

УДК 004.891

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-34-40

## Вывод обобщенного мнения и оценка проведенной экспертизы по методу анализа иерархий на основе согласованности матриц парных сравнений на примере системы когнитивного радио

Г. А. Благодатский, доктор технических наук, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. С. Батури́н, аспирант, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Р. И. Мухамеджанов, студент, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе проведен анализ согласованности матриц парных сравнений для узлов иерархии в различных режимах передачи данных системы когнитивного радио (СКР). Во введении рассмотрена процедура МАИ (Т. Саати) и его связь с методом решающих матриц (Г. Поспелова). Для характеристики объекта (СКР) приведены его режимы работы (передачи информации) (аналоговая и цифровая речь и данные). Рассмотрена процедура взвешивания мнений экспертов на основе опыта работы (по Е. Живицкой), оценка компетентности экспертной группы. Приведена процедура определения согласованности матриц парных сравнений и вывода обобщенного мнения экспертов на его основе. Даны результаты оценки отклонения ОС от идеальной в матрицах парных сравнений узлов иерархий рассматриваемых режимов работы СКР. Выявлено, что хорошо согласованны матрицы узлов «Вычислительная нагрузка» и «Минимизация расхода вычислительных ресурсов», «Воздействие помех», «Воздействие природно-географических факторов», «Оптимальная передача информации», «Снижение вычислительной нагрузки», «Снижение ошибок при передаче», «Снижение потребляемой энергии», «Увеличение скорости» в «Режим 1» при цифровой передаче информации. Матрицы парных сравнений в узлах иерархии «Минимизация расхода энергии» в «Режим 4», речи «Режим 2» и «Режим 3», «Режим 4 повторно» и аналоговой передачи информации «Режим 6», «Максимизация скорости передачи данных» при оценке важности воздействия управляющих параметров в цифровом режиме передачи данных «Режим 3» обладают низкой согласованностью. Слабая согласованность в оценках влияния параметров в определенном режиме подчеркивает необходимость дополнительного анализа и внимания экспертов в этой области иерархической структуры.

**Ключевые слова:** МАИ, согласованность, компетентность, обобщение, экспертиза, когнитивное радио.

### Введение

Процесс проведения сложной экспертизы всегда труден. В работах [1–10] приведены примеры использования метода анализа иерархий при решении сложных прикладных задач. Для его математического сопровождения разработан метод анализа иерархий (МАИ, англ. AHP) [11, 12]. Данный метод является разновидностью метода решающих матриц [13]. Модель, составленная с помощью метода анализа иерархий, иерархическая, поэтому для подготовки принятия решения можно привлечь несколько ( $M$ ) экспертов (состав экспертов может быть не ограничен), компетентных по рассматриваемым проблемам (задачам). Метод

также позволяет привлекать группу экспертов для составления матриц парных сравнений, что повышает репрезентативность выборки и улучшает результаты экспертизы. Рассмотрим вывод обобщенного мнения и оценку согласованности суждений на примере системы когнитивного радио [14].

Цель исследования – определение областей низкой согласованности в иерархиях системы когнитивного радио.

### Система когнитивного радио и ее режимы работы

Система оценивалась в аналоговых и цифровых режимах передачи информации (речевых сообщений и данных) (табл. 1–3).

Таблица 1. Аналоговые режимы передачи информации

Table 1. Information transfer analogue modes

№	Мощность	Регламент	Тип СКК (вид модуляции)	Частота	Полоса
1	1 Вт, 10Вт, 100Вт	Временной симплекс	A1A – амплитудный телеграф	3...30 МГц, ВЧ (HF)	1 кГц
2	1 Вт, 10Вт, 100Вт	Временной симплекс	J3E – Однополосная амплитудная телефония с подавленной несущей, (до -40 дБ)	3...30 МГц, ВЧ (HF)	3,1 кГц
3	1Вт, 3Вт, 10Вт	Временной симплекс	F3E – Частотная телефония	30...300 МГц, ОВЧ (VHF)	12,5 кГц
4	1Вт, 3Вт, 10Вт	Временной симплекс	F3E – Частотная телефония	300...3000 МГц, УВЧ (UHF)	12,5 кГц
5	1Вт, 3Вт, 10Вт	Временной симплекс	A3E – двухполосная амплитудная телефония	30...300 МГц, ОВЧ (VHF)	12,5 кГц
6	1Вт, 3Вт, 10Вт	Временной симплекс	A3E – двухполосная амплитудная телефония	300...3000 МГц, УВЧ (UHF)	12,5 кГц

Таблица 2. Цифровые режимы передачи данных

Table 2. Digital data transfer modes

№	Мощность	Скорость	Тип СКК (вид модуляции)	Частота	Полоса
1	1 Вт, 10 Вт, 100Вт	75, 100, 200	SSB, ЧВС, ППРЧ	3...30 МГц, ВЧ (HF)	3,1кГц, 20 кГц
2	1 Вт, 10 Вт, 100 Вт	200, 400, 800, 1200, 2400, 4800	OFDM, ЧВС, SSB, ЧТ, ППРЧ, ППРЧ-2У	3...30 МГц, ВЧ (HF)	3,1кГц, 20 кГц, 3,1кГц, 3,1кГц
3	1Вт, 3 Вт, 10 Вт	2,4 кбит/с, 9,6 кбит/с, 19,6	4FSK, QPSK, QPSK, МЧС ГФ, ППРЧ-2У	30...300 МГц, ОВЧ (VHF)	6,25/12,5 кГц, 6,25/12,5 кГц, 25/50/100/150 кГц
4	1Вт, 3 Вт, 10 Вт	2,4 кбит/с, 9,6 кбит/с, 512 кбит/с, 1 Мбит/с, 2 Мбит/с	4FSK, QPSK, QPSK, МЧС ГФ, OFDM	300...3000 МГц, УВЧ (UHF)	6,25/12,5 кГц, 6,25/12,5 кГц, 12,5/25/50/100/150 кГц

Таблица 3. Цифровые режимы передачи речи

Table 3. Digital speech transfer modes

№	Мощность	Скорость	Тип СКК (вид модуляции)	Частота	Полоса
1	1 Вт, 10 Вт, 100 Вт	2400, 1200, 800	OFDM (SSB), QPSK	3...30 МГц, ВЧ (HF)	3,1 кГц, 3,1 кГц
2	1 Вт, 3Вт, 10 Вт	2400, 1200, 800	4FSK, QPSK, QPSK	30...300 МГц, ОВЧ (VHF)	6,25/12,5 кГц, 6,25/12,5 кГц, 25/50/100/150 кГц
3	1 Вт, 3 Вт, 10 Вт	2400, 1200, 800	4FSK, QPSK, QPSK	300...3000 МГц, УВЧ (UHF)	6,25/12,5 кГц, 6,25/12,5 кГц, 25/50/100/150 кГц 12,5кГц

### Методы исследования

В работе применялись: метод взвешивания экспертных оценок, метод решающих матриц, метод парных сравнений, степенной метод нахождения собственного вектора, метод анализа иерархий, вычислительный эксперимент. Для формирования оценочных матриц привлечены эксперты с опытом

работы в радиотехнической области не менее 10 лет (табл. 4).

Эксперты в полной мере владеют принципами построения современных средств и систем связи, принимают участие в разработке программно-аппаратных платформ средств связи, алгоритмов ведения связи в различных условиях.

Таблица 4. Состав экспертной группы

Table 4. Experts

№	Эксперт	Должность	Стаж работы в отрасли, год
1	Эксперт 1	Заместитель главного конструктора по НИОКР	14
2	Эксперт 2	Главный специалист по программированию, руководитель группы	20
3	Эксперт 3	Главный конструктор	20
4	Эксперт 4	Главный специалист по радиотехнике, канд. техн. наук	13
5	Эксперт 5	Ведущий инженер-программист	14
6	Эксперт 6	Директор филиала, д-р техн. наук	20

Компетентность экспертов зависит от множества факторов: например, занимаемой должности, ученой степени, ученого звания, опыта практической работы, числа научных трудов, знания достижений науки

и техники, понимания проблем и перспектив развития техники и технологий. Принимая во внимание занимаемую должность и ученую степень, введем матрицу оценок компетентности экспертов (табл. 5).

Таблица 5. Оценка опыта и квалификации эксперта

Table 5. Expert's qualifications

№	Занимаемая должность / квалификация	(R <sub>j</sub> )		
		Специалист без степени	Кандидат наук	Доктор наук
1	Ведущий инженер	1	1,5	3
2	Зав. лабораторией, сектора	2	3	4
3	Зав. отдела, заместитель	2,5	3,75	5
4	Главный конструктор	3	4,5	6
5	Директор, заместитель	4	6	8

Введем оценку компетентности экспертов [15]

$$R'_j = R_j + \frac{0,1R_u + R_a}{2}, \quad (1)$$

где  $R_u$  и  $R_a$  – коэффициенты информированности и аргументированности эксперта по решаемой проблеме.

Для эксперта определяется относительный коэффициент компетентности:

$$\rho_j = \frac{R'_j}{\sum R'_j}, \quad (2)$$

где  $j = \overline{1, m}$ ,  $m$  – количество экспертов.

Таблица 6. Аргументация оценок

Table 6. Argumentation

№	Источники аргументаций	Степень влияния источника на ваше мнение		
		высокая	средняя	низкая
1	Проведенный вами теоретический анализ	0,3	0,2	0,1
2	Ваш производственный опыт	0,5	0,4	0,2
3	Обобщение работ зарубежных авторов	0,2	0,1	0,05
4	Ваше личное знакомство с состоянием дел за рубежом	0,1	0,05	0,01
5	Ваша интуиция	0,1	0,05	0,01

Таблица 7. Уровень компетентности экспертов

Table 7. Expert's qualification level

№	Эксперт	$R_u$	$R_a$	$R'_j$	$\rho_j$
1	Эксперт 1	7/9	0,3+0,4+0,05+0,1+0,1	3,01	0,13
2	Эксперт 2	4/6	0,1+0,5+0,1+0,05+0,1	2,46	0,11
3	Эксперт 3	7/9	0,3+0,5+0,2+0,1+0,1	3,64	0,16
4	Эксперт 4	1/3	0,2+0,2+0,2+0,1+0,05	3,39	0,15
5	Эксперт 5	1/3	0,1+0,5+0,05+0,05	1,37	0,06
6	Эксперт 6	1	0,3+0,5+0,2+0,1+0,1	8,65	0,38

Процедура определения согласованности матрицы парных сравнений

Пусть обозначается через  $a_{ij}$  число, соответствующее значимости элемента  $C_i$  по сравнению с  $C_j$ . Матрица, состоящая из этих чисел, обозначится через  $A$ , т. е.

$$A = (a_{ij}). \quad (3)$$

Матрица  $A$  – обратно-симметричная, т. е.  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ . Если суждение  $a_{ik} = a_{ij}/a_{jk}$  истинно для всех  $i, j, k$ , то матрицу  $A$  называют *абсолютно согласованной* (отношение согласованности равно нулю):

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = n w_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Что эквивалентно

$$A w = n w. \quad (5)$$

В теории матриц эта формула отражает то, что  $w$  – собственный вектор матрицы  $A$  с собственным значением  $n$ . Уравнение (5), расписанное поэлементно, выглядит следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} w_1 & w_1 & \dots & w_1 \\ w_1 & w_2 & \dots & w_n \\ w_2 & w_2 & \dots & w_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n & w_n & \dots & w_n \\ w_1 & w_2 & \dots & w_n \end{pmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_1 \\ w_1 \\ \dots \\ w_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \\ w_n \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Коэффициент  $R_u$  определяется на основе самооценки эксперта по решаемой проблеме: 0 – эксперт совсем не знает проблемы; 1/3 – эксперт поверхностно знаком с проблемой, но она ходит вокруг его интересов; 4/6 – эксперт знаком с проблемой, но не принимает непосредственного участия в ее решении; 7/9 – эксперт знаком с проблемой и принимает непосредственное участие в ее решении; 1 – эксперт отлично знает проблему.

$R_a$  определяется: в результате суммирования баллов по отметкам эксперта в табл. 6, 7.

Для примера рассматривается конкретный случай, в котором  $a_{ij}$  основаны не на точных измерениях, а на субъективных суждениях. В данном случае  $a_{ij}$  будет отклоняться от «идеальных» отношений  $w_i/w_j$ , и поэтому уравнение (6) более не будет иметь места.

Используем итеративную процедуру [16] нахождения собственного вектора  $\omega'_1$  матрицы парных сравнений  $A_{I_1}$  и наибольшего собственного числа

$\lambda_{\max}$

$$A_{I_1} \omega'_1 = \lambda_{\max I_1} \omega'_1. \quad (7)$$

Пусть  $y^{(0)} = \{1, \dots, 1\}$  – вектор размерности  $n_{I_1}$ .

По процессу  $y^{(k)} = A_{I_1} y^{(k-1)} = A_{I_1}^{k-1} y^{(0)}$  до

$$\varepsilon^{(k)} = \left| \frac{y_j^{(k)}}{y_j^{(k-1)}} - \frac{y_j^{(k-1)}}{y_j^{(k-2)}} \right| \leq \varepsilon, \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – точность.

$$\lambda_{\max I_1} = \frac{y_j^{(k)}}{y_j^{(k-1)}}. \quad (9)$$

$y^{(k)}$  и  $\lambda_{\max}$  ответ в  $A_{I_1} \omega'_1 = \lambda_{\max I_1} \omega'_1$ .

Нормируем вектора  $\omega'_{I_1}$ , по сумме координат

$$\omega_{I_1} = \left\{ \frac{\omega'_{I_1 i}}{\sum_{j=1}^{n_{I_1}} \omega'_{I_1 j}} \right\}, i = \overline{1, n_{I_1}}, \quad (10)$$

где  $\omega'_{I_1}$  – вектор весов влияния  $I_1 \rightarrow I_0$  сил, расположенных на уровне  $I_1$  на цель системы  $I_0$ .

В качестве меры согласованности суждений в МАИ вводится отношение согласованности (ОС). ОС – это отношение индекса согласованности (ИС) матрицы парных сравнений для  $j$ -го узла иерархии  $A_{I_j}$  к случайному индексу (СИ, СИ – это ИС для квадратной матрицы размерности  $n \times n$ , заполненной случайными числами).

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max}}{n-1}. \quad (11)$$

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СИ}}. \quad (12)$$

ОС  $\leq 0,1$  считается допустимым для согласованности матрицы парных сравнений.

Рассмотрим в качестве характеристики согласованности проведенных экспертиз среднее отклонение ОС от 1.

Таблица 8. Общее количество экспертиз узла иерархии во всех режимах работы системы

Table 8. Node's examination numbers

№	Узел иерархии	Количество экспертиз
1	Максимизация скорости передачи данных	35
2	Минимизация расхода вычислительных ресурсов	35
3	Минимизация расхода энергии	35
4	Управление мощностью передатчика	422
5	Управление регламентом связи	422
6	Управление типом СКК	422
7	Расход заряда батарей	94
8	Управление частотой	422
9	Управление полосой	422
10	Количество MIPS	104
11	Расход времени	84
12	Максимизация достоверности	35
13	Снижение потребляемой энергии	9
14	Снижение ошибок при передаче	9
15	Увеличение скорости	9
16	Снижение вычислительной нагрузки	9
17	Мощность	36
18	Скорость	36
19	Регламент	36
20	Тип СКК	36
21	Частота	36

### Результаты

При рассмотрении модели получены результаты, которые описывают оценку согласованности матриц парных сравнений по влиянию элементов каждого

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^{k_j} (1 - \text{ОС}_j)}{k_j}, \quad (13)$$

где  $k_j$  – количество проведенных экспертиз для  $j$ -го узла иерархии параметров когнитивного радио.

Весовой коэффициент мнений эксперта [17]

$$\alpha_j = \frac{\sum_{I=1}^N \frac{C_I}{k_j}}{\sum_{I=1}^{k_j} \frac{C_I}{k_j}}, \quad (14)$$

где  $C_I$  определяется по формуле (13).

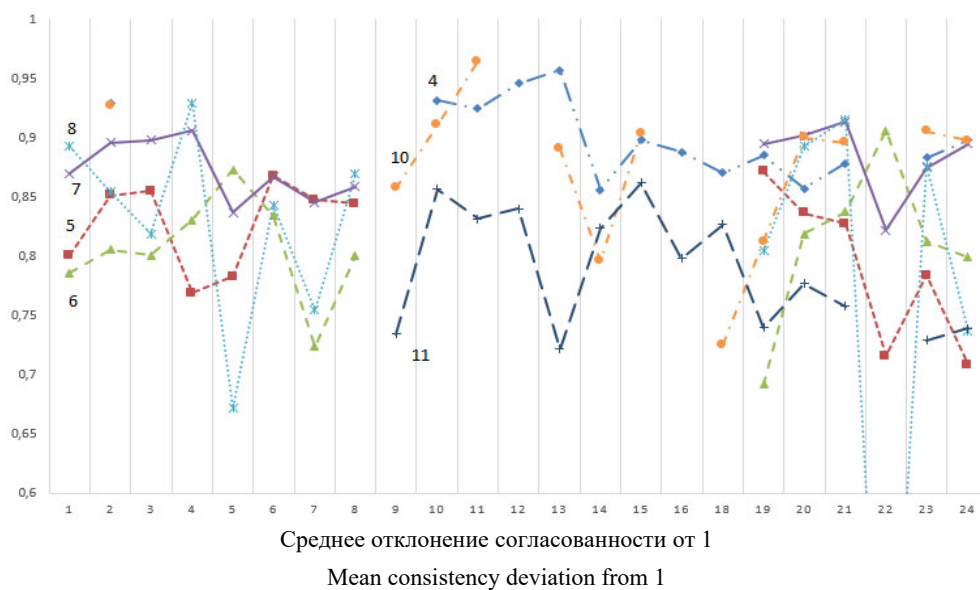
Обобщенное мнение рассчитывается по формуле

$$\omega = \{\omega_j\} = \left\{ \frac{\sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \alpha_i \omega_{ij} \rho_i}}{\sum_{j=1}^{n_0} \omega_j \rho_j} \right\}, \quad (15)$$

где  $\rho$  – оценка компетентности эксперта по (2).

В приведенных режимах работы (табл. 1–3) оценивалась согласованность матриц парных сравнений по узлам иерархии (табл. 8).

уровня модели на цель системы – повышение эффективности передачи информации. Усредненный результат оценки согласованности  $C$  приведен на рисунке.



На рисунке цифрами обозначены узлы иерархии: 4 – «количество MIPS», 5 – «Максимизация достоверности», 6 – «Максимизация скорости передачи данных», 7 – «Минимизация расхода вычислительных ресурсов», 8 – «Минимизация расхода энергии», 10 – «Расход времени», 11 – «Расход заряда батарей». По оси абсцисс на рисунке цифрами обозначены экспертизы:

I. Важность воздействия управляющих параметров в цифровом режиме передачи данных: 1 – «Режим 4» (повторно), 2 – «Режим 1», 3 – «Режим 2», 4 – «Режим 3», 5 – «Режим 4».

II. Важность воздействия управляющих параметров в цифровом режиме передачи речи: 6 – «Режим 1», 7 – «Режим 2», 8 – «Режим 3».

III. Ресурсоемкость воздействия управляющих параметров в цифровом режиме передачи данных: 1 – «Режим 4» (повторно), 2 – «Режим 1», 3 – «Режим 2», 4 – «Режим 3», 5 – «Режим 4».

IV. Ресурсоемкость воздействия управляющих параметров в цифровом режиме передачи речи: 1 – «Режим 1», 2 – «Режим 2», 3 – «Режим 3».

V. Влияние управляющих параметров на показатель эффективности связи: 1 – общая иерархия.

VI. Важность воздействия управляющих параметров в аналоговом режиме передачи информации: 1 – «Режим 1», 2 – «Режим 2», 3 – «Режим 3», 4 – «Режим 4», 5 – «Режим 5», 6 – «Режим 6».

Выявлено, что хорошо согласованы матрицы узлов «Количество MIPS» и «Минимизация расхода вычислительных ресурсов», «Воздействие помех», «Воздействие природно-географических факторов», «Оптимальная передача информации», «Снижение вычислительной нагрузки», «Снижение ошибок при передаче», «Снижение потребляемой энергии», «Увеличение скорости» в «Режим 1» при цифровой передаче информации. Достаточно хорошо согласованы матрицы узлов «Управляемый процесс» и «Устройство наблюдения» в аналоговом режиме передачи информации «Режим 1», «Расход времени», «Расход заряда батарей» и «максимизация достоверности».

Матрицы парных сравнений в узлах иерархии «Минимизация расхода энергии» в «Режим 4», речи «Режим 2» и «Режим 3», «Режим 4 повторно» и аналоговой передачи информации «Режим 6», «Максимизация скорости передачи данных» при оценке важности воздействия управляющих параметров в цифровом режиме передачи данных «Режим 3» обладают низкой согласованностью. Это связано с тем, что сложно оценить долю расхода энергии, затрачиваемую на формирование СКК в цифровых режимах, которая для маломощных радиосредств (с мощностью излучения до 10 Вт) будет сопоставима с энергией, затрачиваемой на передачу, а для более мощных радиосредств она будет иметь менее важное значение. Причем чем выше мощность передачи сигнала, тем меньше энергии будет затрачено на формирование СКК в общем соотношении.

#### Обсуждение

Можно выделить три параметра, которые в большей степени оказывают влияние на эффективность передачи информации в оцененных режимах работы: мощность передающего устройства, сигнално-кодированная конструкция, используемая для передачи сигналов, а также скорость передачи информации. Связано это с тем, что важным параметром любой радиолинии является ее энергетика и способность противостоять помехам за счет применяемых алгоритмов обработки и кодирования сигналов. Вместе с тем потери качества передачи информации могут быть компенсированы снижением скорости передачи, либо повышением мощности передаваемого сигнала.

Однако наряду с увеличением эффективности передачи информации именно эти параметры определяют расход ресурсов, обеспечивающих работу радиосистемы. Мощность радиопередающих устройств во многом определяет расход энергетических ресурсов, а также задает ограничение временных ресурсов на передачу информации, т. к. чем выше мощность излучения сигналов, тем меньше время работы радиосистемы в целом.

Сигнально-кодовая конструкция требует использования вычислительных ресурсов радиосистемы, а значит, и энергетических затрат. Причем чем сложнее применяемая СКК, тем больше вычислительных ресурсов она потребует для формирования сигналов. С другой стороны, применение эффективных алгоритмов и кодов позволяет сократить время передачи информации. Скорость передачи информации при хорошем канале связи позволит передать больше информации за единицу времени при постоянном расходе энергии, но при плохом канале снижение скорости позволит передавать информацию стабильно, хотя в целом ее объем снизится.

#### Заключение

В результате исследования выявлено, что в иерархии параметров системы когнитивного радио присутствует разная степень согласованности оценок в матрицах парных сравнений. Хорошо согласованы участки «Количество MIPS» и «Минимизация расхода вычислительных ресурсов», «Воздействие помех», «Воздействие природно-географических факторов», «Оптимальная передача информации», «Снижение вычислительной нагрузки», «Снижение ошибок при передаче», «Снижение потребляемой энергии», «Увеличение скорости» в «Режим 1».

Удовлетворительно согласованы «Управляемый процесс» и «Устройство наблюдения» в аналоговом режиме передачи информации «Режим 1», «Расход времени», «Расход заряда батарей» и «максимизация достоверности». Слабо согласованы «Минимизация расхода энергии» в «Режим 4», речи «Режим 2» и «Режим 3», «Режим 4 повторно» и аналоговой передачи информации «Режим 6», «Максимизация скорости передачи данных» при оценке важности воздействия управляющих параметров в цифровом режиме передачи данных «Режим 3».

Слабая согласованность в оценках влияния параметров в определенном режиме подчеркивает необходимость дополнительного анализа и внимания экспертов в этой области иерархической структуры.

#### Библиографические ссылки

1. *Фам В. Т.* Применение нечеткого метода анализа иерархий к методу анализа видов и последствий отказов // *Computational Nanotechnology*. 2021. Т. 8, № 2. С. 29–36. DOI 10.33693/2313-223X-2021-8-2-29-36.
2. *Ухлова В. В., Мартыненко Г. Н., Лукьяненко В. И.* Адаптация метода анализа иерархий для возможности проведения сценарного анализа проектов развития предприятий газовой сферы // *Системы управления и информационные технологии*. 2021. № 1 (83). С. 43–48. DOI 10.36622/VSTU.2021.83.1.008.
3. *Шестаков Н. И., Титаренко Б. П.* Сравнение биопозитивности покрытий дорожных одежд методом анализа иерархий // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 3 (84). С. 25–34.
4. Преобразование качественных характеристик автотранспортных средств в количественные показатели с применением метода анализа иерархий / Л. Н. Мазунова, В. В. Беляков, В. С. Макаров [и др.] // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2023. № 1(140). С. 97–106. DOI 10.46960/1816-210X\_2023\_1\_97.

5. Применение метода анализа иерархий для решения задач выбора альтернатив в системах специального назначения / А. Д. Гаврилов, В. А. Новиков, М. В. Ширяев, В. В. Сухов // *Научные технологии*. 2023. Т. 24, № 3. С. 5–11. DOI 10.18127/j19998465-202303-01.

6. *Лубенцов А. В.* Синтез модели получения характеристик эффективности комплексной системы безопасности на базе метода анализа иерархий // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023. Т. 11, № 1(40). С. 12–13. DOI 10.26102/2310-6018/2023.40.1.030.

7. *Лубенцов А. В.* Использование каскадного метода анализа иерархий для оценки эффективности комплексной системы безопасности // *Вестник Воронежского института ФСИИ России*. 2022. № 4. С. 113–120.

8. *Кузнецов Д. С., Поздняков Е. В., Евсикова Н. Ю.* Применение метода анализа иерархий для обоснования выбора наиболее эффективного корчевателя // *Воронежский научно-технический Вестник*. 2020. Т. 1, № 1 (31). С. 133–139.

9. *Корытаева Ю. В., Кузнецова Л. Д., Сумин В. И.* Моделирование с помощью метода анализа иерархий в задаче назначения командира в группе курсантов военного вуза // *Вестник Воронежского института ФСИИ России*. 2022. № 2. С. 73–82.

10. *Федосов С. В., Федосеев В. Н., Зайцева И. А.* Многокритериальный процесс моделирования тепломассопереноса в воздушных теплонасосных системах с целью энергоресурсосберегающих решений методом анализа иерархий // *Современные научные технологии. Региональное приложение*. 2020. № 3 (63). С. 98–111.

11. *Saaty Томас Л.* Принятие решений: Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вацнадзе. М. : Радио и связь, 1993. 314 с. ISBN 5-256-00443-3.

12. Vargas, Luis L.; Saaty, Thomas L. Prediction, Projection and Forecasting: Applications of the Analytic Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games and Sports (1991). Boston: Kluwer Academic, 251 p.

13. *Поспелов Г. С., Ириков В. А.* Программно-целевое планирование и управление: Введение. М. : Сов. радио, 1976. 440 с.

14. Анализ иерархической модели автоматизированной системы управления параметрами радиолиний когнитивной радиосистемы / Г. А. Благодатский, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков, И. С. Батурин // *Научные технологии в космических исследованиях земли*. 2018. № 6 (10). С. 51–67. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10187.

15. *Жилицкая Е. Н., Унучек Т. М., Мытник Н. П.* Системный анализ и проектирование информационных систем. Минск : Издательство БГУИР, 2016. 92 с.

16. *Калиткин Н. Н.* Численные методы. М. : Наука, 1978. 177 с.

17. *Тенев В. А., Якимович Б. А.* Методы и алгоритмы анализа систем. Ижевск : Изд-во ИЖГТУ, 2001. 182 с.

#### References

1. Fam V.T. [Application of the fuzzy analytic hierarchy process to the method of analysis of types and consequences of failures]. *Computational Nanotechnology*. 2021. Vol. 8, no. 2, pp. 29-36 (in Russ.). DOI 10.33693/2313-223X-2021-8-2-29-36.
2. Ukhlova V.V., Martynenko G.N., Lukyanenko V.I. [Adaptation of the analytic hierarchy process for conducting scenario analysis of development projects in the gas industry]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2021. No. 1. Pp. 43-48 (in Russ.). DOI 10.36622/VSTU.2021.83.1.008.
3. *Shestakov N.I., Titarenko B.P.* [Comparison of the biopositivity of road pavement coatings using the analytic hierarchy process]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo*

*arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2021. No. 3. Pp. 25-34 (in Russ.).

4. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S. et al. [Transformation of qualitative characteristics of vehicles into quantitative indicators using the analytic hierarchy process]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev]. 2023. No. 1. Pp. 97-106 (in Russ.). DOI 10.46960/1816-210X\_2023\_1\_97.

5. Gavrilov A.D., Novikov V.A., Shirayev M.V., Sukhov V.V. [Application of the analytic hierarchy process for solving alternative selection problems in special-purpose systems]. *Naukoemkie tekhnologii*. 2023. Vol. 24, no. 3. Pp. 5-11 (in Russ.). DOI 10.18127/j19998465-202303-01.

6. Lubentsov A.V. [Synthesis of a model for obtaining efficiency characteristics of a comprehensive security system based on the analytic hierarchy process]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*. 2023. Vol. 11, no. 1. Pp. 12-13 (in Russ.). DOI 10.26102/2310-6018/2023.40.1.030.

7. Lubentsov A.V. [Use of the cascade analytic hierarchy process for evaluating the efficiency of a comprehensive security system]. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii*. 2022. No. 4. Pp. 113-120 (in Russ.).

8. Kuznetsov D.S., Pozdnyakov E.V., Evsikova N.Yu. [Application of the analytic hierarchy process to justify the choice of the most effective stump puller]. *Voronezhskii nauchno-tekhnicheskii Vestnik*. 2020. Vol. 1, no. 1. Pp. 133-139 (in Russ.).

9. Korypaeva Yu.V., Kuznetsova L.D., Sumin V.I. [Modeling with the analytic hierarchy process in the task of appointing a commander in a group of cadets of a military university]. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii*. 2022. No. 2. Pp. 73-82 (in Russ.).

10. Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Zaitseva I.A. [Multicriteria process of modeling heat and mass transfer in air heat pump systems for energy-saving solutions using the analytic hierarchy process]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*. 2020. No. 3. Pp. 98-111 (in Russ.).

11. Saaty Thomas L. *Prinyatie reshenii: Metod analiza ierarhii* [Decision Making: Analytic Hierarchy Process]. Moscow : Radio i svyaz' Publ., 1993. 314 p. ISBN 5-256-00443-3 (in Russ.).

12. Vargas Luis L.; Saaty Thomas L. *Prediction, Projection and Forecasting: Applications of the Analytic Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games and Sports* (1991). Boston: Kluwer Academic, 251 p.

13. Pospelov G.S., Irikov V.A. *Programmno-tselevoe planirovanie i upravlenie: Vvedenie* [Program-target planning and management: Introduction]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1976. 440 p. (in Russ.).

14. Blagodatsky G.A., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Baturin I.S. [Analysis of the hierarchical model of an automated control system for the parameters of radio links of a cognitive radio system]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh zemli*. 2018. No. 6. Pp. 51-67 (in Russ.). DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10187.

15. Zhivitskaya E.N., Unuchek T.M., Mytnik N.P. *Sistemnyy analiz i proektirovanie informatsionnykh sistem* [System analysis and design of information systems]. Minsk : Izdatel'stvo BGUIR, 2016. 92 p. (in Russ.).

16. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody* [Numerical Methods]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 177 p. (in Russ.).

17. Tenenev V.A., Yakimovich B.A. *Metody i algoritmy analiza sistem* [Methods and algorithms for system analysis]. Izhevsk, Izd-vo IzGTU, 2001. 182 p. (in Russ.).

\*\*\*

#### AHP Based Consistency of Pairwise Comparison Matrices Generalized Jpinion Assessment and Conclusion on the Example of Cognitive Radio System

G. A. Blagodatsky, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

I. S. Baturin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

R. I. Mukhamedzhanov, Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

*This study focuses on analyzing the of pairwise comparison matrices consistency in cognitive radio systems under various data transmission modes. The introduction considers the AHP procedure (T. Saaty) and its relation to the decision matrix method (G. Pospelov). To describe an object (cognitive radio system) its operational modes are given (information transmission) (analogous and digital speech and the data). The procedure of expert opinion assessment on the basis of experience (according to E. Zhivitskaya) along with expert competency assessment of the group. The procedure of pairwise comparison matrices determination and making a generalized conclusion of expert opinion on its basis was given. The result of feedback deviation assessment from the ideal one within hierarchical nodes of cognitive radio system operation modes. It was revealed that matrix nodes "Computational Load", "Computational Resource Consumption Minimization", "Interferences", "Natural and Geographic Factors", "Optimal Information Transmission", "Power Reduction", "Speed Increase" are consistent into "Mode 1" of digital information transmission. Pairwise comparison matrices in hierarchical nodes "Power Minimization" into "Mode 4", speech "Mode 2" and "Mode 3", "Re-Mode 4" and analogous information transmission "Mode 6", "Data Transmission Maximization" when assessing controlling parameter importance for digital data transmission mode "Mode 3" has the lowest consistency. Weak consistency of parameter assessment for the mode emphasizes the need of extra analysis and special expert attention for the given hierarchy structure.*

**Keywords:** AHP, consistency, competence, generalization, examination, cognitive radio.

Получено: 29.11.23

#### Образец цитирования

Благодатский Г. А., Батулин И. С., Мухамеджанов Р. И. Вывод обобщенного мнения и оценка проведенной экспертизы по методу анализа иерархий на основе согласованности матриц парных сравнений на примере системы когнитивного радио // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 34–40. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-34-40.

#### For Citation

Blagodatsky G.A., Baturin I.S., Mukhamedzhanov R.I. [AHP based consistency of paired comparison matrices generalized opinion assessment and conclusion on the example of cognitive radio system]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 34-40. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-34-40.

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-41-47

## Ветроэнергостановки с оптимальным управлением в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции

В. И. Буяльский, кандидат технических наук, ГБОУ «Средняя общеобразовательная школа № 23», Севастополь, Россия

На основе проведенного анализа управления ветроэлектрическим агрегатом с заблаговременной установкой лопастей на требуемый угол в соответствии с оценкой времени включения двигателя привода питча и учетом образования льда на лопастях ветроколеса, направленного на минимизацию времени переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины, что способствует обеспечению повышения стабильности скорости вращения ветроколеса в условиях неполной информации о характеристиках скорости ветра и электрической нагрузки, существенно изменяющихся во времени, – установлен критерий разграничения времени доступа к устройству изменения положения лопастей со стороны предложенного и основного методов выработки управляющих воздействий.

Разработан программный модуль автоматизации управления ветроэнергетической установкой в составе ветроэлектростанции, обеспечивающий своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям с учетом образования льда на лопастях ветроколеса при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, из которого следует, что изменение угловой скорости ротора ветротурбины в большую сторону в зимнее время требует больше энергии ветрового потока (14 м/с) в сравнении с весенне-осенним периодом (11,1 м/с), то есть образование льда на лопастях ветроколеса замедляет вращение ротора ветроколеса. Следовательно, эффективность применения предложенного управления в зимнее время для исключения запаздывания выработки управляющих воздействий, что проявляется при изменении скорости вращения ротора ветротурбины в сторону увеличения, может быть осуществима при скорости ветра от 13 м/с и выше. Усовершенствован программный комплекс управления ветроэлектрической установкой в составе ветроэлектростанции на основе режимности работы энергоагрегата: летний режим – процесс производства электроэнергии при благоприятных природных условиях; зимний режим – процесс производства электроэнергии в условиях образования льда на лопастях ветроколеса.

**Ключевые слова:** оптимизация, ветротурбина, оценка времени, компьютерная программа, автоматизация, система управления.

### Введение

Существующая технология функционирования ветроэнергостановок в условиях образования льда на лопастях ветроколеса и быстро изменяющейся энергии ветрового потока не обеспечивает должной стабильности частоты вращения ротора, что снижает надежность ветроэлектрических агрегатов. Сочетание значимости ветровой энергетики с недостаточной эффективностью автоматизации ее управления делает актуальным решение этих проблем [1–12].

Целью выполненных исследований является определение критерия согласованного доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного способов управления ветроэнергостановкой с учетом образования льда на лопастях ветроколеса и программная реализация в составе ветроэлектростанции, что способствует улучшению условий поддержки номинального значения угловой скорости ветроколеса современных ветрогенераторов при разных режимах эксплуатации.

### Влияние изменения массы лопастей на инерционность системы

Оптимальное управление ветроэнергостановкой, предложенное в [13], основывается на упреждении внешних возмущений с учетом сил инерции, действующих на роторные системы, которые определяются для движущего ( $J_{пр.Д}$ ) и тормозного ( $J_{пр.Т}$ ) усилий:

$$J_{пр.Д} = m_{в.к} l_{в.к}^2 + \frac{1}{2} (m_{мф} R_{мф}^2 + m_{в.ш} R_{в.ш}^2) + \frac{1}{2} (m_{з.к} R_{з.к}^2 + m_{г.м} R_{г.м}^2 + m_{р.г} R_{р.г}^2) i^2 \frac{m_{р.г} \Omega_{р.г}^3 R_{р.г}^2}{m_{в.к} \Omega_{в.к}^3 R_{в.к}^2}, \quad (1)$$

$$J_{пр.Т} = m_{в.к} l_{в.к}^2 + \frac{1}{2} (m_{мф} R_{мф}^2 + m_{в.ш} R_{в.ш}^2) + \frac{1}{2} (m_{з.к} R_{з.к}^2 + m_{г.м} R_{г.м}^2 + m_{р.г} R_{р.г}^2) i^2 \frac{m_{в.к} \Omega_{в.к}^3 R_{в.к}^2}{m_{р.г} \Omega_{р.г}^3 R_{р.г}^2}, \quad (2)$$

где  $m_{в.к} = 1570$  кг – масса ветроколеса;  $l_{в.к} = 8,5$  м – длина лопасти;  $m_{мф} = 628$  кг – масса муфты;  $R_{мф} = 0,3$  м – радиус муфты;  $m_{в.ш} = 150$  кг – масса ведущей шестерни;  $R_{в.ш} = 0,3$  м – радиус ведущей шестерни;  $m_{з.к} = 50$  кг – масса зубчатого колеса;  $R_{з.к} = 0,1$  м – радиус зубчатого колеса;  $m_{г.м} = 52$  кг – масса гибкой муфты;  $R_{г.м} = 0,08$  м – радиус гибкой муфты;  $m_{р.г} = 80$  кг – масса ротора генератора;  $R_{р.г} = 0,35$  м – радиус ротора генератора.

В работе [14] предложен метод повышения эффективности ветроэлектрической установки в условиях образования льда на лопастях ветроколеса. В основе предложенного метода лежит математическая зависимость коэффициента быстроходности ветротурбины от толщины образования льда на лопастях ветроколеса, энергии ветрового потока и угла установки лопастей. Формула фактической массы лопасти с учетом образования льда имеет вид:



$$m_{\text{лф}} = m_{\text{л}} + m_{\text{лд}}, \text{ кг}, \quad (3)$$

где  $m_{\text{л}}$  – масса лопасти;  $m_{\text{лд}}$  – масса льда.

Для определения массы льда в (3) используется выражение:

$$m_{\text{лд}} = 917 \cdot 2rbh, \text{ кг}, \quad (4)$$

где  $r$  – длина лопасти;  $b$  – ширина лопасти;  $h$  – толщина льда на лопасти.

Подставив численные значения  $r = 8,5$  м,  $b = 0,68$  м,  $h = 0,005$  м в (4), получим массу льда на лопасти  $m_{\text{лд}} = 53$  кг, а для трех лопастей будет равна  $m_{\text{лд}} = 159$  кг.

Тогда масса ветроколеса в (1) и (2) увеличится на 159 кг и составит  $m_{\text{в,к}} = 1729$  кг, а приведенный момент инерции системы:  $J_{\text{пр,д}} = 126603 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_{\text{пр,т}} = 127529 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Ввиду незначительных расхождений между полученными результатами примем среднее значение  $J = 127372 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

**Сравнение результатов регулирования угловой скорости ротора ветротурбины в обычном режиме и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса на основе базовой функции управления**

Управляющая функция разомкнутой системы автоматического регулирования угловой скорости ротора ветротурбины имеет вид:

$$W = \frac{20,8}{T_{\Delta R} \cdot p + 1} \left( \frac{0,25}{Tp + 1} \Delta V + \frac{0,86}{Tp + 1} \Delta \alpha \right) - \frac{0,007}{Tp + 1} \Delta P, \quad (5)$$

где  $T$  – постоянная времени затухания колебаний угловой скорости ротора ветротурбины;  $T_{\Delta R}$  – постоянная времени редуктора;  $\Delta \alpha$  – переменная управления, характеризующая относительную ординату угла установки лопасти турбины;  $\Delta V$ ,  $\Delta P$  – переменные по возмущению – относительные ординаты скорости ветра и электрической нагрузки соответственно.

Время прекращения колебаний угловой скорости ветротурбины в (5) определяется по формуле

$$T = J / (F_T + k_{\text{тр}}), \text{ с}, \quad (6)$$

где  $F_T = 6220$  – фактор устойчивости;  $k_{\text{тр}} \approx 5500$  – коэффициент трения.

Подставив значение сил инерции роторных систем  $J = 127372 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  в (6), получим постоянную времени затухания колебаний  $T = 11$  с с учетом образования льда на лопастях ветроколеса.

График переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины  $T = 10$  с приведен на рис. 1, а, и  $T = 11$  с – рис. 1, б, в соответствии с реализацией функции управления (5) в среде Matlab Simulink.

Из графиков видно, что время переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины практически не отличается.

**Сравнение результатов регулирования угловой скорости ротора ветротурбины в обычном режиме и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса на основе оптимизационной функции управления**

Оптимизационная управляющая функция (7) направлена на повышение устойчивости системы управления энергоагрегатом на основе оптимизации ошибки управления в результате воздействия внешних возмущений.

$$W_{\text{opt}} = \frac{0,15}{j^2 \omega^2 T_{\Delta R}^2 + 1} \cdot \frac{1}{j\omega T + 1} \Delta P - \frac{0,007}{j\omega T + 1} \Delta P. \quad (7)$$

График переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины  $T = 10$  с приведен на рис. 2, а, а  $T = 11$  с – рис. 2, б, на основе модели оптимизационной функции управления созданной в среде Matlab Simulink.

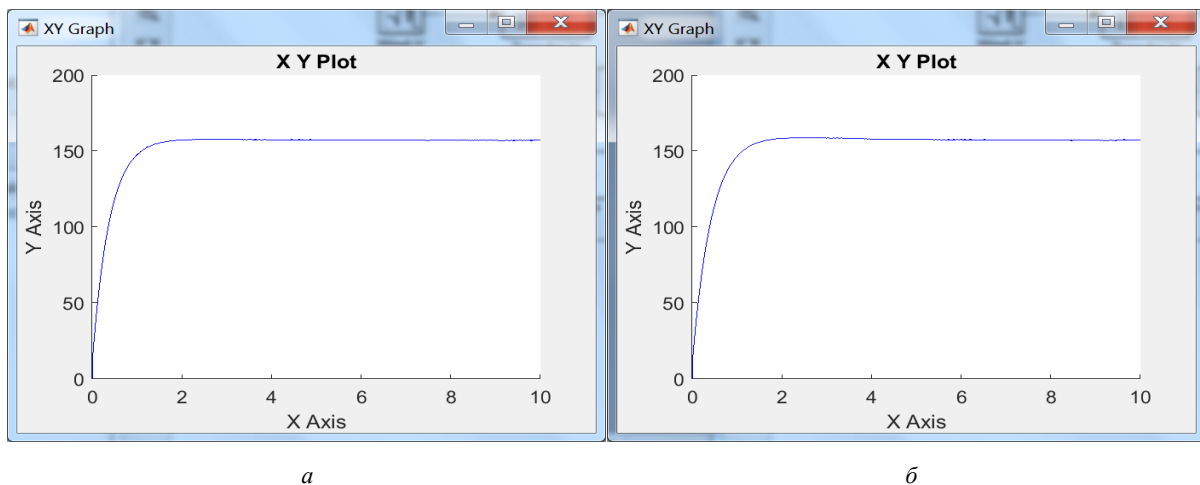


Рис. 1. График переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины

Fig. 1. The schedule of transient of regulation of angular speed of a rotor of wind-turbine

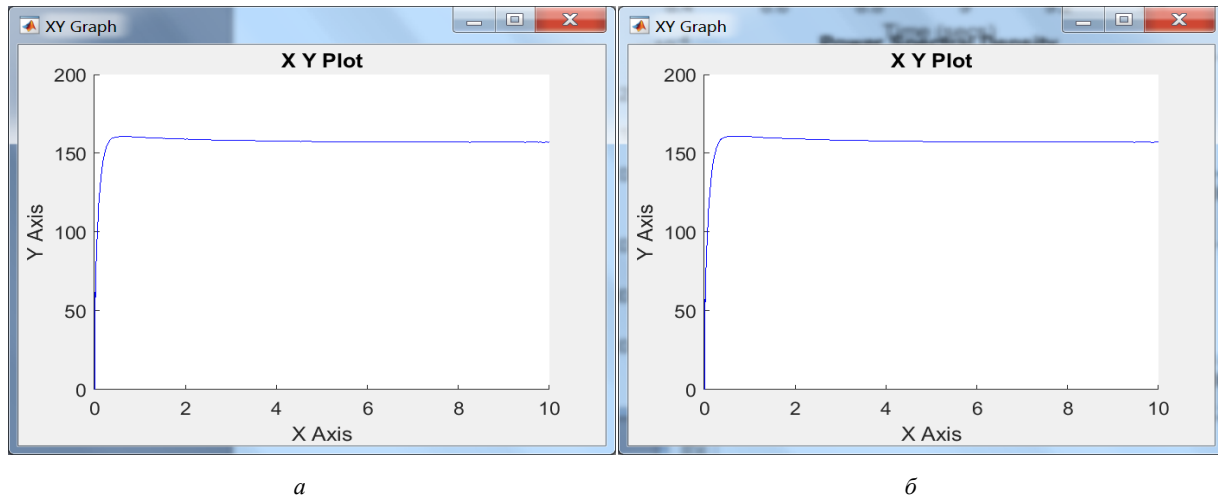


Рис. 2. График переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины

Fig. 2. The schedule of transient of regulation of angular speed of a rotor of wind-turbine

Из графиков видно, что время переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины практически не отличается.

Таким образом, на основе анализа, сравнения результатов регулирования угловой скорости ветротурбины в обычном режиме и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса следует, что критерий по формированию согласованного доступа к двигателю привода угла pitch лопасти со стороны предложенного и основного методов принятия управляющих решений остается неизменным.

#### Программная реализация

Для программной реализации управления ветроэнергоустановкой в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции будет целесообразным использование математической зависимости скорости вращения ветротурбины от скорости ветра, электрической нагрузки и угла установки лопастей с учетом условий вибраций роторных систем при разных режимах эксплуатации ветроэнергоустановки, что способствует повышению надежности ветрогенераторов:

$$\Omega = 119k \frac{1}{rib(1-e^2)} \frac{Ze}{\left(1 - \left[ \frac{I_2'}{\sqrt{\frac{U_1^2 - (I_1')^2(x_1 + x_2')^2}{(I_1')^2} - r_1}} \right]} \right)^\alpha} V, \text{ рад/с,}$$

где  $U_1$  – фазное напряжение;  $x_1$  – индуктивное сопротивление;  $x_2'$  – приведенное индуктивное сопротивление;  $r_1$  – активное сопротивление фазы

обмотки статора;  $r_2'$  – приведенное активное сопротивление фазы обмотки статора.

В работе [15] предложен программный комплекс управления ветротурбиной в составе ветроэлектростанции на базе учета вибраций роторных систем, что способствует своевременной установке лопастей к внешним возмущающим воздействиям при разных режимах эксплуатации энергоагрегата.

Таким образом, с учетом наличия свойств инвариантности решения задач по управлению объектом со стороны компьютерной программы будет целесообразным и эффективным реализовать модифицированный «Главный экран» (рис. 3), который включает два режима оптимального управления ветротурбиной: летний и зимний режим.

«Главный экран» всегда отображается на мониторе компьютера управления и контроля, а области А, В, С D, Е, F и G имеют назначения.

Летний режим реализует подход для оптимального управления ветроагрегатом выработки электроэнергии на основе учета вибраций роторных систем и упреждения внешних возмущений, что способствует своевременной установке лопастей к изменению внешней среды.

Зимний режим отличается тем, что подход по управлению реализуется в соответствии с подходом для летнего режима, но в дополнение учитывает образование льда на лопастях ветроколеса.

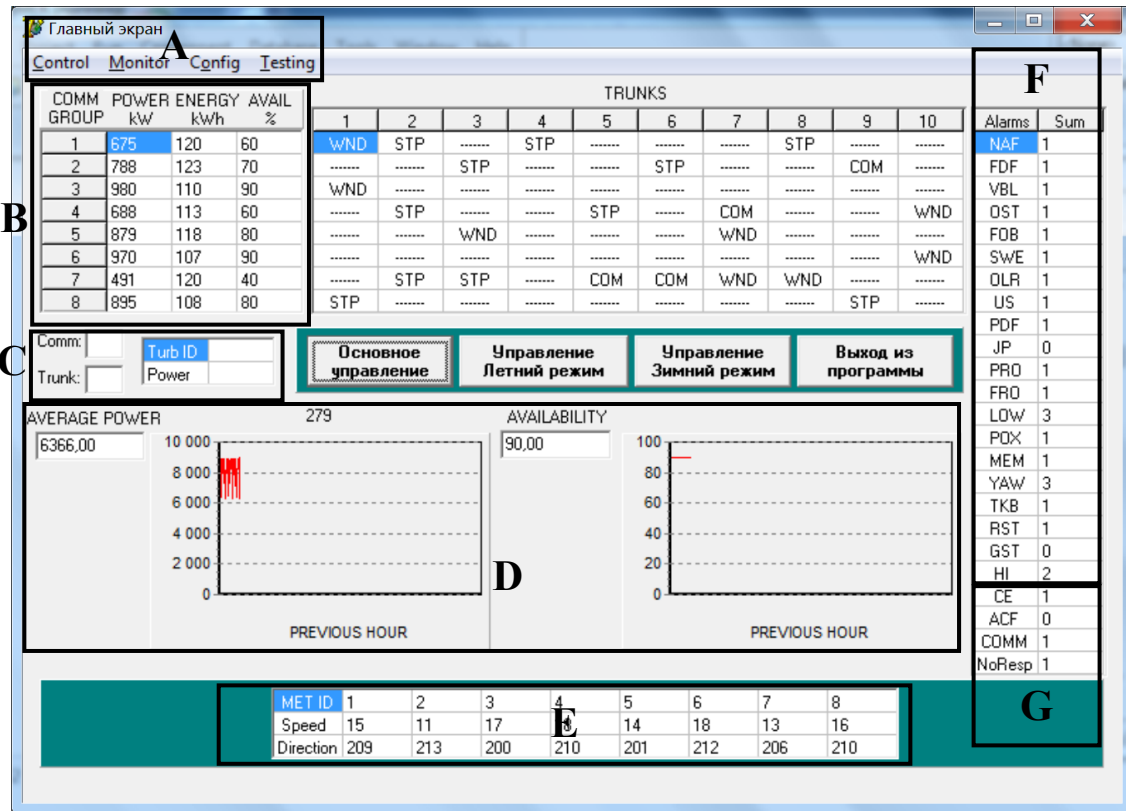


Рис. 3. «Главный экран» системы управления ветроэлектростанцией.  
Расположение областей: А, В, С D, Е, F, G

Fig. 3. «The main Screen» control systems wind power plant. An arrangement of areas: A, B, C D, E, F, G

На рис. 4 представлен вид окна программного модуля управления работой ветроагрегата «Летний режим». Алгоритм обработки данных способствует

своевременной установке лопастей к внешним возмущающим воздействиям и согласно (1), (2) учитывает силы инерции, действующие на роторные системы.

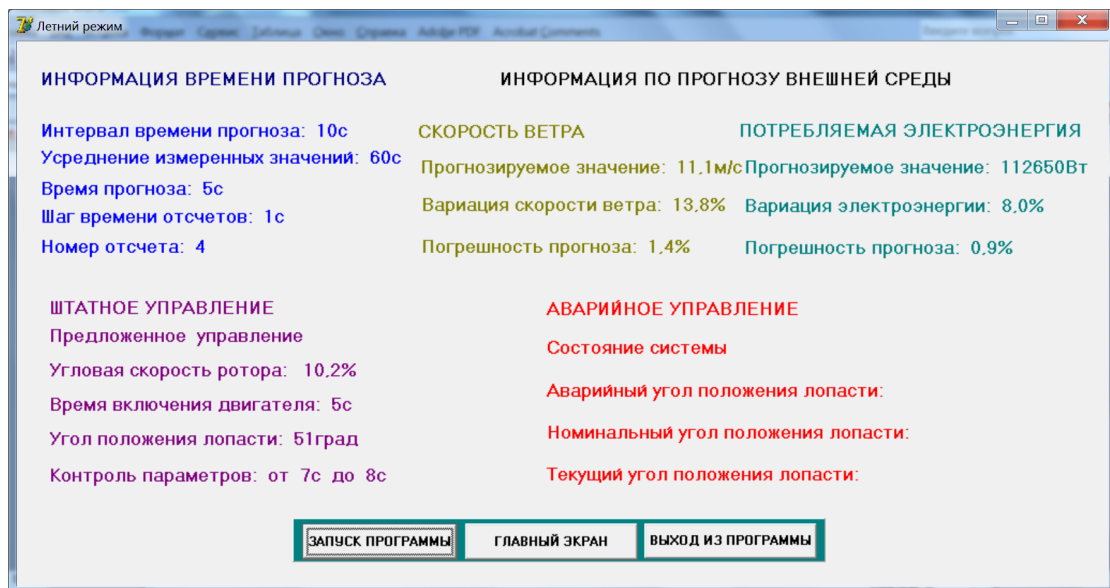


Рис. 4. Программный модуль управления работой ветроагрегата в условиях весенне-осеннего периода

Fig. 4. The program module of control of work wind unit in the conditions of the vesenne-autumn period

Алгоритм обработки данных для своевременной подготовки системы к внешним возмущаю-

щим воздействиям «Зимний режим» представлен на рис. 5.

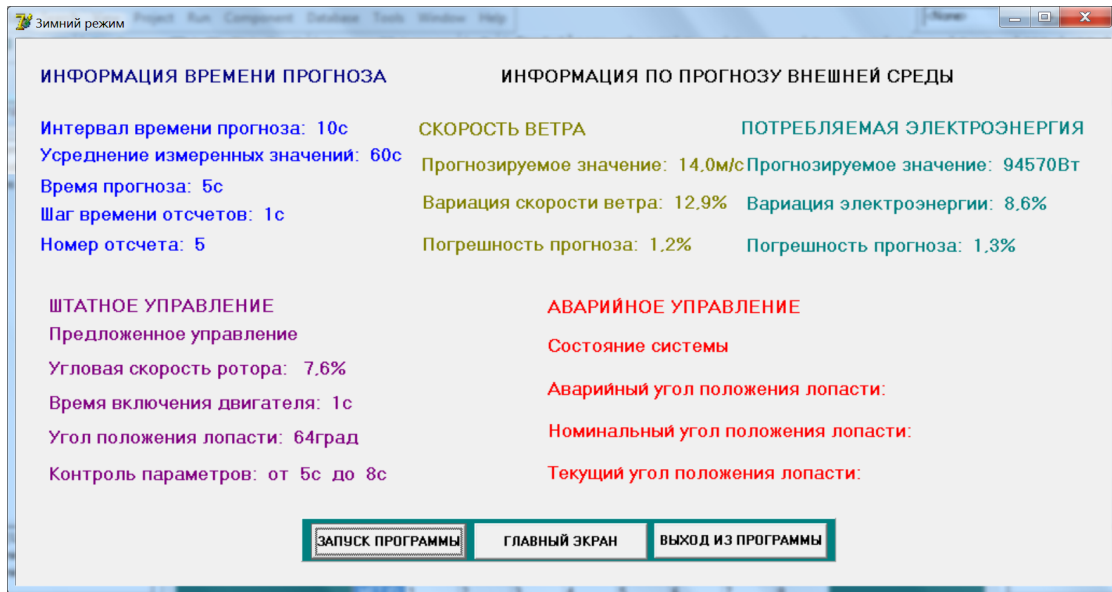


Рис. 5. Программный модуль управления работой ветроагрегата в условиях зимнего периода

Fig. 5. The program module of control of work wind unit in the conditions of the winter period

В результате программной реализации управления ветроэнергоустановкой (рис. 4, 5) следует, что изменение угловой скорости ротора ветротурбины в большую сторону в зимнее время требует больше энергии ветрового потока (14 м/с) в сравнении с весенне-осенним периодом (11,1 м/с), то есть образование льда на лопастях замедляет вращение ротора ветроколеса.

Следовательно, эффективность применения предложенного управления в зимнее время для исключения запаздывания выработки управляющих воздействий, что проявляется при изменении скорости вращения ротора ветротурбины в сторону увеличения, может быть осуществима при скорости ветра от 13 м/с и выше.

#### Анализ полученных результатов и выводы

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- проведен анализ моделирования регулирования угловой скорости ротора ветротурбины при стандартных погодных условиях и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса на основе базовой и оптимизационной управляющих функций, который показал, что время переходного процесса не отличается;

- в результате идентичности переходных процессов регулирования угловой скорости ротора ветротурбины для разных погодных условий критерий согласованного доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного способов управления ветроэнергоустановкой с учетом образования льда на лопастях ветроколеса остается неизменным;

- на основе программной реализации управления ветроэнергоустановкой в летнее и зимнее время сле-

лан вывод, что в условиях образования льда на лопастях ветроколеса потребность энергии ветра возрастает относительно режима, когда обледенение отсутствует (14 м/с > 11,1 м/с).

Таким образом, предложенный метод принятия управляющих воздействий минимизирует время запаздывания по управлению, что способствует повышению стабильности скорости вращения ветроколеса.

Полученные результаты исследований могут использоваться для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы.

#### Библиографические ссылки

1. Серебряков П. А. Перспективы развития ветроэнергетики // Точная наука. 2021. № 110. С. 2–13.
2. Серебряков П. А. Теоретические основы математического моделирования вихревой ветроэнергетической установки // Точная наука. 2021. № 110. С. 23–30.
3. Многоагрегатная ветроэнергетическая установка для районов с низким ветровым потенциалом / С. С. Доржиев, Е. Г. Базарова, В. В. Пилипков, М. И. Розенблюм // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 2 (31). С. 45–52.
4. Пионкевич В. А. Математическое моделирование ветротурбины для ветроэнергетической установки с асинхронным генератором методом частотных скоростных характеристик // Вестник ИрГТУ. 2016. № 3. С. 83–88.
5. Emadifar R., Tohidi D., Eldoromi M. Controlling Variable Speed Wind Turbines Which Have Doubly Fed Induction Generator by Using of Internal Model Control Method // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016. No. 5. Pp. 3464–3471.
6. Balamurugan N., Selvaperumal S. Intelligent controller for speed control of three phase induction motor using indirect vector control method in marine applications // Indian journal of Geo Marine Sciences. 2018. No. 47. Pp. 1068–1074.

7. Vijayalaxmi B., Bheema K. Individual Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines Using Fuzzy Logic with DFIG // International Journal of research in advanced engineering technologies. 2016. No. 5. Pp. 45–52.

8. Qin Hongwu, Li Xinze, Chye En Un, Voronin V.V. Research on the mechanism of wind turbine blades ice coating and anti-icing methods // Вестник ТОГУ. 2021. № 2 (61). С. 53–60.

9. Wei K, Yang Y, Zuo H, et al. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. Wind Energy. 2020. No. 23 (3). Pp. 433–457.

10. Пионкевич В. А. Следящие системы автоматического управления напряжением асинхронного генератора и перспективы их развития // Вестник ИрГТУ. 2016. № 2 (109). С. 81–86.

11. Нечаев И. С., Шонина Д. Е. Особенности и проблемы развития ветровой энергетики // Молодой ученый. 2019. № 15 (253). С. 44–46.

12. Горячев С. В., Смолякова А. А. Проблемы и перспективы ветроэнергетических систем в России // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 5 (119). С. 37–41.

13. Буяльский В. И. Методика для устранения запаздывания включения устройства разворота лопастей ветротурбины // Энергетик. 2014. №5. С. 33–35.

14. Буяльский В. И. Методы повышения эффективности ветроэлектрической установки в условиях образования льда на лопастях ветроколеса // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 42–46. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-42-46.

15. Буяльский В. И. Программное обеспечение управления ветротурбиной в составе ветроэлектростанции на базе учета вибрационной нагруженности привода и своевременной подготовки процесса принятия управляющих решений при разных режимах эксплуатации энергоагрегата // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 79–87. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-79-87.

#### References

1. Serebryakov R.A. [Prospects for the development of wind energy]. *Tochnaya nauka*. 2021. No. 110. Pp. 2-13 (in Russ.).

2. Serebryakov R.A. [Theoretical foundations of mathematical modeling of a vortex wind power plant]. *Tochnaya nauka*. 2021. No. 110, pp. 23-30 (in Russ.).

3. Dorgiev S.S., Bazarova E.G., Pilipkov V.V., Rozenblum M.I. [Multi-unit wind power plant for areas with low wind potential]. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2021. No. 2. Pp. 45-52 (in Russ.).

4. Pionkevich V.A. [Mathematical modeling of a wind turbine for a wind power plant with an asynchronous generator using the method of frequency-speed characteristics]. *Vestnik IrGTU*. 2016. No. 3, pp. 35-37 (in Russ.).

5. Emadifar R., Tohidi D., Eldoromi M. Controlling Variable Speed Wind Turbines Which Have Doubly Fed Induction Generator by Using of Internal Model Control Method. In International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016. No. 5. Pp. 3464-3471.

6. Balamurugan N., Selvaperumal S. Intelligent controller for speed control of three phase induction motor using indirect vector control method in marine applications. In Indian journal of Geo Marine Sciences. 2018. No. 47. Pp. 1068-1074.

7. Vijayalaxmi B., Bheema K. Individual Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines Using Fuzzy Logic with DFIG. In International Journal of research in advanced engineering technologies. 2016. No. 5. Pp. 45-52.

8. Qin Hongwu, Li Xinze, Chye En Un, Voronin V. V. Research on the mechanism of wind turbine blades ice coating and anti-icing methods. *Vestnik TOGU*. 2021. No. 2. Pp. 53-60.

9. Wei K, Yang Y, Zuo H, et al. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. Wind Energy. 2020. No. 23. Pp. 433-457.

10. Pionkevich V.A. [Watching systems of automatic control of pressure of the asynchronous generator and prospect of their development]. *Bulletin IrGTU*. 2016. vol. 109, no. 2, pp. 81-86 (in Russ.).

11. Nechev I.S., Shonina D.E. [Features and problems of development of wind power]. *Molodoy ucheniy*. 2019. No. 15. Pp. 44-46 (in Russ.).

12. Goryachev S.V., Smolyakova A.A. [Problems and prospects wind power systems in Russia]. *Megdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy jurnal*. 2022. No. 5. Pp. 37-41 (in Russ.).

13. Buyalsky V.I. [Technique for elimination of delay of inclusion of the device of a turn of blades wind turbine]. *Energetik*. 2014, no. 5, pp. 33-35 (in Russ.).

14. Buyalsky V.I. [Wind Power Plant Efficiency Increasing Methods in Ice Formation on Wind Wheels Blades]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 42-46 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2023-4-42-46.

15. Buyalsky V.I. [Software for controlling a wind turbine as part of a wind power plant based on taking into account the vibration load of the drive and timely preparation of the process of making control decisions under different operating modes of the power unit]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 79-87 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2023-1-79-87.

\*\*\*

#### Optimum Control Wind Power Installations Being Subjected to Ice Formation on Wind Wheel Blades Within Wind Electric Station Structure

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, State budgetary educational institution of a city of Sevastopol Average comprehensive school No. 23

*On the basis of the analysis of wind electric unit control with preliminary installation of blades at a required angle according to an estimation of the drive pitch engine start timesubjected toice formation on wind wheel blades to minimize the wind turbine rotor angular speedtransient time, that promotes wind wheel rotation speed stability under the conditions of incomplete wind speed and the electric loadinginformation, that may change significantly with time, the criterion of access time to the of bladeposition control devicefrom the proposed and basic methods of control is established.*

*The program module towind power automation control within thewind electric stationstructure is developed, providing relevantssystem preparation for external actions due to ice formation on blades wind wheel at different operation modes of power unit,that showedangular speed increase of a wind turbine rotor during winter time thus demanding more energy of a wind stream*

(14m/s) in comparison with the spring and autumn period (11.1m/s). Therefore, ice formation on wind wheel blades slows down wind wheel rotor rotation. Hence, the offered control method efficiency during winter time to avoid control delay is shown by rotation speed increase of a wind turbine rotor towards can be realized for wind speeds exceeding 13m/s.

The improved software control unit of wind power installation within the structure of wind power station based on the power unit operation modes provides: «Summer mode» – electric power generation under favorable environment conditions; «Winter mode» – electric power generation under ice formation on blades wind wheel.

**Keywords:** optimization, wind turbine, time estimation, computer program, automation, control system.

Получено: 21.12.23

#### Образец цитирования

Буяльский В. И. Ветроэнергоустановки с оптимальным управлением в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 41–47. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-41-47.

#### For Citation

Buyalsky V.I. [Wind power installations with optimum control in the conditions of ice formation on blades wind wheel in structure wind electric station]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 40-47. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-40-47.