

УДК 004.032.26

Г. Дибє, С.Г. Удовенко, А.А. Шамраєв

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків*

## НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

*Решена задача нейро-нечеткого цифрового управления энергией электронов для линейного ускорителя ЛУ-40. В разработанном регуляторе используются многослойная нейросетевая модель и правила нечеткого вывода, основанные на матрице нечетких ассоциаций. Для выбора наилучшей архитектуры сети использовалась процедура дискриминации нейросетевых моделей. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенной схемы цифрового управления.*

**Ключевые слова:** *нейросетевое моделирование, линейный ускоритель, нечеткая логика, цифровой регулятор.*

### Введение

Современные методы цифрового управления зачастую базируются на линеаризации исследуемого объекта, что позволяет получить в ряде случаев приемлемые результаты. Однако изменение свойств динамической системы или условий ее функционирования приводит к необходимости периодической коррекции модели и, соответственно, к изменению закона управления. Трудности решения реальных задач традиционными методами привели к появлению и развитию методов интеллектуального управления, основой которых являются искусственные нейронные сети (ИНС) и нечеткая логика. В частности, ИНС оказались весьма эффективными при решении задачи управления нелинейными объектами. Простота реализации нейронных сетей и их способность к обучению делают их особенно привлекательными при управлении сложными нелинейными объектами в реальном времени.

Большинство реальных систем, в частности, ускорителей заряженных частиц, характеризуются нелинейными зависимостями, сложными для моделирования динамическими свойствами, наличием неконтролируемых шумов и помех, препятствующих реализации традиционных стратегий управления, поскольку, как современная (в частности теория адаптивного и оптимального управления), так и классическая теория управления в значительной степени базируются на идее линеаризации систем.

Для практического применения алгоритмов управления необходимо, чтобы они были адаптивными, устойчивыми, нелинейными, а также простыми для реализации и понимания. Именно по этим причинам в настоящее время широкое применение в задачах управления получили искусственные нейронные сети, обладающие указанными выше свойствами.

Являясь альтернативой традиционным методам управления, нейро-нечеткое управление основано на

применении полностью определенных ИНС и нечетких алгоритмов для выработки требуемых сигналов управления [1].

В данной статье представлены результаты исследований возможности цифрового управления энергией электронов в односекционном сильноточном ускорителе электронов с использованием нейро-нечеткого регулятора.

**Постановка задачи.** 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. 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. Общий подход к нейросетевому моделированию процесса стабилизации электронов в линейном ускорителе ЛУ-40 и структура системы цифрового управления этим ускорителем приведены в [2].

**Задачей настоящей работы** является уточнение нейросетевой модели исследуемого процесса и разработка алгоритма нечеткого управления на основе этой модели.

### Нейросетевое моделирование процесса стабилизации энергии электронов

Для автоматизации процесса стабилизации энергии ускоренных электронов необходима простая и быстродействующая процедура расчета выходной энергии в зависимости от большого числа входных характеристик. Расчет выходной энергии на основе самосогласованной электродинамической модели требует большого ресурса, поэтому для решения данной задачи была построена нейросетевая модель ускорителя ЛУ-40.

Одним из основных факторов, который влияет на эффективность передачи энергии от СВЧ-источника в энергию пучка, есть влияние тока на распределение электромагнитного поля в ускоряющей секции.

Пучковые эффекты играют важную роль в сильноточных ускорителях, поэтому много усилий прилагалось и прилагается для разработки методов, которые описывали бы эти эффекты с необходимой точностью. Наиболее общим методом есть решение (численное или аналитическое) неоднородного волнового уравнения. Для моделирования самосогласованной динамики пучков в ускорителях была использована методика, которая основана на одновременном решении волнового уравнения и уравнений движения заряженных частиц [3].

При построении нейросетевой модели проводились эксперименты с различными структурами сети, начиная от простейшей 4-1 без обратных связей, состоящий из двух слоев, с 4 нейронами в скрытом слое и 1 нейроном в выходном слое и заканчивая рекуррентными сетями, включающими как задержки по входным сигналам, так и обратные связи. Структура нейросетевой модели 10-1 приведена на рис. 1.

Для выбора наилучшей архитектуры сети использовалась процедура дискриминации нейросетевых моделей. В качестве функции активации нейронов в скрытом слое использовался гиперболический тангенс, а в выходном слое – линейная функция. Настройка сети осуществлялась на основании 10000 обучающих пар, требуемая точность задавалась на уровне  $1 \cdot 10^{-6}$ . Для обучения сети использовался алгоритм Левенберга-Марквардта.

Заданной точности выбранная сеть достигла за 132 итерации.

Результаты идентификации показали, что сеть способна с высокой точностью воспроизводить поведение объекта.

### Нейро-нечеткое управление

На основе полученной нейросетевой модели был построен нейро-нечеткий регулятор, обеспечивающий как стабилизацию энергии пучка электронов, так и ее регулирование. Регулятор представляет собой набор лингвистических условных операторов или нечетких ассоциаций, определяющих конкретные ситуации управления. Для рассматриваемой системы управления энергией электронов использовались следующие параметры:

$u$  – сигнал на выходе (фактическая энергия пучка на выходе секции);

$x$  – сигнал на входе (заданный уровень энергии);

$e$  – ошибка между заданным и фактическим уровнями;

$e'$  – скорость изменения ошибки  $e$ ;

$u$  – выход регулятора.

В ходе исследования две нечеткие переменные были представлены в виде девяти нечетких подмножеств: от нулевого значения ZE до высокого положительного значения PL и высокого отрицательного (табл. 1).

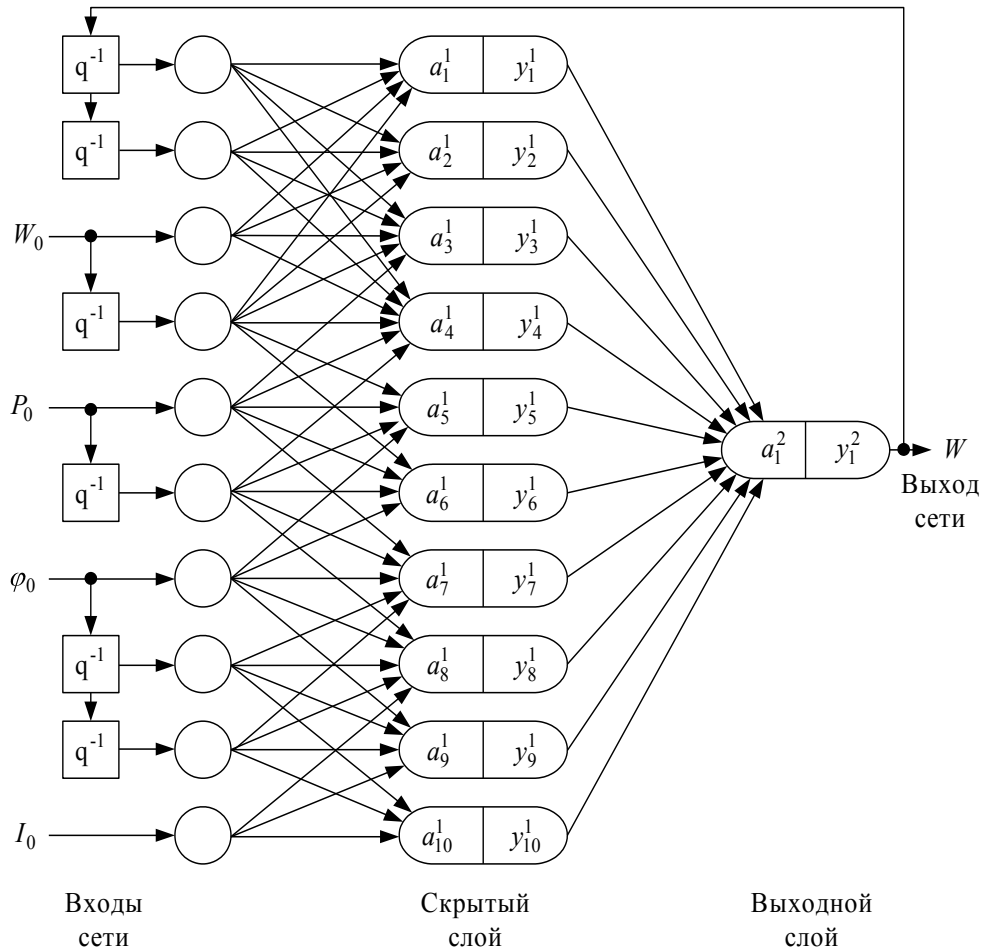


Рис. 1. Нейросетевая модель 10-1 ускорителя ЛУ-40

Таблица 1

Матрица нечетких ассоциаций

e \ e'	PL	PS	PM	POM	ZE	NOM	NM	NS	NL
PL					NL	NS	NM	NOM	ZE
PS					NM	NOM	ZE	ZE	POM
PM	NL	NL	NS	NM	NOM	ZE	ZE	POM	PM
POM	NL	NS	NM	NOM	ZE	ZE	POM	PM	PS
ZE	NS	NM	NOM	ZE	ZE	POM	PM	PS	PL
NOM	PL	PS	PM	POM	ZE	POM	PM	PS	PL
NM	PL	PL	PS	PM	POM	ZE	NOM	NM	NS
NS	POM	PM	PM	PS	PM				
NL	ZE	POM	PM	PS	PL				

Матрица нечетких ассоциаций (правил) для системы управления составляется на основании экспертных суждений.

Каждая группа элементов в матрице дает одно нечеткое правило (ассоциацию), указывающее, как

следует изменить переменную управления  $u$  для наблюдаемых величин входных нечетких переменных  $e$  и  $e'$ . В качестве примера приведем интерпретацию правила (PL, ZE, PL) на естественном языке.

*Если ошибка (рассогласование) между задан-*

ным и фактическим значением уровня энергии положительная и скорость изменения ошибки близка к нулю, то сигнал управления должен быть максимальным.

Некоторые правила могут опускаться или, наоборот, добавляться в зависимости от расширения или сжатия задачи.

Для нечетких подмножеств двух нечетких переменных выбраны функция Гаусса и сигмовидная функция принадлежности (рис. 2). Нечеткое подмножество нечетких переменных ZE (значения близкие к нулю) выбирается более узкое, чем другие. Это позволяет повысить точность стабилизации и повысить робастность системы.

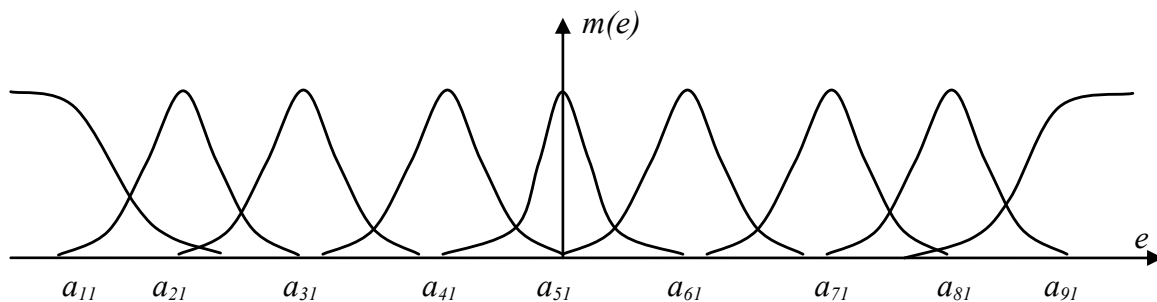


Рис. 2. Функции принадлежности нечеткой переменной  $e$

1. Просчитать (измерить) выходную величину процесса  $y(t)$ .

2. Вычислить ошибку  $e(t)$  и скорость изменения ошибки  $e'(t)$  для момента времени  $t$ .

3. Провести формирование соответствующих нечетких подмножеств путем квантования величин  $e(t)$  и  $e'(t)$ .

4. На основе сформированных функций принадлежности вычисляются степени принадлежности ошибки и производной ошибки:  $m(e_i)$  и  $m(e'_i)$ .

5. Из базы правил активизируются заключения со степенями принадлежности  $m_{u_i}$ , вычисляемыми по степеням принадлежности посылок  $m(e_i)$  и  $m(e'_i)$  с помощью нечеткой логической операции «И».

6. Величина  $m_{u_i}$  «срезается» до величины  $m_{\theta_i}$  методом кодирования по минимуму корреляции.

7. Вычисляется действительная выходная степень принадлежности  $m_{\theta}$  путем выполнения нечеткой логической операции «ИЛИ» между значениями  $m_{\theta_i}$  – всех активизированных заключений.

8. Выход нечеткого регулятора определяется дискретным аналогом центроидного метода. То есть, упрощенный алгоритм нечеткого вывода применяется по следующей форме записи предикатных правил:

$P_i$ : если  $e$  есть  $A_{i1}$  и  $e'$  есть  $A_{i2}$ , тогда  $c = z_i$ , где  $z_i$  – вещественные числа,  $A_{ij}$  – нечеткие числа из функций Гаусса и сигмоидальных функций.

В работе использовался случайный метод поиска параметров предикатных правил, который по-

зволяет избежать остановки алгоритма на локальном экстремуме и не зависит от размерности задачи.

Непрерывные нечеткие подмножества в каждом из наборов перекрываются на 20 – 30%. При слишком большом перекрытии теряются различия между величинами, соответствующими разным подмножествам. При слишком малом перекрытии возникает тенденция к «двухзначному» управлению, что приводит к ухудшению качества процесса (неоднозначность решения, большое перерегулирование и т.д.). В реальных условиях перекрытия позволяют сглаживать переход от одного управляющего воздействия к другому в процессе работы системы управления. Вычисление параметров функционирования нечеткого регулятора можно представить в виде следующего алгоритма

звояет избежать остановки алгоритма на локальном экстремуме и не зависит от размерности задачи.

На рис. 3 представлены результаты управления энергией электронов в ускорителе ЛУ-40. Как видно из рисунка, нейро-нечеткий регулятор 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, как видно из рисунка, связаны с изменениями сигналов управления.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что предложенный подход может быть использован для построения систем цифрового управления блоками сильноточного линейного ускорителя. Используемые в процессе нечеткого управления нейросетевые модели существенно отличаются от традиционных, однако обеспечивают адекватное отражение свойств исследуемых физических процессов линейного ускорителя. Хотя построение моделей происходит в основном в режиме off-line и для достижения требуемой точности необходимо значительное количество измерений входных и выходных сигналов, управление на основе этих моделей осуществляется в режиме on-line.

## Выводы

Разработанный нейро-нечеткий регулятор обеспечивает высокое качество управления при стабилиза-

ции энергии пучка электронов в односекционном сильноточном ускорителе электронов ЛУ-40. Показана эффективность использования многослойного персеп-

трона и нечетких правил вывода, основанных на матрице нечетких ассоциаций при построении системы цифрового управления линейным ускорителем.

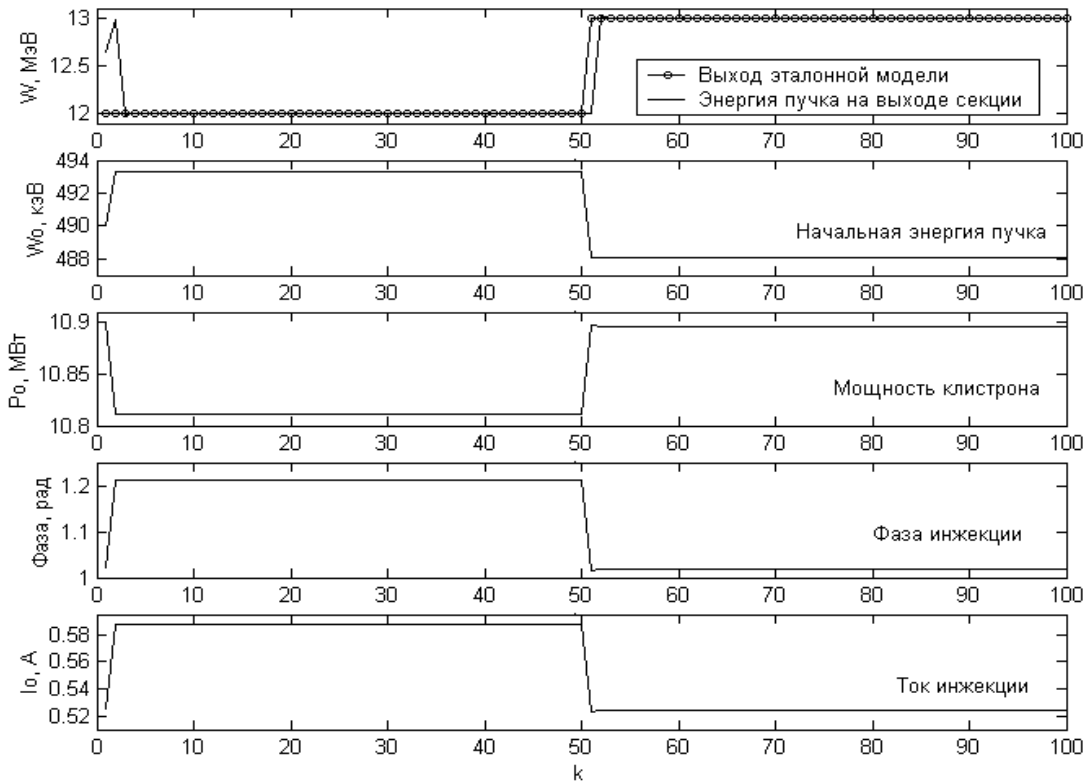


Рис.3. Управление энергией электронов в ускорителе

### Список литературы

1. 2. Efstathiou J. Architectures and techniques of artificial intelligence in process control / J. Efstathiou // In Artificial intelligence in real-time control, 1992. – Oxford: Pergamon, 1993. – V.17. – P. 348-361.

2. Удовенко С.Г. Цифровое нейро-нечеткое управление блоками линейного сильноточного ускорителя электронов / С.Г. Удовенко, А.А. Шамраев, Г. Дибе // Радиоэлектроника, управление и информатика. – 2009. – №3. – С. 35-42.

3. Айзацкий Н.И. К вопросу о токовой нагрузке группирующей секции линейного ускорителя электронов / Н.И. Айзацкий, Л.А. Махненко // ЖТФ. – 1982. – Т.52, вып.4. – С. 680-683.

Поступила в редколлегию 2.09.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Филатов, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### НЕЙРО-НЕЧІТКИЙ ЦИФРОВИЙ РЕГУЛЯТОР ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОНІВ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА

Г. Дибе, С.Г. Удовенко, А.А. Шамраев

Розглядається метод нейро-нечіткого керування енергією електронів лінійного прискорювача, що базується на використанні нейронної мережі та нечіткого цифрового регулятора. Показано можливість адекватного опису динаміки об'єктів, що досліджуються, за допомогою нейронних мереж. Наведено результати моделювання, що дозволяють зробити висновок щодо ефективності застосування запропонованого підходу у цифрових системах керування лінійним прискорювачем.

**Ключові слова:** нейромережеве моделювання, лінійний прискорювач, нечітка логіка, цифровий регулятор.

### NEURAL-FUZZY DIGITAL CONTROLLER OF ENERGIE OF ELECTRONS FOR ACCELATOR LINEAR

G. Dibe, S.G. Udovenko, A.A. Shamraev

The method of neural-fuzzy control of energie of electrons for accelateur linear, based on application of neural network and fuzzy controller, is examined. Possibility of adequate description of objects by the neural models got on this method is shown. Results of modeling loud allowing to draw conclusion about efficiency of application of offered approach in the digital control system by accelateur linear.

**Keywords:** neuronet design, linear accelerating, fuzzy logic, digital regulator.