

УДК 658.71.08,519.87

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-29-43

## РАЗВИТИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СЕТЕВЫХ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ВОЗДУШНОМ ТРАНСПОРТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ

А.А. ГЛАДКИХ<sup>1</sup>, Л.Г. БОЛЬШЕДВОРСКАЯ<sup>2</sup>, Ан.К. ВОЛКОВ<sup>1</sup>, Ал.К. ВОЛКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,  
г. Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

В данной работе проведен анализ зарубежного опыта и сделан вывод, что один из путей повышения эффективности обеспечения авиационной безопасности в Российской Федерации заключается в применении современных сетевых тренажерных комплексов. Предложен и апробирован новый подход к оценке уровня компетентности операторов досмотра, позволяющий учитывать параметры глазодвигательной деятельности и вариабельности сердечного ритма испытуемых операторов, отличающийся от существующих подходов применением нечетких моделей классификации. В качестве аппаратных средств психофизиологического мониторинга использованы технология Eye tracking и устройство психофизиологического тестирования УПФТ-1/30 «Психофизиолог». Представлены основы автоматической генерации нечетких моделей типа Сугено и Мамдани из экспериментальных данных. Проведены экспериментальные исследования на базе ФГБОУ ВО УИ ГА. Результаты сравнения сгенерированных моделей показали, что модель Сугено, обученная с применением ANFIS-алгоритма, точнее, чем модель Мамдани и модель линейной регрессии, идентифицирует исследуемую зависимость по оценке компетентности операторов досмотра. В качестве критерия качества моделей на обучающих и тестовых данных использована средняя квадратическая ошибка. Обоснована актуальная задача выбора эффективной концепции помехоустойчивого кодирования в телекоммуникационной составляющей перспективных тренажерных комплексов. Описаны пути решения важной задачи повышения достоверности актуальных цифровых данных в сетевых тренажерных комплексах на основе применения средств помехоустойчивого кодирования. Представлена модель перестановочного декодера недвоичного избыточного кода на базе лексикографической когнитивной карты. Данная модель декодера избыточного кода использует методы когнитивной обработки данных при реализации процедуры перестановочного декодирования для эффективной защиты команд дистанционного управления от влияния деструктивных факторов на процесс управления.

**Ключевые слова:** оператор досмотра, тренажерная подготовка, технология Eye tracking, нечеткие модели, ANFIS-алгоритм, субтрактивная кластеризация, сетевые технологии, помехоустойчивое кодирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач, стоящей перед авиационной отраслью в настоящее время, является повышение качества профессиональной подготовки различных категорий авиационного персонала, и в частности операторов досмотра. Для решения данной задачи необходимо повысить уровень интеллектуализации процессов принятия решений по оценке компетентности операторов досмотра и реализовать интеграцию систем подготовки в единое информационное пространство.

Начальная подготовка операторов досмотра реализуется с применением специализированных компьютерных тренажеров, а текущая подготовка на рабочем месте с применением технологии проецирования изображений опасных предметов (ПИОП) [1]. Согласно рекомендациям Международной организации гражданской авиации (ИКАО) подготовка авиационного персонала должна основываться на анализе фактических данных (Evidence Based Training, ЕВТ). Достижение качественной подготовки авиационных специалистов в рамках ЕВТ в первую очередь достигается за счет внедрения аппаратных средств психофизиологического мониторинга. Применение биологической обратной связи позволяет получать объективную и всестороннюю информацию о процессе тренажерной подготовки операторов. В данной работе для решения широкого

круга диагностических задач в области подготовки операторов досмотра на базе биологической обратной связи предлагается использовать технологию Eye tracking и метод вариационной кардиоинтервалометрии (ВКМ). Применение технологии Eye tracking позволяет оценить стратегии зрительного поиска запрещенных предметов операторами. Использование метода ВКМ в свою очередь позволяет оценить степень психофизиологической напряженности (ПФН) (психофизиологической «цены» выполняемой задачи) операторов во время тренажерной подготовки. Исследования особенностей движения глаз при решении профессиональных задач в процессе подготовки активно развиваются в медицине [2, 3], спорте [4, 5] и авиации [6, 7]. Существующие модели [8], используемые для оценки компетентности операторов досмотра, применяют только итоговые результаты их деятельности, не учитывая при этом параметры глазодвигательной деятельности и ПФН операторов. При этом в рамках даже одной тренировочной сессии в условиях ЕВТ генерируется большой информационный массив, поэтому необходимо применять технологии интеллектуального анализа данных. В связи с этим актуальной задачей является разработка нового подхода к поддержке принятия решений по оценке уровня компетентности операторов досмотра, заключающегося в применении аппаратных методов диагностики психофизиологического состояния обучающихся с последующим автоматическим проектированием нечетких моделей из экспериментальных данных. В связи с тем, что принятие решений в области обеспечения авиационной безопасности часто происходит в условиях неопределенности и неполноты исходных данных, применение нечетких моделей является оправданным.

Анализ зарубежного опыта показывает, что развитие сетевой организации подготовки операторов досмотра является актуальным направлением повышения качества обеспечения авиационной безопасности. В целях стандартизации начальной подготовки операторов досмотра в Европейском союзе был разработан сетевой тренажерный комплекс X-Ray Tutor [9]. В целях централизованного управления текущей подготовкой операторов на рабочих местах 3-е поколение технологии ПИОП также реализовано с применением сетевых технологий [10]. В настоящее время в Европейском союзе реализуется проект «Автоматическое сравнение рентгеновских изображений при сканировании грузов» (Automated Comparison of X-ray Images for cargo scanning) [11, 12]. Данный проект предполагает объединить в общую сеть как объекты транспортной инфраструктуры, так и различные исследовательские центры [13]. Необходимо отметить, что внедрение сетевых технологий в процессы организации подготовки операторов досмотра предъявляет повышенные требования к характеристикам применяемых каналов связи. Для подобных систем реального времени требуется обеспечить качество визуальных данных, своевременность и достоверность получаемой и обрабатываемой цифровой информации. При этом даже в условиях применения очень надежных оптических систем связи возникает острая необходимость использования средств и методов помехоустойчивого кодирования для защиты данных от ошибок. В связи с этим обоснование и выбор эффективной концепции помехоустойчивого кодирования в телекоммуникационной составляющей перспективных тренажерных комплексах является, безусловно, актуальной задачей.

## **НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ДОСМОТРА**

### **Методика автоматического проектирования нечетких моделей по результатам кластеризации**

На практике чаще всего используют два основных типа нечетких моделей: модель Мамдани и модель Сугено. Нечеткий вывод Мамдани предполагает, что все значения входных и выходной переменных заданы нечеткими множествами. Нечеткий вывод Сугено предполагает, что заключения правил являются линейными функциями от входов. Методика автоматического

проектирования нечетких моделей из экспериментальных данных предполагает, что имеется зависимость  $y = f(X)$ , которую можно описать нечеткой базой знаний. При этом имеется обучающая выборка из  $M$  пар данных, связывающая входные данные ( $x$ ) с выходом ( $y$ ) исследуемой зависимости [14]:

$$(X_r, y_r), \quad r = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где  $X_r$  – значение входных данных в  $r$ -й строке выборки и  $y_r$  – соответствующий выход.

Процедура генерации модели Сугено из экспериментальных данных состоит из двух этапов. На первом этапе для синтеза базовой структуры нечеткой модели применяется субтрактивная кластеризация. На втором этапе происходит обучение полученной базовой модели с применением ANFIS-алгоритма. Обучение модели Сугено осуществляется по критерию средней квадратической ошибки ( $RMSE_s$ ):

$$RMSE_s = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1, M} (y_r - F(P, B, X_r))^2}, \quad (2)$$

где  $P$  – вектор характеристик функций принадлежности (ФП) термов переменных ( $x$ );  $B$  – вектор коэффициентов в заключениях правил базы знаний Сугено;  $F(P, W, X_r)$  – результат нечеткого логического вывода Сугено.

Генерация из данных нечеткой модели Мамдани реализуется с помощью кластеризации по алгоритму нечетких  $s$ -средних. Обучение модели Мамдани осуществляется по критерию средней квадратической ошибки ( $RMSE_m$ ):

$$RMSE_m = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1, M} (y_r - F(P, W, X_r))^2}, \quad (3)$$

где  $P$  – вектор характеристик ФП термов переменных ( $x$ ) и ( $y$ );  $W$  – вектор весовых коэффициентов правил базы знаний;  $F(P, W, X_r)$  – результат нечеткого логического вывода Мамдани.

Термы переменных представляются нечеткими множествами с гауссовыми ФП. Для оценки качества разбиения исходных данных на нечеткие кластеры используется индекс Хей-Бени (Index Xei-Beni,  $IXB$ ) [15]:

$$IXB = \frac{\sum_{i=1, c} \sum_{k=1, M} (\mu_{ki})^m \|X_k - V_i\|^2}{M \min_{i \neq j} (\|X_k - V_i\|^2)}, \quad (4)$$

где  $\mu_{ki}$  – элемент матрицы нечеткого разбиения, причем  $\mu_{ki} \in [0, 1]$ ,  $k = \overline{1, M}$ ,  $i = \overline{1, c}$ ;  $X_k$  –  $k$ -й элемент общего множества  $X$ ;  $V_i$  – центры нечетких кластеров;  $m$  – экспоненциальный вес,  $m \in (1, \infty)$ .

Разбиению на компактные и отделимые кластеры соответствует критерий  $IXB < 1$ . В качестве входных переменных ( $x$ ) модели используются три показателя, описывающих стратегии зрительного поиска операторов (DT, SE и ET), которые представлены в работе [14]. Четвертый показатель HR описывает психофизиологическое напряжение оператора и базируется на анали-

зе частоты сердечных сокращений. Выходом модели ( $y$ ) является частота обнаружения запрещенных предметов. Таким образом, ставится задача идентифицировать нелинейную зависимость между показателями глазодвигательной деятельности оператора, его психофизиологической напряженностью и частотой обнаружения запрещенных предметов.

### Генерация нечетких моделей оценки компетентности операторов досмотра

Для разработки нечеткой модели были проведены экспериментальные исследования на базе ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева». В качестве средств съема показателей деятельности операторов использовался ай-трекер Eye Tracking Glasses 2.0 и устройства психофизиологического тестирования УПФТ-1/30 «Психофизиолог». В тестировании приняло участие 35 курсантов, из них 30 вошли в обучающую выборку и 5 в тестовую.

Для оценки качества исходных данных проведено робастное оценивание, которое представлено в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1

Робастное оценивание  
Robust evaluation

	Trimmed mean, 5,000 %	Winsorized mean, 5,000 %	Grubbs Test Statistic	p-value	Std. Dev.
<i>DT</i>	2,989	2,985	2,208	0,795	0,445
<i>SE</i>	0,100	0,106	2,072	1,000	0,094
<i>ET</i>	2,258	2,294	2,603	0,219	0,695
<i>HR</i>	0,958	0,955	3,037	0,038	0,049

Критерии Граббса для максимальных значений показателей *DT*, *SE*, *ET* и *HR* имеют уровень значимости 0,7952; 1; 0,2199; 0,03858 соответственно, что больше выбранного уровня значимости  $\alpha = 0,01$ . Рассчитанные критерии Граббса не превышают критического значения, равного 3,33 при  $\alpha = 0,01$ . Таким образом, максимальные значения не являются выбросами. Значения показателей точности выборочных характеристик равны:  $Ar_{DT} = 2,5234\%$ ,  $Ar_{SE} = 14,9901\%$ ,  $Ar_{ET} = 5,1421\%$ ,  $Ar_{HR} = 0,8634\%$ . Значение  $Ar$  для *DT* и *HR* находится ниже заданных критериев, что говорит о достаточной точности данных характеристик. Для остальных интегральных показателей значение  $Ar$  несколько превышает 5 %. Проведенный анализ показал пригодность полученных статистических данных для обучения нечеткой модели.

Для генерации нечетких моделей использовался пакет Fuzzy Logic Toolbox системы Matlab. С помощью функции *genfis2* генерируется модель Сугено с использованием субтрактивной кластеризации. Значение радиусов кластеров равно 0,7. В результате синтезирована нечеткая модель Сугено с тремя правилами:

ЕСЛИ  $DT=in1cluster1$  И  $SE=in2cluster1$  И  $ET=in3cluster1$  И  $HR=in4cluster1$ , ТО  $DP=out1cluster1$ ;  
ЕСЛИ  $DT=in1cluster2$  И  $SE=in2cluster2$  И  $ET=in3cluster2$  И  $HR=in4cluster2$ , ТО  $DP=out1cluster2$ ;  
ЕСЛИ  $DT=in1cluster3$  И  $SE=in2cluster3$  И  $ET=in3cluster3$  И  $HR=in4cluster3$ , ТО  $DP=out1cluster3$ .

Ошибка моделирования на обучающей выборке согласно (2) равна  $trnRMSE_1^1 = 0,0105$ , а на тестовой –  $chkRMSE_1^1 = 0,8313$ . Результаты тестирования модели на обучающей выборке после субтрактивной кластеризации представлены на рис. 1.

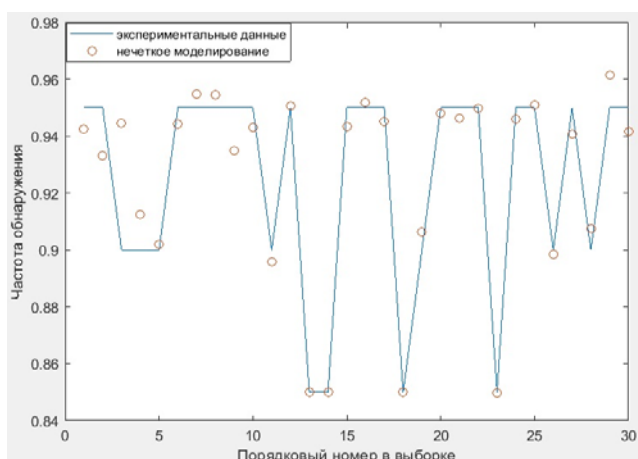


Рис. 1. Тестирование модели Сугено  
Fig. 1. Testing the Sugeno model

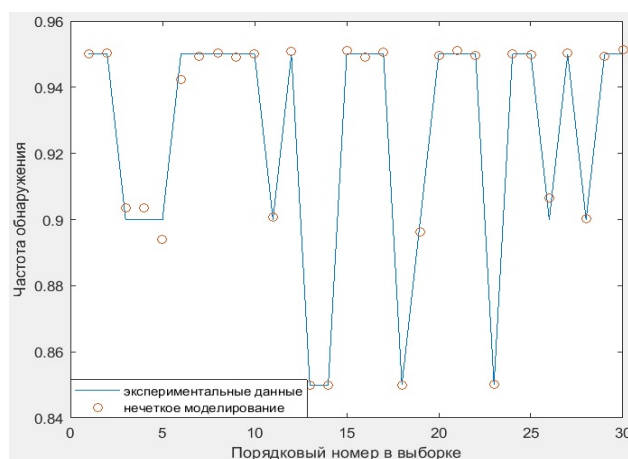


Рис. 2. Тестирование модели Сугено после ANFIS-обучения  
Fig. 2. Testing the Sugeno model after ANFIS-training

После обучения модели на протяжении 200 итераций с использованием ANFIS-алгоритма значение ошибок снизилось до  $trnRMSE_2^1 = 0,0025$  и  $chkRMSE_2^1 = 0,0329$ . Сравнение экспериментальных данных с результатами нечеткого моделирования после ANFIS-обучения представлено на рис. 2.

На рис. 3 представлены кривые обучения модели при использовании ANFIS-алгоритма.

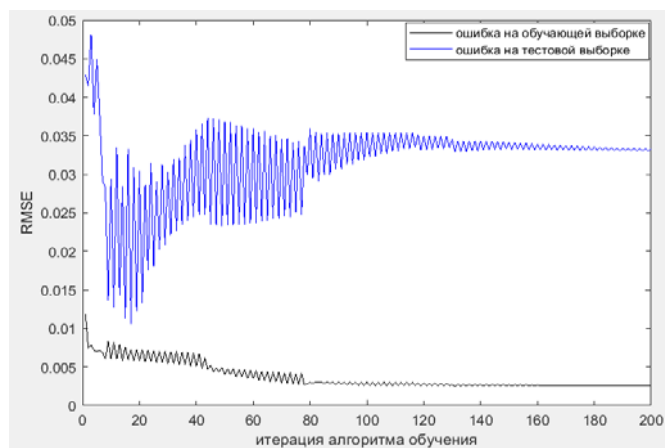


Рис. 3. Динамика обучения модели Сугено  
Fig. 3. Dynamics of learning Sugeno model

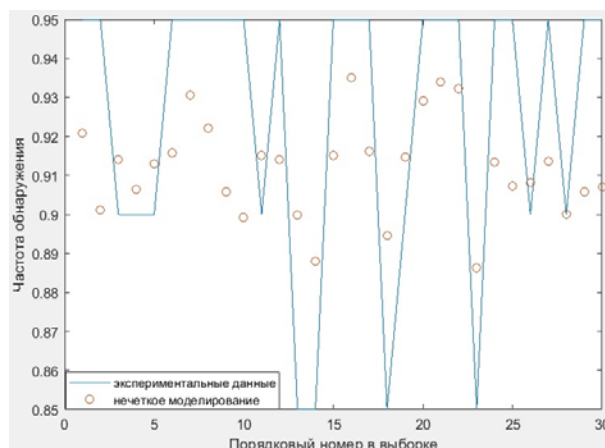


Рис. 4. Тестирование модели Мамдани  
Fig. 4. Testing Mamdani model

Анализ динамики обучения (рис. 3) позволяет сделать вывод, что ошибка на тестовой выборке достигает наименьшего значения на 20-й итерации ( $chkRMSE_{мес}^1 = 0,0106$ ). При этом ошибка на обучающей выборке снижается на протяжении всех 200 итераций.

На рис. 5 и 6 изображены ФП нечетким кластерам для переменной  $HR$  до обучения ANFIS-алгоритмом и после обучения.

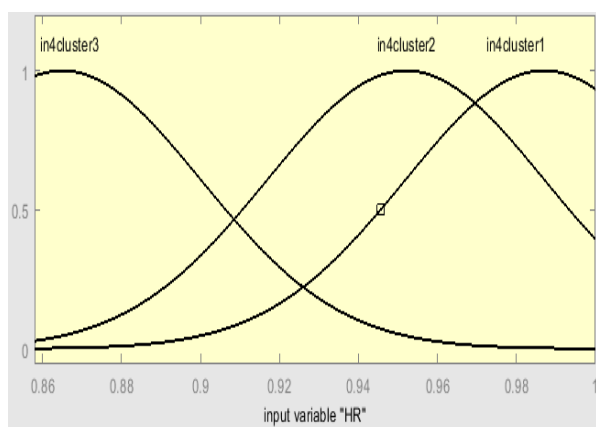


Рис. 5. Функции принадлежности нечетким кластерам переменной HR до обучения

Fig. 5. Membership functions for fuzzy clusters of HR variable before learning

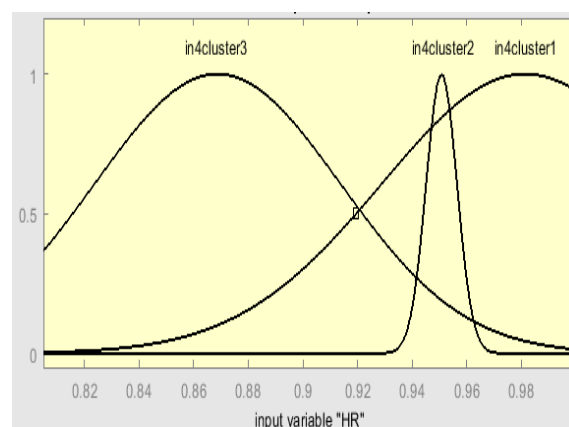


Рис. 6. Функции принадлежности нечетким кластерам переменной HR после ANFIS-обучения

Fig. 6. Membership functions for fuzzy clusters of HR variable after ANFIS learning

Параметры ФП для всех значений переменной *HR* представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Table 2

Параметры функций принадлежности нечетким кластерам  
Parameters of membership functions for fuzzy clusters

Входная переменная	Кластер	до обучения		после ANFIS-обучения	
		<i>b</i>	<i>c</i>	<i>b'</i>	<i>c'</i>
<i>HR</i>	cluster1	0,987	0,035	0,981	0,052
	cluster2	0,952	0,035	0,951	0,005
	cluster3	0,865	0,035	0,868	0,045

В данном случае показатель *b* характеризует координату максимума, а показатель *c* коэффициент концентрации функций принадлежности. Аналогичным образом после применения ANFIS-алгоритма были уточнены как параметры ФП других входных переменных, так и параметры в заключениях правил модели Сугено.

С помощью функции *genfis3* была сгенерирована нечеткая модель Мамдани. Параметры алгоритма нечетких *s*-средних были выбраны следующими: количество кластеров – 3; экспоненциальный вес – 2; значение улучшения целевой функции за одну итерацию – 0,00001; количество итераций – 100. В результате нечеткой кластеризации сгенерирована модель Мамдани, также содержащая базу знаний из трех правил. Ошибка моделирования на обучающей выборке согласно (3) равна  $trnRMSE_3^1 = 0,0323$ , а на тестовой –  $chkRMSE_3^1 = 0,0360$ . Результаты тестирования модели на обучающей выборке представлены на рис. 4. В результате кластеризации получена матрица координат центров нечетких кластеров (и матрица степеней принадлежности объектов кластерам).

На рис. 7 и 8 представлены примеры ФП нечетким кластерам для входной переменной SE и выходной переменной DP.

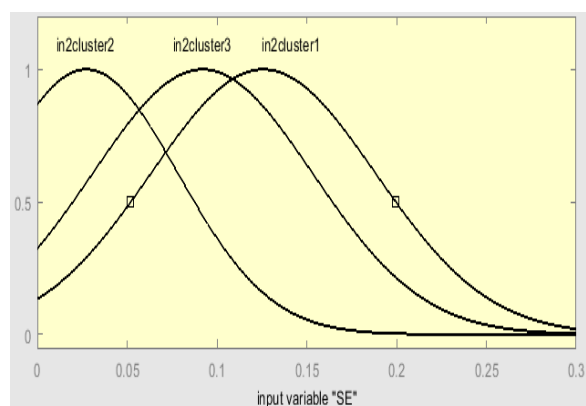


Рис. 7. Функции принадлежности нечетким кластерам переменной SE

Fig. 7. Membership functions for a fuzzy cluster of the variable SE

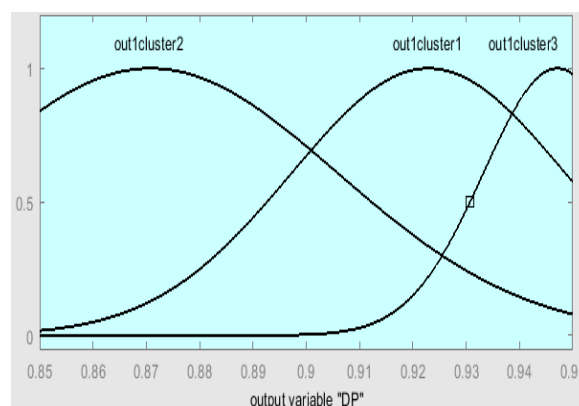


Рис. 8. Функции принадлежности нечетким кластерам переменной DP

Fig. 8. Membership functions for a fuzzy cluster of the variable DP

Следующим этапом исследования являлся регрессионный анализ. Параметры регрессионной модели для исследуемой зависимости представлены в табл. 3.

Таблица 3  
Table 3

Параметры регрессионной модели  
Regression model parameters

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	Значение t-критерия Стьюдента	Уровень значимости (p-value)
Константа	0,554	0,103	5,332	9,102E-06
DT	-0,025	0,007	-2,874	0,007
SE	0,095	0,034	2,873	0,008
ET	-0,005	0,005	-0,920	0,364
HR	0,467	0,084	5,595	4,339E-06
$R^2$	0,83			

Ошибка модели на обучающей выборке равна  $trnRMSE_4^1 = 0,0368$ , а на тестовой –  $chkRMSE_4^1 = 0,0393$ . Оценка правильности выбора количества кластеров проводилась по критерию  $IXB$  и согласно (4) составила 0,6892. Таким образом, был сделан вывод, что получены компактные и отделимые нечеткие кластеры. На последнем этапе сравнивались результаты нечеткой идентификации с моделью линейной регрессии (табл. 4).

Таблица 4  
Table 4

Оценка качества моделей  
Evaluation of the models' quality

Нечеткая модель	$RMSE$ на обучающей выборке	$RMSE$ на тестовой выборке
Сугено (без ANFIS-обучения)	0,0105	0,8313
Сугено (с ANFIS-обучением)	<b>0,0025</b>	<b>0,0329</b>
Мамдани	0,0323	0,0360
Линейная модель регрессии	0,0368	0,0393

Из табл. 4 следует, что модель Сугено, обученная с применением ANFIS-алгоритма, точнее других моделей идентифицирует исследуемую зависимость по оценке компетентности операторов досмотра.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ В СЕТЕВЫХ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ

### Концепция когнитивной метафоры в перестановочном декодировании

Объективной основой интеллектуализации многих перспективных информационных и технологических процессов является совершенствование процедуры управления при их реализации в масштабе реального времени. Последнее обстоятельство требует поиска путей сокращения цикла получения требуемого изображения, внедрения принципов когнитивной адаптации и искусственного интеллекта. Конечно же, использование недвоичных кодов является бесспорным. Тогда становится очевидным, что жесткие требования к длительности цикла представления обучающего видеоряда не позволяют использовать в полной мере для достижения указанной цели ряд положений теории помехоустойчивого кодирования, например, в виде систем турбокодирования с емкой по числу арифметических операций процедурой итеративных преобразований данных или системы, основанной на полярных кодах. Указанные конструкции недостаточно приспособлены для обработки недвоичных сигналов. На этом фоне возникает проблема эффективного применения коротких недвоичных помехоустойчивых кодов для защиты векторных изображений с максимальным использованием введенной в такие коды избыточностью и быстрой идентификацией цифровых данных. Предлагается метод, в котором емкая по времени процедура решения системы линейных уравнений заменяется на шаблон, хранящийся в памяти декодера. Метод основан на возможности создания множества эквивалентных кодов в системе перестановки символов кодовых векторов [17, 18]. Преимуществом перестановочного декодирования (ПД) перед другими методами в контексте когнитивной обработки данных является наличие детерминированной составляющей, которую декодер может вычислять в процессе работы и хранить в когнитивной карте. Данный подход резко снижает сложность реализации процедуры декодирования на программируемых логических интегральных схемах.

### Результаты помехоустойчивого кодирования на базе когнитивной метафоры

Анализ показывает, что целевая функция алгоритма ПД содержит несколько стохастических параметров и единственную детерминированную компоненту. Образ целевой функции можно представить как

$$F\{\bullet\} = \begin{cases} \{V_k\} \oplus e(h); \\ \{P_n\}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\{V_k\}$  – множество случайных векторов, составляющих суть команды управления, а  $e(h)$  – вероятность появления векторов помех длины  $n$  как функция отношения сигнал/шум при  $h = E_b/N_0$ , действующих на элементы множества  $\{V_k\}$ . К детерминированной составляющей целесообразно отнести множество перестановок  $\{P_n\}$ , формирующихся на втором этапе реализации ПД. Принципиально такие перестановки могут быть вычислены заранее (в процессе обучения декодера), и результаты вычисления матриц вида могут быть зафиксированы в памяти декодера, по сути в его когнитивной карте. В этом случае сложный в реализационном отношении второй этап алгоритма ПД однозначно теряет свое негативное значение в реализации процедуры ПД.



Пусть в системе обмена данными используется недвоичный код РС с параметрами (7,3,5). Порождающая матрица  $G$  этого кода в систематической форме имеет вид

$$G = \begin{pmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

а столбцы матрицы нумеруются обычным образом слева направо. Здесь и далее  $\alpha$  – примитивный элемент поля  $GF(2^3)$ . Предположим, что надежными символами в некотором принятом кодовом векторе кода РС будут символы с номерами (2 4 5), а менее надежные символы в порядке убывания значений располагаются в последовательности вида (6 7 1 3). Тогда из выражения (6) следует

$$G' = \begin{pmatrix} 0 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 0 \\ \alpha^0 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^6 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & 0 & \alpha^0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В систематической форме матрица (7) принимает вид

$$G'_{sis} = \begin{pmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Заметим, что для вычисления матрицы (8) при реализации известного алгоритма ПД пришлось выполнить 336 арифметических операций в поле  $GF(2^3)$ .

В ходе оперативной обработки данных сочетание надежных символов кодовой комбинации вида (2 4 5) даже в одном сеансе связи с высокой долей вероятности может повторяться. Поэтому в целях экономии вычислительного ресурса декодера целесообразно сохранить этот результат в памяти процессора и использовать эти данные при возможных повторениях перестановок с номерами (2 4 5). Проверочная часть матрицы, полученная из выражения (8) и представленная на рис. 9, со строго возрастающей последовательностью номеров строк называется канонической, и сама матрица является эталонной.

$$\begin{matrix} \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & 2 \\ \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 & 4 \\ \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 \\ 6 & 7 & 1 & 3 \end{matrix}$$

**Рис. 9.** Структура эталонной матрицы в каноническом виде по системе надежных символов  
**Fig. 9.** The structure of the reference matrix in canonical form on the system of reliable symbols

В ходе исследований установлено, что при сохранении номеров позиций в перестановках  $k$  надежных и  $(n - k)$  ненадежных символов следует на первом шаге переставлять строки эта-

лонной матрицы, а на втором шаге – столбцы этой новой матрицы. Следуя принципам когнитивной обработки данных, декодер, получив, например, кортеж значений надежных символов в виде (5 2 4) для первых  $k$  надежных символов принятой комбинации и оставшихся  $(n - k)$  менее надежных символов в виде (3 7 1 6), формирует матрицу  $G'$ , исходя из структуры эталонной матрицы, как показано ниже:

$$G'_{sis} = \begin{vmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^3 \end{vmatrix}.$$

Для этого выполняются три действия с перестановкой строк, например, вторая строка из эталонной матрицы с первой позиции устанавливается на вторую позицию в соответствии с перестановкой (5 2 4) и т. п. И затем выполняются четыре перестановки столбцов вновь образованной матрицы с соответствующей конфигурацией ненадежных символов (3 7 1 6). Всего семь действий копирования и переноса данных вместо 336 арифметических операций. Проверка полученного результата (и многих других) с применением классической методики показала справедливость предложенной модели ПД.

$$\begin{matrix} \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & 2 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 \\ \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 & 4 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & 2 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^6 & 2 \\ \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 & \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 & 4 & \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^3 & 4 \\ 6 & 7 & 1 & 3 & & 6 & 7 & 1 & 3 & & 3 & 7 & 1 & 6 \end{matrix} \Rightarrow$$

Становится очевидным, что для поиска эталонной матрицы декодер не выполняет арифметических операций в полях Галуа, а реализует тривиальную процедуру копирования и адресного переноса данных. В последнем случае число таких операций всегда будет равно длине кодового вектора  $n$ .

Таблица 5  
Table 5

Оценка выигрыша по числу операций  
Estimation of winning by the number of operations

Код Рида – Соломона	Классический метод	Предложенный метод
Код PC (7,3,5)	336	7
Код PC (15,5,11)	$2,4 \cdot 10^3$	15
Код PC (15,9,7)	$2,9 \cdot 10^6$	15
Код PC (15,13,3)	$6,8 \cdot 10^{10}$	15

Преимущества предлагаемого метода очевидны, особенно для кодов с различной корректирующей способностью при фиксированной длине кодового вектора. Впервые разработана модель декодера избыточного кода, использующая методы когнитивной обработки данных при реализации процедуры перестановочного декодирования для эффективной защиты команд дистанционного управления от влияния деструктивных факторов на процесс управления. Математически обоснован аппарат быстрых матричных преобразований эталонных матриц и доказаны

циклические свойства таких матриц, позволившие за счет некоторого увеличения вычислительной нагрузки на процессор декодера снизить объем его когнитивной карты до приемлемых размеров. Современная элементная база позволяет реализовать алгоритмы ПД. Повышение скорости получения конечного результата позволяет говорить о целесообразности использования алгоритмов ПД для систем реального времени, и в частности для построения тренажерных средств для специалистов системы авиационной безопасности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа зарубежного опыта был сделан вывод, что важным направлением повышения эффективности обеспечения авиационной безопасности в Российской Федерации является применение современных сетевых тренажерных комплексов. Разработан новый подход к поддержке принятия решений по оценке уровня компетентности операторов досмотра, заключающейся в применении аппаратурных методов диагностики психофизиологического состояния обучающихся с последующим автоматическим проектированием нечетких моделей из экспериментальных данных. В работе описаны пути решения важной задачи повышения достоверности и надежности передачи данных в сетевых тренажерных комплексах на основе применения помехоустойчивого кодирования. Представлены результаты моделирования перестановочного декодера недвоичного избыточного кода на базе когнитивной карты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hofer F., Schwaninger A.** Using threat image projection data for assessing individual screener performance // *Safety and Security Engineering*. 2005. Vol. 82. Pp. 417–426. DOI: 10.2495/SAFE050411
2. **Atkins M.** What do surgeons see: capturing and synchronizing eye gaze for surgery applications / M. Atkins, G. Tien, R. Khan, A. Meneghetti, B. Zheng // *Surgical Innovation*. 2013. Vol. 20, no. 3. Pp. 241–248. DOI: 10.1177/1553350612449075
3. **Bond R.R.** Assessing computerized eye tracking technology for gaining insight into expert interpretation of the 12-lead electrocardiogram: an objective quantitative approach / R.R. Bond, T. Zhu, D.D. Finlay, B. Drew, P.D. Kligfield, D. Guldenring, C. Breen, A.G. Gallagher, M.J. Daly, G.D. Clifford // *J. Electrocardiol.* 2014. Vol. 47, no. 6. Pp. 895–906. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2014.07.011
4. **Menshikova G.Ya.** Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique / G.Ya. Menshikova A.I. Kovalev, O.A. Klimova, A.M. Chernorizov, S.V. Leonov // *Procedia, social and behavioral sciences*. 2014. Vol. 146. Pp. 252–258. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.08.123
5. **Hancock D.J., Ste-Marie D.M.** Gaze behaviors and decision making accuracy of higher- and lower-level referees // *Psychology of Sport and Exercise*. 2013. Vol. 14 (1). Pp. 66-71. DOI: 10.1016/j.psychsport.2012.08.002
6. **Vrzakova H., Bednarik R.** Hard lessons learned: mobile eye-tracking in cockpits // *Proceedings of 4-th Workshop on eye gaze in intelligent human machine interaction*. 2012. Vol. 7. Pp. 130–136. DOI: 10.1145/2401836.2401843
7. **Weibel N.** Let's look at the cockpit: exploring mobile eye-tracking for observational research on the flight deck / N. Weibel, A. Fouse, C. Emmenegger, S. Kimmich, E. Hutchins // *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. 2012. Pp. 107–114. DOI: 10.1145/2168556.2168573

8. **Hofer F.** Reliable and valid measures of threat detection performance in X-ray screening // IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. 2004. Vol. 38. Pp. 303–308. DOI: 10.1109/CCST.2004.1405409
9. **Schwaninger A.** Reacting to the terror threat. Analyzing, controlling and adapting to the meet new threats // Airport. 2006. Vol. 5. Pp. 30–31.
10. **Schwaninger A.** Increasing efficiency in airport security screening // Safety and Security Engineering. 2005. Vol. 82. Pp. 407–416. DOI: 10.2495/SAFE050401
11. **Visser W.** Automated comparison of x-ray images for cargo scanning / W. Visser, A. Schwaninger, D. Hardmeir, A. Flisch, M. Costin, C. Viene, F. Sukowski, U. Hassler U., I. Dorion, A. Marciano, G. Koomen, M. Slegt, C.A. Cesare // IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. 2016. Vol. 50. Pp. 268–276. DOI: 10.1109/CCST.2016.7815714
12. **Kolokytha S.** Creating a reference database for cargo inspection X-ray images using high energy CT of cargo mock-ups / S. Kolokytha, A. Flisch, T. Lüthi, M. Plamondon, S. Hartmann, W. Vasser, A. Schwaninger, D. Hardmeier, M. Costin, C. Vienne, F. Sukowski, U. Hassler, I. Dorion, A. Canonica, E. Rochat, G. Koomen, M. Slegt // IEEE Instrumentation and measurement society. 2016. Pp. 249–254. DOI: 10.1109 / IST.2016.7738232
13. **Kolokytha S.** Improving customs' border control by creating a references database of cargo inspection X-ray images / S. Kolokytha, A. Flisch, T. Lüthi, M. Plamondon, A. Schwaninger, W. Vasser, D. Hardmeier, M. Costin, C. Vienne, F. Sukowski, U. Hassler, I. Dorion, N. Gadi, S. Maitrejean, A. Marciano, A. Canonica, E. Rochat, G. Koomen, M. Slegt // Technology and Engineering Systems Journal. 2017. Vol. 2, iss 3. Pp. 60–66. DOI: 10.25046/aj020309
14. **Волков А.К.** Исследование и диагностика стратегий зрительного поиска операторов досмотра с применением технологии Eye-tracking в целях создания интеллектуальных тренажерных комплексов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 25. С. 75–86.
15. **Штовба С.Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия, Телеком, 2007. 288 с.
16. **Yager R., Filev D.** Essentials of Fuzzy Modeling and Control. New York: John Wiley & Sons. 1984, 387 p.
17. **Гладких А.А.** Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными // Электросвязь. 2017. № 8. С. 52–56.
18. **Гладких А.А., Ал Тамими Т.Ф.Х.** Система быстрых матричных преобразований в процедуре формирования эквивалентных избыточных кодов // Радиотехника. 2017. № 6. С. 41–44.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гладких Анатолий Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева», a\_gladkikh@mail.ru.

**Большедворская Людмила Геннадьевна**, доктор технических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», l.bolshedvorskaya@mstuca.aero.

**Волков Андрей Константинович**, аспирант, ассистент ФГБОУ ВО «Ульяновский института гражданской авиации», oabuvauga@mail.ru.

**Волков Александр Константинович**, кандидат технических наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «Ульяновский института гражданской авиации», oabuvauga@mail.ru.

## THE DEVELOPMENT OF ADVANCED NETWORK SIMULATORS FOR AIR TRANSPORT BY USING FUZZY MODELS AND NOISE-RESISTANT CODING

Anatoliy A. Gladkih<sup>1</sup>, Lyudmila G. Bolshedvorskaya<sup>2</sup>,  
Andrei K. Volkov<sup>1</sup>, Alexander K. Volkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia

<sup>2</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

### ABSTRACT

The article analyzes foreign experience and concludes that one of the ways to improve the efficiency of aviation security in the Russian Federation is to use modern network training complexes. A new approach to the assessment of the competence of the aviation security screeners was proposed and tested, that allows to take into account the parameters of the oculomotor activity and heart rate variability of the aviation security screeners being tested, different from the existing approaches using fuzzy classification models. The eye-tracking technology and the device of psychophysiological testing UPFT-1/30 "Psychophysiologicalist" were used as instruments of psychophysiological monitoring. The basics of automatic generation of fuzzy models such as Sugeno and Mamdani from experimental data are presented. Experimental studies were conducted on the basis of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute. The results of the comparison of the generated models showed that the Sugeno model trained with the use of ANFIS-algorithm is more accurate than the Mamdani model and the linear regression model identifies the dependence being studied, according to the competence of aviation security screeners. As a criterion of quality of models on training and test data the average square error is used. The actual problem of choosing an effective concept of noise-resistant coding in the telecommunication component of advanced training complexes is substantiated. The ways of solving the important problem of increasing the reliability of actual digital data in network training complexes based on the use of noise-resistant coding are described. A model of permutation decoder of non-binary redundant code based on lexicographic cognitive map is presented. This model of redundant code decoder uses methods of cognitive data processing in the implementation of the procedure of permutation decoding to effectively protect remote control commands from the influence of destructive factors on the control process.

**Key words:** aviation security screener, simulator training, Eye-tracking technology, fuzzy models, ANFIS-algorithm, subtractive clustering, network technologies, noise-resistant coding.

### REFERENCES

1. Hofer, F. and Schwaninger A. (2005). *Using threat image projection data for assessing individual screener performance*. Safety and Security Engineering, vol. 82, pp. 417–426. DOI: 10.2495/SAFE050411
2. Atkins, M., Tien, G., Khan, R., Meneghetti, A. and Zheng, B. (2013). *What do surgeons see: capturing and synchronizing eye gaze for surgery applications*. Surgical Innovation, vol. 20, no. 3, pp. 241–248. DOI: 10.1177/1553350612449075
3. Bond, R.R., Zhu, T., Finlay, D.D., Drew, B., Kligfield, P.D., Guldenring, D., Breen, C., Gallagher, A.G., Daly, M.J. and Clifford, G.D. (2014). *Assessing computerized eye tracking technology for gaining insight into expert interpretation of the 12-lead electrocardiogram: an objective quantitative approach*. J. Electrocardiol, vol. 47, no. 6, pp. 895–906. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2014.07.011
4. Menshikova, G.Ya., Kovalev, A.I., Klimova, O.A., Chernorizov, A.M. and Leonov, S.V. (2014). *Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique*. Procedia, social and behavioral sciences, vol. 146, pp. 252–258. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.08.123
5. Hancock, D.J. and Ste-Marie, D.M. (2013). *Gaze behaviors and decision making accuracy of higher- and lower-level referees*. Psychology of Sport and Exercise, vol. 14 (1), pp. 66–71. DOI: 10.1016/j.psychsport.2012.08.002

6. **Vrzakova, H. and Bednarik, R.** (2012). *Hard lessons learned: mobile eye-tracking in cockpits*. Proceedings of 4-th Workshop on eye gaze in intelligent human machine interaction, vol. 7, pp. 130–136. DOI: 10.1145/2401836.2401843
7. **Weibel, N., Fouse, A., Emmenegger, C., Kimmich, S. and Hutchins, E.** (2012). *Let's look at the cockpit: exploring mobile eye-tracking for observational research on the flight deck*. Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications, pp. 107–114. DOI: 10.1145/2168556.2168573
8. **Hofer, F.** (2004). *Reliable and valid measures of threat detection performance in X-ray screening*. IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings, vol. 38, pp. 303–308. DOI: 10.1109/CCST.2004.1405409
9. **Schwaninger, A.** (2006). *Reacting to the terror threat. Analyzing, controlling and adapting to the meet new threats*. Airport, vol. 5, pp. 30–31.
10. **Schwaninger, A.** (2005). *Increasing efficiency in airport security screening*. Safety and Security Engineering, vol. 82, pp. 407–416. DOI: 10.2495/SAFE050401
11. **Visser, W., Schwaninger, A., Hardmeir, D., Flisch, A., Costin, M., Viene, C., Sukowski, F., Hassler, U., Dorion, I., Marciano, A., Koomen, G., Slegt, M. and Cesare C.A.** (2016). *Automated comparison of x-ray images for cargo scanning*. IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. vol. 50, pp. 268–276. DOI: 10.1109/CCST.2016.7815714
12. **Kolokytha, S., Flisch, A., Lüthi, T., Plamondon, M., Hartmann, S., Vasser, W., Schwaninger, A., Hardmeier, D., Costin, M., Vienne, C., Sukowski, F., Hassler, U., Dorion, I., Canonica, A., Rochat, E., Koomen, G. and Slegt, M.** (2016). *Creating a reference database for cargo inspection X-ray images using high energy CT of cargo mock-ups*. IEEE Instrumentation and measurement society, pp. 249–254. DOI: 10.1109 / IST.2016.7738232
13. **Kolokytha, S., Flisch, A., Lüthi, T., Plamondon, M., Schwaninger, A., Vasser, W., Hardmeier, D., Costin, M., Vienne, C., Sukowski, F., Hassler, U., Dorion, I., Gadi, N., Maitrejean, S., Marciano, A., Canonica, A., Rochat, E., Koomen, G. and Slegt, M.** (2017). *Improving customs' border control by creating a references database of cargo inspection X-ray images*. Technology and Engineering Systems Journal, vol. 2, no. 3, pp. 60–66. DOI: 10.25046/aj020309
14. **Volkov, An.K.** (2019). *The research and diagnostics of aviation security screeners' visual search strategies by using Eye-tracking technology in order to develop intellectual training complexes*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation, GosNII GA, no. 25, pp. 75–86. (in Russian)
15. **Shtovba, S.D.** (2007). *Proyektirovaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [Design of fuzzy systems by means of MATLAB]*. Moscow: Hot line, Telecom, 288 p. (in Russian)
16. **Yager, R. and Filev, D.** *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. New York: John Wiley & Sons, 1984, 387 p.
17. **Gladkikh, A.A.** (2017). *Permutation decoding as a tool to improve the energy efficiency of data exchange systems*. Telecommunication, no. 8, pp. 52–56. (in Russian)
18. **Gladkikh, A.A and al Tamimi, T. F. H.** (2017). *The system of fast matrix transformations in the procedure of the equivalent redundant codes formation*. Radio technology, no. 6, pp. 41–44. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anatoliy A. Gladkikh**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute, a\_gladkikh@mail.ru.

**Lyudmila G. Bolshedvorskaya**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, l.bolshedvorskaya@mstuca.aero.

**Andrei K. Volkov**, Postgraduate Student of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute, oabuvauga@mail.ru.

**Alexander K. Volkov**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute, oabuvauga@mail.ru.

Поступила в редакцию 04.06.2019  
Принята в печать 14.11.2019

Received 04.06.2019  
Accepted for publication 14.11.2019