

ОБЗОР НА ОБОБЩЕНОМРЕЖОВИТЕ МОДЕЛИ, ОПИСВАЩИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА НЕВРОННИ МРЕЖИ

Антон Антонов

Институт по биофизика и биомедицинско инженерство
Българска академия на науките
email: ajantonov@gmail.com

Резюме: Целта на статията е да представи публикациите, съдържащи обобщеномрежови модели, описващи функционирането на невронни мрежи, както и оптимизационни алгоритми за обучение на невронни мрежи описани чрез обобщени мрежи.

Ключови думи: Обобщена мрежа, Моделиране, Невронна мрежа, Оптимизация.

Обзор

От дефинирането на обобщените мрежи през 1982 г. (въпреки, че първата по време статия [7] е публикувана със закъснение от две години – през 1984 г.) до момента има публикувани над петдесет статии и две книги, в които са представени различни класове невронни мрежи и техни оптимизации с обобщеномрежови модели. В тези публикации са разгледани основни типове невронни мрежи, базови алгоритми за обучение и техни оптимизации, използвайки обобщеномрежовите модели. За удобство, ще използваме съкращението ОММ за обобщеномрежови модели по-нататък в текста. Класификацията на публикациите, разгледани в статията, е според вида на обучение – с учител и без учител. Повече подробности по видовете обучения и техните предимства са описани в книгата на Nauck [28]. Основен дял от статиите заемат ОММ на невронни мрежи, използващи обучение с учител. В тази група ОММ попадат двадесет и три статии [2, 6, 10, 11, 19, 47, 48, 50, 51, 52, 54, 55, 60, 64, 67, 69, 71, 77, 78, 80, 86, 87], които използват многослойната архитектура с право разпространение на сигнала и модификации на алгоритъма с обратно разпространение на грешката [66]. Шест от статиите [6, 10, 11, 60, 80, 87] представляват интерес с описаните нови разширения на алгоритмите за обучение на невронните мрежи, които позволяват паралелна оптимизация на алгоритмите с различни параметри на обучение. Първата статията за въвеждането на този нов оптимизационен подход е представен за първи път през 2007 г. от Atanassov, Sotirov и Antonov в [10]. В тази статия за първи път е предложен този подход, отчитайки съвременните тенденции в информационните технологии и паралелната обработка на информацията (за подробности, [89, 90]). Поредица от статии, използващи ОММ при симулирането на невронни мрежи с времезакъснителни вериги,

са публикувани през годините. Тази поредица от статии представя чрез ОММ основните алгоритми, използващи времезакъснение при предаване на невронни въздействия. Първата статия е публикувана на конференцията IEEE Intelligent Systems през 2002 г., където е описан нов темпорален алгоритъм за обучение на невронна мрежа чрез ОММ от Aladjov, Atanassov и Shannon, [3]. Няколко години по-късно са публикувани три статии на Sotirov и съавтори [79, 83, 85] в различни издания, които представят ОММ на невронна мрежа, използващи време закъснителни подходи [61, 91]. Използвайки времезакъснителния подход в невронните мрежи, Sotirov и Krawczak са описали нов модел на рекурентна невронна мрежа [17, 27] чрез обобщена мрежа [82]. Друга рекурентна невронна мрежа, представена чрез ОММ, е „Машина на Boltzmann“ [1, 29] от Antonov, Krawczak, [5]. По време на 11-ия международен семинар по обобщени мрежи в Лондон през 2010 г. е представен обобщеномрежов модел на невронна мрежа на Elman [21, 22] с алгоритъм за обратно разпространение на грешката с автор Sotirov, [81], а в друга статия на същия семинар, две години по-късно, е разгледан и обобщеномрежов модел на рекурентна невронна мрежа на Elman от Sotirov и Kodogiannis, [88].

През годините на моделиране на съществуващите невронни мрежи с ОММ не липсват и иновативни подходи, в които са описани нови невронни мрежи, представени чрез обобщени мрежи. Пример за такъв тип мрежа е спрегната невронна мрежа, която за първи път е представена от Krawczak, [50], след което е описана чрез ОММ, [56]. В тази група на новосъздадени невронни мрежи и представени за първи път чрез ОММ могат да се добавят и няколко статии от различни автори, използващи интуиционистки размит подход в невронните мрежи, [8]. За първи път понятието интуиционистки размита невронна мрежа се дефинира в статията на Hadjyisky и Atanassov [26] през 1995 г. Следваща статия, в която невронна мрежа с интуиционистки размити оценки е представена чрез ОММ, е статия на Krawczak, El-Darzi, Atanassov, Tasseva [58]. В тази статия се моделира невронна мрежа, която се използва за оптимизация на реални процеси. Друга употреба на интуиционистката размитост е показана с ОММ на многослоен перцептрон с интуиционистки размити оценки на студентските знания в статия на Dimitrov, Jonova, Vineva, Sotirova, Sotirov, [20]. Към тази последователност от нестандартни невронни мрежи или техни модификации може да се добави и йерархичната невронна мрежа представена чрез ОММ от Atanassov, Sotirov и Shannon, [12].

Първата книга за многослойни невронни системи и обобщеномрежови модели е публикувана през 2003 г. от Krawczak, [57]. В тази книга са обобщени резултатите от статиите на тема спрегнати невронни мрежи разработени от Krawczak [50, 54] и ОММ, както и принципно моделиране на основни елементи на невронна мрежа. Следващата книга е публикувана през 2010 г. с автори Krawczak, Sotirov, Atanassov [59]. Тази книга представя многослойни невронни мрежи чрез ОММ от вече публикувани от авторите модели на невронни мрежи в статии от предишни години.

В няколко статии са разгледани модели на различни невронни мрежи без учител [28] от създаването на обобщените мрежи. През 2006 г. в две статии са представени ОМ модели на самоорганизиращи се карти на Kohonen [39, 40, 45]. Първата статия е публикувана от Sotirov и Krawczak, [72], за моделирането на самоорганизиращите се карти на Kohonen в списанието *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*. В същия брой на списанието е публикувана статия на Atanassov и Sotirov [9], която представя чрез ОММ оптимизация на самоорганизиращите се карти на Kohonen по време. Интересни невронни мрежи, които са представени от същия автор Kohonen

[41–45] и описани от Sotirov, Krawczak и Kodogiannis в [73] са невронните мрежи за обучение на векторно околичествяване. В категорията от статиите за обучение без учител попадат също невронни мрежи и когнитивните модели на Grossberg [31–35]. През 2001 г. Mengov, Hadjitodorov, и Shannon [62] представят модел на когнитивен мозъчен процес чрез ОММ. Две години по-късно Mengov, Pulov, Atanassov, Georgiev и Trifonov [63] моделират с ОММ мозъчен когнитивен процес, стъпвайки върху идеите на Grossberg [35]. След тези две статии Sotirov, Krawczak и Kodogiannis публикуват две статии [68, 70] за симулиране на невронни мрежи на Grossberg [31–34] с ОММ. На следващата година Sotirov и Krawczak публикуват три статии [74–76], в които представят ОМ модели на ART и Fuzzy ARTMAP невронни мрежи, които са развитие на невронните мрежи на Grossberg (за повече подробности виж Grossberg и Carpenter [14–16]).

През годините са представени няколко теоретични статии, в които са разгледани основна теорема за представяне на невронните мрежи чрез ОММ (Hadjisky и Atanassov [23]), както и ОММ, представящ елементите на една невронна мрежа (от същите автори [24, 25]). В статии на Krawczak е разгледан ОММ на концептуални невронни мрежи, [53], както и пример за прилагането на ОМ модели при симулирането на невронни мрежи, [49]. Освен тези статии има ОММ практически работещ модел на неврон, описан от Antono, [4].

Заклучение

В статията са разгледани всички типове невронни мрежи, които са описани чрез апарата на обобщените мрежи от създаването на обобщените мрежи до днес. За справка на вече публикувани статии беше използвана и библиографията на Radeva, Krawczak и Chou, [65]. Трябва да се отбележи, че въпреки огромния брой описани модели на невронни мрежи, много малко от тях имат представени работещи модели, което не дава реална представа за ползата от моделирането с обобщени мрежи. Примери за полза от създаването на реални работещи модели, които позволяват оптимизация на невронни мрежи в процеса на обучение и значително подобряване на резултатите са описани в статиите на Antonov, Hadjitodorov [6] и Mengov и съавтори [62, 63].

Литература

- [1] Ackley D., G. Hinton, T. Sejnowski, A learning algorithm for Boltzmann machines, *Cognitive Science*, Vol. 9, 1985, 147–169.
- [2] Aladjov H., Generalized Net for Artificial Neural Networks Learning, *Proceedings of International Symposium “Bioprocess Systems”*, Sofia, 2000.
- [3] Aladjov H., K. Atanassov, A. Shannon, Generalized net model of temporal learning algorithm for artificial neural networks, *Proceedings of First International IEEE Conf. on Intelligent Systems*, 2002, Vol. 1, 190–193.
- [4] Antonov A., Presentation of neuron by generalized net, *Issues in the Representation and Processing of Uncertain Imprecise Information: Fuzzy Sets, Intuitionistic Fuzzy*

- Sets, Generalized Nets, and Related Topics* (K. Atanassov, J. Kacprzyk, M. Krawczak, E. Szmidt, Eds.) Akademicka Oficyna Wydawnictwo EXIT, Warsaw, 2005, 1–10.
- [5] Antonov A., M. Krawczak, Boltzmann machine model by generalized nets, *Proc. of the 10th ISPE Int. Conf. on Concurrent Engineering “Advanced Design, Production and Management Systems”*, Madeira, 26–30 July 2003, 1095–1099.
 - [6] Antonov A., S. Hadjitodorov, Concurrent Algorithm for Learning of Neural Networks, *2012 IEEE 6th International Conference ‘Intelligent Systems’*, 225–228.
 - [7] Atanassov K., Theory of Generalized nets (an algebraic aspect), *Advances in Modelling & Simulation*, AMSE Press, Vol. 1, No. 2, 1984, 27–33.
 - [8] Atanassov K., Intuitionistic Fuzzy Sets, *Fuzzy Sets and Systems*, No. 20, 1986, 87–96.
 - [9] Atanassov, K., S. Sotirov, Optimization of a neural network of self-organizing maps type with time-limits by a generalized net, *Advanced Studies on Contemporary Mathematics*, Vol. 13, 2006, No. 2, 213–220.
 - [10] Atanassov, K., S. Sotirov, A. Antonov, Generalized net model for parallel optimization of feed-forward neural network, *Advanced Studies in Contemporary Mathematics*, Vol.15, No. 1, 2007, 109–119.
 - [11] Atanassov K., M. Krawczak, S. Sotirov, Generalized Net Model for Parallel Optimization of Feed-Forward Neural Network with Variable Learning Rate Back-propagation Algorithm, *Advanced Intelligent systems from theory to practice*, Springer, 2010, 361–372.
 - [12] Atanassov K., S. Sotirov, A. Shannon, Generalized net Model of the Hierarchical Neural Networks, *Proceedings of the 13th International Workshop on Generalized Nets*, 29 October 2012, London, UK, 8–14.
 - [13] Bishop, C.M., *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford, Oxford University Press, 1995.
 - [14] Carpenter G., S. Grossberg, A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine, *Computer Vision, Graphics, And Image Processing*, Vol. 37, 1987, 54–115.
 - [15] Carpenter G., S. Grossberg, ART 2: Stable self-organization of pattern recognition codes for analog input patterns, *Applied Optics*, Vol. 26, No. 23, 1987, 4919–4930.
 - [16] Carpenter G., S. Grossberg, N. Markuzon, J. Reynolds, D. Rosen, Fuzzy ARTMAP: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multi-dimensional maps, *IEEE Transactions on Neural Networks*, No. 3, 1992, 698–713.
 - [17] Chen, C., Tzi-Dar Chiueh, Jyh-Horng Chen, Active cancellation system of acoustic noise in MR imaging, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 46, No. 2, 1999, 186–191.
 - [18] Churchland, P.S., T.J. Sejnowski, *The computational Brain*, Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
 - [19] Dimitrova M., Kr. Vasilev, S. Sotirov, Generalized net model of the process of the prognosis biomass accumulation with neural network, *Developments in Fuzzy Sets, Intuitionistic Fuzzy Sets, Generalized Nets and related topics. Vol II: Applications*, System Research Institute, Polish Academy of Science. Warsaw, 2010, 79–90.

- [20] Dimitrov I., I. Jonova, V. Bineva, E. Sotirova, S. Sotirov, Generalized net model of the students' knowledge assessments using Multilayer Perceptron with intuitionistic fuzzy estimations, *Eleventh Int. Workshop on GNs and Second Int. Workshop on GNs, IFSs, KE*, London, 9–10 July 2010, 27–34.
- [21] Elman, J., Finding structure in time, *Cognitive Science*, No. 14, 1990, 179–211.
- [22] Elman, J., Learning and development in neural networks: The importance of starting small, *Cognition*, 48, 1993, 71–99.
- [23] Hadjisky L., Atanassov K., Theorem for representation of the neuronal networks by generalized nets, *AMSE Review*, Vol. 12, No. 3, 1990, 47–54.
- [24] Hadjisky L., Atanassov K., A generalized net, representing the elements of one neuron network set, *AMSE Review*, Vol. 14, No. 4, 1990, 55–59.
- [25] Hadjisky L., Atanassov K., Generalized nets representing the elements of neuron networks, *Applications of generalized nets*, (K. Atanassov, Ed.), World Scientific Publ. Co., Singapore, 1993, 49–67.
- [26] Hadjisky L., Atanassov K., Generalized net model of the intuitionistic fuzzy neural networks, *Advances in Modelling & Analysis*, AMSE Press, Vol. 23, 1995, No. 2, 59–64.
- [27] Hagan M., M. Demuth, M. Beale, *Neural Network Design*, Boston, MA: PWS Publishing, 1996.
- [28] Haykin, S., *Neural Networks and Learning Machines*, 3th Ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2009, 64–67.
- [29] Hinton G., Sejnowski T., Learning and relearning in Boltzmann machines, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Volume 1: Foundations*, MIT Press, Cambridge, MA., 1986, 282–317.
- [30] Grossberg, S., *Neural Networks and Natural Intelligence*, Cambridge, MA: MIT Press, 1988.
- [31] Grossberg, S., Adaptive Pattern Classification and Universal Recoding I: Parallel Development and Coding of Neural Feature Detectors, *Biological Cybernetics*, Vol. 23, 1976, 121–134.
- [32] Grossberg, S., Adaptive Pattern Classification and Universal Recoding II: Feedback, Expectation, Olfaction, and Illusions, *Biological Cybernetics*, Vol. 23, 1976, 187–202.
- [33] Grossberg S., *A Theory of Human Memory: Self-organization and Performance of Sensory-motor Codes, Maps, and Plans*, *Progress in Theoretical Biology*, New York, Academic Press, Vol. 5, 1978, 233–374.
- [34] Grossberg S., Behavioral Contrast in Short-term Memory: Serial Binary Memory Models or Parallel Continuous Memory Models, *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 3, 1978, 199–219.
- [35] Grossberg, S., Some psychophysiological and pharmacological correlates of a developmental, cognitive, and motivational theory, In R. Karrer, J. Cohen, and P. Tueting (Eds.), *Brain and information: Event related potentials*, New York: New York Academy of Sciences, 1984, 58–142.

- [36] Haykin, S., *Adaptive Filter Theory*, 4th ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [37] Haykin, S., *Neural Networks and Learning Machines*, 3th Ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2009.
- [38] Kerlirzin, P., F. Vallet, Robustness in multilayer perceptrons, *Neural Computation*, Vol. 5, 1993, 267–278.
- [39] Kohonen, T., Self-organized Formation of Topologically Correct Feature Maps, *Biological Cybernetics*, 43, 1982, 59–69.
- [40] Kohonen, T., *Self-organizing and Associative memory*. 2nd Ed. Berlin, Springer-Verlag, 1987.
- [41] Kohonen, T., Learning Vector Quantization, *Neural Networks*, Volume 1, Supplement 1, 1988.
- [42] Kohonen, T., An introduction to neural computing, *Neural Networks*, Volume 1, Issue 1, 1988, 3–16.
- [43] Kohonen, T., G. Barna, R. Chrisley, Statistical pattern recognition with neural networks: benchmark studies, *IEEE International Conference on Neural Networks*, 1988.
- [44] Kohonen T., “Improved versions of learning vector quantization”, International Joint Conference on Neural Networks, 1990.
- [45] Kohonen T., J. Hynninen, J. Kangas, J. Laaksonen, K. Torkkola, *LVQ-PAK: The Learning Vector Quantization Program Package*, Technical Report A30, Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science, Rakentajanaukio, 1996.
- [46] Kohonen, T., *Self-organizing Maps*, Berlin, Springer-Verlag, 1997.
- [47] Krawczak M., Generalized net models of multilayer neural networks, *Advanced Studies on Contemporary Mathematics*, Vol. 7, 2003, No.1, 69–86.
- [48] Krawczak M. On a generalized net model of MLNN simulation, *Soft Computing Tools, Techniques and Applications* (P. Grzegorzewski, M. Krawczak, S. Zadrozny, Eds.), Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2004, 157–171.
- [49] Krawczak M., An example of generalized nets applications to modelling of neural networks simulation, *Current Issues in Data and Knowledge Engineering* (B. de Baets, R. de Caluwe, G. de Tre, J. Fodor, J. Kacprzyk and S. Zadrozny, Eds.), Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2004, 297–308.
- [50] Krawczak M., Modelling of adjoint neural networks by generalized nets, *9th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2003*, Miedzyzdroje (Poland), 25–28 August 2003, Technology Univ. of Szczecin, 33–42.
- [51] Krawczak M., A way to aggregate multilayer neural networks, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2, No. 3697, 2005, 19–24.
- [52] Krawczak M. Generalized net models of MLNN learning algorithms, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2, No. 3697, 2005, 25–30.

- [53] Krawczak M., Generalized net modelling concept-neural networks models. In: Studzinski J., Drelichowski L., Hryniewicz O. (Eds.): *Computer aiding of social, economical and environment development*. Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences, Warsaw 2004, 203–216.
- [54] Krawczak M., Modelling of adjoint neural networks by generalized nets, *Issues in the Representation and Processing of Uncertain Imprecise Information: Fuzzy Sets, Intuitionistic Fuzzy Sets, Generalized Nets, and Related Topics* (K. Atanassov, J. Kacprzyk, M. Krawczak and E. Szmidt, Eds.) Akademicka Oficyna Wydawnictwo EXIT, Warszawa, 2005, 217–227.
- [55] Krawczak, M., H. Aladjov, Generalized net model of backpropagation learning algorithm, *Proc. of the Third Int. Workshop on Generalized Nets*, Sofia, 1 October 2002, 32–36.
- [56] Krawczak M., H. Aladjov, Generalized net model of adjoint neural networks. *Advanced Studies on Contemporary Mathematics*, Vol. 7, 2003, No. 1, 19–32.
- [57] Krawczak M., *Multilayer Neural Systems and Generalized Net Models*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2003.
- [58] Krawczak, M., E. El-Darzi, K. Atanassov, V. Tasseva, Generalized net for control and optimization of real processes through neural networks using intuitionistic fuzzy estimations, *Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets*, Vol. 12, 2007, No. 2, 54–60.
- [59] Krawczak M., S. Sotirov, K. Atanassov, *Multilayer Neural Network Modelling by Generalized Nets*, Warsaw School of Information Technologies, 2010.
- [60] Krawczak M., S. Sotirov, E. Sotirova, Generalized Net Model for Parallel Optimization of Multilayer Neural Network with Time Limit, *2012 IEEE 6th International Conference 'Intelligent Systems'*, 173–177.
- [61] Lang, K., A. Waibel, G. Hinton, “A time-delay neural network architecture for isolated word recognition”, *Neural Networks*, 1990, Vol. 3, 23–43.
- [62] Mengov G., S. Hadjitodorov, A. Shannon, Modeling cognitive brain processes with a generalized net, *Proceedings of Second International Workshop on Generalized Nets*, Sofia, 26 - 27 June, 2001, 59–61.
- [63] Mengov G., S. Pulov, K. Atanassov, K. Georgiev, T. Trifonov, “Modeling neural signals with a generalized net”, *Advanced Studies on Contemporary Mathematics*, Vol. 7, 2003, No. 2, 155–166.
- [64] Nikolova N., Generalized net representation of backpropagation neural networks, *Advances in Modelling & Analysis*, AMSE Press, Vol. 1, 1998, No. 1, 2, 27–34.
- [65] Radeva, V., M. Krawczak, and E. Choy, Review and bibliography on generalized nets theory and applications. *Advanced Studies in Contemporary Mathematics*, Vol. 4, 2002, 173–199.
- [66] Rumelhart, D., G. Hinton, R. J. Williams., Learning representations by back-propagating errors, *Nature*, London, Vol. 323, 1986, 533–536.
- [67] Sotirov, S., Modeling the algorithm backpropagation for learning of neural networks with generalized nets, Part 1. *Proc. of the Fourth Int. Workshop on Generalized Nets*, Sofia, 23 Sept. 2003, 61–67.

- [68] Sotirov, S., M. Krawczak, V. Kodogiannis, Generalized nets model of the Grossberg neural network. Part 1, *Issues in Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets*, Volume 4, Warszawa, 2004, 27–34.
- [69] Sotirov, S., Generalized net model of the accelerating backpropagation algorithm, *Jangjeon Mathematical Society*, 2006, 217–225.
- [70] Sotirov, S., V. Kodogiannis, Generalized Net Model of the Grossberg Neural Networks. Part 2. *Issues in Intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*. Vol. 5. Warsaw School of Information Technology, Warsaw 2007, 130–138.
- [71] Sotirov S., M. Krawczak, Modeling the algorithm backpropagation for learning of neural networks with generalized networks -Part 2. In: Atanassov K., Kacprzyk J., M. Krawczak, Szmidt E. (Eds.): *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*. Vol. 3. Warsaw School of Information Technology, Warsaw 2006, 65–69.
- [72] Sotirov S., M. Krawczak, Modeling the work of self-organizing neural networks with generalized networks. In: Atanassov K., Kacprzyk J., Krawczak M., Szmidt E. (Eds.): *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*. Vol. 3. Warsaw School of Information Technology, Warsaw 2006, 57–63.
- [73] Sotirov S., M. Krawczak and V. Kodogiannis, Modeling the work of learning vector quantization neural networks, *Proceedings of the Seventh Int. Workshop on Generalized Nets*, Sofia, 14–15 July 2006, 39–44.
- [74] Sotirov S., M. Krawczak, Generalized net model of the art neural networks, Part 1, *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*, Volume 7, Warszawa, 2008, 67–74.
- [75] Sotirov S., M. Krawczak, Generalized net model of the art neural networks. Part 2, *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*, Volume 7, Warszawa, 2008, 75–82.
- [76] Sotirov S., Generalized net model of the art neural networks. Part3, *Developments in Fuzzy Sets, Intuitionistic Fuzzy Sets, Generalized Nets and related topics. Vol. II: Applications*, System Research Institute, Polish Academy of Science. Warsaw, 2008, 257–246.
- [77] Sotirov S., D. Orozova, E. Sotirova, Generalized net model of the process of the prognosis with feedforward neural network, *Proc. of the 16th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies*, SIELA 2009, Vol. 1, 272–278.
- [78] Sotirov S., E. Sotirova, M. Krawczak, Application of Data mining in Digital University: Multilayer perceptron for Lecturer's Evaluation with Intuitionistic Fuzzy Estimations, *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*, Volume 8, Warszawa, 2010, 102–108
- [79] Sotirov S., Generalized net model of the time delay neural network, *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*, Volume 9, Warszawa, 2010, 125–131.
- [80] Sotirov S., M. Krawczak, K. Atanassov, Generalized Net Model for Parallel Optimization of Multilayer Perceptron with Momentum Backpropagation Algorithm, *5th International IEEE Conference "Intelligent Systems"*, London, 2010, 281–285.

- [81] Sotirov S., V. Kodogiannis, Generalized net model of the Elman neural network, *Eleventh Int. Workshop on GNs and Second Int. Workshop on GNs, IFSS, KE*, London, 9–10 July 2010, 21–26.
- [82] Sotirov S., M. Krawczak, Generalized net model of recurrent neural network, *Eleventh Int. Workshop on GNs and Second Int. Workshop on GNs, IFSS, KE*, London, 9–10 July 2010, 14–20.
- [83] Sotirov S., V. Kukenska, M. Hristova, I. Vardeva, L. Staneva, J. Barzov, S. Dimitrov, S. Stoqnova, Modeling the nonlinear autoregressive network with Exogenous inputs with a Generalized net, *Developments in Fuzzy Sets, Intuitionistic Fuzzy Sets, Generalized Nets and related topics. Vol. II: Applications*, System Research Institute, Polish Academy of Science. Warsaw, 2010, 223–230.
- [84] Sotirov S., A. Dimitrov, Neural Network for Defining Intuitionistic Fuzzy Estimation in Petroleum Recognition, *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*, Vol. 8, 2010, 74–78.
- [85] Sotirov S., Modelling Distributed Time-Delay Neural Network by Generalized net, *Developments in Fuzzy Sets, Intuitionistic Fuzzy Sets, Generalized Nets and related topics. Vol. II: Applications*, System Research Institute, Polish Academy of Science. Warsaw, 2010, 231–238.
- [86] Sotirov S., M. Krawczak, Modelling Layered Digital Dynamic Network by a Generalized Net, *Issues in intuitionistic fuzzy sets and generalized nets*, Vol. 9, Warsaw, 2011, 84–91.
- [87] Sotirov S., M. Krawczak, Generalized Net Model for Parallel Optimization of Multilayer Perceptron with Conjugate gradient Backpropagation Algorithm, *Developments in Fuzzy Sets, Intuitionistic Fuzzy Sets, Generalized Nets and related topics. Vol. II Applications*, System Research Institute, Polish Academy of Science. Warsaw, 2012 (accepted).
- [88] Sotirov S., Modeling the Backpropagation algorithm of the Elman neural network by Generalized Net, *Proceedings of the 13th International Workshop on Generalized Nets*, London, 2012, 49–55.
- [89] Sutter H., Understanding Parallel Performance, *Dr. Dobb's Journal*, 2008, <http://www.ddj.com/cpp/211800538>
- [90] Sutter H., The Free Lunch Is Over: A Fundamental Turn Toward Concurrency in Software, *Dr. Dobb's Journal*, 2005. <http://www.gotw.ca/publications/concurrency-ddj.htm>
- [91] Waibel A., T. Hanazawa, G. Hinton, G. Shikano, K. Lang, Phoneme recognition using time-delay neural networks., *IEEE Acoustics Speech and Signal Processing*, Vol. 37, 1989, 328–339.