

На правах рукописи

Потапов Илья Викторович

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям: информация и информационные системы, энергетика, экономика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2004

Работа выполнена в Омском государственном техническом университете

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Потапов В. И.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор Терпугов А.Ф.
Кандидат физико-математических наук,
Иваненко Б.П.

Ведущая организация: Новосибирский государственный технический университет.

Защита состоится “__” _____ 2004 г. в __ час. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.269.06 по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84, институт "Кибернетический центр" ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан “__” _____ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.т.н., доцент

Сонькин М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Теория искусственных нейронных сетей (ИНС) благодаря фундаментальным работам зарубежных исследователей У.МакКаллока, У.Питтса, Ф.Розенблатта, М.Минского, С.Дейча, Б.Уидроу, Т.Кохонена, Д.Хопфилда, С.Гроссберга, а также советских и российских ученых И.Б.Гутчина и А.С.Кузичева, Н.В.Позина, С.О.Мкртчяна, Н.М.Амосова, А.И.Галушкина, А.Н.Горбаня, В.В.Круглова и др. получила широкое развитие. При этом основные направления исследований были связаны с изучением топологии (архитектуры) нейронных сетей, их синтезом и обучением (настройкой) для решения поставленных задач.

В связи с созданием нейрокомпьютеров и применением их на практике нейросетевая тематика стала междисциплинарной и появились новые научные проблемы, решению которых уделялось недостаточно внимания или совсем не уделялось ввиду их сложности и неизученности.

Одной из таких проблем, решению которой посвящена диссертационная работа, является проблема разработки математических моделей и необходимого аппарата для исследования и оптимизации функциональной надежности нейронных сетей, которая, по мнению крупных специалистов в области нейрокомпьютерных систем и нейроинформатики, находится в настоящее время в самом начале своего развития.

Годовой рынок современных искусственных нейронных сетей и нейрокомпьютеров по данным ведущих организаций и фирм США и Японии на 2000 год составил 750-900 млн. долларов. При этом практическая реализация ИНС и нейрокомпьютеров в виде кремниевых нейрочипов и нейросистем на пластинах, содержащих свыше 10^6 эквивалентных искусственных нейронов различного уровня сложности, стала технологически и экономически разрешимой и имеет тенденцию к росту.

Поэтому задачи обеспечения отказоустойчивости и оптимизации надежности специфичных по структурно-функциональной организации и условиям работы нейронных сетей и нейрокомпьютерных систем выходят на первый план среди актуальных задач теории искусственных нейронных сетей.

Основными задачами оптимизации функциональной надежности, поставленными и решенными в работе, являются задачи оптимизации резервирования однородной адаптивной искусственной нейронной сети без восстановления и с восстановлением отказавших блоков нейронов, оптимизации резервирования “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, у которой интенсивность отказов нейронов является неубывающей функцией времени, оптимизации восстановления избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, состоящей из логически стабильных мини-сетей.

Диссертационная работа выполнена в рамках НИР “Разработка математических моделей и методов оптимизации функциональной надежности

искусственных нейронных сетей” в соответствии с грантом Министерства образования РФ Е02-2-75 по фундаментальным исследованиям в области естественных и точных наук.

Цель работы. С учетом сложившегося состояния вопроса в области исследования надежности искусственных нейронных сетей, основной целью диссертационной работы стало: обобщение известных и разработка новых математических моделей, методов и алгоритмов оптимизации функциональной надежности искусственных нейронных сетей.

Задачи исследования. В диссертационной работе были поставлены и решены следующие основные задачи.

1. Разработка математических моделей и исследование функциональных возможностей многофункциональных искусственных нейронов (ИН) для построения логически избыточных искусственных нейронных сетей, функционально устойчивых к отказам нейронов.

2. Развитие метода синтеза оптимизированных логически стабильных искусственных нейронных сетей, адаптивных к отказам нейронов, и метода минимизации процесса адаптации нейронной сети к отказам.

3. Создание вероятностных моделей функционирования и развитие методов расчета надежности избыточных искусственных нейронных сетей, неадаптивных и адаптивных к отказам нейронов.

4. Исследование надежностных характеристик адаптивных искусственных нейронных сетей с целью выбора оптимальной по надежности нейронной системы.

5. Разработка математической модели, метода расчета функциональной надежности и создание алгоритма решения задачи оптимального резервирования однородной адаптивной искусственной нейронной сети при пуассоновском потоке отказов.

6. Разработка алгоритма решения задачи оптимального резервирования, максимизирующего вероятность безотказной работы или среднее время “жизни” однородной адаптивной искусственной нейронной сети с восстановлением отказавших блоков нейронов.

7. Разработка алгоритма решения задачи оптимального резервирования, максимизирующего вероятность безотказной работы или среднее время “жизни” “стареющей” однородной адаптивной искусственной нейронной сети.

8. Решение задачи и разработка алгоритма оптимизации восстановления избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, состоящей из логически стабильных мини-сетей.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используется математический аппарат теории марковских процессов, теории надежности, вычислительной математики и компьютерное моделирование.

Научная новизна

1. Предложен способ оценки логической избыточности одновыходных однородных ИНС.

2. Предложен критерий оптимальности для организации синтеза логически стабильных искусственных нейронных сетей, адаптивных к отказам нейронов, зависящий от вероятности безотказной работы и структурной сложности сети.
3. Решена задача минимизации процесса адаптации к отказам ИН для логически стабильных регулярных однородных двухранговых нейронных сетей.
4. Построена математическая модель и решена задача определения функциональной надежности и среднего времени “жизни” избыточных ИНС произвольной конфигурации, неадаптивных и адаптивных к отказам нейронов.
5. Поставлена и решена задача оптимального резервирования, максимизирующего среднее время “жизни”, и задача оптимального резервирования, максимизирующего вероятность безотказной работы на заданном временном интервале, для многослойной многовыходной структурно однородной адаптивной искусственной нейронной сети с замещением отказавших нейронов резервными при пуассоновском потоке отказов и восстановления отказавших нейронных блоков.
6. Поставлена и решена задача оптимизации резервирования избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, обеспечивающего максимизацию среднего времени “жизни” или вероятность безотказной работы сети на заданном временном интервале.
7. Поставлена и решена задача оптимизации восстановления избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, состоящей из логически стабильных нейронных мини-сетей.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Математическая модель и расчет среднего времени “жизни” и вероятности безотказной работы на заданном временном интервале избыточных ИНС произвольной конфигурации, неадаптивных и адаптивных к отказам нейронов.
2. Решение задачи оптимального резервирования, максимизирующего среднее время “жизни”, и задачи оптимального резервирования, максимизирующего вероятность безотказной работы на заданном временном интервале, для многослойной многовыходной структурно однородной адаптивной искусственной нейронной сети с замещением отказавших нейронов резервными при пуассоновском потоке отказов и восстановления отказавших нейронных блоков.
3. Решение задачи оптимизации резервирования избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, обеспечивающего максимизацию среднего времени “жизни” или вероятности безотказной работы сети на заданном временном интервале.

4. Решение задачи оптимизации восстановления избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, состоящей из логически стабильных нейронных мини-сетей.

Теоретическая ценность

1. Сформулированы и теоретически обоснованы задачи оптимизации функциональной надежности структурно однородных избыточных адаптивных к отказам нейронных сетей. Показано, что данные оптимизационные задачи сводятся к задачам целочисленного программирования. Решение таких задач доведено до подробных алгоритмов, реализуемых на ПЭВМ.
2. Разработаны теоретические положения оптимизации функциональной надежности “стареющих” искусственных нейронных сетей и показано, что для приближенного решения этих оптимизационных задач необходимо использовать совместно метод дискретизации и методы целочисленного программирования.
3. Разработаны теоретические основы оптимизации восстановления после отказов нейронов избыточных стареющих адаптивных искусственных нейронных сетей, состоящих из логически стабильных мини-сетей. Показано, что для решения подобных задач могут быть использованы методы теории оптимального управления совместно с методом дискретизации.
4. Совокупность разработанных в диссертации теоретических положений оптимизации функциональной надежности ИНС создает основу для развития теории оптимизации надежности нейрокомпьютеров и нейрокомпьютерных систем.

Практическая ценность

1. Предложен способ реализации логических функций от большого числа переменных с использованием двухвходового многофункционального искусственного нейрона с пресинаптическим взаимодействием и возможностью перестройки порогов и весов в процессе реализации функции, практическая реализация которого не вызывает особых трудностей.
2. Построенные в работе математические модели и детально разработанные алгоритмы расчета функциональной надежности избыточных нейронных систем с адаптивными ИН позволяют решить следующие важные для инженерной практики задачи:
 - 1) при заданном соотношении между интенсивностями отказов и сбоев найти тип адаптивного искусственного нейрона и алгоритм адаптации, обеспечивающий на интервале $[0, t]$ вероятность безотказной работы не ниже заданной при минимальной избыточности системы, либо при

заданном ограничении на избыточность ИНС найти тип адаптивного искусственного нейрона, обеспечивающий максимальную вероятность безотказной работы;

- 2) для каждого соотношения интенсивностей отказов и сбоев обоих типов и заданной избыточности определить такой тип адаптивной искусственной нейронной сети и такой алгоритм адаптации, которые обеспечат ей максимальное среднее время “жизни”.
3. Решены задачи оптимизации резервирования “нестареющей” и “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети для максимизации среднего времени “жизни” или вероятности безотказной работы на заданном временном интервале и задача оптимизации восстановления избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, состоящей из логически стабильных нейронных мини-сетей.
4. Разработано программное обеспечение для решения практических задач оптимизации резервирования адаптивных искусственных нейронных сетей.

Апробация работы. По результатам работы сделаны доклады на Технологическом конгрессе «Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения» (Омск, 2001 г.), на Седьмой международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Барнаул, 2001 г.), на Научной сессии ТУСУР в рамках межрегиональной научно-технической конференции (Томск, 2002 г.), на Восьмой международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Кемерово, 2002 г.), на IV Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск 2002 г.), на научных семинарах кафедры «Информатика и вычислительная техника» Омского государственного технического университета (Омск, 2001 – 2003 гг.), на II Международном технологическом конгрессе «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения в XXI веке» (Омск, 2003 г.).

Реализация результатов работы. Разработанные в диссертации математические модели, алгоритмы и программы используются в учебном процессе на кафедре ИВТ Омского государственного технического университета при обучении студентов по магистерской программе 552803 – Отказоустойчивые вычислительные системы. По результатам исследований опубликовано учебное пособие для студентов, обучающихся по магистерской программе. Алгоритмы и программы для исследования и расчета оптимальных параметров резервирования «нестареющих» нейронных систем используются в лаборатории разработки и внедрения программно-технических средств автоматизации Омского государственного института системотехники для моделирования и выбора оптимальных технических решений в системах управления энергоресурсами. Имеются акты о внедрении.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 21 научном труде, включая 19 печатных работ и 2 депонированные в ВИНТИ рукописи.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 97 наименований, и двух приложений. Основной объем работы 168 страниц машинописного текста. Объем приложения 1 - 5 страниц, объем приложения 2 - 2 страницы машинописного текста. Работа содержит 11 рисунков и 1 таблицу. Приложение 1 содержит 2 рисунка.

Основное содержание работы

Во **введении** проводится краткий анализ известных методов исследования функциональной надежности искусственных нейронных сетей, обосновывается актуальность темы диссертационной работы, ставятся основные цели и задачи, решению которых посвящена диссертационная работа.

В **первой главе** рассматриваются математические модели искусственных нейронов с пороговой функцией активации, приведенные к удобному для машинного моделирования виду. Дана оценка структурной сложности монофункциональных и многофункциональных искусственных нейронов с пресинаптическим взаимодействием (ИНП). Решена задача реализации логических функций от большого числа переменных с использованием функционально гибких ИНП с малым числом информационных входов, переменным порогом T_v и весами входов $w_{j\ell}$. Предложен способ оценки логической избыточности функционально устойчивых искусственных нейронных сетей как фактора повышения их функциональной надежности.

При рассмотрении искусственных нейронов без пресинаптического взаимодействия показано, что для расширения логических возможностей подобных нейронов и увеличения их логической гибкости, являющейся одним из критериев надежности искусственных нейронных сетей, искусственные нейроны данного типа следует объединять в простейшие сети, например, двухранговые с одним выходным нейроном, и использовать как логически полный нейроноподобный модуль.

Результаты анализа моделей ИН с пресинаптическим взаимодействием показали, что каждая из моделей описывает архитектуру и работу соответствующей двухранговой искусственной нейронной сети, в первом ранге которой находятся монофункциональные ИН типа порогового элемента, которые реализуют функции узлов пресинаптического взаимодействия, а выходной ИН, являясь также пороговым элементом, работающим как в монофункциональном, так и в многофункциональном режиме при изменении его параметров $(w_1, w_2, \dots, w_n; T_v)$, реализует на выходе любые булевы функции $f(x_1, x_2, \dots, x_\delta)$ от δ входных переменных.

В результате анализа структурной сложности ИН сделан вывод о том, что с увеличением количества функциональных входов δ имеет место достаточно быстрый рост конструктивных параметров у всех видов искусственных нейронов с пресинаптическим взаимодействием, как и у ИН без пресинаптического взаимодействия. Это усложняет проблему технической реализации искусственных нейронов, число функциональных входов которых $\delta > 5-6$.

Для решения задачи реализации ИН логических функций от большого числа переменных предлагается подход, основанный на использовании функционально гибких ИНП с $\delta = 2$ и переменными параметрами $T_v, w_{j\ell}$. Параметры T_v и $w_{j\ell}$ могут программно задаваться и перестраиваться перед началом и в процессе работы. При этом ИНП каждого типа может реализовать любую из 2^{2^δ} логических функций. Если в качестве управляющих сигналов для перестройки параметров ИН использовать входные переменные x_3, x_4, x_5, \dots и их инверсии $\bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \dots$, то на выходе двухвходового нейрона можно реализовать по частям различные функции $f_i(X)$ от трех, четырех, пяти и более аргументов. Принципиальных ограничений на число аргументов нет.

При оценке логической избыточности функционально устойчивых искусственных нейронных сетей как фактора повышения их функциональной надежности установлено, что ИНС, у которых в результирующих диаграммах количество единиц $\tau_F = 2^{\delta-1}$, обладают наименьшей логической избыточностью, а следовательно, и наименьшей функциональной устойчивостью, а сети, у которых $\tau_F = 1$ или $\tau_F = 2^\delta - 1$, обладают наибольшей логической избыточностью и наибольшей функциональной устойчивостью.

Для повышения надежности реализации заданной функции нейронной сетью предложен итеративный метод построения сети. Суть этого метода состоит в том, что каждый ИН заменяется, например, однородной двухранговой функционально устойчивой сетью. Каждая такая ИНС принимается за логический модуль, подобный отдельно взятому ИН, и из этих модулей строится новая функционально устойчивая сеть по тем же правилам, что и двухранговая сеть из отдельных ИН. Итеративное наращивание сети указанным способом приводит к повышению ее функциональной надежности.

Было экспериментально установлено, что при указанном способе построения сети надежность реализации заданной функции $F(X)$ увеличивается не бесконечно, а достигает максимума после нескольких итераций.

Во **второй главе** решена задача синтеза искусственной нейронной сети, логически стабильной в максимально возможном диапазоне изменения порогов входящих в нее искусственных нейронов, с использованием предложенного критерия оптимальности. Решена также задача минимизации

процесса адаптации к отказам ИН для логически стабильных регулярных однородных двухранговых сетей с δ нейронами в первом ранге и одним нейроном во втором ранге.

Критерием оптимальности нейронной сети обычно считают минимум суммарного числа компонентов N (например, узлов пресинаптического взаимодействия или волокон) у входящих в нее искусственных нейронов. При таком критерии оптимальности задача оптимизации нейронной сети сводится к минимизации N . Очевидно, что с технической точки зрения минимизация N приводит к уменьшению общего числа компонентов ИН, необходимых для построения ИНС, и поэтому данным критерием целесообразно пользоваться тогда, когда минимизация компонентов ИН является определяющим фактором при синтезе ИНС.

Основная же цель (кроме возможных других), преследуемая при объединении ИН в сеть, - повышение надежности реализации заданной функции $F(X)$ путем введения избыточности и адаптации сети к отказам ИН. Поэтому использование в качестве критерия оптимальности ИНС функционала, не зависящего от того или иного параметра надежности сети, является с этой точки зрения принципиально неверным. Следовательно, оптимизация ИНС должна заключаться либо в минимизации N при заданной вероятности $P(t)$ безотказной реализации нейронной сетью требуемой функции $F(X)$, либо в максимизации $P(t)$ при ограничении N . Но в связи с тем, что $P(t)$ является функцией времени, нельзя говорить об оптимальности сети вообще, а необходимо указать временной интервал $[0, t^*]$, внутри которого синтезируемая ИНС оптимальна по выбранному критерию, учитывающему надежность сети в этом интервале. Ввиду различной скорости изменения функции $P(t)$ в зависимости от t и структуры ИНС оптимальная в одном временном интервале сеть может оказаться далеко не оптимальной в другом временном интервале.

В соответствии со сказанным, максимизируемый функционал в интервале $[0, t^*]$ для синтезируемой, оптимальной с точки зрения автора, ИНС с определенной структурой представляется целесообразным записать в следующем виде

$$\Phi_{[0, t^*]} = \frac{P(t^*)}{\gamma N},$$

где γ - коэффициент, определяющий долю конструктивного фактора в оптимизируемой ИНС.

Величина коэффициента γ зависит от конкретного исполнения ИН, а также от назначения сети и может выбираться разработчиками из практических соображений. При абстрактном синтезе ИНС удобно считать $\gamma = 1$.

Решение задачи синтеза логически стабильной в заданном диапазоне изменения наборов порогов ИНС сводится к нахождению порядка заполнения диаграмм (карт) Карно ИН $\varphi, \psi_{11}, \psi_{12}, \dots, \psi_{1\delta}$, обеспечивающего получение требуемого диапазона логической стабильности сети из невырожденных ИН при максимизации функционала $\Phi_{[0, t^*]}$.

Анализ многочисленных примеров показывает, что для получения максимального диапазона логической стабильности сети из невырожденных ИН заполнение диаграммы Карно выходного нейрона φ двухранговой ИНС должно производиться в определенной последовательности, зависящей от общего количества единиц τ_F в результирующей диаграмме Карно $F(X)$.

Выбранная для заданной функции $F(X)$ последовательность заполнения диаграммы Карно φ как оператора накладывает определенные ограничения на последовательность заполнения карт Карно $\psi_{11}, \psi_{12}, \dots, \psi_{1\delta}$ как операндов. Для облегчения процедуры заполнения диаграмм Карно $\psi_{1i} (i = 1, 2, \dots, \delta)$ двухранговой ИНС и упрощения процесса оптимизации нейронной сети можно воспользоваться визуальным представлением в виде карт (таблиц) стабильности, которые легко приводятся к машинной форме записи и обработки.

Одной из важнейших задач при построении адаптивных ИНС является задача минимизации процесса адаптации к отказам ИН, т.е. задача минимизации числа настроек параметров ИН сети, а следовательно, и времени восстановления функциональных свойств нейронной сети, при наличии дестабилизирующих факторов, включая все возможные отказы у ИН.

Рассматриваемая задача многопараметрическая, многоплановая и в общем виде не решается. Поэтому в данной работе решена задача минимизации процесса адаптации к отказам ИН для логически стабильных регулярных однородных двухранговых сетей с δ нейронами в первом ранге и одним (выходным) нейроном во втором ранге. При этом предполагается, что адаптация осуществляется пошагово путем одновременного изменения порогов $T_v(r, i)$ у всех ИН сети на одинаковую величину на каждом шаге адаптации.

В третьей главе построена с использованием математического аппарата теории марковских случайных процессов математическая модель и решена задача определения функциональной надежности, т.е. вероятности безотказной работы и среднего времени “жизни” избыточных ИНС произвольной конфигурации, неадаптивных к отказам нейронов. Также построена математическая модель и решена задача расчета функциональной надежности, включая вероятность безотказной работы, среднее время “жизни” и вероятность нахождения в состоянии адаптации, избыточных ИНС произвольной конфигурации, адаптивных к отказам нейронов. С использованием полученных моделей и методов расчета исследована

функциональная надежность двух типов ИНС, адаптивных к отказам нейронов, при различных алгоритмах адаптации. Полученные результаты позволяют аналитически и численно решать важные для практики задачи оптимизации функциональной надежности ИНС.

Расчет функциональной надежности неадаптивной ИНС проводится исходя из следующих предположений. Любая нейронная сеть S , предназначенная для реализации функции $F(x_1, \dots, x_\delta)$, состоит из N искусственных нейронов произвольного типа и сложности. Нейроны состоят из компонентов, отказы которых равновероятны, статистически независимы, и имеет место экспоненциальный закон распределения времени между отказами. Под действием очередного отказа неадаптивной ИНС переходит из состояния с большим ресурсом надежности либо в состояние с меньшим ресурсом, либо в состояние отказа. Обратные переходы невозможны. Сделанное предположение о простейшем потоке отказов ИН в сети справедливо для внезапных отказов в период нормальной эксплуатации.

Пусть n - количество всех возможных одиночных отказов у N нейронов сети S , не приводящих либо приводящих ИНС к отказу. Такая сеть может находиться в конечном числе состояний (соответственно числу отказов) $E_0, E_1, \dots, E_l, \dots, E_r$ ($r \leq n$), где через E_l обозначено состояние, в котором у нейронов сети имеется l отказов. Состояние E_0, \dots, E_{r-1} назовем состояниями "жизни", так как, находясь в любом из них, сеть S без ошибок, оговоренных при обучении (настройке), реализует заданную функцию $F(X)$. Состояние E_r будем называть состоянием "гибели", если находящаяся в нем сеть S реализует функцию $F^*(X)$, значение которой выходит за установленные при обучении (настройке) допустимые пределы.

Обозначая через $p_l(t)$ вероятность нахождения ИНС в состоянии E_l ($l = 0, 1, \dots, r$), можно записать систему дифференциальных уравнений Колмогорова, решая которую нетрудно определить $P(t)$ - вероятность безошибочной реализации нейронной сетью требуемой функции $F(X)$ за время t , то есть вероятность безотказной работы ("жизни") сети. Используя решение такой системы дифференциальных уравнений, можно рассчитать для любого t функциональную надежность ИНС, т.е. вероятность достоверной реализации заданной функции $F(X)$ нейронной сетью при наличии отказов кратности l , $1 \leq l \leq r-1$.

На практике для сравнения различных типов ИНС возможно использование также такой характеристики, как среднее время "жизни" сети - T . Выражения для расчета этого параметра получены из решения системы дифференциальных уравнений с использованием известных в теории надежности приемов.

Адаптивной или восстанавливаемой ИНС будем называть такую сеть S_A , у которой в процессе работы производится целенаправленное изменение параметров нейронов (весов входов w_j и порогов T_v), преследующее цель стабилизировать работу, восстанавливать заданную в процессе обучения

(настройки) выходную функцию $F(X)$ сети при наличии внутренних и внешних дестабилизирующих факторов, например, отказов ИН сети, обрыва связей между ними и др.

Пусть n – количество всех возможных одиночных отказов у ИН, входящих в сеть S_A . Процесс возникновения отказов пуассоновский с параметром λ . Такая сеть может находиться в конечном числе состояний (соответственно числу отказов) $E_0, E_1, \dots, E_l, \dots, E_r$ ($r \leq n$), где через E_l обозначено состояние, в котором у нейронов сети имеется l отказов. Состояние E_0, \dots, E_{r-1} назовем состояниями "жизни", так как, находясь в любом из них, сеть S без ошибок, оговоренных при обучении (настройке), реализует заданную функцию $F(X)$. Состояние E_r будем называть состоянием "гибели", если находящаяся в нем сеть S реализует функцию $F^*(X)$, значение которой выходит за установленные при обучении (настройке) допустимые пределы. Состояния адаптации сети обозначим символами $E_{l,l+1}$.

Адаптивная сеть S_A из состояния "жизни" E_l ($l = 0, 1, \dots, r-2$) в зависимости от вида очередного $(l+1)$ -го отказа может перейти либо непосредственно в новое состояние "жизни" E_{l+1} , либо через состояние адаптации $E_{l,l+1}$ - в одно из следующих состояний "жизни" E_{l+1} , либо в состояние "гибели" E_r . Из состояний "жизни" E_{r-1} сеть S_A может перейти только в состояние "гибели" E_r .

Будем считать, что интенсивность восстановления работоспособного состояния нейронной сети S_A - μ является постоянной для любого состояния $E_{l,l+1}$.

Функционирование такой ИНС описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова - Чепмена, решение которой в аналитическом или численном виде позволяет рассчитывать вероятность безотказной работы для заданного времени, среднее время "жизни" и вероятность нахождения в состоянии адаптации ИНС.

Полученные математические модели избыточных адаптивных нейронных систем использованы в диссертации для исследования искусственных нейронных сетей с конкретной конфигурацией и конкретным принципом адаптации, что позволяет решить следующие важные для инженерной практики задачи.

При заданном соотношении между интенсивностями отказов (λ_0, λ_1) и сбоев (λ_0^*, λ_1^*) найти тип АИН и алгоритм адаптации, обеспечивающий нейронной системе на интервале $[0, t]$ вероятность безотказной работы не ниже заданной при минимальной избыточности системы.

При заданном ограничении на избыточность ИНС найти тип АИН, обеспечивающий максимальную вероятность безотказной работы нейронной системы на интервале $[0, t]$.

Для заданного соотношения интенсивностей отказов и сбоев определить такой тип адаптивной искусственной нейронной сети и такой алгоритм адаптации, которые обеспечат нейронной системе максимальное среднее время "жизни".

Примеры решения подобных задач приведены в диссертации.

В четвертой главе построена и исследована математическая модель многослойной многовыходной структурно однородной адаптивной к отказам нейронной сети с замещением отказавших нейронов резервными. Показано, что задачи выбора наилучшей в смысле максимизации вероятности безотказной работы к заданному моменту времени t_f и среднего времени “жизни” восстанавливаемой и невозстанавливаемой нейронной системы сводятся к задаче целочисленного программирования. Решена задача оптимального резервирования, максимизирующего среднее время “жизни”, и задача оптимального резервирования, максимизирующего вероятность безотказной работы на заданном временном интервале, для многослойной многовыходной структурно однородной адаптивной искусственной нейронной сети с замещением отказавших нейронов резервными при пуассоновских потоках отказов и восстановления отказавших нейронных блоков. Поставлена и решена задача оптимизации резервирования “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, максимизирующего среднее время “жизни” или вероятность безотказной работы на заданном временном интервале. Поставлена и решена задача оптимизации восстановления избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, состоящей из логически стабильных нейронных мини-сетей. Показано, что решение такой задачи сводится к задаче оптимального управления.

Для решения указанных выше задач в диссертации рассматривается многослойная многовыходная структурно однородная искусственная нейронная сеть, состоящая из n основных и m резервных ($n + m = a$) блоков (столбцов нейронов), разбитых на q групп по $b = \frac{n}{q}$ основных и $s = \frac{m}{q}$ резервных блоков нейронов в каждой группе. Замещение основных блоков с отказавшими нейронами резервными блоками нейронов возможно только внутри каждой q -группы.

Поиск отказавшего нейрона производится системой контроля и переключения с помощью диагностического теста. Тест конструируется так, что в процессе его проведения единичный сигнал появляется на выходе только у отказавшего нейрона. По этому сигналу с помощью переключателей производится отключение блока-столбца с отказавшим нейроном и включение резервного блока путем соответствующего переключения межнейронных связей отключаемого блока с соседними блоками нейронов, а также входных и выходных цепей у всех нейронов, расположенных со стороны блоков резерва от отключаемого блока нейронов.

Обозначим через E_k ($k = 0, 1, \dots, m$) работоспособное состояние рассматриваемой ИНС $S_A(n, m, s)$ с k отказавшими блоками; E_r ($r = m + 1$) - поглощающее состояние системы, т.е. состояние “гибели” ИНС; λ -

интенсивность отказов нейронов системы; $A_k \lambda$ ($1 \leq k \leq m$) - интенсивность переходов системы из состояния E_{k-1} в состояние E_k ; $B_k \lambda$ ($1 \leq k \leq m+1$) - интенсивность переходов системы из состояния E_{k-1} в состояние “гибели“ E_r ; $p_k(t)$ ($0 \leq k \leq m+1$) - вероятность нахождения системы в момент времени t в состоянии E_k .

С учетом сделанных предположений и обозначений определяются коэффициенты A_k и B_k и записывается система дифференциальных уравнений Колмогорова - Чепмена, описывающих поведение рассматриваемой адаптивной ИНС $S_A(n, m, s)$, сложность решения которой не оставляет надежд на аналитические исследования. Для машинного анализа подобных ИНС с целью оптимизации надежностных характеристик $P_{S_A(n, m, s)}(t)$ и $T_{S_A(n, m, s)}$ при заданных ограничениях и диапазонах изменения параметров нейронной сети n, m, q, λ данная задача сводится к задаче целочисленного программирования.

Расширим условия функционирования вышеописанной нейронной сети, поставив в соответствие каждому из q блоков основных ИН n_1, n_2, \dots, n_q интенсивности отказов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$. При этом будем полагать, что интенсивность отказов, не включенных в работу резервных блоков ИН s_1, s_2, \dots, s_q , равна λ_0 . Очевидно, что $\lambda_0 \leq \min \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q \}$. После подключения резервного блока ИН вместо отказавшего в своей группе он начинает работать в том же режиме, что и основные ИН, т.е. с интенсивностью отказов λ_i , $1 \leq i \leq q$.

Обозначим искусственную нейронную сеть, у которой отказавшие блоки ИН не восстанавливаются, $S_{A^0}(n, m, \bar{s})$, а ИНС, у которой отказавшие блоки ИН в процессе работы восстанавливаются с интенсивностью $\mu = const$, обозначим $S_{A^1}(n, m, \bar{s})$.

Основная оптимизационная задача резервирования однородной адаптивной ИНС с замещением отказавших нейронов резервными с постоянным во времени вектором $\bar{s} = (s_1, s_2, \dots, s_q)$ заключается в вычислении такого распределения m резервных нейронных блоков по q группам, которое при заданном разбиении n основных нейронных блоков по q группам обеспечивает либо максимальное среднее время “жизни” нейронной системы $S_{A^i}(n, m, \bar{s})$ $i \in \{0, 1\}$, либо максимальную вероятность безотказной работы этой системы для заданного времени t_f , либо решаются обе указанные задачи и выбирается лучший для разработчика вариант. То есть основная задача сводится к вычислению соответствующего оптимального вектора резервирования \bar{s} , которая, в свою очередь, сводится к задаче целочисленного программирования. В диссертации получены алгоритмы для решения описанных задач на ПЭВМ. В приложении рассмотрены примеры решения задач оптимального резервирования однородной адаптивной ИНС.

Под “старееющей” искусственной нейронной сетью будем понимать сеть, у которой интенсивность отказов нейронов (элементов сети) является возрастающей функцией времени $\lambda(t) \neq const$. При этом, очевидно, закон надежности для такой ИНС не будет экспоненциальным.

Будем полагать, что рассмотренная выше многослойная многовыходная структурно однородная адаптивная ИНС является “старееющей”. Тогда задача оптимального резервирования “старееющей” адаптивной ИНС заключается в нахождении целочисленного вектора $\bar{s} = (s_1, s_2, \dots, s_q)$, где $s_1 + s_2 + \dots + s_q = m$, максимизирующего в зависимости от поставленной цели либо вероятность безотказной работы нейронной сети, либо среднее время ее “жизни”.

Задача оптимизации вероятности безотказной работы адаптивной “старееющей” нейронной сети заключается в следующем. Для заданного времени $t_f > 0$ найти вектор \bar{s}^0 , максимизирующий вероятность безотказной работы $P(t_f, \bar{s}^0)$ “старееющей” адаптивной ИНС $S_A(n, m, \bar{s})$ при заданных ограничениях.

Задача оптимизации среднего времени “жизни” адаптивной “старееющей” нейронной сети заключается в следующем. Найти вектор \bar{s}^1 , максимизирующий среднее время “жизни” $T(S_A(n, m, \bar{s}^1))$ “старееющей” ИНС $S_A(n, m, \bar{s})$ при заданных ограничениях.

Получить точное решение указанных задач не представляется возможным. В диссертации приведен алгоритм для приближенного решения описанных задач на ПЭВМ при помощи метода дискретизации. В приложении рассмотрен пример решения задачи оптимального резервирования однородной адаптивной “старееющей” ИНС.

Еще одной из поставленных и решенных в диссертации задач оптимизации надежности ИНС является следующая задача.

Рассматривается многослойная многовыходная структурно однородная “старееющая” адаптивная ИНС в предположении, что каждый основной и резервный элемент этой сети представляет собой не отдельно взятый искусственный нейрон, а является мини-сетью, например двухранговой, логически стабильной в диапазоне $\{T_v(r, i)\} \quad v=1,2,\dots,m$ одновременного изменения порогов у нейронов мини-сети. Очевидно, что в такой адаптивной ИНС отказавшие мини-сети после их замещения резервными могут восстанавливаться путем изменения порогов ИН сети в диапазоне логической стабильности с интенсивностью $\mu(t)$. После восстановления отказавшие мини-сети по мере надобности могут включаться в работу. Процесс восстановления любой мини-сети может быть многократным до тех пор, пока не будет исчерпан заложенный при синтезе запас ее логической стабильности. Рассматриваемую адаптивную восстанавливаемую “старееющую” ИНС будем обозначать $S_{AB}(n, m, \bar{s})$.

Задача оптимального восстановления “стареющей” адаптивной ИНС $S_{AB}(n, m, \bar{s})$ формулируется следующим образом.

Для заданных функций $\lambda_i(t)$, $0 \leq i \leq q$ и заданного вектора резервирования $\bar{s} = (s_1, s_2, \dots, s_q)$ определить интенсивности восстановления $\mu_i(t)$, $1 \leq i \leq q$ нейронных мини-сетей в группах, минимизирующих функционал

$$U(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_q) = \int_0^{t_f} \left[\sum_{i=1}^q c_i(t) \mu_i(t) \right] dt,$$

при условии, что вероятность безотказной работы восстанавливаемой нейронной системы

$$P(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_q; t_f) \geq d, \quad 0 < d < 1,$$

где t_f - время функционирования системы,

$c_i(t)$ - заданные неубывающие функции, моделирующие удельную стоимость восстановления мини-сетей в i -й группе,

$P(t)$ - вероятность безотказной работы нейронной системы в течение времени t .

Постановка рассматриваемой задачи может быть сформулирована в терминах теории оптимального управления.

Аналитическое решение поставленной задачи невозможно, поэтому данная задача сводится к виду, удобному для решения на ПЭВМ с помощью метода дискретизации. В диссертации приведен детальный алгоритм для приближенного решения описанной задачи на ПЭВМ.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

1. Сделан вывод, что для повышения функциональной надежности искусственных нейронных сетей необходимо использовать максимально логически гибкие искусственные нейроны и объединять их по соответствующим правилам в логически стабильные нейронные сети, функционально устойчивые к флуктуациям параметров нейронов сети и катастрофическим отказам нейронов.
2. Построены вероятностные модели избыточных неадаптивных и адаптивных к отказам искусственных нейронных сетей произвольной конфигурации, позволяющие исследовать функциональную надежность искусственных нейронных сетей. Исследована надежность и среднее время “жизни” двух типов адаптивных к

отказам ИНС при различных алгоритмах адаптации и возникновении в нейронной сети не только отказов, но и сбоев.

3. Разработана математическая модель и исследована многослойная многовыходная структурно однородная адаптивная к отказам искусственная нейронная сеть с замещением отказавших нейронов резервными. Показано, что задачи выбора наилучшей в смысле максимизации вероятности безотказной работы и среднего времени “жизни” нейронной системы сводятся к задаче целочисленного программирования.
4. Поставлена и решена задача оптимального резервирования, максимизирующего среднее время “жизни”, и задача оптимального резервирования, максимизирующего вероятность безотказной работы на заданном временном интервале, для многослойной многовыходной структурно однородной адаптивной искусственной нейронной сети с замещением отказавших нейронов резервными при пуассоновском потоке отказов и восстановления отказавших нейронных блоков. Получены детальные алгоритмы для решения указанных задач на ПЭВМ.
5. Предложен способ решения задачи оптимального резервирования “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, в которой интенсивность отказов нейронов является возрастающей функцией времени. Разработаны алгоритмы для решения на ПЭВМ задач оптимизации вероятности безотказной работы и оптимизации среднего времени “жизни” “стареющей” адаптивной ИНС.
6. Поставлена и решена задача оптимизации восстановления избыточной “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети, состоящей из логически стабильных нейронных мини-сетей. Показано, что решение такой оптимизационной задачи сводится к задаче оптимального управления. Разработан детальный алгоритм решения данной задачи на ПЭВМ.

В приложении приведены примеры решения задач оптимизации функциональной надежности ИНС, подтверждающие работоспособность алгоритмов, разработанных в главе 4 диссертации.

Публикации по теме диссертации

1. Потапов В.И., Потапов И.В. Математические модели и функциональные возможности искусственных нейронов / Омский гос. техн. ун-т – Омск, 2001. – 12 с. - Деп. в ВИНТИ 03.05.01, № 1140.
2. Потапов В.И., Потапов И.В. Классификация сетей искусственных нейронов, используемых для обработки цифровой информации // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: Доклады VIII

- международной научно-практической конференции (Барнаул 17-19 сент. 2001 г.) – Томск, 2001. – Ч. 2. – С. 194-197.
3. Потапов И.В. Повышение функциональной надежности и среднего времени безотказной работы искусственной нейронной сети для обработки изображений и распознавания образов // Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения: Сб. докл. Технологического конгресса (Омск 5 – 9 июня 2001 г.). – Омск, 2001. – Ч. 1. С. 324-327.
 4. Потапов И.В. Синтез оптимизированных логически стабильных искусственных нейронных сетей, адаптивных к отказам нейронов / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2001. – 14 с. - Деп. в ВИНТИ 21.09.01, № 2014.
 5. Потапов В.И., Потапов И.В. Расчет функциональной надежности искусственных нейронных сетей // Омский научный вестник. – 2001. – Вып. 14. – С. 144-145.
 6. Потапов В.И., Потапов И.В. О логической избыточности функционально устойчивых сетей искусственных нейронов // Омский научный вестник. – 2001. – Вып. 15. – С. 90-91.
 7. Потапов В.И., Потапов И.В. Вероятностная модель функционирования избыточной адаптивной искусственной нейронной сети // Доклады СО АН ВШ. – 2001. - № 2 (4). – С. 75-82.
 8. Потапов И.В. Минимизация процесса адаптации логически стабильных искусственных нейронных сетей к отказам нейронов // Омский научный вестник. – 2001. – Вып. 17. – С. 147-149.
 9. Потапов В.И., Потапов И.В. Математические модели и расчет функциональной надежности адаптивных искусственных нейронных сетей двух типов // Омский научный вестник. – 2001. – Вып. 17. – С. 143-147.
 10. Потапов В.И., Потапов И.В. О структурной сложности искусственных нейронов с пресинаптическим взаимодействием и реализации функций от большого числа переменных // Доклады СО АН ВШ. – 2002. – № 1 (5). – С. 84-91.
 11. Потапов И.В. Математическое моделирование надежностных характеристик избыточных адаптивных искусственных нейронных сетей при пуассоновском и непуассоновском процессе восстановления // Материалы докладов межрегиональной научно-технической конференции (Томск 14-16 мая 2002 г.). – Томск, 2002. – Ч. 1. – С. 233-234.
 12. Потапов В.И., Потапов И.В. Математическая модель адаптивной искусственной нейронной сети с замещением отказавших нейронов резервными // Омский научный вестник. – 2002. – Вып. 18. – С. 135-138.

13. Потапов В.И., Потапов И.В. Направления и результаты исследований искусственных нейронов и искусственных нейронных сетей на кафедре информатики и вычислительной техники ОмГТУ // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: Доклады VIII международной научно-практической конференции (Кемерово 26-27 сент. 2002 г.). – Томск, 2002. – Ч. 2. – С. 162-165.
14. Потапов И.В. Аналитическое исследование среднего времени «жизни» двух типов адаптивных искусственных нейронных сетей // Омский научный вестник. – 2002. – Вып. 19. – С. 127-129.
15. Потапов И.В. Решение задачи оптимального резервирования однородной адаптивной искусственной нейронной сети с замещением отказавших нейронов резервными при пуассоновском потоке отказов // Омский научный вестник. – 2002. – Вып. 20. – С. 146-148.
16. Потапов В.И., Потапов И.В. Оптимизация восстановления избыточной стареющей адаптивной искусственной нейронной сети, состоящей из логически стабильных нейронных мини-сетей // Омский научный вестник. – 2002. – Вып. 20. – С. 143-146.
17. Потапов В.И., Потапов И.В. Анализ адаптивных к отказам нейрокомпьютерных систем на базе функционально устойчивых искусственных нейронных сетей // Динамика систем, механизмов и машин: Материалы IV Международной научно-технической конференции (Омск 12-14 ноября 2002 г.) – Омск, 2002. – Кн. 1. – С. 233-236.
18. Потапов И.В. Проблемы надежности искусственных нейронных сетей // Динамика систем, механизмов и машин: Материалы IV Международной научно-технической конференции (Омск 12-14 ноября 2002 г.) – Омск, 2002. – Кн. 1. – С. 236-238.
19. Потапов И.В. Задачи оптимизации функциональной надежности избыточных искусственных нейронных сетей с замещением отказавших нейронов резервными // Омский научный вестник. – 2002. – Вып. 21. – С. 83-85.
20. Потапов В.И., Потапов И.В. Решение задачи оптимального резервирования “стареющей” адаптивной искусственной нейронной сети // Доклады СО АН ВШ. – 2003. - № 1 (7). – С. 35-43.
21. Потапов В.И., Потапов И.В. Оптимизация функциональной надежности искусственных нейронных сетей нейрокомпьютеров // Развитие оборонно-промышленного комплекса на современном этапе: Материалы научно-технической конференции (Омск, 4-6 июня 2003 г.) – Омск, 2003. – Ч. 1. – С. 131-133.