

ВИСНОВОК

У роботі вирішено актуальне завдання прискорення роботи методу оптимізації з використанням рою часток.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що метод оптимізації з використанням рою часток, на основі якого розроблено метод з керуванням зміною швидкості часток, дістав подальшого розвитку. Запропоновані процедури враховують недоліки базового методу, пов'язані з можливістю занадто великою зміною швидкості часток, що негативно впливає на оптимізаційний процес.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропонований метод оптимізації на основі моделювання поведінки рою часток з керуванням зміною швидкості часток, і дозволяє провести експерименти по знаходженню оптимуму функцій. Запропонований метод може бути використаний у будь-якій задачі оптимізації, де необхідно знайти значення змінних, за яких залежність, що досліджується, набуває оптимального значення.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Науково-методичні основи та математичне забезпечення для автоматизації і моделювання процесів керування та підтримки прийняття рішень на основі процедур розпізнавання й еволюційної оптимізації в нейромрежному і нечіткологічному базисах» (№ держ. реєстрації 0106U008621).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Beni G. Swarm Intelligence / Beni G., Wang J. // Annual Meeting of the Robotics Society : proceedings of Seventh International Conference. – Tokyo : RSJ Press, 1989. – P. 425–428.
2. Bonabeau E. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems / Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. – New York : Oxford University Press, 1999. – 320 p.
3. Dorigo M. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents / Dorigo M., Maniezzo V., Color-

- ni A. // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1996. – Part B, № 26(1). – P. 29–41.
4. Олейник А. А. Сравнительный анализ методов оптимизации на основе метода муравьиных колоний / Олейник А. А. // Комп'ютерне моделювання та інтелектуальні системи : збірник наукових праць / за ред. Д. М. Пізи, С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2007. – С. 147–159.
5. Camazine S. A Model of Collective Nectar Source by Honey Bees: Self-organization Through Simple Rules / Camazine S., Sneyd J. // Journal of Theoretical Biology. – 1991. – № 149. – P. 547–571.
6. Sumpter D. J. T. Formalising the Link between Worker and Society in Honey Bee Colonies / Sumpter D. J. T., Broomhead D. S. // Lecture Notes In Computer Science : Proceedings of the First International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation (MABS '98). – Berlin : Springer, 1998. – P. 95–110.
7. Kennedy J. Particle Swarm Optimization / Kennedy J., Eberhart R. C. // International Conference on Neural Networks : Proceedings of the IEEE. – NJ : IEEE Press, 1995. – P. 1942–1948.
8. De Castro L. N. Artificial Immune Systems. Part I. Basic Theory And Applications / De Castro L. N., Von Zuben F. J. // Technical Report No. Rt Dca 01/99. – Brazil : Feec/Unicamp, 1999. – 95 p.
9. Colorni A. Ant System for Job-shop Scheduling / Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V., Trubian M. // Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science (JORBEL). – 1994. – № 34. – P. 39–53.
10. Субботин С. А. Отбор информативных признаков на основе модифицированного метода муравьиных колоний / Субботин С. А., Олейник А. А., Яценко В. К. // Радиоэлектроника та інформатика. – 2006. – № 1. – С. 65–69.
11. Engelbrecht A. Computational Intelligence: an Introduction / Engelbrecht A. – Sidney : John Wiley and Sons, 2007. – 597 p.
12. Abraham A. Swarm Intelligence in Data Mining / Abraham A., Grosan G. – Berlin : Springer, 2006. – 267 p.

Надійшла 2.10.2008
Після доробки 2.12.2008

Исследован метод оптимизации на основе моделирования поведения роя частиц. Разработана модификация исследованного метода с управлением изменением скорости частиц. Проведены эксперименты по нахождению глобального оптимума многомерной функции на основе предложенной модификации.

A particle swarm optimization method has been considered. A modification of PSO-method with velocity control has been developed. The experiments on finding global optimum for multidimensional function on the basis of suggested modification has been carried out.

УДК 621.365.036

С. Г. Удовенко, А. А. Шамраев, Г. Дибс

ЦИФРОВОЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЛОКАМИ ЛИНЕЙНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Предложена структура и разработаны методы цифрового управления блоками линейного ускорителя с применением нечетких и нейросетевых моделей. Приведены результаты моделирования, подтверждающие эффективность рассмотренных методов.

© Удовенко С. Г., Шамраев А. А., Дибс Г., 2009

ВВЕДЕНИЕ

Линейный резонансный ускоритель электронов представляет собой сложную электрофизическую установку, в которой в течение длительного времени

(порядка нескольких миллисекунд) происходит накопление энергии от внешнего маломощного источника (порядка 100 кВт) с последующей быстрой (порядка нескольких микросекунд) трансформацией накопленной энергии в энергию электронного пучка. Поскольку отношение времен накопления и трансформации составляет величину порядка 1000, то мощность ускоренного пучка с учетом к. п. д. = 0,1 будет в 100 раз больше мощности внешнего источника, т. е. составлять 10 МВт. При токе пучка $I = 1$ А энергия будет составлять 10 МэВ. Преобразование энергии происходит через цепочку: накопитель заряда – коммутатор – импульсный трансформатор – СВЧ-источник – ускоряющая секция. Именно в последнем элементе при ускорении электронного пучка происходит трансформация энергии от внешнего источника в энергию электронного пучка. Ускоряющая секция представляет собой отрезок замедляющей структуры (обычно с фазовой скоростью волны, равной скорости света) с элементами ввода СВЧ мощности. В ряде случаев необходимо проводить регулировку или стабилизацию энергии ускоренных электронов. Отсутствие полной информации об условиях функционирования объектов, а также об их динамических характеристиках и характере действующих помех обуславливают необходимость применения при управлении такими объектами адаптивного и робастного подходов, допускающих возможность использования при синтезе регуляторов упрощенных (в частности, нейросетевых и нечетких) моделей. Наиболее распространенным типом замедляющих структур является диафрагмированный волновод, представляющий собой круглый цилиндрический волновод с равномерно расположенными диафрагмами, отверстия в которых служат как для пролета частиц, так и для передачи СВЧ энергии. Крупнейшим ускорительным центром Украины является Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт». В настоящее время в нем функционирует семь линейных резонансных ускорителей электронов на различные энергии. Одним из них является линейный ускоритель ЛУ-40, который используется для проведения различных облучательных программ. В ряде случаев необходимо проводить регулировку или стабилизацию энергии ускоренных электронов. Отсутствие полной информации об условиях функционирования объектов, а также об их динамических характеристиках и характере действующих помех обуславливают необходимость применения при управлении такими объектами адаптивного и робастного подходов, допускающих возможность использования при синтезе регуляторов упрощенных (в частности, нейросетевых и нечетких) моделей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае построение системы цифрового управления линейным сильноточным ускорителем (СУЛСУ) предполагает необходимость решения ряда взаимосвязанных задач моделирования и разработки регуляторов для отдельных блоков и секций СУЛСУ. В частности, для регулирования энергии ускоренных электронов важной является стабилизация тока анализирующего магнита. При этом целесообразно разработать микропроцессорный блок управления электропитанием магнитных элементов, позволяющий существенно повысить качество работы СУЛСУ, и цифровой регулятор энергии пучка электронов в секциях ускорителя. Ниже приведены результаты решения этих задач с использованием нейросетевых и нечетких методов.

ПОДСИСТЕМА НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕМ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Для преодоления недостатков используемой в настоящее время системы цифрового управления магнитными спектрометрами линейных ускорителей была разработана микропроцессорная подсистема управления электропитанием магнитных элементов (СУЭМЭ) для ускорителей типа ЛУ-40. Структурная схема СУЭМЭ показана на рис. 1. СУЭМЭ формирует сигнал опорного напряжения на входе схемы стабилизации тока анализирующего магнита. Напряжение формируется двенадцатиразрядным цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП), обеспечивая дискретность шага по току магнита менее 0,1 А или 0,07 % от максимального тока анализирующего магнита. Интерфейсная часть системы выполнена на микроконтроллере MSP430F1611, основными задачами которого являются формирование управляющих сигналов для ЦАП, обслуживание местного пульта управления и обеспечение связи с ЭВМ. Двусторонняя связь контроллера с управляющей ЭВМ осуществляется по оптоволоконному кабелю (ВОЛС) в последовательном формате по протоколу RS232C. Применение оптического канала связи обеспечивает гальваническую развязку контроллера от линии связи, что требуется по условию обеспечения соответствующего уровня безопасности и помехозащищенности при установке опорного напряжения.

Электропитание магнита осуществляется от генератора постоянного тока ПН-145 с независимым возбуждением. Для обеспечения стабилизации и регулировки тока магнита, обмотка возбуждения генератора подключена к управляемому источнику тока, величина тока в обмотке возбуждения генератора задается контроллером магнита. Управляемый источник тока построен на базе линейного источника на-

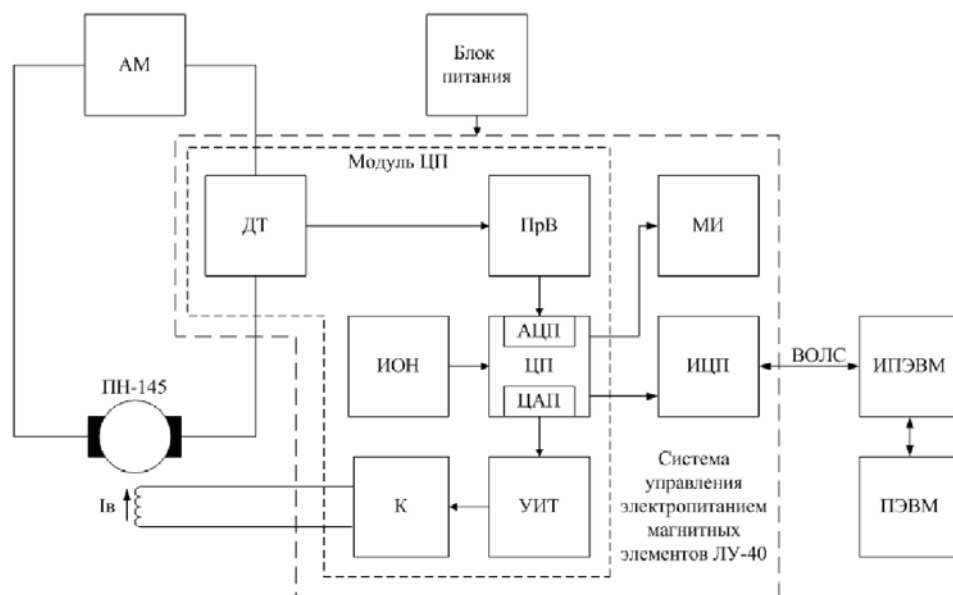


Рисунок 1 – Структурная схема СУЭМЭ

пряжения и линейного источника тока. Основу контроллера магнита составляет модуль центрального процессора. Данный модуль включает:

- датчик тока (ДТ), реализованный на базе бесконтактного датчика тока на эффекте Холла типа CSNF661;
- прецизионный выпрямитель (ПрВ), построенный на операционных усилителях ОР97;
- источник опорного напряжения (ИОН) для АЦП и ЦАП REF192;
- центральный процессор (ЦП) MSP430F1611, со встроенными 12-ти разрядными АЦП и ЦАП;
- управляемый источник тока (УИТ);
- коммутатор (К).

ДТ обеспечивает измерение тока, протекающего через обмотку анализирующего магнита. К выходу ДТ подключен прецизионный резистор сопротивлением 50 Ом. Коэффициент передачи ДТ составляет 1000:1. Таким образом, диапазон сигналов на выходе датчика при максимальном изменении тока анализирующего магнита от 0 до 150 А составляет от 0 до +7,5 В. В зависимости от состояния коммутатора сигнал на выходе ДТ может быть положительной или отрицательной полярности. Для согласования с допустимым диапазоном входных сигналов АЦП (от 0 до 2,5 В) в схеме применен прецизионный выпрямитель на операционных усилителях и масштабирующий усилитель. Сигнал с выхода выпрямителя поступает на вход АЦП, далее он обрабатывается контроллером для формирования сигнала управления источником тока. УИТ сравнивает значение напряжения на выхо-

де ЦАП с напряжением на измерительном резисторе и обеспечивает стабилизацию тока в обмотке возбуждения генератора. Коммутатор предназначен для смены полярности тока в обмотке возбуждения генератора и уменьшения остаточной намагниченности якоря генератора. В соответствии с задающими воздействиями, поступающими в СУЭМЭ от управляющей ЭВМ по оптоволоконному кабелю, вырабатываются управляющие воздействия, реализуемые нечетким цифровым регулятором.

При построении нечеткой модели объекта регулирования использовались априорные данные, полученные в результате активного эксперимента [1]. Эффективным подходом к построению нечетких правил вывода для управления магнитным спектрометром является применение фильтров Калмана совместно с нечеткой кластеризацией. Такой гибридный метод был реализован в СУЭМЭ на микроконтроллере MSP430F1611.

В предложенном цифровом регуляторе реализован метод нечеткого управления динамическим процессом, основанный на использовании дополнительных аддитивных составляющих. Это позволило повысить робастность нечеткого цифрового управления магнитным спектрометром по отношению к неопределенностям, характерным для нечеткой системы. Такая робастность обеспечивает компенсацию или снижение влияния неопределенностей и возмущений на качество управления. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенной подсистемы.

**НЕЙРОРЕГУЛЯТОР ЕНЕРГІЇ ПУЧКА
ЕЛЕКТРОНОВ ЛІНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ**

Аналіз показав, що для стабілізації енергії електронів в СУЛСУ для ЛУ-40 цілесообразно використовувати нейросетеву модель (НСМ).

При побудові НСМ односекційного лінійного ускорителя в якості основних параметрів були вибрані чотири: фаза інжекції ϕ_0 , ток I інжекції, початкова енергія (енергія інжекції) частиц W_0 і потужність зовнішнього джерела P_0 . При цьому попередньо була проведена стандартизація змінних, що складається в центруванні і нормуванні входних і вихідних змінних:

$$\bar{x}_{jk} = \frac{x_{jk} - m_{x_j}}{\sigma_{x_j}}, \quad \bar{y}_k = \frac{y_k - m_y}{\sigma_y},$$

$$j = \overline{1, 4}, \quad k = \overline{1, 10000},$$

де m_{x_j} – середнє вибірки x_{jk} , $k = \overline{1, 10000}$; m_y – середнє вибірки y_k , $k = \overline{1, 10000}$; σ_{x_j} , σ_y – дисперсії вибірок x_{jk} і y_k відповідно.

При побудові НСМ проводились експерименти з різними структурами мережі, починаючи від простішої мережі без зворотних зв'язків, що складається з двох шарів, з 4 нейронами в прихованому шарі і 1 нейроном в вихідному шарі, і закінчуючи рекуррентними мережами, що включають затримки по входним сигналам, так і зворотні зв'язки. Для вибору найкращої архітектури мережі використовувалась процедура дискримінації НСМ. В якості функції активації нейронів в прихованому шарі використовувалась гіперболічний тангенс, а в вихідному шарі – лінійна функція. Налаштування мережі здійснювалось на основі 10000 навчальних пар, необхідна точність задавалась на рівні $1 \cdot 10^{-6}$. Для навчання мережі використовувалась алгоритм Левенберга – Марквардта. Рис. 2 відображає динаміку навчання НСМ, структура якої показана на рис. 3 і рис. 4. Як видно з рис. 2, а, мережа не досягла необхідної точності, а величина помилки стабілізувалась на рівні $2,4 \cdot 10^{-5}$. На рис. 2, б показана крива навчання для найкращої НСМ. Заданої точності вибрана мережа досягла за 132 ітер-

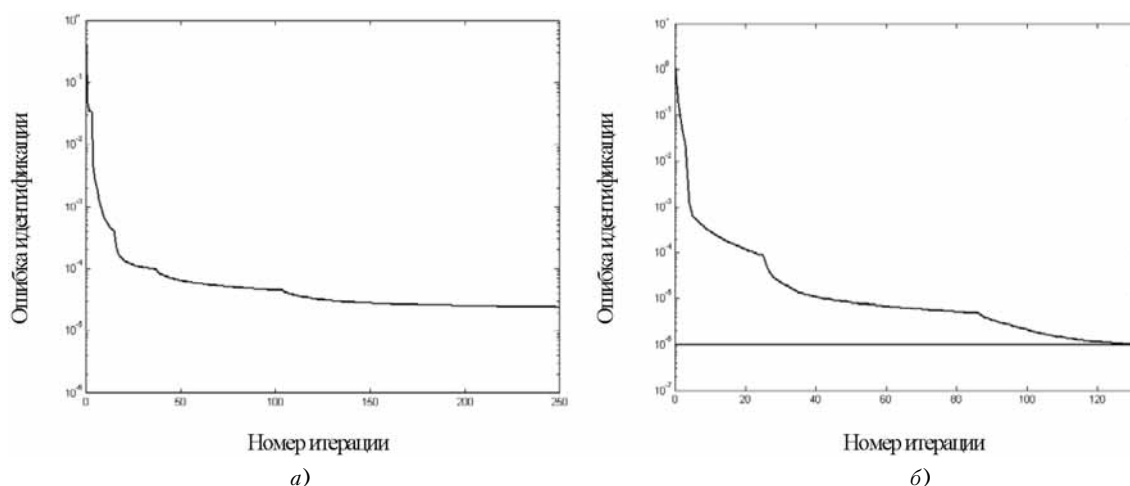


Рисунок 2 – Динаміка навчання нейросетевих моделей:

а – НСМ 1а; б – НСМ 16

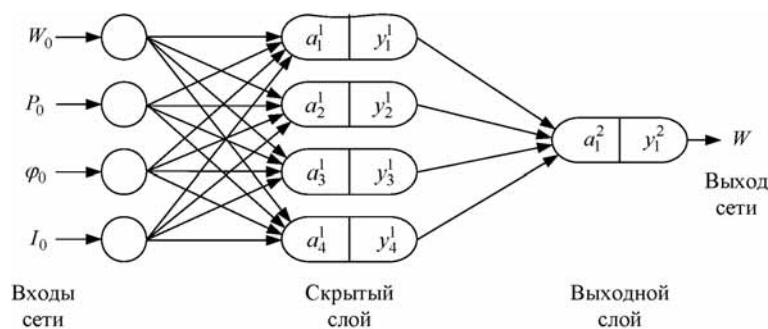


Рисунок 3 – НСМ 1а ускорителя ЛУ-40

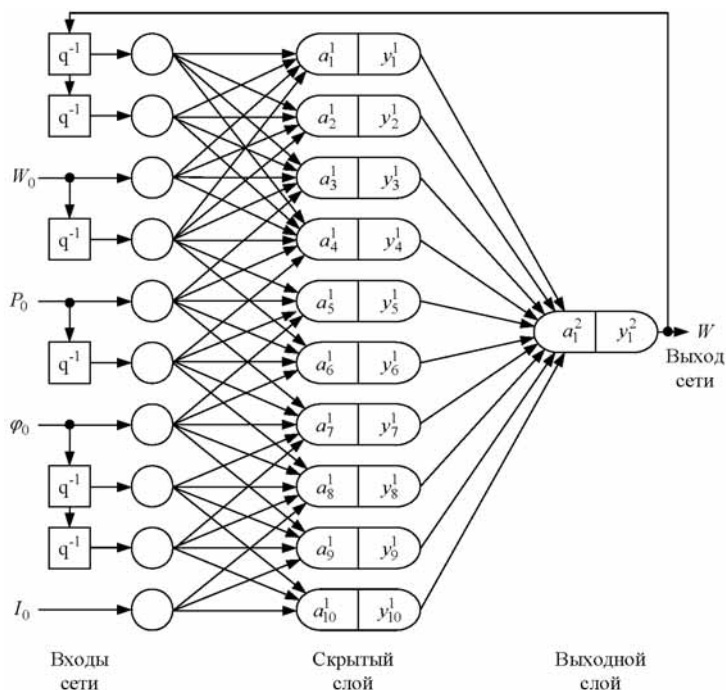


Рисунок 4 – НСМ 16 ускорителя ЛУ-40

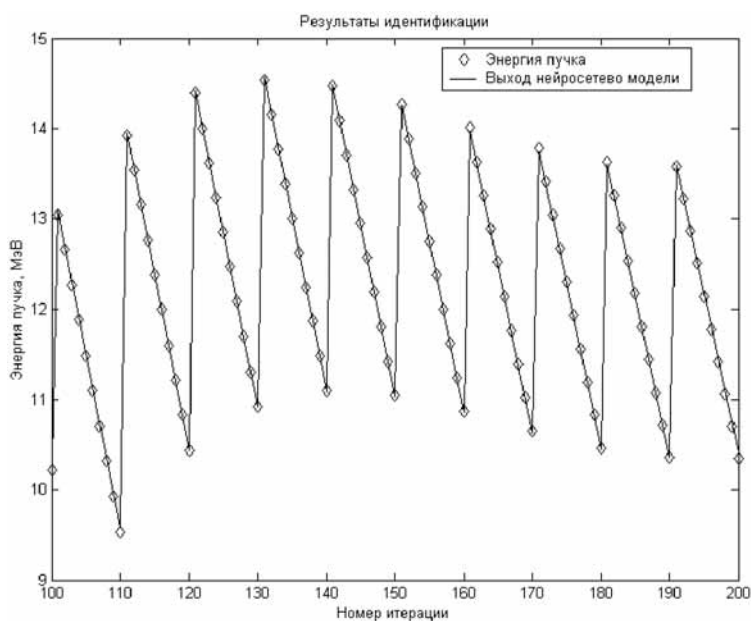


Рисунок 5 – Результаты идентификации

рации. Результаты идентификации объекта представлены на рис. 5. Здесь сплошной линией показаны выходы НСМ, а ромбами – величина энергии пучка электронов. Как видно из рисунка, сеть способна с высокой точностью воспроизводить поведение объекта. На основе полученной НСМ был построен нейро-регулятор, обеспечивающий как стабилизацию энергии пучка электронов, так и ее регулирование. Для

выработки требуемых управляющих воздействий использовался алгоритм, предложенный в [2]. Но, поскольку рассматриваемый объект имеет только один выход, то при реализации алгоритма исключается операция обращения матриц, что обеспечивает стабильность и высокое качество управления. На рис. 6 представлены результаты управления энергией электронов в ускорителе КУТ. Как видно из рисунка,

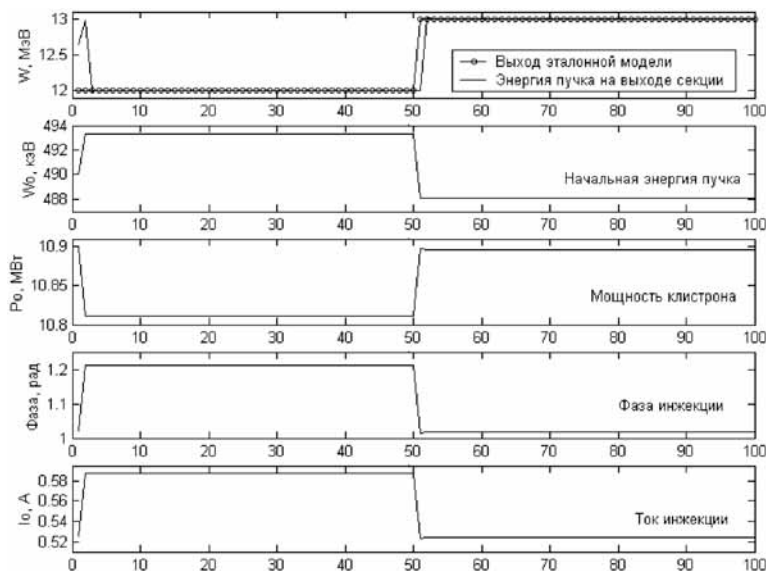


Рисунок 6 – Управление энергией электронов в ускорителе ЛУ-40

нейрорегулятор обеспечивает высокое качество управления при стабилизации энергии пучка электронов. Небольшая задержка обусловлена временем распространения сигнала в сети. Короткие переходные процессы (не более 4 тактов управления), возникающие на выходе сети, вызваны установкой новых целей управления и связаны с изменениями сигналов управления.

ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что нечеткие и нейросетевые методы, реализуемые на базе микропроцессорных средств, является эффективным средством построения цифровых систем управления секциями линейных ускорителей электронов. Предпосылкой для использования разработанных методов является внедрение предложенной подсистемы управления электропитанием магнитных элементов.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Довбня А. Н. Определение параметров модели магнитного спектрометра по экспериментальным данным / А. Н. Довбня, С. Г. Удовенко, А. А. Шамраев // Радиоэлектроника, информатика, управління. – 2008. – Вып. 1 (19). – С. 45–49.
2. Efstathiou J. Architectures and techniques of artificial intelligence in process control / J. Efstathiou // Artificial intelligence in real-time control, 1992. – Oxford : Pergamon, 1993. – V. 17. – P. 348–361.

Надійшла 28.04.2009
Після доробки 11.05.2009

Запропоновано структуру та розроблено методи цифрового керування блоками лінійного прискорювача з використанням нечітких та нейронних моделей. Наведено результати моделювання, що підтверджують ефективність запропонованих методів.

In the work the control structure is offered and the digital control methods for the linear accelerator blocks with use of fuzzy and artificial neural networks models are developed. The simulation data is confirmative efficiency of the considered methods.