

НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

КНИГА 4

В.А. Головки

**НЕЙРОННЫЕ СЕТИ:
ОБУЧЕНИЕ,
ОРГАНИЗАЦИЯ
И ПРИМЕНЕНИЕ**

Под общей редакцией доктора технических наук,
профессора А. И. Галушкина

Рекомендовано в качестве учебного пособия для студентов по направлению
подготовки бакалавров и магистров «Прикладная математика и физика»
учебно-методическим советом по указанному направлению

Издательское предприятие редакции журнала "Радиотехника"



Москва 2001

УДК 621
Г15
ББК 32.818

Нейрокомпьютеры и их применение

Рецензенты:

докт. техн. наук Р.Х. Садыхов;
докт. техн. наук В.В. Голенков

Головко В. А.

Г15 Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн. 4: Учеб. пособие для вузов / Общая ред. А. И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.: ил. (Нейрокомпьютеры и их применение).

ISBN 5-93108-05-8

Изложены математические и алгоритмические аспекты функционирования нейронных сетей с прямыми и обратными связями; отражены вопросы самоорганизации, отказоустойчивости и реализации нейронных сетей на системных процессорах; большое внимание уделено применению и проектированию нейронных сетей для решения различного рода задач.

Для студентов по направлению подготовки бакалавров и магистров «Прикладная математика и физика», а также для научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся разработкой и применением сверхвысокопроизводительной вычислительной техники.

УДК 621
ББК 32.818

Научная серия

НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Владимир Адамович Головко

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ:

ОБУЧЕНИЕ, ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ.

Кн. 4

Под общей редакцией докт. техн. наук, проф. А. И. Галушкина

Зав. редакцией И. Е. Якушина

Редактор С.К. Куприянова

Изд. № 80 Слано в набор 19.07.2001. Подписано в печать 20.09.2001. Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная. Печ. л. 16. Уч. изд. л. 18,5. Тираж 600 экз. Зак. № 1337

ЛР № 065229 от 20.06.97.

Издательское предприятие редакции журнала “Радиотехника”.

103031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6, ИПРЖР.

Тел./факс: 921-48-37; 925-78-72; 925-92-41.

Е-mail: iprzh@online.ru

www.webcenter.ru/~iprzh/

Отпечатано в Подольской типографии Чеховского полиграфического комбината Комитета по печати РФ.

142 ПП. с Подольск. ж-л. Пирова. 25

ISBN 5-93108-05-8

© ИПРЖР. 2001

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 6 |
| ВВЕДЕНИЕ | 8 |
| В.1. На стыке наук | 8 |
| В.2. Биологический нейрон | 9 |
| В.3. Нейронная организация мозга | 10 |
| В.4. Морфогенез мозга | 14 |
| В.5. Механизмы обучения | 15 |
| В.6. Адаптация и самоорганизация | 18 |
| В.7. Искусственные нейронные системы | 28 |
| В.8. Классификация искусственных нейронных сетей | 29 |
| ГЛАВА 1. ОДНОСЛОЙНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ | 33 |
| 1.1. Формальный нейрон | 33 |
| 1.2. Функции активации нейронных элементов | 34 |
| 1.3. Нейронные сети с пороговой функцией активации | 37 |
| 1.4. Правило обучения Хебба | 39 |
| 1.5. Процедура обучения Розенблатта | 42 |
| 1.6. Геометрическая интерпретация процедуры обучения персептрона | 44 |
| 1.7. Правило обучения Видроу-Хоффа | 45 |
| 1.8. Выбор адаптивного шага обучения | 48 |
| 1.9. Использование псевдообратной матрицы для обучения линейных нейронных сетей | 50 |
| 1.10. Анализ линейных нейронных сетей | 52 |
| 1.11. Линейная ассоциативная память | 52 |
| 1.12. Нелинейная ассоциативная память | 55 |
| 1.13. Использование линейной нейронной сети для прогнозирования | 55 |
| ГЛАВА 2. МНОГОСЛОЙНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ | 59 |
| 2.1. Топология и анализ многослойных нейронных сетей | 59 |
| 2.2. Нейронные сети высокого порядка | 61 |
| 2.3. Математические основы алгоритма обратного распространения ошибки | 62 |
| 2.4. Обобщенное дельта-правило для различных функций активации нейронных элементов | 65 |
| 2.5. Алгоритм обратного распространения ошибки | 67 |
| 2.6. Недостатки алгоритма обратного распространения ошибки | 68 |
| 2.7. Рекомендации по обучению и архитектуре многослойных нейронных сетей | 69 |
| 2.8. Адаптивный шаг обучения | 71 |
| 2.9. Модификация адаптивного шага обучения | 76 |
| 2.10. Алгоритм послонного обучения | 78 |

| | |
|---|------------|
| 2.11. Сравнительный анализ алгоритмов обучения | 81 |
| 2.12. Гетерогенные нейронные сети | 85 |
| 2.13. Алгоритм многократного распространения ошибки..... | 87 |
| 2.14. Использование логарифмической функции активации..... | 89 |
| 2.15. Применение гетерогенных нейронных сетей для прогнозирования | 91 |
| ГЛАВА 3. МНОГОСЛОЙНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ С ОБРАТНЫМ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИИ | 93 |
| 3.1. Рекуррентные нейронные сети..... | 93 |
| 3.2. Рециркуляционные нейронные сети | 99 |
| ГЛАВА 4. РЕЛАКСАЦИОННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ | 118 |
| 4.1. Устойчивость динамических систем | 118 |
| 4.2. Нейронная сеть Хопфилда | 120 |
| 4.3. Нейронная сеть Хэмминга | 141 |
| 4.4. Двухнаправленная ассоциативная память..... | 144 |
| ГЛАВА 5. САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ КОХОНЕНА..... | 148 |
| 5.1. Общая характеристика сетей Кохонена | 148 |
| 5.2. Конкурентное обучение | 149 |
| 5.3. Векторный квантователь | 153 |
| 5.4. Самоорганизующиеся карты Кохонена..... | 155 |
| 5.5. Решение задачи коммивояжера | 158 |
| ГЛАВА 6. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ АДАПТИВНОГО РЕЗОНАНСА..... | 161 |
| 6.1. Основы адаптивного резонанса | 161 |
| 6.2. Архитектура нейронной сети адаптивного резонанса..... | 163 |
| 6.3. Функционирование ART1-сети..... | 165 |
| 6.4. Алгоритм обучения и функционирования ART1-сети..... | 166 |
| ГЛАВА 7. ГИБРИДНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ | 169 |
| 7.1. Нейронные сети встречного распространения | 169 |
| 7.2. Нейронные сети с радиально-базисной функцией..... | 175 |
| 7.3. Иерархический классификатор..... | 178 |
| ГЛАВА 8. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОТ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ | 181 |
| 8.1. Модели роботов | 181 |
| 8.2. Управление движением робота по заданной траектории..... | 182 |
| 8.3. Автономное управление мобильным роботом..... | 186 |
| 8.4. Автономное управление автомобилем..... | 201 |
| 8.5. Интеллектуальная система для прогнозирования погрешностей сенсоров | 202 |
| ГЛАВА 9. ОТОБРАЖЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА СИСТОЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССОРЫ | 205 |

| | |
|---|------------|
| 9.1. Однослойные нейронные сети | 205 |
| 9.2. Многослойные нейронные сети | 210 |
| 9.3. Релаксационные нейронные сети | 215 |
| ГЛАВА 10. САМООРГАНИЗАЦИЯ И | |
| ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ | 217 |
| 10.1. Статистические модели выхода годных | 217 |
| 10.2. Показатели надежности | 223 |
| 10.3. Факторы, влияющие на структурную реконфигурацию линейных систолических процессоров | 224 |
| 10.4. Параллельный однородный поток входных данных | 226 |
| 10.5. Параллельный неоднородный поток входных данных | 233 |
| 10.6. Самоорганизующаяся линейная нейронная сеть | 237 |
| 10.7. Отказоустойчивая сеть Хопфилда | 238 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Статистическая таблица размеров | |
| стока вод реки Березины | 243 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Результаты работы сети Хопфилда в | |
| задаче коммивояжера | 245 |
| ЛИТЕРАТУРА | 248 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Существует два направления в теории искусственного интеллекта. Первое направление является традиционным. Оно использует методы логических рассуждений и символической обработки информации. Второе направление связано с построением сетей, состоящих из нейронных элементов. Оно опирается на биологические основы естественного интеллекта и позволяет проектировать системы, способные к обучению и самоорганизации. Использование нейросетевых методов в теории искусственного интеллекта называется *нейроинтеллектом*.

В книге основное внимание уделено рассмотрению теории нейронных сетей и их использованию для решения задач.

Введение посвящено различным аспектам нейронной организации головного мозга и обучения биологических систем. Рассмотрены процессы морфогенеза и самоорганизации как физических, так и биологических систем, основные этапы развития искусственных нейронных сетей и их классификация. Приведены модели самоорганизации систем.

В главе 1 рассмотрены нейронные сети с одним обрабатывающим слоем и прямыми связями (feedforward networks). Приведены основные определения, различные алгоритмы обучения однослойных нейронных сетей, а также вывод выражения для адаптивного шага обучения, использование которого позволяет уменьшить временную сложность процесса обучения. Показано применение однослойных нейронных сетей в качестве ассоциативной памяти и для прогнозирования временных рядов.

В главе 2 отражены различные аспекты построения и обучения многослойных нейронных сетей с прямыми связями (multilayer feedforward networks). Рассмотрены алгоритм обратного распространения ошибки (backpropagation algorithm) и его модификации, которые ориентированы на ускорение процесса обучения. Дан анализ применения многослойных нейронных сетей для решения задач распознавания, прогнозирования и кодирования информации.

В главе 3 рассмотрены функционирование и алгоритмы обучения рекуррентных и рециркуляционных нейронных сетей, а также алгоритмы обучения, как известных нейронных сетей, так и разработанных автором.

В главе 4 даны теоретический анализ и различные аспекты применения релаксационных нейронных сетей. Приведены архитектура, функционирование и обучение этих сетей. Для сети Хопфилда рассмотрен механизм получения функции Ляпунова и анализ устойчивости.

В главе 5 показаны самоорганизующиеся сети Кохонена, которые характеризуются обучением без учителя. Приведены архитектура и различные алгоритмы обучения таких нейронных сетей. Рассмотрен алгоритм решения задачи коммивояжера с использованием сети Кохонена.

В главе 6 приведены нейронные сети адаптивного резонанса, а также основные принципы построения и функционирования таких сетей.

В главе 7 рассмотрены гибридные нейронные сети, которые представляют собой объединение различного рода нейронных сетей и концепций их обучения, а также нейронные сети для иерархической классификации образов. Приведен анализ известных гибридных сетей, таких как нейронные сети встречного распространения и с радиально-базисной функцией активации.

В главе 8 отражены различные аспекты применения нейронных сетей для автономного управления транспортными средствами и прогнозирования погрешностей сенсорных устройств. Основное внимание уделено описанию нейронной системы для автономного управления мобильным роботом. Рассмотрены основные принципы функционирования нейронных систем и приведены результаты экспериментов.

В главе 9 представлены различные варианты реализации нейронных сетей на систолических массивах.

В главе 10 приведены структурная самоорганизация и отказоустойчивость нейронных сетей, реализованных на систолических процессорах. Предложены различные варианты построения схем, которые характеризуются самоорганизацией и отказоустойчивостью. Даны количественные оценки показателей отказоустойчивости при проектировании схемы на уровне кристалла. Рассмотрены примеры проектирования отказоустойчивых нейронных сетей.

Автор стремился изложить материал в доступной для широкого круга специалистов форме и восполнить пробелы в отечественной литературе по данной тематике. Поэтому в книге подробно рассмотрены различные нейронные сети и приводится много примеров.

Данная работа выполнена в соответствии с INTAS проектами 97-0606 "Development of an intelligent sensing instrumentation structure" и 97-2028 "Intelligent neural system for antonomous control of a mobile robot", а также проектом BLR99/003 в рамках программы DLR (Deutsches Zentrum fuer Luft und Raumfahrt). Автор благодарит INTAS и DLR за поддержку исследований в области нейронинтеллекта.

Автор благодарит рецензентов – докт. техн. наук, проф. Р. Х. Садыхова и докт. техн. наук, проф. В. В. Голенкова за постоянное внимание и поддержку в работе, проф. К. Шиллинга, проф. Н. Рота (Германия), А. Саченко (Украина), Т. Лапоулоса (Греция), Л. Грандинетти (Италия) за плодотворные дискуссии и предоставление экспериментальной базы для проведения исследований, а также своих коллег по лаборатории нейронных сетей Брестского государственного технического университета Ю. В. Савицкого, О. Н. Игнатюка, А. П. Дунца за помощь в проведении исследований.

Автор и издательство будут признательны за предложения и замечания по книге, которые следует направлять по адресу:

103031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6, ЗАО "ИПРЖР"

Автор

ЛИТЕРАТУРА

1. Советский энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1983.
2. *Фишбах Д.* Психика и мозг. – В мире науки. – М., 1992, №11–12, с.10–20.
3. *Хьюбелл Д.* Глаз, мозг, зрение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
4. *Гольдман-Ракич П.* Оперативная память и разум. – В мире науки. – М., 1992, №11–12, с.63–70.
5. *Кендел Э., Хокинг Р.* Биологические основы обучения и индивидуальности. – В мире науки. – М., 1992, №11–12, с.43–51.
6. *Зеки С.* Зрительный образ в сознании и мозге. – В мире науки. – М., 1992, №11–12, с.33–41.
7. *Шатц К.* Развивающийся мозг. – В мире науки. – М., 1992, №11–12, с.23–30.
8. *Головкин В. А.* Нейроинтеллект: проблемы и исследования. – Тр. X научно-технической конференции. – Брест: БПИ, 1998, с.63–67.
9. *Сенко Д.* Стареющий мозг. – В мире науки. – М., 1992, №11–12, с.93–100.
10. *Фрейд Зигмунд.* Психология бессознательного: Сб. произведений/Под науч. ред. *М. Г. Ярошевского.* – М.: Просвещение, 1989.
11. *Крик Ф., Кох К.* Проблема сознания. – В мире науки. – М., 1992, №11–12, с.113–120.
12. *Невв Д.* The Organization of Behaviour. New York: Wiley, 1949.
13. *Хакен Г.* Синергетика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980.
14. *Пригожин И.* Порядок из хаоса: Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1986.
15. *Рабинович М. К., Трубецков Д. И.* Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука, 1984.
16. *Mcculloh, W., Pitts, W.* A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, №5, pp.115–133.
17. *Розенблат Ф.* Принципы нейродинамики: Персептрон и теория механизмов мозга: Пер. с англ. – М.: Мир, 1965.
18. *Widrow B., Hoff M.* Adaptive switching circuits // In 1960 IRE WESCON Convention Record. – DUNNO, 1960, pp.96–104.
19. *Minsky, M., Papert, S.* Perceptrons: An introduction to Computational Geometry. The MIT Press, 1969.
20. *Anderson J.* Neural models with cognitive implications // Basic Processes in Reading Perception and Comprehension Models. – Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1977, pp.27–90.
21. *Kohonen, T.,* Associative Memory: A System – Theoretical Approach. Springer Verlag, 1977.
22. *Grossberg, S.,* Adaptive pattern classification and universal recoding // Biological Cybernetics, 1976, № 23, pp.121–134.

23. *Hopfield, J.* Neural Networks and physical systems with emergent collective computational abilities // Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 1982, pp.2554–2558.
24. *Kohonen, T.* Self-organised formation of topologically correct feature maps // Biological Cybernetics, 1982, no.43, pp.59–69.
25. *Rumelhart, D., Hinton, G., Williams, R.* Learning representation by backpropagation errors // Nature, 1986, №323, pp.533–536.
26. *Дуда Р., Харп П.* Распознавание образов и анализ сцен: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976.
27. *Golovko, V., Savitsky, Ju., Gladischuk.* Predicting Neural Net // Proceedings Int. Conf. CM NDT–95, Berlin: DGZfP, 1995, pp.348–353.
28. *Гантмахер Ф.* Теория матриц. – М.: Наука, 1988.
29. *Ruediger, Brause.* Neuronale Netze eine Einfuehrung in die Neuroinformatik.-Stuttgart: Teubner, 1995.
30. *Golovko, V., Savitsky, Ju., Glaischuk, V.,* Neural Nets Training Algorithms for Pattern Recognition and Prediction // Proceeding Int. Conf. on Pattern Recognition. – Szczecin: Technical University, Poland, 1995, pp.167–171.
31. *Golovko, V., Savitsky, Ju., Gladischuk, V.,* A neural net for prediction problems // Proceedings of Int. Conf. on technical informatics. – Timisoara: University of Timisoara, Romania, 1996, t.49–52.
32. *Головко В. А., Дунец А. П., Левонюк Д. Н.* Метод обучения многослойной нейронной сети // Тр. X научно-технической конференции. – Брест: – БПИ, 1998, с.8–15.
33. *Golovko, V., Dunets, A., Savitsky, Y.,* The Training of Feedforward Neural Networks // Proceedings of International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence ICNNAI'99 (October 12–15, 1999, Brest Belarus), Published by Brest Polytechnic Institute, 1999, pp.36–39.
34. *Golovko, V., Savitsky, Y., Theodore Laopoulos, Anatoly Sachenko, Lucio Grandinetti.* Technique for Efficient Training of MLP with Adaptive Training Step Rate Estimation. // Proc. of Second Int. ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems EIS'2000, University of Paisley, Scotland, U.K., 2000. pp.145–148.
35. *Golovko, V., Savitsky, Y., Theodore Laopoulos, Anatoly Sachenko, Lucio Grandinetti.* Technique of Learning Rate Estimation for Efficient Training of MLP // Proc. of Int. Joint Conf. on Neural Networks IJCNN'2000, Como, Italy, 2000, pp.323–329.
36. *Golovko, V., Savitsky, Y., Theodore Laopoulos, Anatoly Sachenko, Lucio Grandinetti.* Efficient Training of MLP with Training Step Rate Estimation. // Proc. of Euro-International Symposium on Computational Intelligence E-ISCI, Kosice, Slovakia. Springer-Verlag Company, 2000, pp.21–26.
37. *Lipmann, R.* An introduction to computing with neural nets // IEEE Acoustic, Speech and Signal Processing Magazine, 1987, no 2, L.4–22.

38. *Скурихин А. Н.* Нейронные сети: определения, концепции, применение. – М.: ЦНИИ управления экономики и информатики, 1991.
39. *Колмогоров А. Н.* Представление непрерывных функций многих переменных суперпозицией функций одной переменной и сложением // ДАН, 1958, №.5, с.953–956.
40. *Rojas Raul.* Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einfuehrung. – Berlin: Springer–Verlag, 1993.
41. *Hornik, K., Stinchcombe, M., and White, H.,* Multilayer feedforward networks are universal approximators // Neural Networks, 1989, №2, pp.359–366.
42. *Maxwell, T., Giles, C., Lee, Y., Chen, H.,* Nonlinear Dynamics of Artificial Neural Systems // Proceedings of the Conf. On Neural Networks for Computing. – American Institute of Physics, 1986.
43. *Rumelhart, D., Hinton, G, and Williams, R.,* Learning Internal Representations by errors propagation. // Parallel Distributed Processing. Cambridge: MIT Press, 1986.
44. *Hertz, J., Krogh, A., Palmer, R.,* Introduction to the theory of neural computation. – Addison Wesley Publishing Company, 1991.
45. *Kroese, B.,* An introduction to Neural Networks. – Amsterdam: University of Amsterdam, 1996.
46. *Поляк Б. Т.* Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983.
47. *Темников Ф. Е., Афонин В. А., Дмитриев В. И.* Теоретические основы информационной техники – М.: Энергия, 1979.
48. *Jordan, M.,* Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine // Proceedings of the Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society. – Hillsdale: Erlbaum, 1986, pp.531–546.
49. *Elman, J.* Finding structure in time // Cognitive Science, 1990, №.14, pp.179–211.
50. *Haykin, S.,* Neural Networks: A comprehensive Foundation.- NewYork: Macmillan College Publishing Company, 1994.
51. *Pedersen, M.,* Training Recurrent Networks // Proceeding of the IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing VII. –New Jersey: IEEE, 1997.
52. *Golovko, V., Savitsky, Y.,* New Approach of the Recurrent Neural Network Training. // Proceedings of International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence ICNNAI'99 (October 12–15, 1999, Brest, Belarus) – Published by Brest Polytechnic Institute, 1999, pp.32–35
53. *Takens, F.,* Detecting Strange Attractors in Fluid Turbulence. In dynamical Systems and Turbulence. – Springer, Berlin, 1981.
54. *Hinton, G., McClelland J.,* Learning Representation by Recirculation // Proceedings of IEEE Conference on Neural Information Processing Systems, 1989.
55. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. / С. А., Айвазян и др.; Под ред. С. А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989.

56. *Афифи А., Эйзен С.* Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982.
57. *Мазиновский Л. Г.* Классификация объектов средствами дискриминантного анализа. – М.: Наука, 1978.
58. *Cottrell, G., Munro, P., Zipser, D.* Learning Internal Representation from Gray-Scale Images: An Example of Extensional Programming // Proceedings 9th Annual Conference of the Cognitive Science Society, 1987, pp.461–473.
59. *Cottrell, G., Munro, P., Zipser, D.* Image compression by back-propagation: a demonstration of extensional programming // Tech. Rep. N.TR8702. – USCD: Institute of Cognitive Sciences, 1987.
60. *Golovko, V., Ignatiuk, O., Savitsky, Y., Theodore Laopoulos, Anatoly Sachenko, Lucio Grandinetti.* Unsupervised learning for dimensionality reduction. // Proc. of Second Int. ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems EIS'2000, University of Paisley, Scotland, U.K., 2000, pp.140–144.
61. *Golovko, V., Savitsky, Y., Theodore Laopoulos, Anatoly Sachenko, Lucio Grandinetti.* Unsupervised Neural Network Training for data Compression. // Proc. of Second Int. ICSC Symposium on Neural Computation NC'2000, Berlin, Germany, Publication by ICSC Academic Press, Canada / Switzerland, 2000.
62. *Hopfield, J.* Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons // Proceeding of the National Academy of Science USA, 1984, vol.81, pp.3088–3092.
63. *Hopfield, J., Tank, D.* Neural computation of decisions in optimization problems // Biological Cybernetics, 1985. vol.52. pp.141–152.
64. *Тэнк Д., Хопфилд Д.* Коллективные вычисления в нейроподобных электронных схемах // В мире науки, 1988, №2, с.45–53.
65. *Kosko, B.* Competitive Adaptive Bidirectional Associative Memories // Proceedings of the IEEE First International Conference on Neural Networks–IEEE Press, 1987, vol.2.
66. *Kosko, B.* Feedback Stability and Unsupervised Learning // Proceedings of the IEEE Second International Conference on Neural Networks. – IEEE Press, 1988.
67. *Ackley, D., Hinton, G., Sejnowski T.* A learning algorithm for Boltzmann machines // Cognitive Sciences, 1985, vol.9, pp.147–169.
68. *Ляпунов А. М.* Общая задача об устойчивости движения. – М.: Гостехиздат, 1952.
69. *Воронов А. А., Титов В. К., Новогранов Б. Н.* Основы теории автоматического регулирования и управления: Учебное пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1977.
70. Теория автоматического управления / Под. ред. *А. С. Шаталова*. – М.: Высш. школа, 1977.
71. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. *А. А. Красковского*. – М.: Наука, 1987.

72. Меламед И. И. Нейронные сети и комбинаторная оптимизация. – Автоматика и телемеханика, 1994, №11, с.3–40.
73. Гусак А. А., Гусак Г.М. Справочник по высшей математике. – М.: Наука і техніка, 1991.
74. Nijhuis, J., Spaanenburg, L., Fault tolerance of neural associative memories // Comput and Digital Techn, 1989, no.5, pp.389–394.
75. Лосев В. В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки. – М.: Высш. школа, 1990.
76. Lam, D., Carroli, J., Pattern recognition using a double layer assotiative memory // Proceedings Int. Conf. on Real-Time Signal Process. – San Diego, 1989, pp.177–188.
77. Aiyer, V., Niranjana, M., Fallside, F., A Theoretical Investigation into the Performance of the Hopfield Model // IEEE Transactions on Neural Networks, 1990, vol.2, no2, pp.204–215.
78. Wilson, G., Pawley, G., On the Stability of the travelling salesman problem algorithm of Hopfield and Tank // Biological Cybernetics, 1988, no58, pp.63–70.
79. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1988.
80. Kohonen, T., Self-organizing and Associative Memory. – Berlin: Springer Verlag, 1984.
81. Kohonen, T., Self-organizing Maps. – Heidelberg: Springer Verlag, 1995.
82. Grossberg, S., Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance // Cognitive Science, 1987, no11, pp.23–63.
83. Kohonen, T., Hynninen, J., Kandas, J., Laaksonen, J., Torkkola, K., LVQPAK: The Learning Vector Quantization. – Helsinki: University of Technology, 1995.
84. Grossberg, S., Adaptive pattern classification and universal recoding // Biological Cybernetics, 1976, no23, pp.121–134.
85. Lipmann, R., Review of neural networks for speech recognition // Neural Computation, 1989, no1, pp.1–38.
86. Grossberg, S., Nonlinear neural networks: principles, mechanisms and architectures // Neural Networks, 1988, no1, pp.17–61.
87. Grossberg, S., Carpenter, G. A., Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine // Neural Networks and Natural Intelligence. – MIT Press, 1988, vol.37, pp.54–115.
88. Hecht-Nielsen, R., Counterpropagation Networks // Proceedings of the IEEE First International Conference on Neural Networks. – IEEE Press, 1987, pp.19–32.
89. Hecht-Nielsen, R., Applications of Counterpropagation Networks // Neural Networks, 1988, vol.1, no2, pp.131–139.

90. Moody, J., Darken, C., Fast Learning in networks locally-tuned processing units // *Neural Computation*, 1989, no1, pp.281–294.
91. *Bishop, C.*, *Neural Networks for Pattern Recognition*. – Oxford University Press, 1995.
92. *Hartman, E., Keeler, D., Kawalski, J.*, Layered neural networks with gaussian hidden units as universal approximator // *Neural Networks*, 1990, vol.35, no2, pp.210–215.
93. *Millan, J.*, Reinforcement learning of goaldirected obstacle-avoiding reaction strategies in an autonomous mobile robot // *Robotics and Autonomous Systems*, 1995, vol.15, no4, pp.273–297.
94. *Thrun, S.*, An approach to learning mobile robot navigation // *Robotics and Autonomous Systems*, 1995, vol.15, no4, pp.301–319.
95. *Jlg, W., Berns, R.*, A learning arhitecture based on reinforcement learning for adaptive control of the Walking machine LAURON // *Robotics and Autonomous Systems*, 1995, vol.15, no4, pp.321–334.
96. *Schilling, K., Roth, H.*, Sensordatefusion mit Fuzzy Logic zur Steuerung mobiler Roboter // *Neuro-fuzzu symposium*. – Friedrichshafen: Graf-Zeppelin-Haus, 1995.
97. *Schilling, K., Garbajosa, J., Mellado, M., Mayerhafer, R.*, Design of Flexible Autonomes Transport Robots for Industrial Production // *Proceedings IEEE International Simposium on Industrial Electronics*. – Guimares. – IEEE Press, 1997, vol.3, pp.791–796.
98. *Roth, H., Shilling, K.*, Rotating Ultrasonic Sensors for Obstacle Clas-sification Applied to Mobile Robots // *Proceedings 4th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, 1997.
99. *Schilling, K., Golovko, V., Dimakov, V.*, Neural system for mobile robot autonomous navigation // *Proccedings of International Workshop on disign methodologies for signal processing*.-Szczecin: Silesian Technical University, 1996, pp.124–130.
100. *Golovko, V., Dimakov, V., Savitsky, Ju., Gladischuk, V.*, Neural system for intelligent robot navigation // *Proceedings of International Conference on Technical Informatics*. – Timisoara: University of Timisoara, 1996, pp.63–70.
101. *Golovko, V., Dimakov, V.*, Neural Networks for autonomous mobile robot control // *Proceedings of international Conference NITE'96*.-Szczecin: Technical University, 1996.
102. *Golovko, V., Dimakov, V., Schilling, K.*, Intelctual system for control of mobile robot // *Proceedings of International Conference "New trends in Artificial Intelligence and Neural Networks"*.– Ankara: EMO Scientific Books, 1997.
103. *Golovko, V., Dimakov, V.*, Neural Cntrol System for Mobile Robot // *Preprints of International Workshop on Intellegent Control IN-CON'97*: – Sofia: Techical University, 1997.
104. *Golovko, V., Dimakov, V.*, Intellectual Simulation of Mobile Robot Control System // *Proccedings of the High Perfomance Computing*

- Symposium. – San Diego: The Society for Computer Simulation International, USA, 1998, pp.440–445.
105. *Golovko, V., Dimakov, V.*, Intelligent Neural System for Vehicle Control // Proceeding of the High Performance Computing Symposium. – San Diego: The Society for Computer Simulation International, USA, 1998, pp.110–115.
 106. *Golovko, V., Dimakov, V.*, Architecture of Neural System for Control of Autonomous Vehicles // Preprints of the 3rd IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles. – Oxford UK: Elsevier Science Ltd, 1998, vol.1, pp.287–297.
 107. *Головко В.* Интеллектуальная нейронная система для автономного управления мобильным роботом // Труды X научно-технической конференции. – Брест: БПИ, 1998, с.15–25.
 108. *Golovko, V., Dimakov, V.*, Neural Systems for a Route Planning for the Mobile Robot // Proceedings of the Seventh Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks. – Ankara: Bilkent University, 1998, pp.267–268.
 109. *Golovko, V.A., Klimovich, A.N., Gladyschuk, V.B.*, Pre-processing of the sensors information for robustness control of the mobile robot // Proceedings of the Second World manufacturing congress WMC'99 (University of Durham, UK, September 27–30). Publication by ICSC Academic Press, Canada/Switzerland, 1999, pp.362–367.
 110. *Dimakov, V., Golovko, V., Schilling, K., Pico, J.*, Self-organizing optimal route planning system for control of an autonomous mobile robot // Proceedings of IEEE international Workshop on Intelligent Signal processing WISP'99 (September 4–7, 1999, Budapest, Hungary). Published by Technical University of Budapest, 1999, pp.99–103.
 111. *Dimakov, V., and Golovko, V.*, The Neural Network of Best Path Planning // In Proceedings of International Conference on Information Technologies for Education, Science and Business – Minsk, Belarus, 1999, pp.220–222.
 112. *Golovko, V., Schilling, K., Sadykhov, R., Albertos, P., Dimakov, V.* The architecture of the neural system for control of a mobile robot // Proc. of the International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence (ICNNAI'99), Ed. Vladimir Golovko – Brest, BPI, 1999, pp.57–61.
 113. *Golovko, V.*, Reactive control of a mobile robot based on neural networks // Proc. of the International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence (ICNNAI'99), Ed. Vladimir Golovko – Brest, BPI, 1999, pp.62–68.
 114. *Dimakov, V., Golovko, V.*, Self-Organizing Path Planning Control System for a Vehicle // Proc. of Second Int. ICSC Symposium on Neural Computation NC'2000 – Berlin, Germany, Publication by ICSC Academic Press 2000.

115. *Golovko, V., Ignatiuk, O., Sadykhov R.*, An Approach to Mobile Robot Learning // Proc. of Euro-International Symposium on Computational Intelligence E-ISCI, Kosice, Slovakia. Springer – Verlag Company, 2000, pp.388-389.
116. *Golovko, V., Ignatiuk, O., Sauta, V.*, An Approach to Mobile Robot Self-training. Proceedings of the IV 2000, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 3–5 October 2000, Dearborn, Detroit, USA, pp.608–613.
117. *Golovko, V., Dimakov, V., Ignatiuk, O.*, The neural network approach for reactive control of a mobile robot. Proceedings of the 6th International IFAC Symposium on Robot Control – SYROCO–2000, Wien-Vienna, Austria, September 21–23, 2000, – Oxford UK: Elsevier Science Ltd, 2000.
118. *Jochem, T., Pomerlau, D., Thorpe, C.*, MANIAC: A Next Generation Neurally Based Autonomous Road Follower // Proceedings of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems. –Pittsburgh, 1993.
119. *Pomerlau, D., Gowdy, J., Thorpe, C.*, Combining Artificial Neural Networks and Symbolic Processing for Autonomous Robot Guidance // Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems. – Pittsburg, 1995, pp.961–967.
120. *Golovko, V., Grandinetti, L., Kochan, V., Laopoulos, T., Sachenko, A., Turchenko, V.*, Sensor Signal Processing Using Neural Networks, IEEE Region 8 Intern. Conf. Africon'99, Cape Town (South Africa), 1999, pp.345–350.
121. *Golovko, V., Savitsky, J., Sachenko, A., Kochan, V., Turchenko, V., Laopoulos, T., Grandinetti, L.*, Intelligent System for Prediction of Sensor Drift", Proc. Intern. Conf. Neural Networks and Artificial Intelligence ICNNAI'99. – Brest (Belarus), 1999, pp.126–135.
122. *Golovko, V., Grandinetti, L., Kochan, V., Laopoulos, T., Sachenko, A., Turchenko, V., Tymchyshyn, V.*, Approach of an Intelligent Sensing Instrumentation Structure Development", Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing, Budapest (Hungary), 1999, pp.336–341.
123. *Sachenko, A., Kochan, V., Turchenko, V., Golovko, V., Laopoulos, T.*, Using Neural Networks for Decreasing ADC Error. Proceedings of 4th IMEKO International Workshop on ADC Modelling and Testing. Bordeaux, France, September 9–10, 1999, pp.78–81.
124. *Sachenko, A., Kochan, V., Turchenko, V., Golovko, V., Savitsky, J., Dunets, A., Laopoulos, T.*, Sensor Errors Prediction Using Neural Networks // Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks IJCNN'2000. – Como, Italy, July 24–27, 2000, vol.IV, pp.441–446.
125. *Sachenko, A., Kochan, V., Turchenko, V., Golovko, V., Savitsky, J., Laopoulos, T.*, Method of the training set formation for neural network predicting drift of data acquisition device", Patent of Ukraine, application number 2000010010.

126. *Sachenko, A., Kochan, V., Turchenko, V., Laopoulos, T., Golovko, V., Grandinetti, L.*, Features of Intelligent Distributed Sensor Network Higher Level Development, Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC/2000. – Baltimore, USA, May 1–4, 2000, pp.335–340.
127. *Кун С.* Матричные процессоры на СБИС: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991.
128. *Головко В.* Методы обеспечения отказоустойчивости линейных систолических процессоров. – Микроэлектроника, 1995, т.24, №3, с.229–240.
129. *Стэппер Ч., Армстронг Ф., Саджи К.* Статистические модели выхода годных интегральных микросхем // ТИИЭР, 1983, т.74, №4, с.6–26.
130. *Stapper, C.*, Large-area fault clusters and fault tolerance in VLSI circuits: a review // IBM J. Res. Develop, 1989, vol.33, no.2. pp.162–173.
131. *Головко В.* Показатели эффективности отказоустойчивых структур СБИС. – Минск: ИТК АН РБ, – 1991, №15.
132. *Головко В.* Статистические модели выхода годных для отказоустойчивых схем на кристалле. – Микроэлектроника, 1992, т.21, №1, с.20–26.
133. *Головко В.* Некоторые аспекты определения выхода годных для отказоустойчивых схем на кристалле. – Микроэлектроника, 1992, т.21, №5, с.37–44.
134. *Golovko, V.*, Self-organization of systolic processors // Proceedings of the International Conference GMNDT – 95, Berlin: DGZfP, 1995.
135. *Головко В.* Самоорганизующиеся линейные процессоры // Сб. трудов конференции "Распознавание образов и обработка информации". – Минск: ИТК АН РБ, 1995, с.82–87.
136. *Ярмолик В.* Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ. – Минск: Наука и техника, 1988.
137. *Айерлэнд К., Роузен М.* Классическое введение в современную теорию чисел. – М.: Мир, 1987.