

УДК 681.5; 004.8

## Разработка и программная реализация алгоритма нечеткой нейросетевой идентификации параметров синхронного генератора

И.В. Игнатъев<sup>1</sup>, М.А. Приходько<sup>1</sup>, Ю.Н. Булатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: bulatovyura@yandex.ru  
Статья поступила 2.08.2012, принята 12.11.2012

*Задача повышения эффективности и оптимизации настроек системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ) является особо актуальной в свете возможного объединения Единой энергетической системы России и энергосистемы стран Европейского союза. Для оптимизации настроек системы АРЧМ при различных режимных ситуациях в электроэнергетической системе (ЭЭС) необходим алгоритм идентификации, позволяющий в реальном времени, быстро и точно строить математическую модель ЭЭС с учетом нелинейности. В работе проанализирована возможность применения теории нечетких множеств, нечеткой логики и нейронных сетей для идентификации параметров синхронных генераторов, участвующих в регулировании частоты и активной мощности в энергосистеме. Приведена блок-схема разработанного алгоритма нечеткой нейросетевой идентификации на основе искусственной нейронной сети Элмана. Параметры функций принадлежности нечетких термов модели оптимизируются с помощью генетического алгоритма. Результаты исследований в MATLAB и на физической модели автономной электрической системы показали высокую эффективность использования аппарата нечеткой логики и нейронных сетей для решения задачи аппроксимации экспериментальных данных без использования дифференциальных и интегральных исчислений. Сравнительный анализ существующих методов идентификации показал высокую точность разработанного алгоритма. Предлагаемый алгоритм нечеткой нейросетевой идентификации параметров синхронного генератора реализован в виде программы для ЭВМ.*

**Ключевые слова:** идентификация, синхронный генератор, нечеткая логика, нечеткая нейросетевая модель.

## Development and program implementation of algorithm fuzzy neural network identifications of parameters of the synchronous generator

I.V. Ignatyev<sup>1</sup>, M.A. Prihodko<sup>1</sup>, U.N. Bulatov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia. E-mail: bulatovyura@yandex.ru  
The article received 2.08.2012, accepted 12.11.2012

*The task of rise of effectiveness and optimisation of options of the system automatic regulation of frequency and active power (ARFP) is actual, especially in the conditions of possible union of the Uniform power system (UPS) of Russia and an electric power system of the countries of the European union. The algorithm of identification allowing in real time fast and precisely to build mathematical model electric power system taking into account nonlinearity is necessary for optimisation of options of system ARFP at various regime situations in electric power system. Possibility of application of the theory of fuzzy sets, fuzzy logic and neural networks for identification of parameters of the synchronous generators participating in regulating of frequency and active power in power system is parsed in work. The flowchart of the developed algorithm fuzzy neural network identifications on the basis of Elman's artificial neural network is reduced. Parametres of functions of membership of fuzzy terms of model are optimised by means of genetic algorithm. Outcomes of researches in MATLAB and on physical model have shown effectiveness of usage of means fuzzy logic and neural networks for solution of the task of approximating of experimental data without usage differential and integral calculus. The comparative analysis with existing methods of identification has shown a high exactitude of the developed algorithm of identification. The offered algorithm fuzzy neural network identifications of parametres of the synchronous generator is realised in the form of the computer program.*

**Keywords:** identification, the synchronous generator, fuzzy logic, fuzzy neural network model.

Частота переменного тока является одним из важнейших показателей качества электрической энергии. От частоты зависит производительность вращающихся механизмов (станков, насосов, вентиляторов и т. д.). При снижении частоты их производительность понижается, повышение же частоты приводит к перерасходу электроэнергии. Таким образом, всякое отклонение частоты от номинального значения наносит ущерб, как потребителям электроэнергии, так и самим электро-

энергетическим системам. Поэтому частота переменного тока нормируется ГОСТ 13109-97 [1].

В нормальном режиме работы ЭЭС возникают внеплановые изменения мощности, вызванные незначительным отклонением запланированного и фактического графиков нагрузки. Такое несоответствие может привести к отклонениям частоты от номинального значения. Для поддержания частоты на номинальном уровне необходимо постоянно устранять отклонения потреб-

ляемой и генерируемой активной мощности от запланированного графика нагрузки, что осуществляется на электростанциях с помощью системы автоматического регулирования частоты и активной мощности. В связи с этим задача повышения эффективности и оптимизации настроек системы АРЧМ приобретает особую актуальность в условиях возможного объединения Единой энергетической системы (ЕЭС) России и энергосистемы стран Европейского союза.

Для настройки системы АРЧМ и регулирования частоты при различных схемно-режимных ситуациях в ЭЭС авторами с помощью инженерного пакета моделирования и программирования MATLAB была разработана модель адаптивного блока настройки АРЧМ, как показали исследования, для регулирования частоты с высокой точностью адаптивный блок настройки АРЧМ должен включать в себя интеллектуальную систему идентификации. Функционирование такого блока должно осуществляться в реальном масштабе времени, что предъявляет высокие требования к сходимости и быстродействию применяемых алгоритмов. Вместе с тем классические методы решения данной задачи требуют проведения многочисленных расчетов и экспериментов на объекте управления. В целях сокращения длительности процесса идентификации предлагается использовать искусственные нейронные сети (ИНС), анализирующие динамические характеристики объекта управления, и нечеткую логику (НЛ), позволяющую построить нелинейную модель объекта.

Математическую основу для применения НЛ в задаче идентификации составляет доказательство в конце 80-х годов Бартоломеем Коско знаменитой теоремы FAT (Fuzzy Approximation Theorem), согласно которой любая математическая система может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике. Другими словами, с помощью естественно-языковых высказываний «ЕСЛИ–ТО», с последующей их формализацией средствами теории нечетких множеств, можно сколько угодно точно описать произвольную взаимосвязь «вход-выход» объекта без использования сложного аппарата дифференциального и интегрального исчисления, традиционно применяемого в управлении и идентификации. В связи с этим авторами был разработан алгоритм идентификации нелинейных объектов на основе нечеткой логики, нейронных сетей и генетических алгоритмов (ГА). Согласно этому алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 1, для построения нечеткой нейросетевой модели нелинейного объекта, такого как синхронный генератор, необходимо снять экспериментальные характеристики входного (механическая мощность) и выходного (частота вращения ротора генератора) сигналов при внесении возмущения со стороны нагрузки. Обученная нейронная сеть позволяет определить параметры систем нечеткого вывода типа Сугэно, а с помощью метода субтрактивной кластеризации осуществляется синтез нечетких правил «ЕСЛИ–ТО».

Для решения задачи идентификации могут применяться как ИНС прямого распространения (сигмоидальные, радиальные), так и сети с обратными связями. Последние, как показали исследования [3], обладают более высокой аппроксимирующей способностью при

сопоставимом количестве нейронов. В связи с этим в алгоритме идентификации используется рекуррентная ИНС Элмана (рис. 2), состоящая из  $N$  входов,  $K$  нейронов скрытого слоя, охваченных обратными связями через элементы задержки  $z^{-1}$ , и  $M$  нейронов выходного слоя.

Фаззификация нейронной сети предполагает перевод ее параметров «вход-выход» в нечеткие, т. е. их описание с помощью теории нечетких множеств.

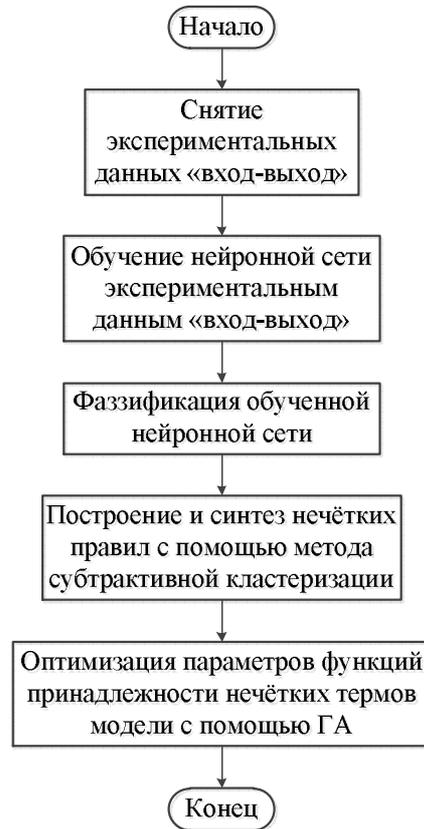


Рис. 1. Блок-схема алгоритма нечеткой нейросетевой идентификации.

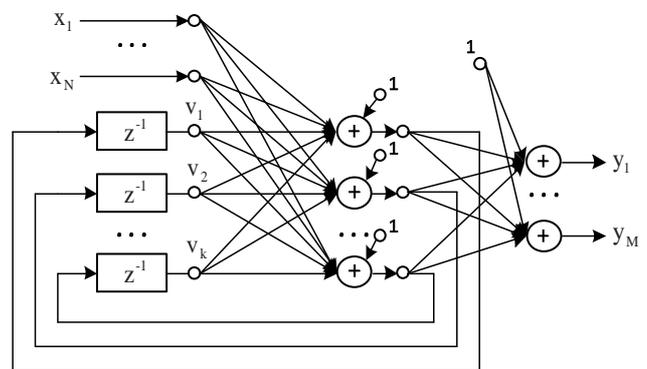


Рис. 2. Структура искусственной нейронной сети Элмана.

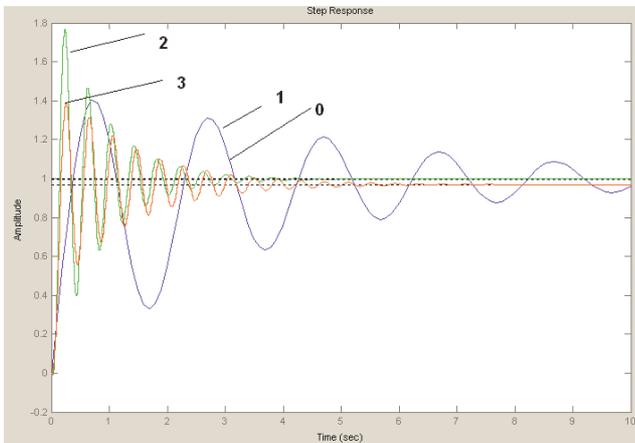
На последнем этапе алгоритма идентификации с помощью ГА оптимизируются параметры функций принадлежности нечетких термов модели таким образом, чтобы минимизировать различия между желаемым (экспериментальным) и модельным (теоретическим) поведением объекта. Для формализации термов базы

знаний хорошо зарекомендовала себя симметричная гауссовская функция принадлежности, которая описывается выражением:

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $c$  – среднее значение, т. е. координата максимума функции принадлежности;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение (определяет ширину гауссовской кривой). Оптимизация параметров функции принадлежности заключается в переборе всех вариантов ее характеристических точек (для гауссовской функции принадлежности (1) –  $c$  и  $\sigma$ ) и в сведении к нулю разности между реакциями нечеткой модели и эталонными значениями [4].

Результаты исследований с тестовой передаточной функцией показали, что разработанный алгоритм идентификации позволяет наиболее качественно отразить характер поведения объекта при вносимых возмущениях, по сравнению с другими методами идентификации. Для этого в пакете Simulink была создана модель объекта с тестовой передаточной функцией  $W_{os}(p) = \frac{(p+1)(0,3p+1)(0,2p+1)}{(0,1p^2+0,05p+1)(1,894p+1)(0,106p+1)}$ , на которую был подан ступенчатый сигнал, а затем произведена идентификация различными методами, реализованными в MATLAB. Результаты сравнения показаны на рис. 3. Переходные характеристики модели с тестовой передаточной функцией и нечеткой модели идеально совпали, в отличие от характеристик, полученных другими методами.

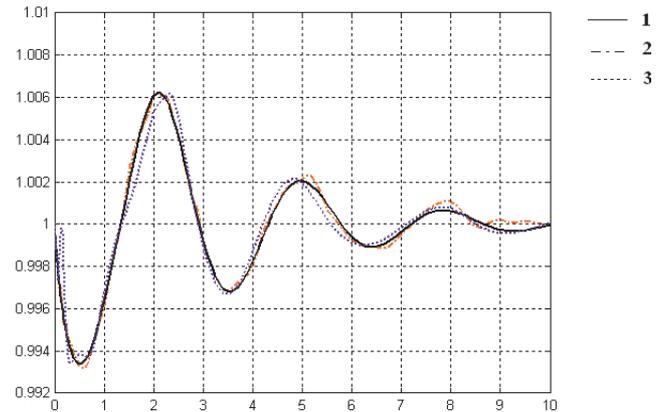


**Рис. 3.** Переходные характеристики тестовой передаточной функции: 0 – тестовая передаточная функция; 1 – нечеткая модель; 2 – AutoRegressive with eXternal input model estimator (ARX модель); 3 – General model estimator using Predictive Error Method (PEM модель).

Апробация разработанного алгоритма идентификации нелинейных объектов была проведена в MATLAB на созданной ранее модели ЭЭС [5], представляющей собой одномашинную систему, работающую на шины бесконечной мощности. Сравнение с экспериментальными данными характеристики частоты вращения ротора генератора, полученной с помощью нечеткой нейросетевой модели, представлено на рис. 4.

Пополнение базы правил нечеткой нейросетевой модели синхронного генератора выполняется с помо-

щью анализа выходных данных при подаче на его вход специальных пробных сигналов малой интенсивности, не нарушающих его нормальной эксплуатации.



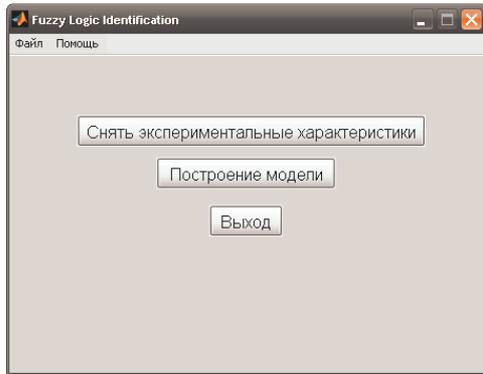
**Рис. 4.** Частота вращения ротора генератора: 1 – экспериментальные данные (эталон); 2 – нечеткая оптимизированная модель (использовалась адаптивная нейронная сеть); 3 – нечеткая оптимизированная модель (использовался метод субтрактивной кластеризации).

С помощью языка программирования MATLAB разработанный алгоритм был реализован в виде программы для ЭВМ [6], предназначенной для идентификации нелинейных объектов на основе нечеткого логического вывода. Программа имеет Windows-ориентированный интерфейс (рис. 5) и предназначена для инженеров и научных работников, занимающихся вопросами идентификации и управления техническими системами. С помощью разработанной программы через многофункциональную плату типа PCI 6025E аналогового и цифрового ввода/вывода, используя пакеты Real-Time Windows Target и Simulink, входящие в систему MATLAB, имеется возможность автоматически снимать необходимые экспериментальные данные «вход-выход».

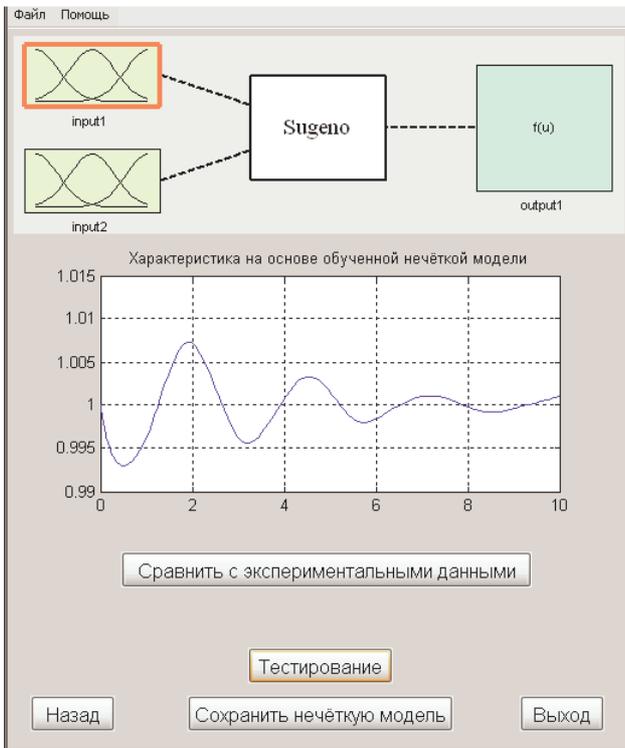
В главном окне программы (рис. 5 а) отображаются функциональные кнопки, нажатие которых поочередно выполняет соответствующее действие. При нажатии на кнопку «Снять экспериментальные характеристики» программа автоматически снимает необходимые данные с исследуемого объекта и сохраняет их в файлы. После того как пользователем задается необходимое время моделирования, программа производит запись на жесткий диск таких экспериментальных данных, как время переходного процесса, механическая мощность и частота вращения ротора генератора, в виде файлов input.txt (входные данные) и output.txt (выходные данные).

При нажатии на кнопку «Построение модели» запускается алгоритм формирования нечеткой нейросетевой модели. В результате отображается выходная характеристика объекта, полученная с помощью обученной нечеткой модели генератора при различных коэффициентах регулирования системы АРЧМ (рис. 5 б). В результирующем окне есть возможность сравнить построенную характеристику с экспериментальными данными и провести тестирование полученной модели. При нажатии на кнопку «Тестирование» программа проводит повторный эксперимент на объек-

те исследования и выдает информацию о сравнении характеристик, полученных в результате повторного эксперимента и работы построенной нечеткой нейросетевой модели (рис. 6).



а)



б)

Рис. 5. Основные окна программы: а) главное окно программы; б) результирующее окно программы.

Полученную нечеткую модель генератора можно сохранить в виде FIS структуры путем нажатия на кнопку «Сохранить нечеткую модель».

Испытание и анализ разработанной программы идентификации проводились также и на физической модели автономной электрической системы, функциональная схема которой показана на рис. 7. В состав физической модели входит генератор (синхронная машина), приводимый во вращение первичным двигателем – турбиной (машина постоянного тока), источник питания машины постоянного тока, возбудитель синхронной машины, преобразователь угловых перемещений, а также активная и индуктивная нагрузки.

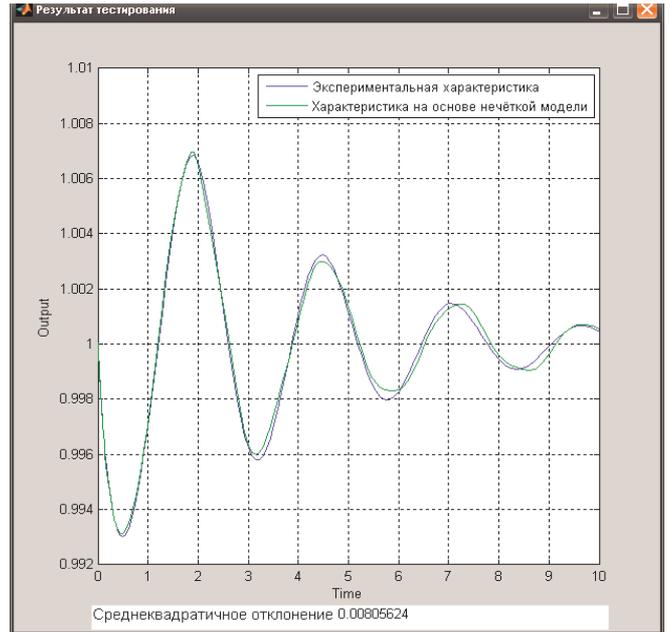


Рис. 6. Результаты тестирования построенной нечеткой нейросетевой модели синхронного генератора.

Изменяя напряжение на якоре машины постоянного тока, можно изменять частоту вращения ротора генератора. Измерение частоты производится с помощью специального блока (указатель частоты вращения) через преобразователь угловых перемещений. Связь между лабораторной установкой и компьютером осуществляется через плату типа PCI 6025E.

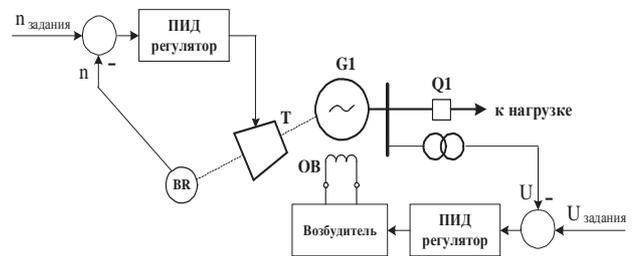


Рис. 7. Функциональная схема физической модели автономной электрической системы.

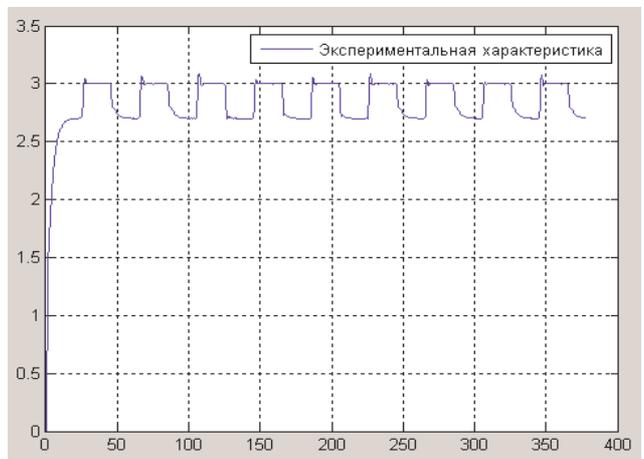


Рис. 8. Экспериментальная характеристика частоты вращения ротора синхронного генератора.

С помощью библиотек Real-Time Windows Target и Simulink была создана модель системы автоматического регулирования частоты вращения (АРЧВ) ротора синхронного генератора. Для снятия экспериментальных характеристик производились разгон генератора и автоматическое регулирование частоты вращения ротора при различных установках и коэффициентах ПИД-регулятора в заданных диапазонах (рис. 8).

С помощью разработанной программы идентификации на основе нечеткой логики и нейронной сети по снятым экспериментальным характеристикам была построена модель системы регулирования частоты вращения ротора синхронного генератора и произведено ее тестирование при случайных коэффициентах ПИД-регулятора (рис. 9).

Результаты тестирования показали высокую точность идентификации (среднеквадратичное отклонение составило менее 0.008) и практическую пригодность разработанной программы для физических моделей.



Рис. 9. Результаты тестирования построенной нечеткой нейросетевой модели.

Таким образом, был разработан и программно реализован алгоритм идентификации параметров синхронного генератора с применением аппарата нечеткой логики, нейронных сетей и генетического алгоритма. Результаты исследований на математической и физической моделях показали эффективность использования аппарата нечеткой логики и нейронных сетей для решения задачи аппроксимации экспериментальных данных без использования дифференциальных и интегральных исчислений. Сравнительный анализ существующих методов идентификации показал высокую точность разработанного алгоритма идентификации.

### Литература

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.:Изд-во стандартов, 1998. 37 с.
2. Приходько М.А., Булатов Ю.Н. Оптимизация настроек АРЧВ двух генераторов с помощью адаптивного блока на основе нечеткой логики // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч.конф.молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Ч. 2. С. 108-109.
3. Аксеновский А.В., Булатов Ю.Н. Идентификация электроэнергетических систем для адаптивного управления автоматическими регуляторами возбуждения // Труды. Братского. государственного. университета-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2011. Т. 1. С. 44-48.
4. Булатов Ю.Н., Приходько М.А. Методика построения оптимизированной нечёткой модели электроэнергетической системы // Труды. Братского. государственного. университета: Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2011. Т. 1. С. 10-16.
5. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Моделирование автоматических регуляторов возбуждения генераторов электрических станций в среде MATLAB // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвуз. темат. сб. тр. СПбГАСУ. СПб., 2008. Вып. 14. 128 с.
6. Нечёткая идентификация односвязных систем (FLI v. 1.00): программ для ЭВМ / Булатов Ю.Н., Приходько М.А. Св. ГР № 2011617041; зарег. в реестре программ 12.09.11. (Федер. служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам).

### References

1. GOST 13109-97. Norms of quality of electrical energy in systems of an electric power supply of a general purpose. – M.: Izd-vo standartov, 1998. – 37 с.
2. Prihodko M.A., Bulatov U.N. Optimisation of options ARCHV of two generators with the help of the adaptive block on the basis of fuzzy logic // Nauka. Tehnologii. Innovacii. – Materiali vserossiyskoy nauchnoi konferencii molodih uchenih v 4-h chastiah. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2010. Chast 2 – С. 108-109.
3. A.V. Aksenovsky, U.N. Bulatov Identification of electropower systems for adaptive control by excitation automatic controllers // Trudi Bratskogo gosudarstvennogo universiteta: Ser.: Estestvennie i inženierii nauki – razvitiu regionov Sibiri: v 2 t. – Bratsk: Izd-vo BrGU, 2011. – Т. 1. – С. 44-48.
4. U.N. Bulatov, M.A. Prihodko Technique of construction of the optimised fuzzy model of an electropower system // Trudi Bratskogo gosudarstvennogo universiteta: Ser.: Estestvennie i inženierii nauki – razvitiu regionov Sibiri: v 2 t. – Bratsk: Izd-vo BrGU, 2011. – Т. 1. – С. 10-16.
5. U.N. Bulatov, I.V. Ignatiev Modelling of automatic controllers of excitation of generators of power plants in the environment of MATLAB: Matematicheskoe modelirovanie, chislennye metodi i kompleksni program: megvuz. temat. sb. tr. Vip.14 / SPbGASU. – SPb., 2008. – 128 с.
6. Fuzzy identification of singly connected systems (FLI v. 1.00) / Bulatov U.N., Prihodko M.A. Sv. GR №2011617041; zareg. v reestre programm dlia EVM 12.09.11. (Feder. slugba po intelektualnoi sobstvennosti, patentam i tovarnim znakam).