олифер. – СПб.: Питер, 2013. – 944 с.
51. Андриюшин, А.В. Управление и инноватика в теплоэнергетике. / А.В. Андриюшин, В.Р.Сабанин, Н.И.Смирнов – М.: МЭИ, 2011. – 392 с.
52. Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. / В.В. Денисенко. – М: Горячая Линия–Телеком, 2009. – 608 с.
53. Дежкина, И. Эффективность управленческой деятельности и принцип "золотого сечения" / И. Дежкина, Г. Поташева // Проблемы теории и практики управления. – 2010. – № 1. – С. 82-86.
54. 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.
55. 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.

56. 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.
57. Дрискол, Ф. Операционные усилители и линейные интегральные схемы. / Ф. Дрискол, Р. Кофлин – М.: Мир, 1979. – 360 с.
58. Евреинов, Э.В. Одноразрядные универсальные вычислительные системы высокой производительности / Э.В. Евреинов, Ю.Г. Косарев – М.: Наука, 1966. – 110 с.
59. 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.
60. 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.
61. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: справ. руководство : пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк – М.: Мир, 1982. – 512 с.
62. Денисенко, В.А. Проблемы схемотехнического моделирования КМОП СБИС / В.А. Денисенко // *Компоненты и технологии*. – 2002. – №3. – С. 74-78.
63. Кон, Е.Л. Автоматизация поиска дефектов в цифровых устройствах / В.В. Киселев, Е.Л. Кон, О.И. Шеховцов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 96 с.
64. Громов, О.А. Разработка контрольных и диагностических тестов для КМОП-элементов с избыточным базисом / О.А. Громов, С.Ф.Тюрин // *Приволжский научный вестник*. – 2013. – №1 (17). – С. 13-21.
65. 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.
66. Кацко, Е.В. Диагностика в аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети / Е.В. Кацко, А.И. Посягин // *Прикладная математика, механика и процессы управления*. – 2013. – Т. 1. – С. 295-303.
67. Асада, К. Логическое проектирование СБИС. / К. Асада, О. Карацу, К. Кикосита – М.: Мир, 1988. – 308 с.
68. Войт, Н.Н. Обзор современных САПР: P-CAD 2002, ORCAD 9.2, QUARTUS II, AUTOCAD 2008, SOLIDWORKS 2008, Компас -3D V10 plus. / Н.Н. Войт, Д.С. Канев // *сборник науч. труд. Российской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых Информатика, моделирование, автоматизация проектирования. ИМАП*. – 2010. – С. 137-141.

69. Quite universal circuit simulator [Электронный ресурс]. URL: <http://qucs.sourceforge.net/> (дата обращения 20.09.2021).
70. Крутиков, К.К. Моделирование в схемотехническом пакете Multisim: проблемы и пути их решения / К.К. Крутиков, В.В. Рожков // Практическая силовая электроника. – 2014. – №53. – С. 46-49.
71. Любимов, Э. В. Теория и практика проведения электротехнических расчётов в среде Mathcad и Multisim. / Э.В. Любимов. – СПб: Наука и техника, 2012. – 384 с.
72. Тюрин, С. Ф. Анализ настроек логических элементов при проектировании конечного автомата в системе Quartus II / С. Ф. Тюрин // Наука и технологические разработки. – 2015. – Т. 94. – № 2. – С. 17-27.
73. INTELFPGA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/programmable/support-resources/fpga-documentation-index.html?s=Newest> (дата обращения 20.09.2021).
74. Строгонов, А. Программируемая коммутация в ПЛИС: взгляд изнутри / А. Строгонов, С. Цыбин // Компоненты и технологии. – 2010. – № 11(112). – С. 56-62.
75. Греков, А.В. Реализация цифровых автоматов в системе Quartus фирмы Altera: лабораторный практикум. / А.В. Греков, О.А. Громов, С.Ф.Тюрин – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – 133 с.
76. Береза А.Н. Аппаратная реализация нелинейных математических функций для нейронных сетей / А.Н. Береза, М.В. Ляшов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – №9 (86). – С. 194-198.
77. Овчаров, Л.А. Прикладные задачи массового обслуживания. / Л.А. Овчаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 324 с.
78. Герасимов, А.Н. Аналитические методы исследования и оптимизации вычислительных систем и сетей на основе сетевых моделей массового обслуживания / А.Н. Герасимов. – М.: Радио и связь, 2001. – 240 с.
79. Моделирование как метод научного исследования / Б.А. Глинский [и др.] – М.: Изд-во МГУ. 1965. – 167 с.
80. Уемов, А.И. Логические основы метода моделирования. / А.И. Уемов – М.: Книга по Требованию, 2012. – 312 с.
81. Емельянов, А. А. Имитационное моделирование в экономических информационных системах / А. А. Емельянов, Е. А. Власова, Р. В. Дума; под ред. А. А. Емельянова. – М.: ИНФРА-М, 2009. – 416 с.
82. Vasbieva, A.F. 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.
83. 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.
84. Кельтон, В. Имитационное моделирование: Пер. с англ. (3-е изд.) / В. Кельтон, А. Лоу – СПб.: БХВ, 2004. – 847 с.
85. Arena Simulation Software. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html> (дата обращения 20.09.2021).
86. Карпов, Ю.В. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с Anylogic / Ю.В. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
87. Системная динамика. [Электронный ресурс]. URL: www.anylogic.ru/system-dynamics (дата обращения 20.09.2021).
88. Даденков, С.А. Анализ моделей и методов агентного и дискретно-событийного имитационного моделирования / С.А. Даденков, Е.Л. Кон // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2015. – №5. – С. 35-41.
89. Дискретно-событийное моделирование. [Электронный ресурс]. URL: www.anylogic.ru/discrete-event-simulation (дата обращения 20.09.2021).
90. 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
91. Южаков А.А. Вопросы анализа аналого-цифровых преобразователей на основе систем массового обслуживания, функционирующих в случайной среде. / А.А. Южаков. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1997. – 52 с.
92. Гнеденко, В.Б. Введение в теорию массового обслуживания. / В.Б. Гнеденко, И.Н. Коваленко // – М.: Наука, 1987. – 432 с.
93. Южаков, А.А. Прикладная теория систем массового обслуживания: учеб. пособие. / А.А. Южаков. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2004. – 121 с.
94. Башарин, Г.П. Теория сетей массового обслуживания и ее приложения к анализу информационно-вычислительных систем. / Г. П. Башарин, А. Л. Толмачев. // Итоги науки и техн. Сер. Теор. вероятн. Мат. стат. Теор. кибернет. – 1983. – том 21. – С. 3-119

95. Южаков, А.А. Стохастические сети в проектировании технических систем: учеб. пособие / А.А. Южаков – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. – 131 с.
96. Казаков, А. В. Планирование эксперимента и измерение физических величин: учебное пособие. / А.В. Казаков – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. – 88 с.
97. Машунин, Ю.К. Модели и методы многокритериальной оптимизации. / Ю.К. Машунин – М.: Наука, 1982. – 128 с.
98. Березовский, Б.А. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты. / А.Б. Березовский [и др.] – М.: Наука, 1989. – 128 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

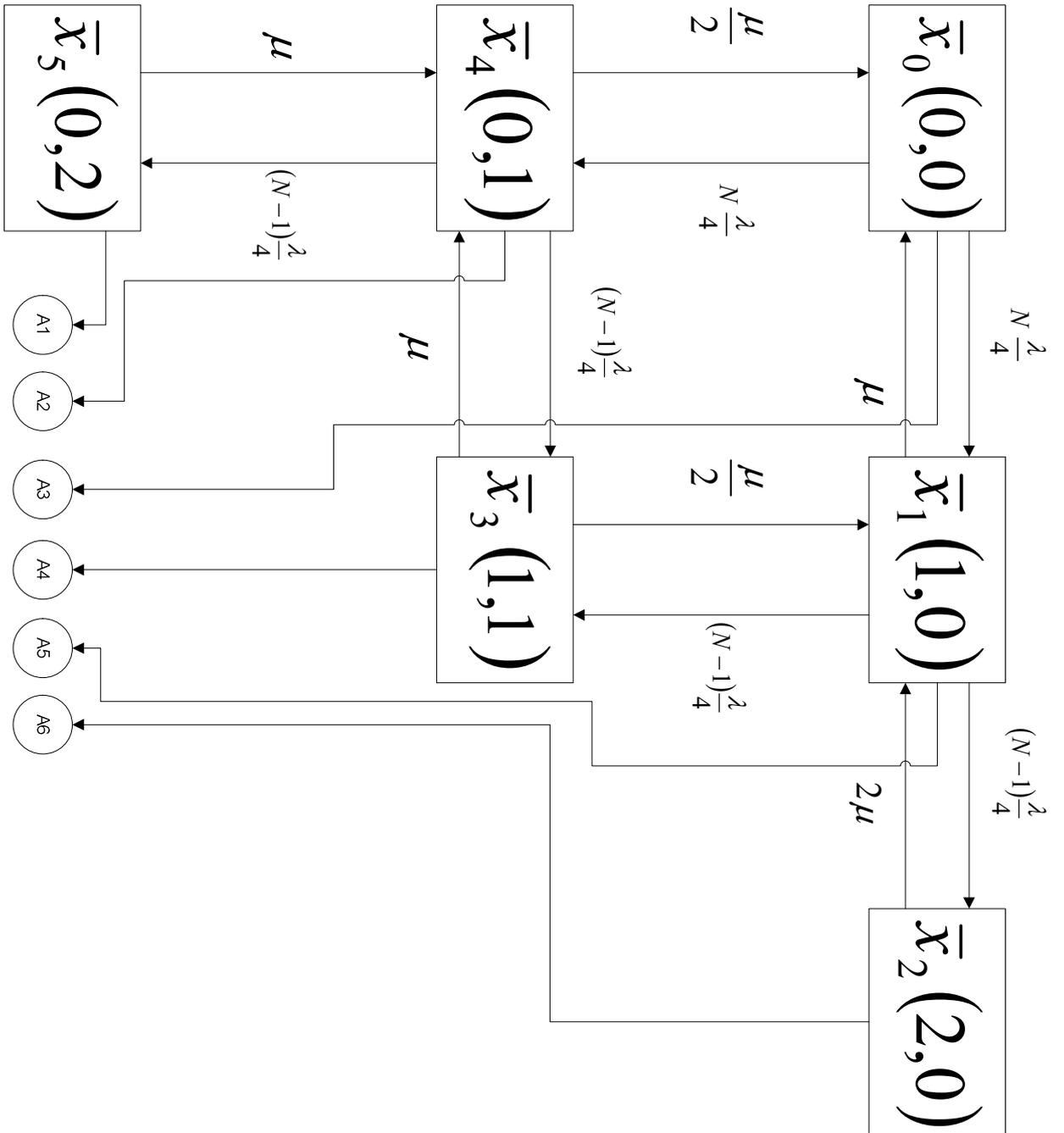


Рисунок А1 — Граф макросостояния 1

Продолжение приложения А

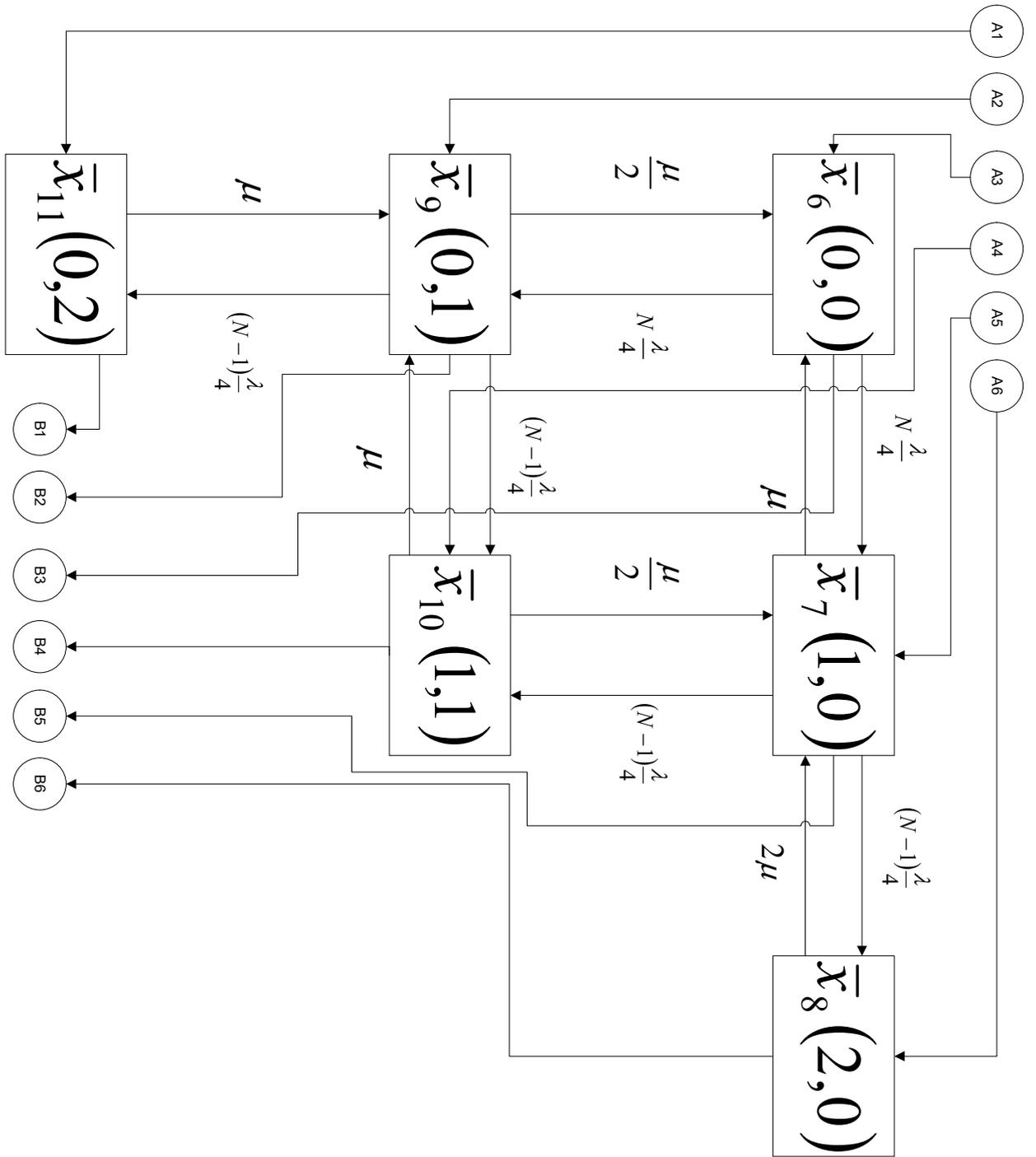


Рисунок А2 — Граф макросостояния 2

Продолжение приложения А

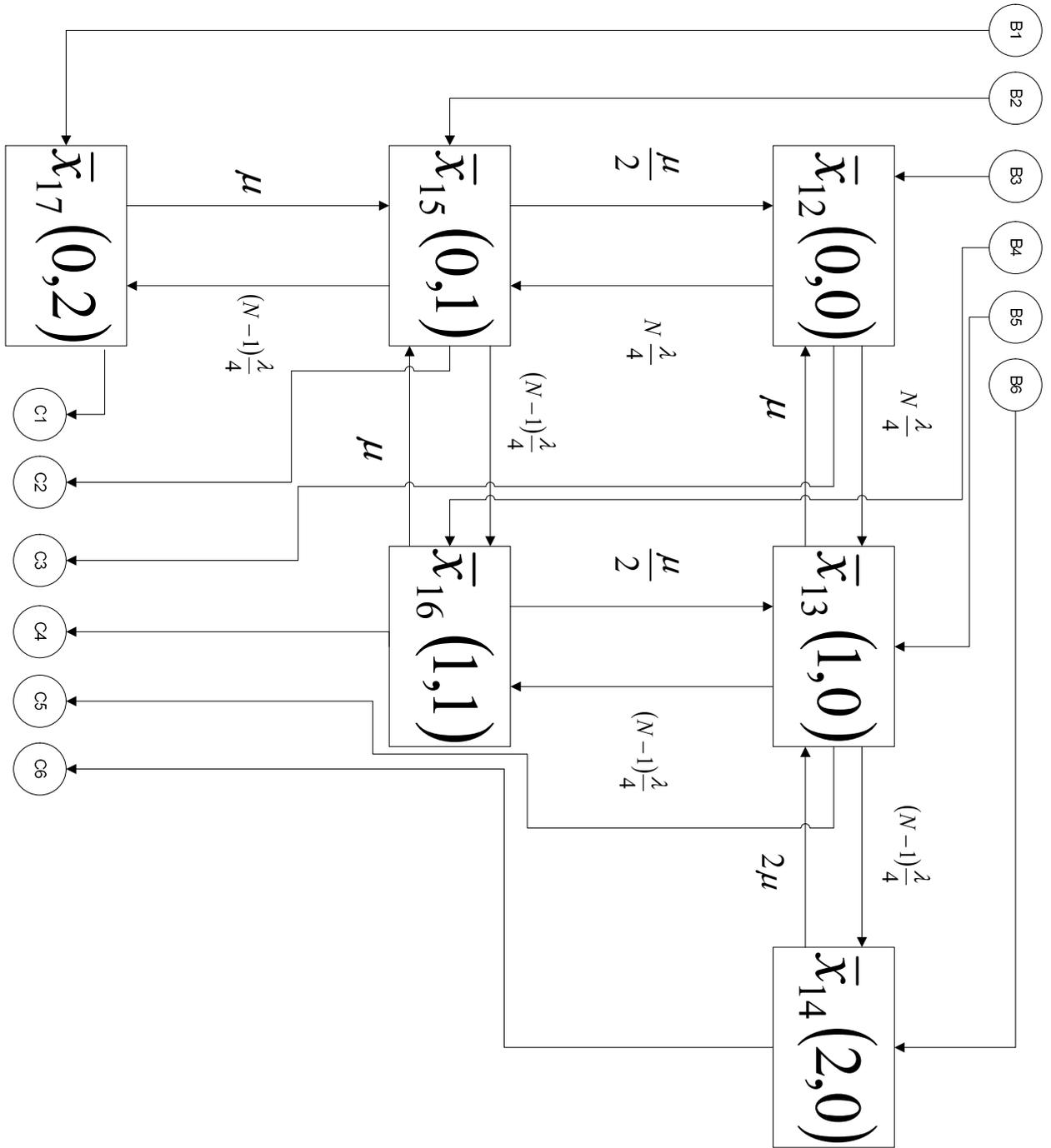


Рисунок А3 — Граф макросостояния 3

Продолжение приложения А

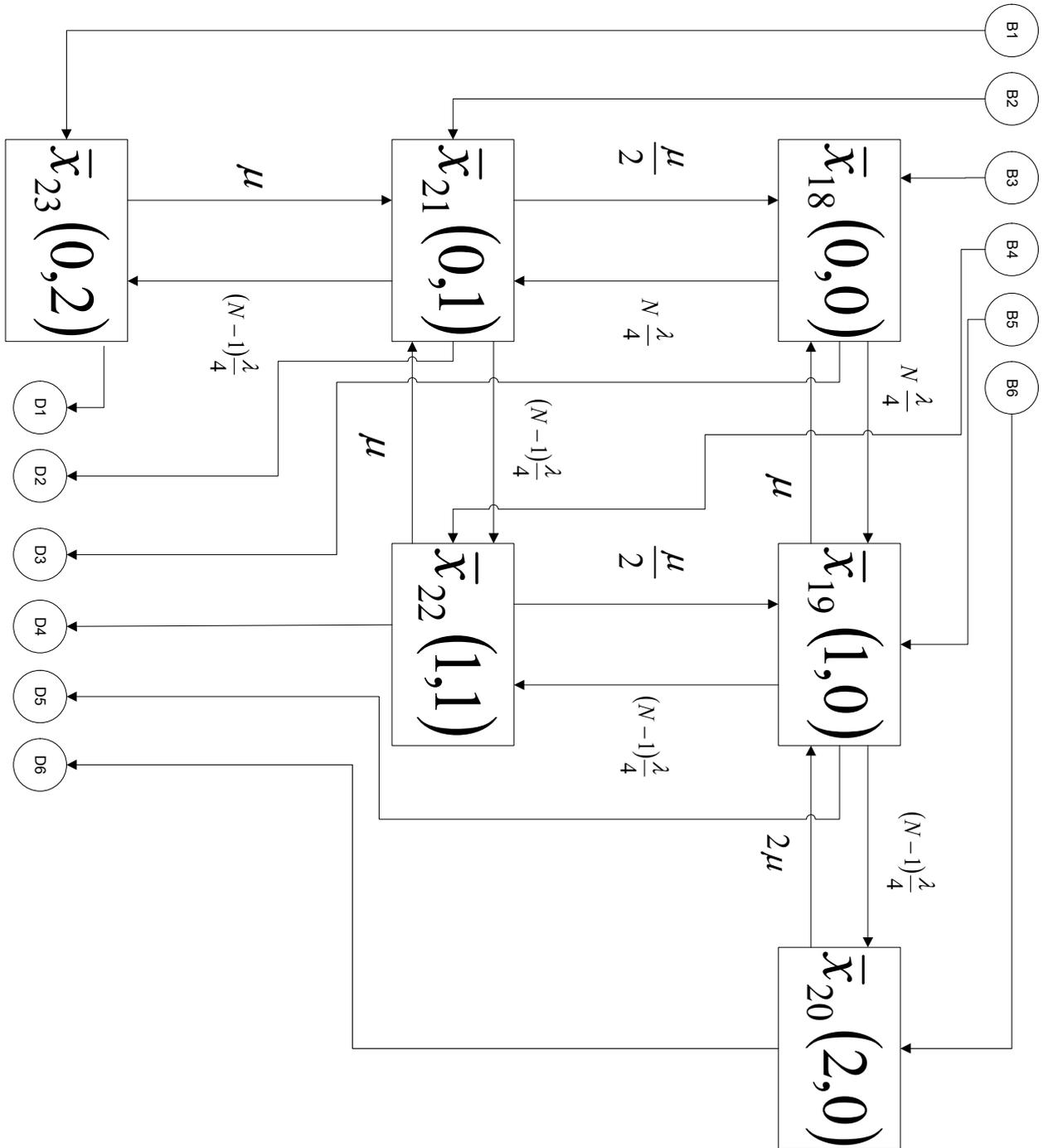


Рисунок А4 — Граф макросостояния 4

Продолжение приложения А

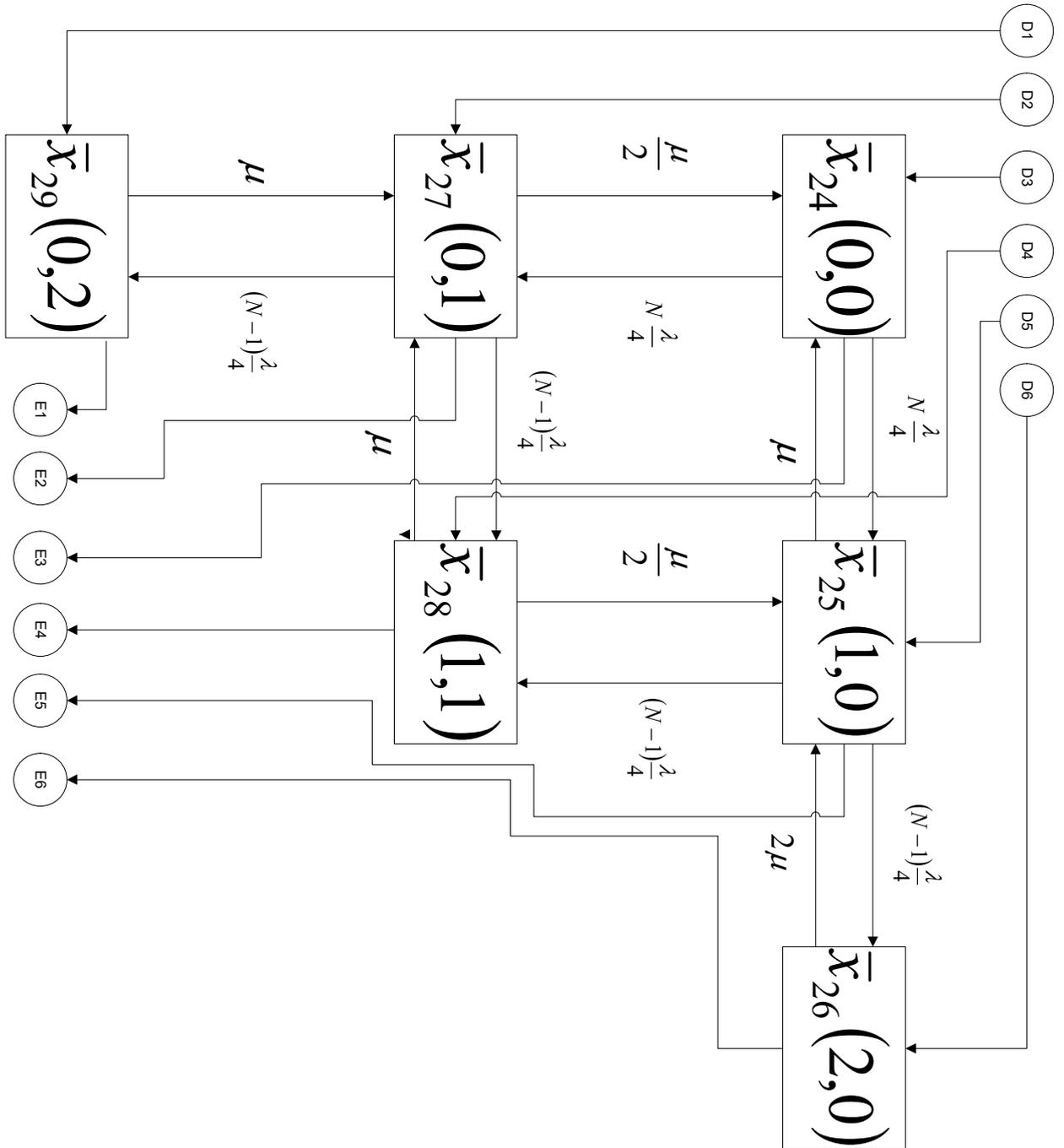


Рисунок А5 — Граф макросостояния 5

Продолжение приложения А

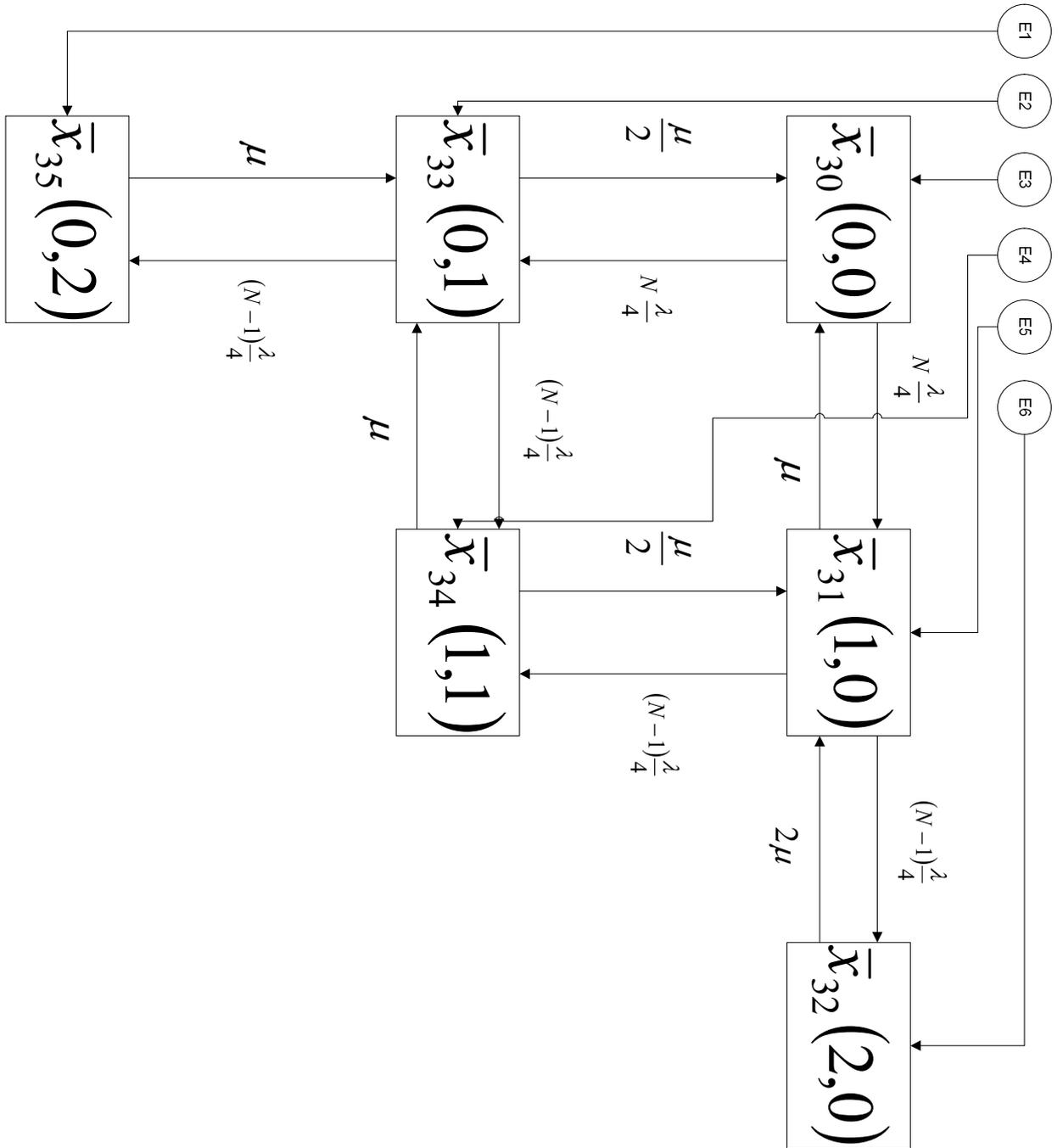


Рисунок А6 — Граф макросостояния 6

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Утверждаю
Первый заместитель Управляющего
директора - Главный конструктор АО
«ОДК-СТАР»

Остапенко С.В.

АКТ

г. Пермь

31.05.2021 года

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
«Самомаршрутизирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе нейронной
сети»

Комиссия в составе:

председателя

Сулимовой Д. А. - ученого секретаря НТС, начальник КО-4

и членов комиссии:

Березнякова Сергея Вадимовича - к.т.н., ведущего инженера-конструктора ВКО

Титова Юрия Константиновича - к.т.н, начальника сектора КО-4

Составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Самомаршрутизирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе нейронной сети» Посягина Антона Игоревича использовались в рамках разработки аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для многопоточного адаптивного измерительного канала (МАИК) в системе автоматизации испытаний авиационных агрегатов (САИ АА).

При проектировании и разработке САИ АА были использованы и внедрены следующие результаты:

1. Применение самомаршрутизирующегося АЦП на основе однослойной нейронной сети (АЦП НС) снизило аппаратные затраты на реализацию МАИК (16 одновременно измеряемых потоков-каналов выходных сигналов) в составе САИ АА на 20-30% в зависимости от требуемой точности и интенсивности проводимых измерений во время испытания.
2. Структура предложенного АЦП НС увеличила отказоустойчивость МАИК на порядок за счет использования реконфигурируемой нейронной сети, исключающей отказавшие измерительные нейроны из состава АЦП НС при длительной эксплуатации.
3. Использование АЦП НС в МАИК обеспечило параллельные (одновременные) измерения до 16 каналов входных сигналов, что применяется для мажоритирования результатов измерения или для увеличения частоты опроса датчиков.
4. Методика проектирования АЦП НС, предложенная в работе для расчета параметров АЦП НС, позволила подобрать оптимальное количество нейронов при минимизации аппаратных затрат на реализацию АЦП НС для различного ансамбля входных сигналов.

Председатель комиссии

_____ Д.А. Сулимова

Члены комиссии:

_____ С.В. Березняков

_____ Ю.К. Титов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

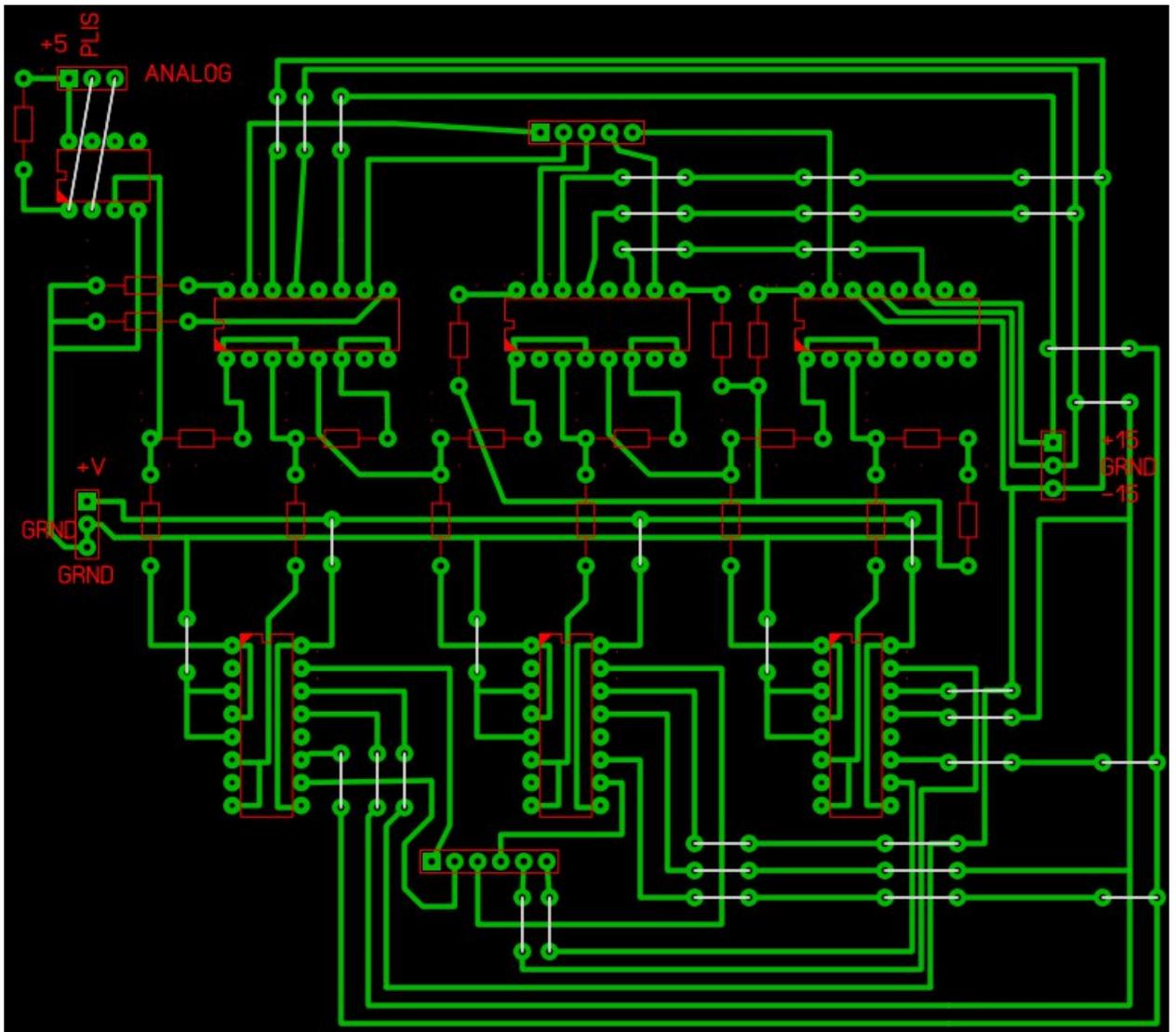


Рисунок В1 — Печатная плата для аналоговой части отладочной платы самомаршрутизирующегося АЦП ИС