

Г. Н. Утляков, В. И. Каримов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Приведены результаты разработки модели и моделирования интеллектуальных систем регулирования частоты выходного напряжения синхронных генераторов. *Синхронные генераторы; математическая модель; нечеткая логика; нейронные сети; системы регулирования частоты*

Анализ перспектив развития авиационной техники показывает, что наряду с увеличением единичной и суммарной мощности потребителей электрической энергии растет и доля потребителей с импульсно–периодическим характером нагрузки повышенной мощности. Это обстоятельство, если не предусмотреть специальных мер, может серьезно отразиться на качестве генерируемой электроэнергии и работе потребителей.

К системам регулирования частоты предъявляется ряд требований, определяющих качество электрической энергии, среди которых такие как: точность стабилизации частоты в статических режимах работы, выбросы и провалы в переходных режимах работы, время переходных процессов.

Дальнейшее развитие и совершенствование систем регулирования частоты, а также других систем автоматического регулирования (САР) связано с использованием цифровых способов управления, реализуемых с помощью микроЭВМ или микропроцессоров [1]. По сравнению с аналоговыми, цифровые САР имеют ряд преимуществ, основными из которых являются высокая точность, помехозащищенность, возможность реализации сложных алгоритмов управления и гибкой перестройки структуры, простота коррекции. При этом открываются широкие перспективы для построения оптимальных и адаптивных САР с использованием интеллектуальных алгоритмов, расширения возможностей контроля и диагностики основных элементов системы электроснабжения (СЭС).

В университете проводятся работы по разработке, созданию и исследованию систем регулирования напряжения и частоты генераторов переменного тока первичных и вторичных СЭС, устройств защиты с использованием элементов

искусственного интеллекта на основе нечеткой логики и нейронных сетей [2–5].

К достоинствам интеллектуальных систем регулирования можно отнести возможность управления процессами, являющимися слишком сложными для анализа с помощью общепринятых количественных методов, способность обучаться, то есть возможность обеспечить более простые решения для сложных задач регулирования. Кроме того, нейронные сети имеют способность к самообучению, что исключает необходимость иметь большой объем информации для нейроконтроллеров и делает их пригодными для регулирования в условиях существенных неопределенностей. Высокая степень параллелизма нейронных сетей позволяет реализовывать очень быстрые методы многопроцессорной обработки на основе использования нейронных кристаллов или параллельных аппаратных средств [6].

Более широкое применение систем регулирования частоты с использованием интеллектуальных алгоритмов для генераторов первичных и вторичных СЭС ограничено отсутствием математических моделей для анализа процессов регулирования частоты в различных режимах работы. Результаты моделирования позволят выработать требования к системам регулирования, определить входные и выходные параметры интеллектуального регулятора, поэтому разработка математических моделей и анализ систем регулирования частоты с использованием интеллектуальных алгоритмов, обеспечивающих повышение качества электрической энергии, является актуальной научной задачей.

В работе приводятся результаты разработки математической модели и моделирования систем регулирования частоты с использованием нечеткой логики и нейронных сетей бесконтактного синхронного генератора (БСГ) с пнев-

математическим приводом, широко используемого на летательных аппаратах.

Теоретические исследования проведены методами математического моделирования электромагнитных процессов. При анализе статических и динамических режимов работы БСГ с системами регулирования частоты на основе интеллектуальных алгоритмов применены среда «MatLab» с пакетом расширений «Simulink», «Neural Network», «Fuzzy Logic», теория нечетких множеств, теория нечеткой логики, программирование и компьютерное моделирование.

Для исследования процессов регулирования частоты генераторов в статических и динамических режимах работы необходимо иметь дифференциальные уравнения элементов системы регулирования.

Уравнение объекта регулирования, состоящего из синхронного генератора и привода постоянной частоты вращения, имеет вид [7]:

$$(T_M p + S_M) v = N\sigma - 2u + \rho + \lambda v_{a.d.},$$

где T_M – постоянная времени привода, S_M – коэффициент самовыравнивания привода, v – относительное изменение угловой частоты, N – коэффициент усиления привода по параметру управления, σ – относительное перемещение управляющего устройства привода, u – относительное изменение напряжения, ρ – относительное изменение сопротивления нагрузки, λ – коэффициент, характеризующий влияние возмущающего воздействия, $v_{a.d.}$ – относительное изменение частоты вращения авиационного двигателя.

Грубый и точный каналы регулирования описываются уравнениями:

$$(T_\sigma p + 1)\sigma = -k_v v - k_\xi \xi; \quad T_\xi \xi = k_\omega v,$$

где T_σ – постоянная времени регулятора по грубому каналу, k_v – коэффициент усиления грубого канала регулирования частоты, k_ξ – коэффициент передачи сигнала от корректора, ξ – относительное перемещение шайбы червячного редуктора корректора, T_ξ – коэффициент, характеризующий время переключения шайбы корректора из одного крайнего положения в другое, k_ω – коэффициент, характеризующий эффективность влияния точного канала регулирования на перемещение золотника.

Постоянные времени пневматического привода, элементов грубого и точного каналов регулирования имеют значения [7]: $T_M = 1,5$ с, $T_\sigma = 0,3$ с, $T_\xi = 0,1$ с. Коэффициенты имеют следующие значения: $S_M = 0,8$, $N = 5$, $\lambda = 1$, $k_v = 5$, $k_\xi = 0,4$, $k_\omega = 2,7$. Статическая ошибка регулирования частоты равна нулю, так как в системе используется интегрирующее звено – конденсаторный двигатель в качестве исполнительного устройства точного канала регулирования частоты (ИУ2 на рисунке 1) [7].

Предлагаемая структура канала регулирования частоты представлена на рис. 1.

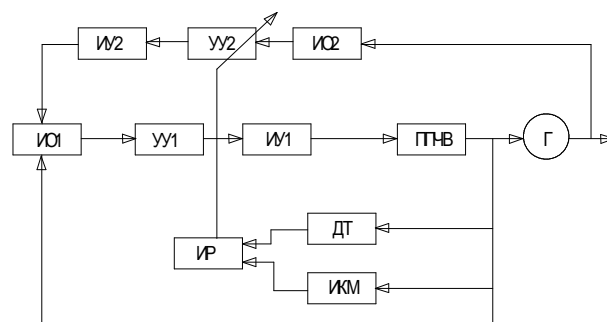


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования частоты

Разработана математическая модель систем регулирования частоты на основе нечеткой логики и нейронной сети для БСГ, выполненная по схеме, представленной на рис. 1. На схеме ИО1, УУ1, ИУ1 – измерительный орган, устройство усиления и исполнительное устройство грубого канала регулирования частоты, ИО2, УУ2, ИУ2 – измерительный орган, устройство усиления и исполнительное устройство точного канала регулирования частоты, ППЧВ – привод постоянной частоты вращения, Г – генератор, ДТ – датчик тока, ИКМ – измеритель коэффициента мощности, ИР – интеллектуальный регулятор. Интеллектуальный регулятор вырабатывает сигнал коэффициента усиления точного канала регулирования на основе значения входных сигналов тока нагрузки и коэффициента мощности нагрузки.

В интерактивной системе Simulink разработана модель системы регулирования частоты выходного напряжения синхронного генератора, представленная на рис. 2.

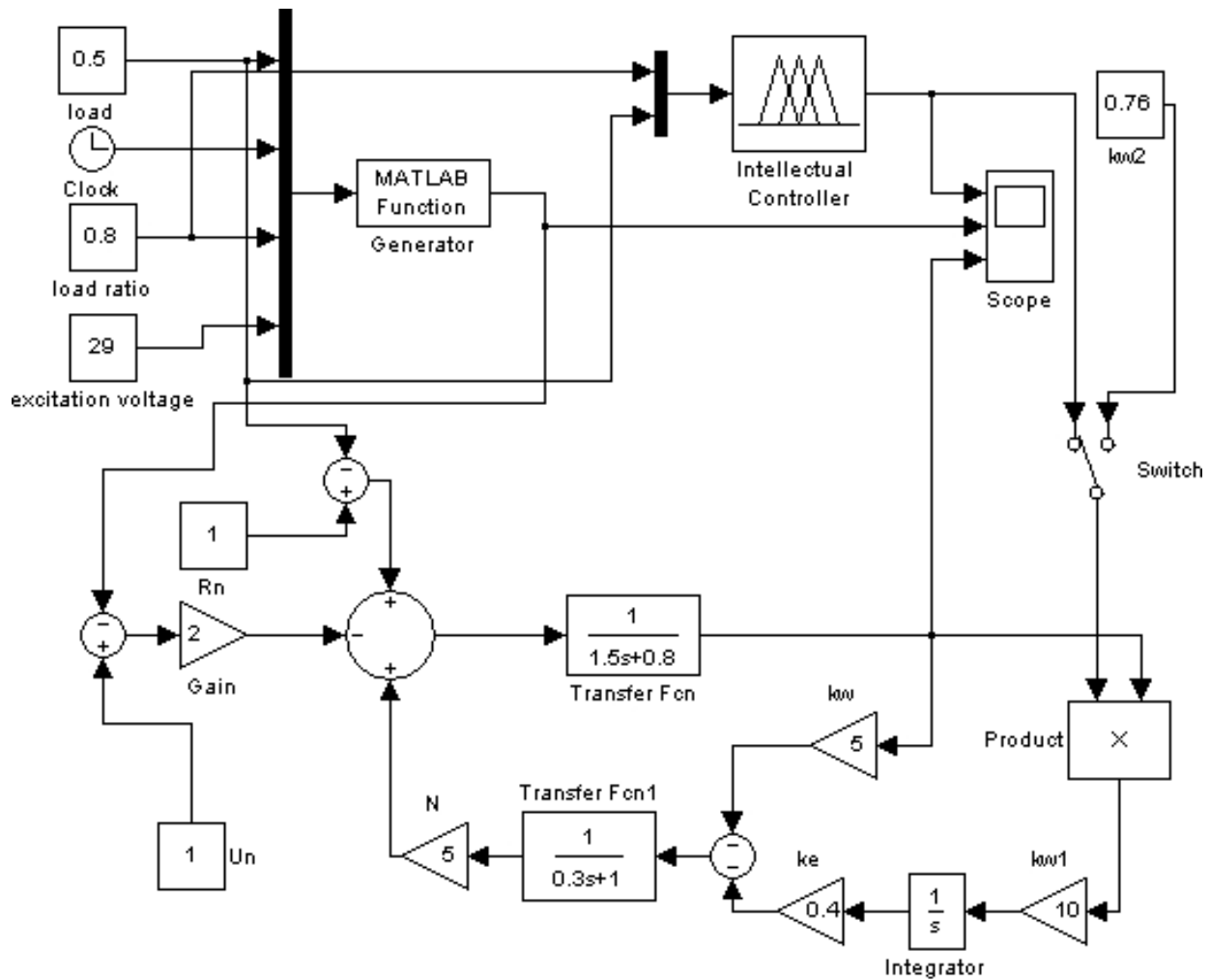


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной системы регулирования частоты

Модель содержит следующие блоки: Generator – синхронный генератор, Intellectual Controller – интеллектуальный регулятор, Transfer Fcn – передаточная функция, Gain – коэффициент усиления, Integrator – интегрирующее звено, Switch – переключатель, Scope – осциллограф, Load Ratio – коэффициент мощности нагрузки, Excitation Voltage – напряжение возбуждения генератора, Clock – секундомер, U_n – уставка напряжения, R_n – уставка сопротивления, k_w – коэффициент усиления грубого канала регулирования, k_{w1} – коэффициент влияния точного канала регулирования на перемещение золотника, k_{w2} – коэффициент усиления штатной системы регулирования, k_e – коэффициент передачи сигнала от корректора, N – коэффициент усиления привода по параметру управления, Product – блок умножения.

Для формирования базы правил нечеткого контроллера необходимо определить входные и выходные лингвистические переменные. В качестве двух входных переменных выступают значения коэффициента мощности нагрузки

и величины нагрузки. В качестве обозначений нечетких термов выбраны следующие: VS – очень малое; S – малое; M – среднее; B – большое; VB – очень большое.

База правил и вид функций принадлежности нечеткого контроллера были определены на основе зависимостей коэффициента усиления от величины сопротивления нагрузки, которые были получены, исходя из наименьшего времени регулирования для отдельно взятых значений сопротивления и коэффициента мощности нагрузки.

База правил разработанного нечеткого контроллера содержит 12 правил:

If (input1 is 0) and (input2 is VS) then (output1 is SM) (1)

If (input1 is 0) and (input2 is S) then (output1 is MB) (1)

If (input1 is 0) and (input2 is M) then (output1 is S) (1)

If (input1 is 0) and (input2 is VB) then (output1 is VVB) (1)

If (input1 is 0.8) and (input2 is VS) then (output1 is SM) (1)

If (input1 is 0.8) and (input2 is S) then (output1 is MBB) (1)

If (input1 is 0.8) and (input2 is M) then (output1 is BVB) (1)

If (input1 is 0.8) and (input2 is VB) then (output1 is VB) (1)

If (input1 is 1) and (input2 is VS) then (output1 is M) (1)

If (input1 is 1) and (input2 is S) then (output1 is B) (1)

If (input1 is 1) and (input2 is M) then (output1 is BBVB) (1)

If (input1 is 1) and (input2 is VB) then (output1 is VS) (1)

На рис. 3, 4 и 5 изображены графики функций принадлежности входных и выходной переменных.

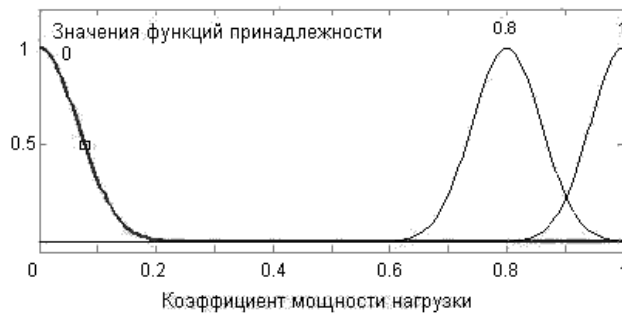


Рис. 3. Графики функций принадлежности для термов входной лингвистической переменной «Коэффициент мощности нагрузки»

В качестве входных параметров нейросетевого регулятора используются значения сопротивления и коэффициента мощности нагрузки. Была сформирована трехслойная сеть обратного распространения (рис. 6), включающая 2 нейрона во входном слое (по числу компонент входного вектора) с передаточной функцией *logsig*, 15 нейронов во втором слое с передаточной функцией *logsig* и 1 нейрон в выходном слое (по числу компонент выходного вектора) с передаточной функцией *purelin*.

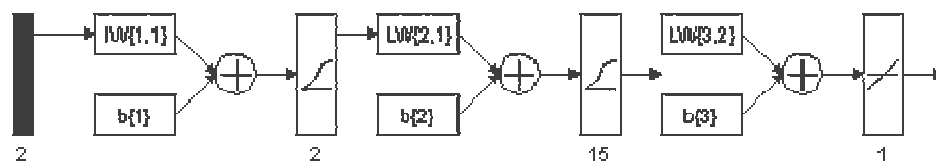


Рис. 6. Конфигурация нейронной сети

Значение функций принадлежности



Рис. 4. Графики функций принадлежности для термов входной лингвистической переменной «Величина нагрузки»

Значения функций принадлежности

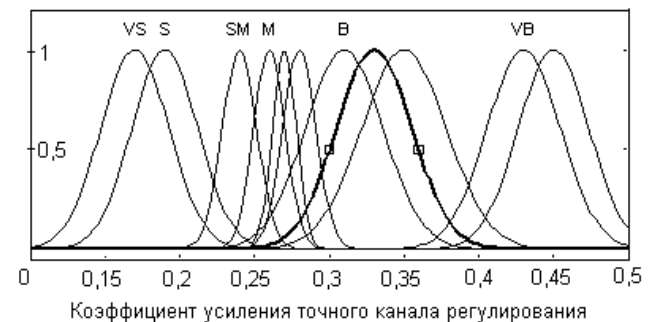


Рис. 5. Графики функций принадлежности для термов выходной лингвистической переменной «Коэффициент усиления точного канала регулирования»

При этом в качестве обучающего алгоритма выбран алгоритм Levenberg–Marquardt (*trainlm*). Этот алгоритм обеспечивает быстрое обучение, но требует много ресурсов. Критерием окончания обучения является значение отклонения, при котором обучение будет считаться законченным. Это значение было выбрано равным 0.01. Максимальное количество циклов обучения – 1000.

Обучающие выборки для нейронной сети, состоящие из матриц входных значений и эталонов, были составлены на основе описанных выше зависимостей коэффициента усиления от величины сопротивления нагрузки.

На рис. 7 показан график процедуры обучения созданной нейронной сети.

Для того чтобы применить обученную сеть в качестве регулятора частоты, был создан блок функции, производящей выработку выходного сигнала нейронной сети на основе входных параметров: $\text{sim}(\text{net}, [\text{u}(1); \text{u}(2)])$, где $[\text{u}(1); \text{u}(2)]$ – матрица входных параметров, net – идентификатор нейронной сети, загруженной в рабочую область Matlab.

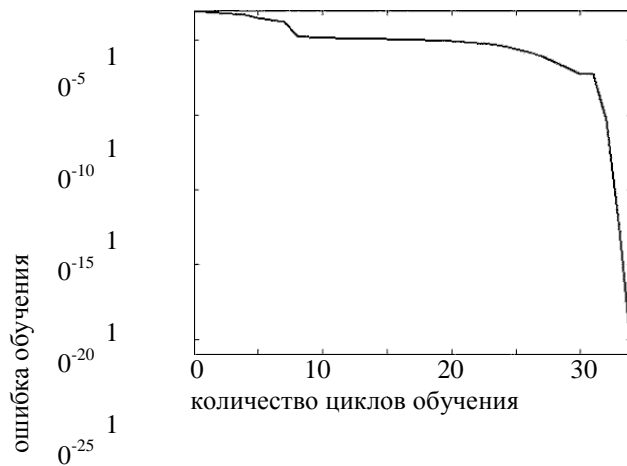


Рис. 7. График процедуры обучения нейронной сети

Для оценки быстродействия систем регулирования частоты на основе нечеткой логики и нейронной сети проведено моделирование при скачкообразном подключении различных нагрузок к зажимам синхронного генератора для системы со штатным регулятором частоты, системы с нечетким регулятором и системы с нейросетевым регулятором. На рис. 8 и 9 показаны графики переходных процессов изменения относительного значения частоты (v) со штатной системой регулирования, системой регулирования на основе нечеткой логики и системой регулирования на основе нейронной сети при $I_n = 2$ и $\cos \varphi = 0,8$.

Результаты моделирования штатной системы регулирования и систем регулирования на основе нечеткой логики и нейронной сети приведены в таблице.

Анализ полученных данных показывает, что система с нечетким регулятором обеспечивает уменьшение времени регулирования в $1,01 \div 1,57$ раза и уменьшение провалов частоты в $1,01 \div 1,04$ раза, система с нейросетевым регулятором обеспечивает уменьшение времени регулирования в $1,01 \div 1,57$ раза и уменьшение провалов частоты в $1,01 \div 1,46$ раза по сравнению со штатной системой регулирования.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели систем регулирования частоты выходного напряжения с использованием интеллектуальных алгоритмов на основе нечеткой логики и нейронной сети для генераторов первичных систем электроснабжения, позволяющие проводить исследования процессов регулирования частоты генераторов в статических и динамических режимах работы, что обеспечивает сокращение сроков разработки и отладки систем регулирования частоты с использованием интеллектуальных алгоритмов.

2. Определены функции принадлежности и составлена база правил нечеткого регулятора частоты, определена структура, разработаны обучающие данные и проведено обучение нейросетевого регулятора частоты.

3. Проведено моделирование процессов регулирования частоты в системах со штатным, нечетким и нейросетевым регулятором, выявившее превосходство системы с нечетким регулятором над системой со штатным регулятором во времени регулирования в $1,01 \div 1,57$ раза, в величине провалов частоты – в $1,01 \div 1,04$ раза, системы с нейросетевым регулятором над системой со штатным регулятором во времени регулирования – в $1,01 \div 1,57$ раза, в величине провалов частоты – в $1,01 \div 1,46$ раза.

4. Результаты моделирования показали, что цифровые регуляторы частоты с реализацией интеллектуальных принципов регулирования по точности регулирования, времени регулирования, величине перерегулирования, максимальному отклонению в переходном процессе превосходят серийные регуляторы, и подтвердили целесообразность и перспективность их применения.

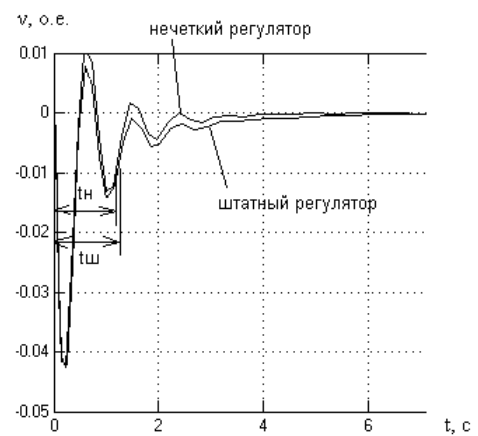


Рис. 8. Графики переходных процессов изменения частоты с системой регулирования на основе нечеткой логики и со штатной системой регулирования

I_n , о.е.	$\cos \varphi = 0$		$\cos \varphi = 0,8$		$\cos \varphi = 1$	
	t_p , с	f_{min} , Гц	t_p , с	f_{min} , Гц	t_p , с	f_{min} , Гц
Штатная система регулирования частоты						
0,5	1,5	380,4	1,41	376,4	1,92	363,2
1,0	0,67	386,4	0,96	385,6	0,91	386
1,5	1,1	385,2	1,1	385,2	1,04	386,8
2,0	1,22	382,8	1,22	383,2	1,18	384,8
Система регулирования частоты на основе нечеткой логики						
0,5	1,49	381,2	1,04	376,8	1,22	364
1,0	0,65	386,8	0,66	386	0,65	386,4
1,5	1,04	385,6	1,09	385,6	1,03	387,2
2,0	1,19	383,2	1,18	384	1,15	385,2
Система регулирования частоты на основе нейронной сети						
0,5	1,48	380,8	1,4	376,8	1,22	363,6
1,0	0,66	386,8	0,93	386	0,9	390,4
1,5	1,05	385,6	1,05	385,6	1,02	387,2
2,0	1,21	383,2	1,15	383,6	1,15	385,2

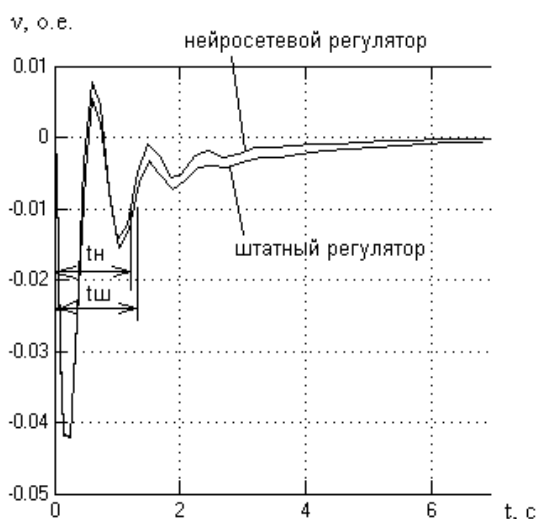


Рис. 9. Графики переходных процессов изменения частоты с системой регулирования на основе нейронной сети и со штатной системой регулирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрооборудование летательных аппаратов. Под ред. С. А. Грузкова. М.: МЭИ, 2005. Т. 1. 568 с.
2. Утляков Г. Н., Валеев А. Р., Асадуллин В. М. Разработка и исследование интеллектуальных систем регулирования напряжения бесконтактных синхронных генераторов // Вестник УГАТУ. 2000. Т.10, № 1(26). С.174–179.
3. Утляков Г. Н., Валеев А. Р., Каримов В. И. Интеллектуальные системы распределения реактивных мощностей параллельно работающих синхронных генераторов // Электротехнические комплексы и

системы. Межвуз. науч. сб. Уфа: Изд. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та, 2009. С.85–87.

4. О построении интеллектуального регулятора частоты генератора / Г. Н. Утляков [и др.] // Электронные устройства и системы: Межвуз. науч. сб. Уфа: Изд. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та, 2010. С. 31–33.

5. Modeling of frequency control systems based on neural networks / G. N. Utlyakov [et al.] // Proc. of the 12th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2010), Moscow – St. Petersburg : USATU, 2010. V. 1. P. 89–91.

6. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: Учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.

7. Синдеев И. М., Савелов А. А. Системы электроснабжения воздушных судов: Учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1990. 296 с.

ОБ АВТОРАХ

Утляков Геннадий Николаевич, проф. каф. электрообор. летательн. аппаратов и наземн. трансп. Дипл. инж. по электр. маш. и аппар. (УГАТУ, 1971). Д-р техн. наук по элементам и устр. выч. техн. и сист. упр-я (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем электрооборуд. летательн. аппаратов.

Каримов Вагиз Ильгизович, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии по электротехнике, электромеханике и электротехнологиям (УГАТУ, 2009). Готовит дис. об интеллектуальн. системах регул. частоты выходного напряжения синхронных генераторов.