
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.5:681.3

Ю. Н. ХИЖНЯКОВ, А. А. ЮЖАКОВ

НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрен нейро-нечеткий регулятор напряжения объекта управления (бесщеточного синхронного генератора с демпферной обмоткой), позволяющий сочетать положительные свойства нечеткого регулятора и нейронной сети на адаптивных нейронах. Представлено описание функций трехслойной нейронной сети нейро-нечеткого регулятора напряжения.

Ключевые слова: бесщеточный синхронный генератор с демпферной обмоткой, лингвистическая переменная, терм, степень принадлежности, фаззификация, адаптивный нейрон, активационная функция, смещение.

Постоянно возрастающие сложность и разнообразие задач, решение которых возлагается на автоматические системы, в последнее время определяют повышенную потребность в системах управления с более универсальными свойствами. Для решения большинства задач подходят системы, основанные на нечеткой логике и нейронных сетях (НС) [1—3]. НС выполняют решения, используя предшествующий опыт, что дает возможность приспособиться к изменениям в системе. Объединение нечеткой логики и НС позволит исключить их недостатки и проектировать нейро-нечеткие (адаптивные) регуляторы. По сравнению с традиционными методами анализа и вероятностным подходом нейро-нечеткое регулирование позволяет анализировать задачи и получать результаты с требуемой точностью, обеспечивать значительное повышение быстродействия процессов управления при использовании нейро-нечетких регуляторов и создавать системы управления для объектов, алгоритмы функционирования которых трудно формализуемы методами традиционной математики [2]. Возможности НС как методологии разрешения проблем позволяют успешно использовать ее в нечетких регуляторах напряжения бесщеточного синхронного генератора (БЩСГ) [4, 5]. Регулирование на основе нечеткой логики с применением НС просто и надежно в реализации и обеспечивает лучшие характеристики, чем ПИД-регулирование. На рис. 1 приведена система автоматического регулирования (САР) с нейро-нечетким регулятором напряжения (D_1 — дифференциатор; Φ — фаззификатор).

Проектирование нейро-нечеткого регулятора напряжения БЩСГ с демпферной обмоткой предполагает выбор лингвистических переменных, терм-множеств по каждой переменной, выбор функций принадлежности фаззификатора и структуры НС.

Вектор входных переменных нейро-нечеткого регулятора напряжения

$$\bar{X}_i = (\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, \bar{x}_{3i})^T,$$

где \bar{x}_{1i} — мгновенное значение отклонения напряжения ($\Delta U = U_{\text{зад}} - U$); \bar{x}_{2i} — мгновенное значение производной отклонения напряжения ($d\Delta U/dt$); \bar{x}_{3i} — мгновенное значение

реактивного тока статора i_p БЩСГ. Зададимся описанием лингвистических переменных. Линейное терм-множество отклонений напряжения: отрицательное среднее (ОС), отрицательное малое (ОМ), норма (Н), положительное малое (ПМ), положительное среднее (ПС). Линейное терм-множество производной отклонения напряжения: ОС, ОМ, Н, ПМ, ПС. Линейное терм-множество реактивного тока статора: положительное очень малое (ПОМ), положительное малое (ПМ), положительное среднее (ПС), положительное большое (ПБ), положительное очень большое (ПОБ), ПМ, ПС.

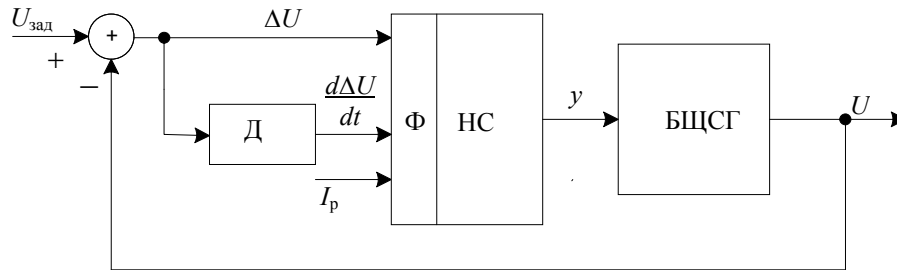


Рис. 1

На рис. 2 приведены линейные терм-множества по отклонению напряжения (а), производной отклонения напряжения (б) и реактивного тока статора (в), отвечающие требованиям непрерывности, непротиворечивости и полноты [6, 7]. Исходя из динамических свойств БЩСГ задаем диапазоны изменения ошибки $\Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max}$, изменения скорости изменения ошибки $(d\Delta U/dt)_{\min} \leq d\Delta U/dt \leq (d\Delta U/dt)_{\max}$, изменения реактивного тока статора $(I_p)_{\min} \leq I_p \leq (I_p)_{\max}$. Нечеткий адаптивный регулятор напряжения состоит из НС и фаззификатора, который формирует векторы степеней принадлежности термов трех лингвистических переменных регулятора: отклонение напряжения (ΔU), производной отклонения напряжения ($d\Delta U/dt$) и реактивного тока статора (I_p).

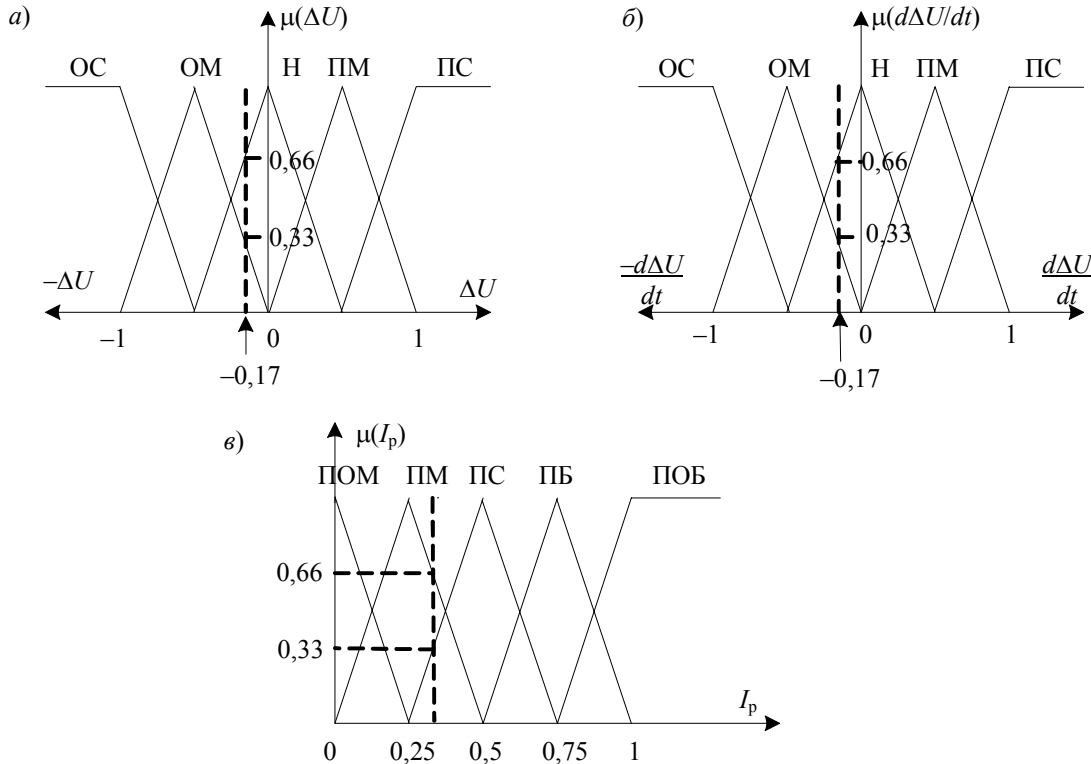


Рис. 2

НС, приведенная на рис. 3, состоит из входного, скрытого и выходного слоев (здесь F_1, F_2, F_3 — активационные функции гиперболического тангенса адаптивных нейронов скрытого слоя; F_4 — линейная активационная функция нейрона выходного слоя НС [10];

$x_{см}, v_{10}, v_{20}, v_{30}$ — „нейронные смещения“, где $v_{10} = 0, v_{20} = 0, v_{30} = 0$). Входной (распределительный) слой НС представлен тремя векторами степеней принадлежности термов фаззификатора по отклонению напряжения, производной отклонения напряжения и реактивному току статора. Скрытый (промежуточный) слой НС состоит из трех нейронов. Каждый нейрон скрытого слоя дополнен обратной связью. Элемент сравнения в цепи обратной связи сопоставляет фактический сигнал с выхода сумматора нейрона с желаемым сигналом d (это может быть ошибка регулирования в САР или производная ошибки регулирования и т.д.). Алгоритм адаптации (алгоритм Уидроу—Хоффа) подстраивает коэффициенты входной матрицы так, чтобы свести к нулю ошибку ϵ . Эта процедура заключается в сведении к минимуму квадрата ошибки с помощью итерационной процедуры с переменным шагом [8]. Сигнал с выхода сумматора нейрона через нелинейную активационную функцию типа гиперболического тангенса подается на вход нейрона выходного слоя [9].

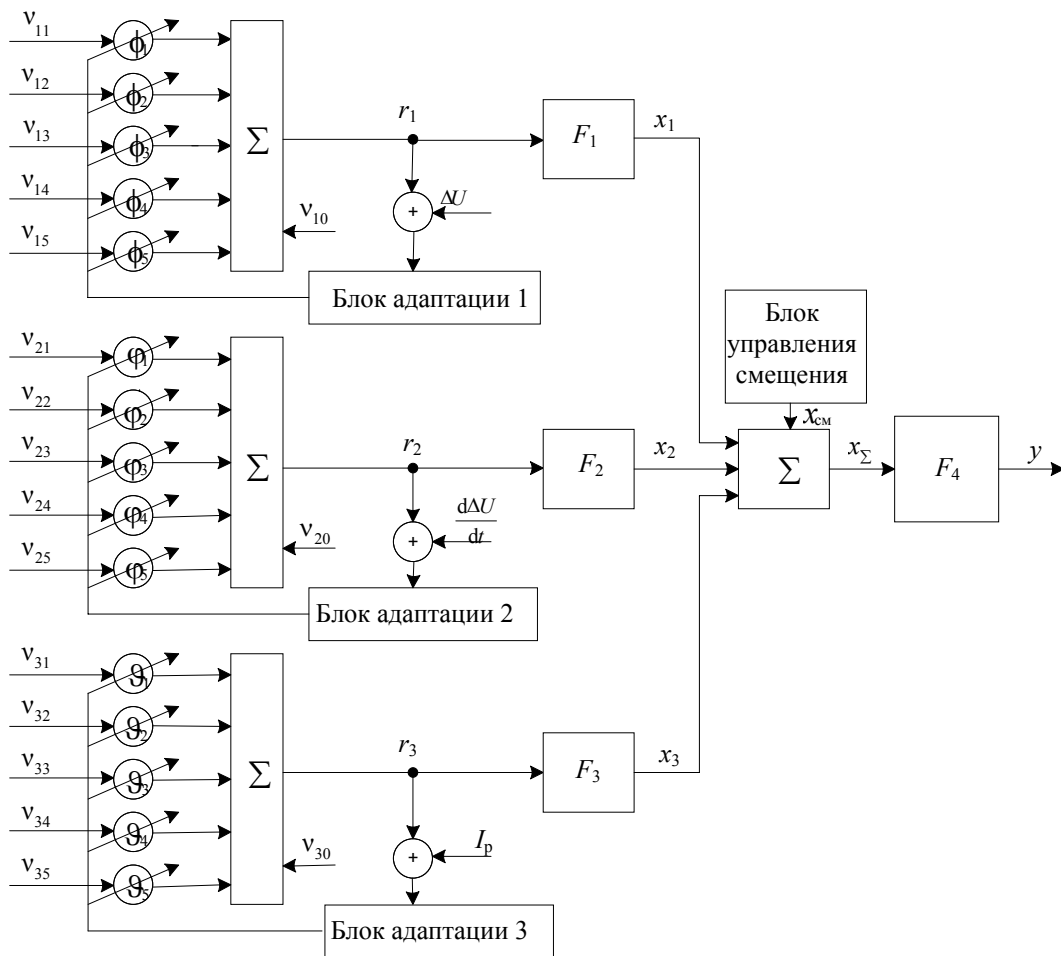


Рис. 3

Выходной слой НС с линейной активационной функцией формирует управляющее воздействие y на регулируемый объект (БЩСГ), которое ограничено по модулю $|y| \leq y_{max}$. НС описывается выражением

$$y = F_4 \left[x_{см} + F_1 \left(\sum_{i=1}^n v_{1i} \phi_i + v_{10} \right) + F_2 \left(\sum_{i=1}^m v_{2i} \varphi_i + v_{20} \right) + F_3 \left(\sum_{i=1}^{\gamma} v_{3i} \vartheta_i + v_{30} \right) \right], \quad (1)$$

где m, n, γ — размерность терм-множеств векторов входа НС; v_1, v_2, v_3 — степень принадлежности соответственно терм-множеств фаззификатора по отклонению напряжения, производной отклонения напряжения и реактивному току статора; ϕ, φ, ϑ — настраиваемые

коэффициенты нейронов скрытого слоя соответственно по отклонению напряжения, по производной отклонения напряжения и по реактивному току статора.

Введем обозначения терм-множеств по отклонению напряжения: $v_{11} = \mu(\Delta U)_{OC}$; $v_{12} = \mu(\Delta U)_{OM}$; $v_{13} = \mu(\Delta U)_H$; $v_{14} = \mu(\Delta U)_{ПМ}$; $v_{15} = \mu(\Delta U)_{ПС}$; по производной отклонения напряжения: $v_{21} = \mu(d\Delta U/dt)_{OC}$; $v_{22} = \mu(d\Delta U/dt)_{OM}$; $v_{23} = \mu(d\Delta U/dt)_H$; $v_{24} = \mu(d\Delta U/dt)_{ПМ}$; $v_{25} = \mu(d\Delta U/dt)_{ПС}$; по реактивному току статора: $v_{31} = \mu(I_p)_{ПОМ}$; $v_{32} = \mu(I_p)_{ПМ}$; $v_{33} = \mu(I_p)_{ПС}$; $v_{34} = \mu(I_p)_{ПБ}$; $v_{35} = \mu(I_p)_{ПОБ}$.

Пусть текущее значение отклонения напряжения $\Delta U = -0,17$ (см. рис. 2) активирует терм Н степенью принадлежности $\mu(\Delta U)_H = 0,66$ и терм ОМ степенью принадлежности $\mu(\Delta U)_{OM} = 0,33$, что соответствуют компонентам вектора степеней принадлежности отклонений напряжения при новых обозначениях: $v_{11} = 0$, $v_{12} = 0,33$, $v_{13} = 0,66$, $v_{14} = 0$, $v_{15} = 0$. При этом на входе его блока адаптации 1 формируется сигнал ошибки $\varepsilon_1(k) = [\Delta U - (\varphi_2 v_{12} + \varphi_3 v_{13})_k]$. Вычисления новых значений весовых коэффициентов φ_2 и φ_3 адаптивного нейрона по отклонению напряжения выполняется по рекуррентной формуле [9]:

$$\varphi_i(k+1) = \varphi_i(k) + 2C_1 \varepsilon_1(k) x_{1i}(k), \quad (2)$$

где $2C_1$ задает скорость настройки коэффициентов φ_2 и φ_3 нейрона по отклонению напряжения, определяемой скоростью сходимости итерационного процесса оптимизации, $C_1 = 0,01-0,1$; $x_{1i}(k) = \left(\frac{d\varphi_i}{d\varphi_i} \right)_k$ — производная k -й итерации i -го коэффициента нейрона отклонения напряжения.

Пусть текущее значение производной отклонения напряжения $d\Delta U/dt = -0,17$ (рис. 2) активирует терм Н по $\mu(d\Delta U/dt)_H = 0,66$ и терм ОМ по $\mu(d\Delta U/dt)_{OM} = 0,33$, что соответствует компонентам вектора степеней принадлежности производной отклонений напряжения при новых обозначениях: $v_{21} = 0$, $v_{22} = 0,33$, $v_{23} = 0,66$, $v_{24} = 0$, $v_{25} = 0$. При этом на входе блока адаптации 2 нейрона формируется сигнал ошибки

$$\varepsilon_2(k) = \left[\frac{d\Delta U}{dt} - (\varphi_2 v_{22} + \varphi_3 v_{23}) \right].$$

Аналогично вычисления новых значений весовых коэффициентов φ_2 и φ_3 нейрона выполняются по рекуррентной формуле

$$\varphi_i(k+1) = \varphi_i(k) + 2C_2 \varepsilon_2(k) x_{2i}(k), \quad (3)$$

где $2C_2$ — скорость настройки коэффициентов φ_2 и φ_3 нейрона по производной отклонения напряжения, $C_2 = 0,01-0,1$; $x_{2i}(k) = \left(\frac{dr_2}{d\varphi_i} \right)_k$ — производная k -й итерации i -го коэффициента нейрона производной отклонений напряжения.

Пусть, например, текущее значение тока ротора $I_p = 0,3$ активирует терм Н $\mu(I_p)_H = 0,66$ и терм ОМ $\mu(I_p)_{OM} = 0,33$ (рис. 2), что соответствует компонентам вектора степеней принадлежности реактивного тока статора при новых обозначениях: $v_{31} = 0$, $v_{32} = 0,33$, $v_{33} = 0,66$,

$v_{34} = 0, v_{35} = 0$. При этом на входе блока адаптации 3 нейрона по реактивному току статора формируется сигнал ошибки $\varepsilon_3(k) = [I_p - (\vartheta_2 v_{32} + \vartheta_3 v_{33})]$. Вычисления новых значений весовых коэффициентов ϑ_2 и ϑ_3 нейрона по реактивному току статора выполняются по рекуррентной формуле

$$\vartheta_i(k+1) = \vartheta_i(k) + 2C_3 \varepsilon_3(k) x_{3i}(k), \quad (4)$$

где $2C_3$ задает скорость настройки коэффициентов ϑ_2 и ϑ_3 нейрона по реактивному току статора, $C_3 = 0,01 \text{—} 0,1$; $x_{3i}(k) = \left(\frac{dr_2}{d\vartheta_i} \right)_k$ — производная k -й итерации i -го коэффициента нейрона по реактивному току статора.

Тогда выход нейро-нечеткого регулятора напряжения, согласно соотношению (1) с учетом (2)—(4), соответствует выражению

$$y = F_4(x_{\text{см}} + r_1 \text{th}(r_1) + r_2 \text{th}(r_2) + r_3 \text{th}(r_3)) = F_4(x_{\text{см}} + x_1 + x_2 + x_3),$$

где r_1, r_2, r_3 — выходы сумматоров нейронов закрытого слоя; x_1, x_2, x_3 — выходы нейронов закрытого слоя; $x_{\text{см}}$ — задает ток в роторе БЩСГ в режиме холостого хода.

Для подтверждения теории нейро-нечеткого управления напряжением БЩСГ был разработан алгоритм и выполнено имитационное моделирование САР [10].

На рис. 4 показан интерфейс и приведена осциллограмма процесса возбуждения БЩСГ и пуска асинхронного двигателя от БЩСГ с помощью нейро-нечеткого регулятора напряжения (1 — изменение тока ротора БЩСГ; 2 — напряжение на шинах автономной системы; 3 — скорость разгона асинхронного двигателя (АД); 4 — ток статора АД).

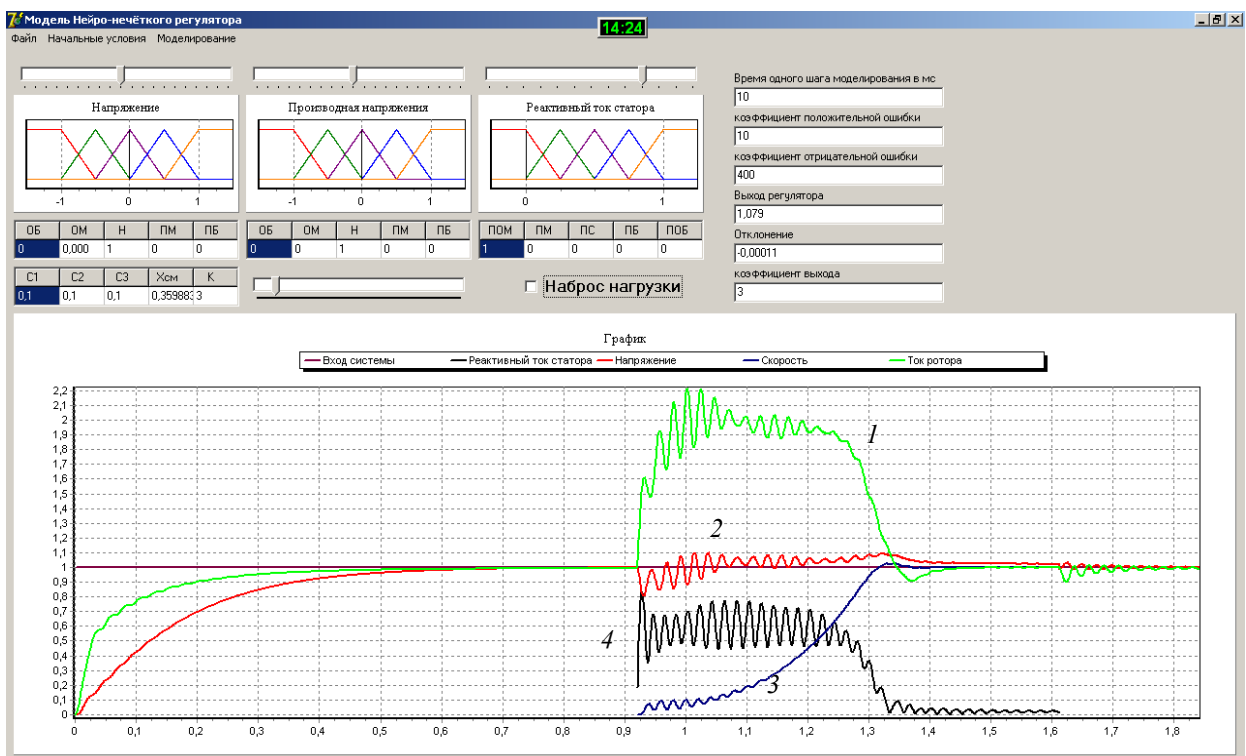


Рис. 4

Показатели качества переходного процесса следующие:

- время первого восстановления напряжения на шинах 0,1 с;
- время регулирования 0,4 с;
- время перерегулирования практически отсутствует;

— коэффициент форсировки тока ротора БЩСГ 2,2, что является допустимым значением.

Таким образом, в настоящей работе приведена методика нейро-нечеткого управления; представлено описание функций трехслойной НС нейро-нечеткого регулятора напряжения; разработаны алгоритм и программа нейро-нечеткого регулятора напряжения БЩСГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егунова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
2. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И. Д. Рудницкого. М.: Горячая линия—Телеком, 2006.
3. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2001.
4. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Нечеткий и нейронный адаптивные регуляторы возбуждения генератора средней мощности // Тр. 11-й Междунар. конф. „Проблемы управления и моделирования в сложных системах“. Самара, 2009. С. 309—313.
5. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Нечеткая адаптивная система возбуждения БЩСГ переменного тока средней мощности // Всеросс. науч.-технич. интернет-конференция. Пермь: ПГТУ, 2007.
6. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия—Телеком, 2002.
7. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия—Телеком, 2007.
8. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
9. Халов Е. А. Одномерные многопараметрические функции принадлежности в задачах нечеткого моделирования и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 2—10.
10. Хижняков Ю. Н. Формирование вектора напряжения на шинах автономной электростанции // Изв. ТПУ. 2009. Т. 315, № 4. С. 43—46.

Сведения об авторах

- Юрий Николаевич Хижняков** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет; кафедра автоматки и телемеханики;
E-mail: luda@at.pstu.ac.ru
- Александр Анатольевич Южаков** — д-р техн. наук, профессор; Пермский государственный технический университет; кафедра автоматки и телемеханики;
E-mail: uz@at.pstu.ac.ru

Рекомендована кафедрой
автоматки и телемеханики

Поступила в редакцию
25.03.11 г.