

УДК 621.391

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-93-106

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КОГНИТИВНОГО РАДИО

**Г. А. Благодатский**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**А. Н. Копысов**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**В. В. Хворенков**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**И. С. Батури**н, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Представлен алгоритм оптимального управления системой когнитивного радио в аналоговых и цифровых режимах работы. Алгоритм основан на применении критериев принятия решений в условиях изменяющейся обстановки. Основой алгоритма является максимизация коэффициента эффективности системы в рассматриваемых режимах. Таким образом, система когнитивного радио может выбрать оптимальный режим работы как в конкретной внешней ситуации, так и предпочтительный режим работы при учете всех внешних воздействий.*

*Для эффективной передачи информации при значительно разряженной батарее радиосистеме требуется перейти в режим  $E_3$  (мощность 1, 3, 10 Вт; скорость 2400, 9600 бит/с; тип СКК (вид модуляции) 4FSK, QPSK, QPSK; частота 30...300 ОБЧ (VHF) МГц; полоса 6,25/12,5; 6,25/12,5; 25/50/100/150 кГц). Для повышения эффективности передачи информации в этом режиме также целесообразно продолжить управление сигнально-кодowymi конструкциями. При продолжении работы во временных ограничениях требуется перейти в режим работы  $E_4$  (мощность 1, 3, 10 Вт; скорость 2400, 9600 бит/с; Тип СКК (вид модуляции) 4FSK, QPSK, QPSK; частота 300...3000 УВЧ (UHF) МГц; полоса 6,25/12,5; 6,25/12,5; 25/50/100/150 12,5 кГц) и направить ресурсы радиосистемы на управление мощностью передачи, тем самым повышая эффективность за счет усиления энергетики радиолинии. Для передачи цифровой речи при разряженной батарее требуется перейти в режим  $E_1$  (мощность 1, 10, 100 Вт; скорость 2400, 1200, 800 бит/с; Тип СКК (вид модуляции) OFDM (SSB), QPSK; частота 3...30 ВЧ (HF) МГц; полоса 3,1 кГц), и для повышения эффективности уже требуется управление сигнально-кодowymi конструкциями. При наступлении временных ограничений радиосистеме требуется перейти в режим работы  $E_2$  (мощность 1, 3, 10 Вт; скорость 2400, 1200, 800 бит/с; тип СКК (вид модуляции) 4FSK, QPSK, QPSK; частота 30...300 ОБЧ (VHF) МГц; полоса 6,25/12,5; 6,25/12,5; 25/50/100/150 кГц), и для повышения достоверности приема-передачи требуется ресурсы потратить на управление мощностью передачи.*

*Рассматривая эффективность работы радиосистемы в аналоговых и цифровых режимах, можно сделать вывод, что при наступлении временных ограничений эффективно управление мощностью передатчика (увеличение энергетики радиолинии). Однако при работе в цифровых режимах снижение эффективности происходит значительно медленнее, чем при использовании аналоговых режимов. Анализ работы радиосистемы при энергетических ограничениях также показывает более медленное снижение эффективности цифровых режимов; кроме того, в цифровых режимах значительно снижается скорость расхода ресурсов, в то время как в аналоговых режимах она резко возрастает.*

**Ключевые слова:** когнитивность, радиосвязь, оптимизация, эффективность, принятие решений, стохастическая среда.

### Введение

**П**ри разработке систем передачи информации в настоящее время обязательным условием является применение технологий программно-определяемого и когнитивного радио [1–5]. Применение этих технологий позволяет создавать унифицированные технические платформы, что не только приводит к расширению применения разрабатываемых систем, но и повышению эффективности их работы за счет возможности конфигурации параметров и их изменений в процессе функцио-

нирования радиосистемы. На этапах эскизного и технического проектирования активно используется стенд главного конструктора (далее СГК) [6, 7]. Математическое обеспечение СГК позволяет осуществлять оптимизацию технических решений при разработке радиотехнических систем и устройств. Одна из таких задач – разработка алгоритмов управления, которые являются неотъемлемой частью когнитивной системы.

Технические системы, работающие в нестационарной обстановке, требуют введения механизма адаптации к изменяющимся внешним ус-

ловиям работы системы. Разработка системы при ориентации на «средние» состояния параметров окружающей среды приводит к тому, что система способна оптимально работать лишь в этих «средних» условиях (снижается эффективность функционирования системы) [8]. Поэтому введение алгоритма управления режимами работы, который будет изменять управляющие параметры системы с целью поддержки эффективности ее функционирования в различных режимах работы, является актуальной задачей.

Цель исследования – оптимизация работы системы когнитивного радио путем внедрения алгоритма управления параметрами системы в различных режимах работы.

### Разработка алгоритма управления режимами работы системы когнитивного радио

Введем обозначение  $E_i, i = \overline{1, m}$ , – конкретный режим работы системы когнитивного радио.  $E_i$  выбирается с учетом внешних условий  $F_j, j = \overline{1, n}$ , где  $n$  – рассматриваемые комбинации коэффициентов целевой функции  $Y$  (1) и существующих в этой ситуации ресурсов  $b$  (2), где  $b_1$  – запас энергии;  $b_2$  – фонд времени;  $b_3$  – фонд вычислительных операций. Функция (1) – безразмерный коэффициент эффективности. Он связывает управляющие параметры системы с достижением конкурентных целей: минимизация расхода энергии при передаче информации, максимизация достоверности приема сообщений, повышение скорости приема-передачи сообщений и снижение вычислительной нагрузки на вычислительную систему при приеме-передаче сообщений (построение коэффициента эффективности проведено в [9, 10]). Связь введена иерархической структурой по методу анализа иерархий. Корнем иерархии является указанная эффективность работы системы; на втором уровне иерархии введены силы, оказывающие влияние на эффективность работы системы; третьим уровнем представлены акторы; четвертым – цели; на нижнем (пятом) уровне системы располагаются управляющие параметры. Глобальный вес управляющих параметров входит коэффициентом в показатель эффективности  $Y$  (1). Переменными  $x_l \in [0, \max x_l]$  показателя эффективности служат уровни активации самих управляющих параметров.

Наступление  $F_j$  характеризуется вероятностью  $q_j$ .

$$Y(\bar{c}, \bar{x}) = \sum_{l=1}^k c_l x_l \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^k a_{1l} x_l \leq b_1, \\ \sum_{l=1}^k a_{2l} x_l \leq b_2, \\ \sum_{l=1}^k a_{3l} x_l \leq b_3; \end{cases} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \{x_l \in [0, \max x_l]\}, \quad l = \overline{1, k}. \quad (3)$$

Каждый  $E_i$  при каждой комбинации внешних условий  $F_j$  и  $q_j$  характеризуется максимальным значением целевой функции (1), полученным по алгоритму симплекс-метода [11, 12]. Обозначим максимальное значение целевой функции (1) режима  $E_i$  при факторе  $F_j$  через  $e_{ij}$ . Составим матрицу решений  $\{e_{ij}\}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ .

Для решения задач выбора оптимальных решений при стохастических внешних ситуациях разработаны критерии принятия решений [13–16]. В соответствии с конкретным критерием  $Z_k$  принятия решений каждый  $E_i$  характеризуется результирующим значением  $e_{ir}$ . Таким образом, задача выбора оптимального режима работы системы сводится к решению задачи принятия решений:

$$E_o = \{E_i : e_{ir} = Z_k, i = \overline{1, m}\}. \quad (4)$$

Составим расширенную матрицу решений для  $l$  вариантов  $Z_k$ :

$$\begin{array}{c|cccc|cccc} F_j & F_1 & F_1 & \dots & F_1 & & & & \\ E_i & q_1 & q_1 & \dots & q_1 & Z_{k_1} & \dots & Z_{k_l} & \\ \hline E_1 & e_{11} & e_{11} & \dots & e_{1n} & e_{1r1} & \dots & e_{1rl} & \\ E_2 & e_{21} & \dots & & e_{2n} & e_{2r1} & \dots & & \\ \dots & & \dots & & & & & & \\ E_m & e_{m1} & & \dots & e_{mn} & e_{mr1} & \dots & e_{mrl} & \end{array} \quad (5)$$

Будем рассматривать множество  $l$  критериев принятия решений  $Z_k$ .

$$\text{Пусть } Z_k = \{Z_{MM}, Z_{BL}, Z_S\}.$$

Здесь  $Z_{MM}$  – минимаксный критерий; характеризуется крайней осторожностью при принятии решений; применяется в случае, когда необходимо исключить любой риск,

$$Z_{MM} = \max_i e_{ir}, \quad e_{ir} = \min_j e_{ij}; \quad (6)$$

$Z_{BL}$  – критерий Байеса – Лапласа; предполагает знание вероятностей появления состояний  $F_j$ ,

$$Z_{BL} = \max_i e_{ir}, \quad e_{ir} = \sum_{j=1}^n e_{ij} q_j, \quad (7)$$

где  $\sum_{j=1}^n q_j = 1$ ;

$Z_S$  – критерий Сэвиджа; ориентирован на отыскание заведомо не худших  $E_i$ ,

$$Z_S = \min_i e_{ir}, \quad e_{ir} = \max_j a_{ij}, \quad (8)$$

где  $a_{ij} = \max_i e_{ij} - e_{ij}$ ; величина  $a_{ij}$  понимается как максимально возможный результат от применения в состоянии  $F_j$  оптимального для этого состояния варианта  $E_i$ .

По каждому из критериев определим множество  $E_o = \{E_i : e_{ir} = Z_k, i = \overline{1, m}\}$ . Выбирая предпочтительный критерий  $Z_k$  или находя пе-

ресечение множеств  $E_o$  для группы предпочтительных критериев (определим предпочтительность критериев методом парных сравнений [17, 18]), выберем оптимальные режимы работы для рассмотренных внешних ситуаций  $F_j, j = \overline{1, n}$ .

### Алгоритм управления режимами работы системы когнитивного радио

Режимы работы системы когнитивного радио из множества  $E_o$  характеризуются максимальным значением функции (1) в каждой внешней ситуации. Максимальное значение целевой функции достигается в каждом из  $E_i$  при определенном уровне активации управляющих параметров  $x_i$  (3) целевой функции (1). Таким образом, система когнитивного радио может выбирать наиболее оптимальный режим работы в конкретной ситуации  $F_j$  или общий предпочтительный режим  $E_i$  при интегральной оценке внешней ситуации (рис. 1).

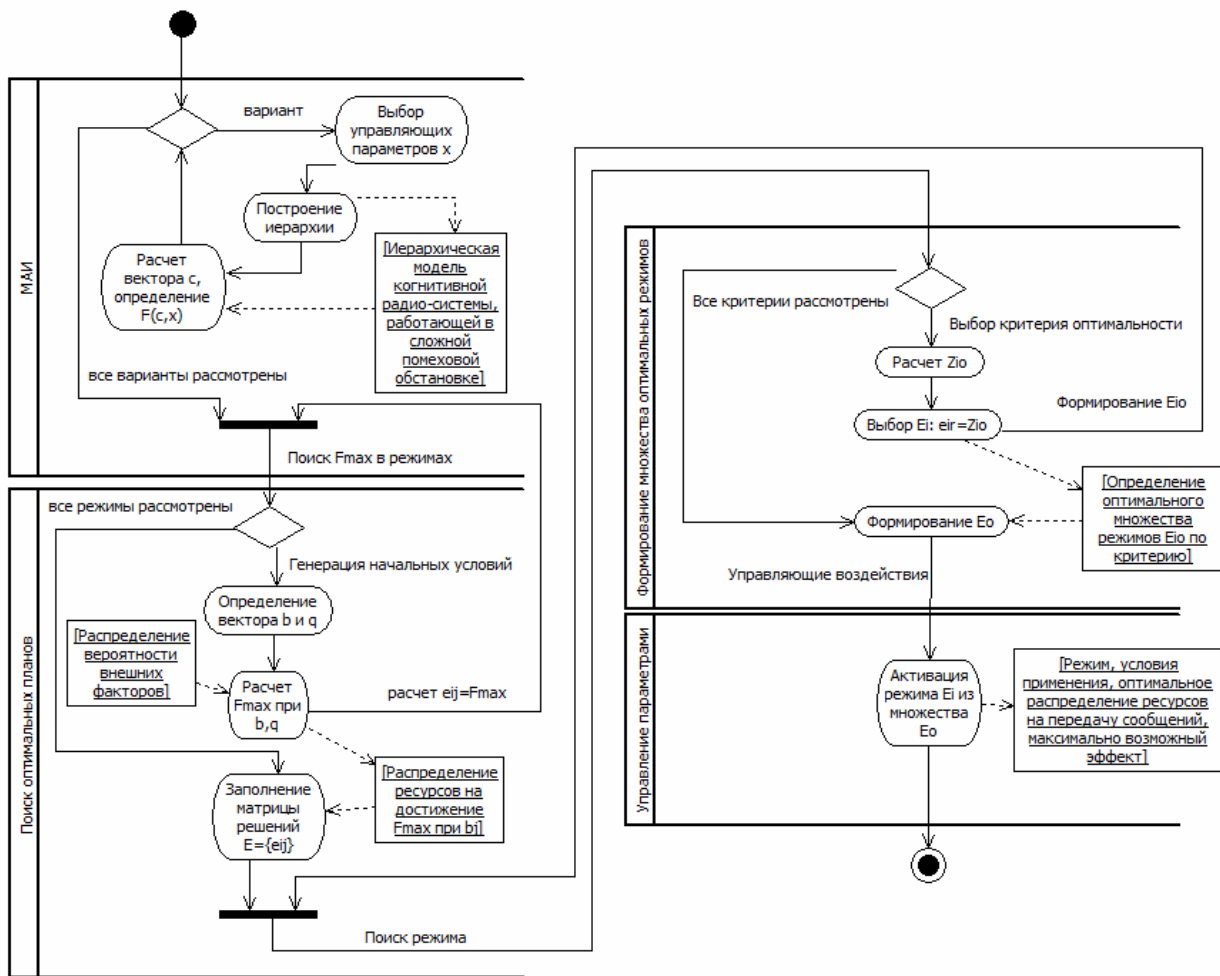


Рис. 1. Алгоритм оптимального управления режимами работы когнитивной радиосистемы

Fig. 1. Cognitive radio system operating modes control algorithm

Согласно алгоритму необходимо следующее.

1. Произвести расчет векторов целевой функции  $Y$  (1) по выбранной иерархии воздействия управляющих параметров на цель системы [19, 20].

2. Произвести расчет векторов расхода ресурсов на параметры управления системой (2).

3. Задать ограничения на вектор  $b$  – запас ресурсов – и вектор  $q$  – вероятность наступления события.

4. Заполнить матрицу решений  $E = \{e_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$  (5), вычисляя  $e_{ij}$  симплекс-методом в ограничениях п. 3 алгоритма.

5. Сформировать множество оптимальных решений  $E_0$  по предпочтительному критерию из (6)–(8).

При изменении структуры управляющих параметров алгоритм запускается с п. 1. В случае изменения среды системы алгоритм можно за-

пустить с п. 3. При повторном принятии решения для среды системы адаптации алгоритма под задачи лица, принимающего решение, возможно выполнение алгоритма с п. 5.

Рассмотрим работу системы в аналоговых и цифровых режимах передачи сигналов. Выделим четыре характерных ситуации  $F_j$ , в которых приходится работать системе:  $F_1$  – полные ресурсы;  $F_2$  – половинная емкость батарей;  $F_3$  – критический уровень заряда батарей;  $F_4$  – недостаток времени.

### Результаты применения алгоритма управления к режимам работы системы когнитивного радио

Приведем результаты применения алгоритма управления параметрами системы к аналоговым режимам работы системы.

В табл. 1 приведена результирующая матрица решений, составленная на основе алгоритма управления параметрами в аналоговых режимах.

Таблица 1. Расширенная матрица решений

Table 1. Extended decision matrix

$E_i$	Мощность, Вт	Регламент	Тип СКК (вид модуляции)	Частота, МГц	Полоса, кГц	$Y$ , ед.				Значение критерия принятия решений, ед.		
						$q$				$Z_{MM}$	$Z_{BL}$	$Z_S$
						$F_1$ 0,4	$F_2$ 0,3	$F_3$ 0,2	$F_4$ 0,1			
1	1 10 100	Временной симплекс	A1A – амплитудный телеграф	3...30 ВЧ (HF)	1	1,162	0,678	0,324	0,522	0,324	0,785	0,297
2	1 10 100	Временной симплекс	J3E – Однополосная амплитудная телефония с подавленной несущей (до –40 дБ)	3...30 ВЧ (HF)	3,1	1,240	0,762	0,453	0,428	0,428	0,858	0,168
3	1 3 10	Временной симплекс	F3E – Частотная телефония	30...300 ОВЧ (VHF)	12,5	1,228	0,815	0,532	0,346	0,346	0,877	0,175
4	1 3 10	Временной симплекс	F3E – Частотная телефония	300...3000 УВЧ (UHF)	12,5	1,273	0,880	0,622	0,312	0,312	0,929	0,209
5	1 3 10	Временной симплекс	A3E – двухполосная амплитудная телефония	30...300 ОВЧ (VHF)	12,5	1,234	0,782	0,477	0,435	0,435	0,867	0,144
6	1 3 10	Временной симплекс	A3E – двухполосная амплитудная телефония	300...3000 УВЧ (UHF)	12,5	1,277	0,875	0,558	0,391	0,391	0,924	0,131
Max						1,277	0,880	0,622	0,522	0,435	0,929	0,131

Согласно приведенной таблице (см. табл. 1) с точки зрения  $Z_{MM}$  необходимо выбирать режим  $E_5$  в качестве основного режима;  $Z_{BL}$  предлагает режим  $E_4$  как наиболее оптимальный.

Для  $Z_S$  в табл. 2 приведена матрица рисков  $R$  принятия неоптимальных решений для матрицы решений, приведенной в табл. 1.

Согласно данным табл. 2  $Z_S$  предлагает режим  $E_6$  как наиболее оптимальный, который обладает наименьшим максимальным отклонением от наилучшего результата под воздействием рассмотренных факторов  $F_j$ .

Рассмотрим применение результатов максимизации показателя эффективности  $Y$  на примере цифровых режимов передачи данных (табл. 3). Для каждого фактора  $F_j$  существует лучший (безрисковый) режим работы (относительно других режимов).

В табл. 4–7 приведены результаты обработки матрицы решений с целью получения максимального показателя  $Y$  за весь цикл приема-передачи сообщений.

Рассмотрим результаты расчета показателя эффективности  $Y$  (табл. 3, четыре правых столбца) симплекс-методом в различных режимах работы системы (табл. 4). Для краткости обо-

значим усилия по управлению мощностью приемопередающей аппаратуры как УМП, управление скоростью приема-передачи – УСП, управление типом сигнально-кодовых конструкций – УТСКК, управление несущей частотой – УЧ, управление полосой – УП.

Таблица 2. Матрица рисков принятия неоптимальных решений

Table 2. Non-optimal decision risk matrix

	Отклонение $Y$ от max $Y$ по каждому $F_j$ , ед.			
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
$q$	0,4	0,3	0,2	0,1
$E_i$				
1	0,115	0,202	0,297	0,000
2	0,037	0,118	0,168	0,093
3	0,049	0,065	0,090	0,175
4	0,004	0,000	0,000	0,209
5	0,043	0,098	0,144	0,086
6	0,000	0,004	0,064	0,131

Таблица 3. Показатель эффективности  $Y$  работы системы в различных ситуациях при передаче цифровых данных

Table 3. Indicator of the efficiency of the system  $Y$  in different situations when transmitting digital data

$E_i$	Мощность, Вт	Скорость, бит/с	Тип СКК (вид модуляции)	Частота, МГц	Полоса, кГц	$Y$ , ед.			
						$q$			
						$F_1$ 0,4	$F_2$ 0,3	$F_3$ 0,2	$F_4$ 0,1
1	1 10 100	75	SSB ЧВС	3...30 ВЧ (HF)	3,1, 20	1,135	1,188	0,966	0,264
2	1 10 100	200 400 800 1200 2400	OFDM ЧВС SSB ЧТ	3...30 ВЧ (HF)	3,1 20 3,1 3,1	1,750	0,920	0,440	0,533
3	1 3 10	2400 9600	4FSK QPSK QPSK	30...300 ОВЧ (VHF)	6,25/12,5 6,25/12,5 25/50/100/150	1,647	0,923	0,460	0,346
4	1 3 10	2400 9600	4FSK QPSK QPSK	300...3000 УВЧ (UHF)	6,25/12,5 6,25/12,5 25/50/100/150 12,5	1,357	1,047	0,419	0,875

Таблица 4. Результаты расчета показателя эффективности  $Y$  симплекс-методом во втором ( $E_2$ ) режиме работы при полном заряде батарей

Table 4. The results of calculating the efficiency indicator  $Y$  by the simplex method in  $E_2$  operating mode with a full battery charge

Коэффициенты целевой функции					Потребность	Запасы	Остаток	–
c1	c2	c3	c4	c5				
0,323	0,188	0,257	0,120	0,112				
УМП	УСП	УТСКК	УЧ	УП				
0,591	0,149	0,119	0,062	0,079	<b>0,901</b>	1,000	0,099	Энергия
0,057	0,362	0,328	0,058	0,194	<b>0,848</b>	1,000	0,152	Вычисления
0,190	0,374	0,291	0,069	0,076	<b>1,000</b>	1,000	0,000	Время
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$Y$			
0,000	0,000	0,000	<b>14,555</b>	0,000	1,750			

Система начинает работать во втором ( $E_2$ ) режиме как наиболее эффективном согласно показателю эффективности  $Y = 1,750$  (см. табл. 3, фактор  $F_1$ ). В данном режиме ресурсы будут задействованы на управление частотой (рис. 2).

При достижении уровня заряда около 50 % система остается во втором режиме работы (см. табл. 3, фактор  $F_2$ ). В данном режиме работы ресурсы будут задействованы на управление скоростью типом сигнально-кодовых конструкций и управление несущей частотой (рис. 3).

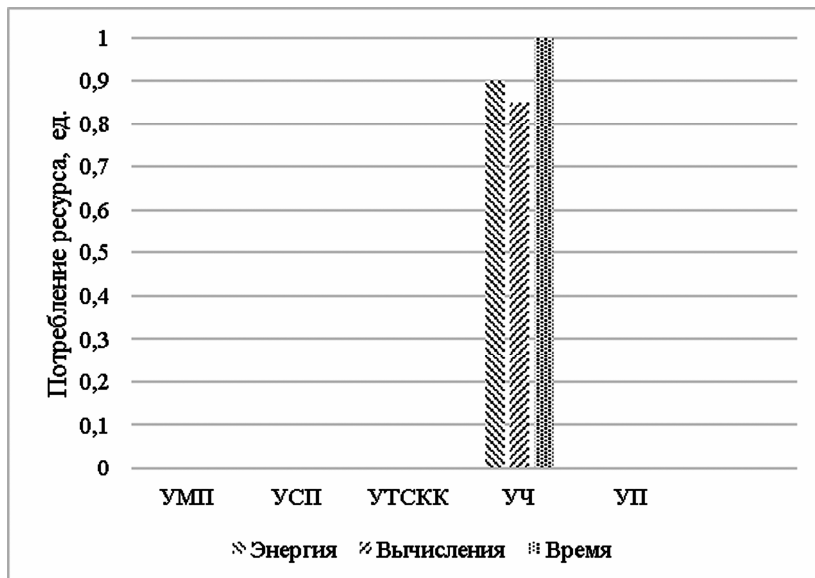


Рис. 2. Результаты расчета затрат ресурсов на управляющие параметры системы в режиме работы  $E_2$  при полном заряде батарей: УМП – управление мощностью приемопередающей аппаратуры; УСП – управление скоростью приема-передачи; УТСКК – управление типом сигнально-кодовых конструкций; УЧ – управление несущей частотой; УП – управление полосой

Fig. 2. The results of calculating the amount of resources for the control parameters of the system in  $E_2$  mode with a full battery charge: УМП - power control of the transceiver equipment; УСП - control of the speed of reception and transmission; УТСКК - control of the type of signal-code structures; УЧ - control of the carrier frequency; УП - band management

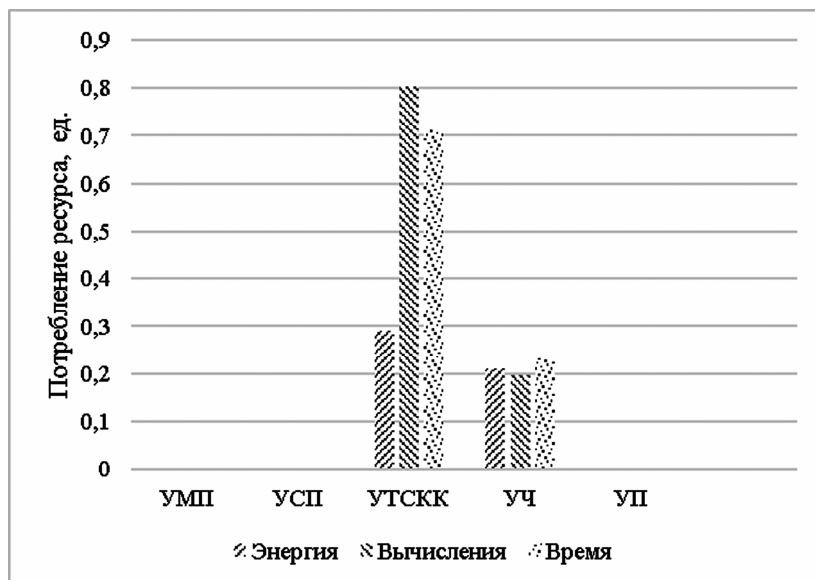


Рис. 3. Результаты расчета затрат ресурсов на управляющие параметры системы в режиме цифровой передачи данных  $E_2$  при половинном заряде батарей

Fig. 3. The results of calculating the amount of resources for the control parameters of the system in  $E_2$  mode with a half battery charge

При достижении низкого уровня заряда батарей система переходит в режим работы  $E_3$  как обладающий наибольшим показателем эффективности (табл. 3, фактор  $F_3$ ). В данном режиме работы также все ресурсы будут направлены на формирование сигнально-кодовых конструкций.

Когда отпущенное на сеанс время подходит к концу, система должна переключиться в режим работы  $E_4$  как наиболее эффективный – обладающий наибольшим значением показателя эффективности (табл. 3, фактор  $F_4$ ). В данном режиме работы все ресурсы будут направлены на повышение мощности передачи сообщений.

В табл. 5 приведем результаты расчета остаточной емкости батарей в каждый момент времени  $t$  сеанса связи.

Таблица 5. Результаты расчета потребления емкости батарей в управляемом режиме при цифровой передаче данных

Table 5. The results of calculating the consumption of battery capacity in a controlled mode of digital data transmission

$t$ , ед.	$E_i$	$Y$ , ед.	Запас энергии, ед.	Затраты энергии, ед.
0	2	1,750	1,00	0,09
0,1	2	1,750	0,91	0,09
0,2	2	1,750	0,82	0,09
0,3	2	1,750	0,73	0,09
0,4	2	1,750	0,64	0,09
0,5	2	1,750	0,55	0,09
0,6	2'	1,034	0,46	0,12
0,7	2'	1,034	0,34	0,12
0,8	3	0,455	0,22	0,15
0,9	4	0,486	0,06	0,04
1	4	0,486	0,02	0,04

$E_2'$  – режим работы  $E_2$  в условиях недостатка энергетического ресурса.

Как видно из табл. 3 и 5, система может функционировать более эффективно (режим  $E_0$ ) в различных внешних ситуациях  $F_j$  при управлении режимами работы  $E_i$ . Для сравнения приведем расчетные значения емкости батарей для оставшихся режимов работы (табл. 6).

По данным табл. 6 видно, что для функционирования системы на уровне  $max Y$  в ряде случаев необходим запас энергии в 1,4 раза больше имеющегося в наличии.

В табл. 7 приведены результаты расчета затрат энергии для обеспечения функционирования системы в управляемом режиме  $E_0$  передачи цифровых данных.

Таблица 6. Сравнение результатов расчета потребления емкости батарей в режимах цифровой передачи данных  $E_j$

Table 6. Comparison of the results of calculating battery consumption in digital data transmission modes  $E_j$

$t$ , ед.	$Y$ , ед.	Расчетный запас энергии в рассматриваемых режимах, ед.				
		$E_0$	$E_2$	$E_2'$	$E_3$	$E_4$
0	1,75	1,00	1,00	1,19	1,42	0,44
0,1	1,75	0,91	0,91	1,07	1,27	0,40
0,2	1,75	0,82	0,82	0,95	1,12	0,36
0,3	1,75	0,73	0,73	0,83	0,97	0,32
0,4	1,75	0,64	0,64	0,70	0,82	0,27
0,5	1,75	0,55	0,55	0,58	0,67	0,23
0,6	1,03	0,46	0,46	0,46	0,52	0,19
0,7	1,03	0,34	0,37	0,34	0,37	0,15
0,8	0,46	0,22	0,28	0,22	0,22	0,11
0,9	0,49	0,06	0,19	0,09	0,06	0,06
1	0,49	0,02	0,10	-0,03	-0,09	0,02

$E_2'$  – режим работы  $E_2$  при половинной емкости источника энергии.

Таблица 7. Сравнение результатов расчета скорости расхода емкости батарей в режимах цифровой передачи данных

Table 7. Comparison of the results of calculating the rate of consumption of battery capacity in digital data transmission modes

$t$ , ед.	Затраты энергии в рассматриваемых режимах, ед.				
	$E_0$	$E_2$	$E_2'$	$E_3$	$E_4$
0	0,09	0,09	–	–	–
0,1	0,09	0,09			
0,2	0,09	0,09			
0,3	0,09	0,09			
0,4	0,09	0,09			
0,5	0,09	0,09	0,12	0,15	–
0,6	0,12	–			
0,7	0,12	–	–	–	0,04
0,8	0,15	–			
0,9	0,04	–	–	–	0,04
1	0,04	–	–	–	0,04

$E_2'$  – режим работы  $E_2$  при половинной емкости источника энергии.

На рис. 4 видно, что при управляемом режиме энергетические ресурсы расходуются в большей мере, когда заканчивается фонд времени на передачу информации.

На рис. 5 видим, что показатель эффективности системы снижается во времени, но действия по управлению режимами позволяют продлить время эффективного функционирования системы.

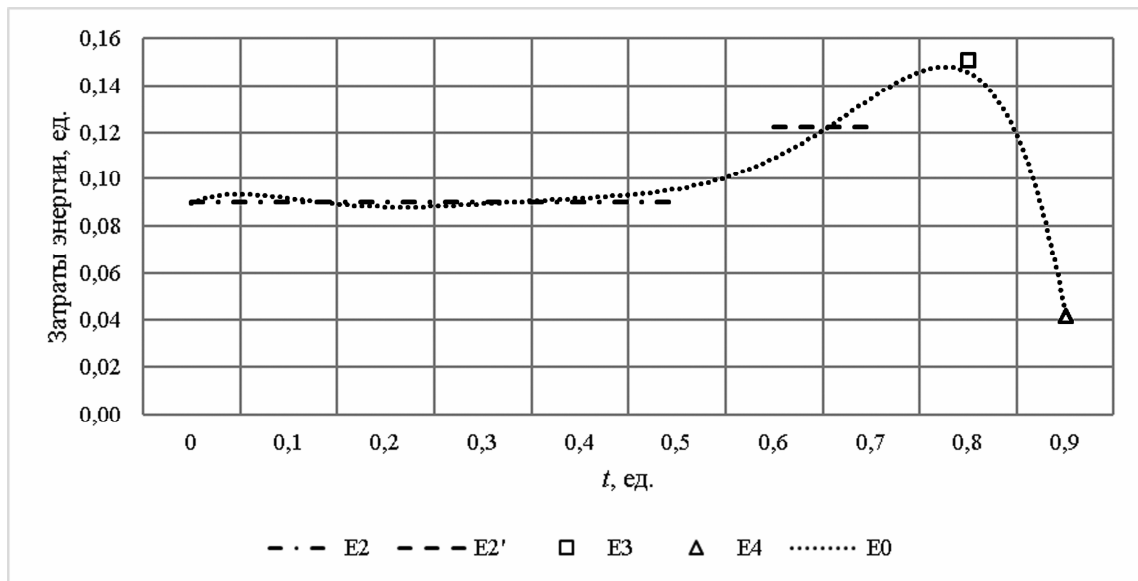


Рис. 4. Результаты расчета скорости расхода энергетического ресурса при управлении режимами цифровой передачи данных

Fig. 4. The results of calculating the rate of consumption of energy resource when managing the operating digital data transmission modes

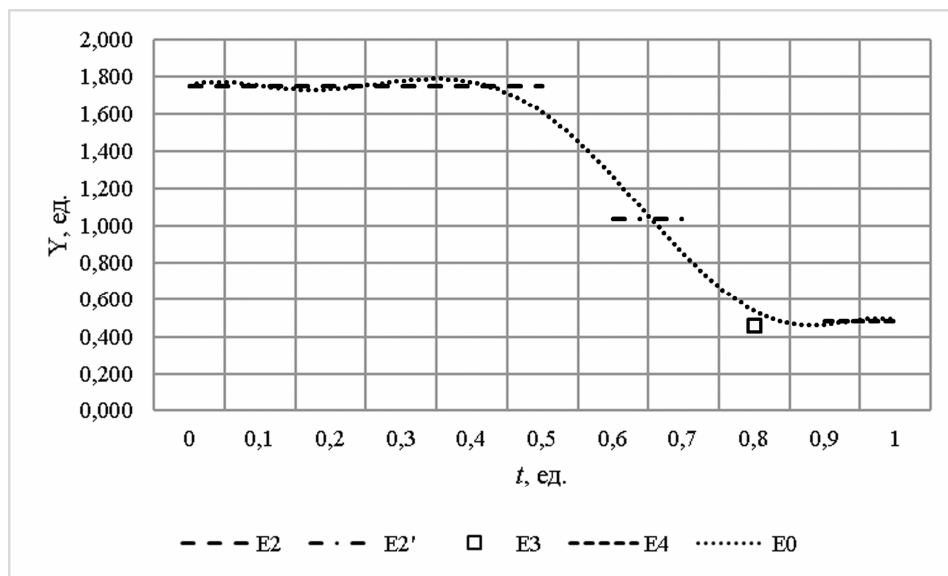


Рис. 5. Результаты расчета показатель эффективности  $Y$  при управлении режимами цифровой передачи данных

Fig. 5. The results of calculating the efficiency indicator  $Y$  by system's data transmission modes management

Приведем результаты аналогичного расчета оптимального режима функционирования системы при передаче цифровой речи (табл. 8).

Максимальным показателем эффективности обладает режим  $E_2$  (табл. 8, фактор  $F_1$ ), поэтому система начинает работать во втором режиме. В этом режиме ресурсы расходуются на управление частотой и мощностью приема-передачи (рис. 6).

При достижении половинного заряда батарей система переходит в третий режим работы, ко-

гда все ресурсы направлены на управление несущей частотой (рис. 7).

При достижении низкого уровня заряда батарей система переходит в режим работы  $E_1$ . Все усилия будут направлены на формирование сигнально-кодовых конструкций речевых сообщений.

При окончании выделенного на сеанс времени система должна переключиться во второй режим работы  $E_2$ . В данном режиме работы все усилия будут направлены на повышение мощности передачи речевых сообщений.



Таблица 8. Показатель эффективности  $Y$  работы системы в различных ситуациях при передаче цифровой речи

Table 8. Indicator of the efficiency of the system  $Y$  in different situations when transmitting digital speech

$E_i$	Мощность, Вт	Скорость, бит/сек.	Тип СКК (вид модуляции)	Частота, МГц	Полоса, кГц	$Y$ , ед.			
						$q$			
						$F_1$ 0,4	$F_2$ 0,3	$F_3$ 0,2	$F_4$ 0,1
1	1	2400	OFDM (SSB)	3...30	3,1	1,15	0,96	0,51	0,30
	10	1200	QPSK	ВЧ (HF)	3,1				
	100	800							
2	1	2400	4FSK	30...300	6,25/12,5	1,77	1,08	0,43	0,42
	3	1200	QPSK	ОВЧ (VHF)	6,25/12,5				
	10	800	QPSK		25/50/100/150				
3	1	2400	4FSK	300...3000	6,25/12,5	1,75	1,15	0,46	0,35
	3	1200	QPSK	УВЧ (UHF)	6,25/12,5				
	10	800	QPSK		25/50/100/150 12,5				

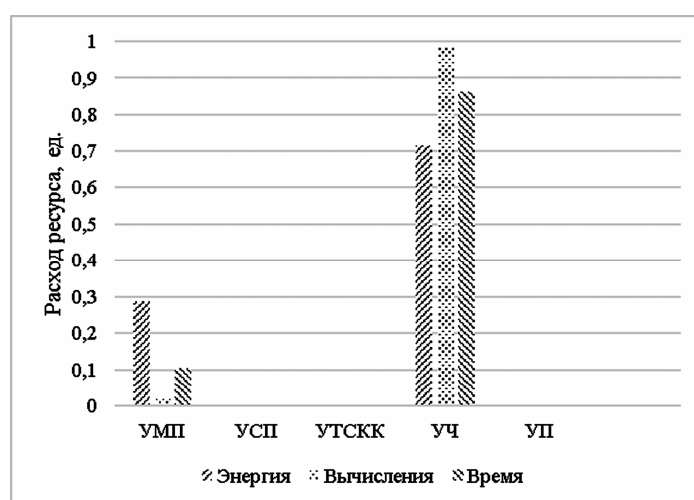


Рис. 6. Результаты расчета затрат ресурсов на управляющие параметры системы в режиме цифровой речи  $E_2$  при полном заряде батарей

Fig. 6. The results of calculating the amount of resources for the control parameters of the system in digital speech  $E_2$  mode with a full battery charge

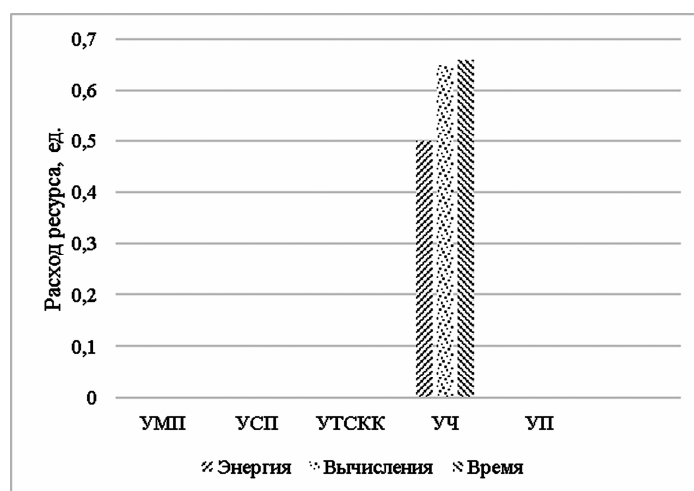


Рис. 7. Результаты расчета затрат ресурсов на управляющие параметры системы в режиме цифровой речи  $E_3$  при половинном заряде батарей

Fig. 7. The results of calculating the amount of resources for the control parameters of the system in digital speech  $E_3$  mode with a half battery charge

В табл. 9 приведены расчеты потребления емкости батарей в управляемом режиме по передаче цифровой речи; табл. 10 содержит сравнение режимов передачи цифровой речи по потреблению емкости батарей; табл. 11 – скорости расхода емкости батарей в управляемом режиме цифровой передачи речи.

**Таблица 9. Результаты расчета потребления емкости батарей в управляемом режиме при передаче цифровой речи**

**Table 9. The results of calculating the consumption of battery capacity in a controlled mode of digital speech**

$t$ , ед.	$E_i$	$Y$ , ед.	Запас энергии, ед.	Затраты энергии, ед.
0	2	1,77	1,00	0,10
0,1	2	1,77	0,90	0,10
0,2	2	1,77	0,79	0,10
0,3	2	1,77	0,69	0,10
0,4	2	1,77	0,59	0,10
0,5	3	1,15	0,48	0,07
0,6	3	1,15	0,41	0,07
0,7	3	1,15	0,33	0,07
0,8	3	1,15	0,26	0,07
0,9	1	0,51	0,19	0,06
1	2'	0,42	0,13	0,03

$E_2'$  – режим работы  $E_2$  при значительном дефиците времени.

**Таблица 10. Сравнение результатов расчета потребления емкости батарей в предложенных режимах цифровой передачи речи**

**Table 10. Comparison of the results of calculating the consumption of battery capacity in the proposed modes of digital voice transmission**

$t$ , ед.	$Y$ , ед.	Запас энергии в рассматриваемых режимах, ед.				
		$E_0$	$E_2$	$E_3$	$E_1$	$E_2'$
0	1,77	1,00	1,00	0,86	0,69	0,47
0,1	1,77	0,90	0,90	0,78	0,64	0,44
0,2	1,77	0,79	0,79	0,71	0,58	0,40
0,3	1,77	0,69	0,69	0,63	0,52	0,37
0,4	1,77	0,59	0,59	0,56	0,47	0,34
0,5	1,15	0,48	0,48	0,48	0,41	0,30
0,6	1,15	0,41	0,38	0,41	0,35	0,27
0,7	1,15	0,33	0,28	0,33	0,30	0,23
0,8	1,15	0,26	0,17	0,26	0,24	0,20
0,9	0,51	0,19	0,07	0,19	0,19	0,16
1	0,42	0,13	-0,03	0,11	0,13	0,13

$E_2'$  – режим работы  $E_2$  при значительном дефиците времени.

Как видно из табл. 10, режимы передачи цифровой речи включаются, так что остается запас емкости батарей на момент окончания сеанса связи даже при условии достижения  $\max Y$ .

**Таблица 11. Результаты расчета скорости расхода емкости батарей в управляемом режиме**

**Table 11. The results of calculating the rate of consumption of battery capacity in a controlled mode of digital speech**

$t$ , ед.	Затраты энергии в рассматриваемых режимах, ед.				
	$E_0$	$E_2$	$E_3$	$E_1$	$E_2'$
0	0,10	0,10			
0,1	0,10	0,10			
0,2	0,10	0,10			
0,3	0,10	0,10			
0,4	0,10	0,10			
0,5	0,07	0,10	0,07		
0,6	0,07		0,07		
0,7	0,07		0,07		
0,8	0,07		0,07		
0,9	0,06		0,07	0,06	
1	0,03			0,06	0,03
1,1	0,03				0,03

$E_2'$  – режим работы  $E_2$  при значительном дефиците времени.

По данным табл. 11 построен график расхода энергетического ресурса (рис. 8). Из графика видно, что режим  $E_0$  постепенно снижает расход энергетического ресурса.

По данным табл. 10 построен график показателя эффективности  $Y$  в управляемом режиме (рис. 9). Из рис. 9 видно, что показатель эффективности сохраняется на высоком уровне более половины длительности сеанса связи.

#### Заключение и выводы

Представлен разработанный алгоритм управления параметрами работы когнитивной радиосистемы. Определены целевые функции эффективности работы радиосистемы в аналоговых и цифровых режимах передачи речи данных. Для повышения эффективности радиосистемы проведена оценка расхода ресурсов при передаче информации при заданном критерии эффективности радиосистемы – достоверная передача информации.

Для аналоговых режимов передачи речи (см. табл. 1) приведены результаты расчета критериев эффективности, полученные симплекс-методом на основе целевой функции, а также минимаксный критерий, критерии Сэвиджа и Байеса – Лапласа. Каждый из них может быть применен для оптимизации работы когнитивной радиосистемы при соответствующих сценариях работы. Для критерия Сэвиджа представлен расчет матрицы рисков принятия неоптимального решения по выбору режима работы.

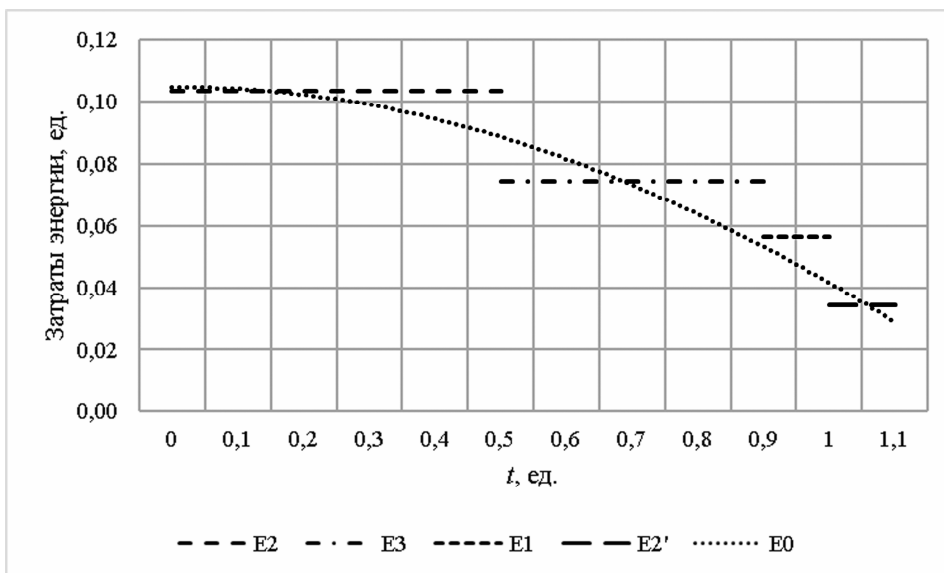


Рис. 8. Результаты расчета скорости расхода энергетического ресурса при управлении цифровыми режимами передачи данных

Fig. 8. The results of calculating the rate of consumption of energy resource when managing the operating modes of digital speech

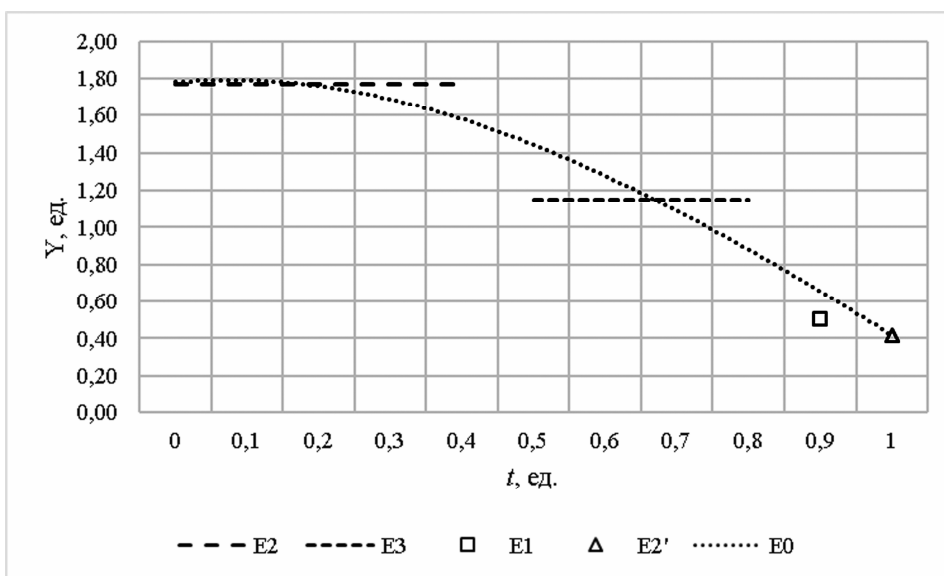


Рис. 9. Результаты расчета показатель эффективности Y при управлении цифровыми режимами передачи речи  
 Fig. 9. The results of calculating the efficiency indicator Y by system's modes management of digital speech transmission

Для цифровых режимов передачи данных и речи представлен пример выбора оптимального режима работы на основе критерия эффективности, полученного симплекс-методом. При передаче информации в цифровых режимах передачи данных для достижения максимальной эффективности передачи информации радиосистеме при полном заряде батареи следует начинать работу в режиме  $E_2$ . При работе в таком режиме (фактически режим без ограничений) повысить эффективность передачи возможно управляя частотой, так как управление осталь-

ными параметрами не будет давать существенного улучшения радиообмена. При разряде батареи на 50 % возникает ограничение в энергетическом ресурсе, поэтому оптимально продолжить работу в режиме  $E_2$ , однако для повышения эффективности обмена информацией требуется управлять сигнально-кодовыми конструкциями. Это связано с тем, что более помехоустойчивые СКК дадут больший прирост эффективности, чем управление частотами передачи. При низком уровне заряда батарей радиосистеме требуется перейти в режим  $E_3$ .

Для повышения эффективности передачи информации в этом режиме также целесообразно продолжить управление сигнально-кодowymi конструкциями. При продолжении работы во временных ограничениях требуется перейти в режим работы  $E_4$  и направить ресурсы радиосистемы на управление мощностью передачи, тем самым повышая эффективность за счет повышения энергетики радиолинии. При этом следует отметить, что работа при сильных энергетических и временных ограничениях приводит к резкому повышению расхода энергетических ресурсов и снижению эффективности работы системы.

При передаче речи в цифровых режимах при полном заряде батареи следует начинать работу радиосистемы в режиме  $E_2$ . Для получения максимальной эффективности в этих условиях требуется управлять частотой передачи. При работе с наполовину разряженной батареей для повышения эффективности требуется перейти в режим  $E_3$  и управлять скоростью передачи. Это связано с тем, что при заданных ограничениях помехоустойчивость цифровых режимов достаточна, и для повышения устойчивости обмена информацией требуется лишь снизить скорость передачи информации. При разряженной батарее требуется перейти в режим  $E_1$ , и для повышения эффективности требуется управление сигнально-кодowymi конструкциями. При наступлении временных ограничений радиосистеме требуется перейти в режим работы  $E_2$ , и для повышения достоверности приема-передачи ресурсы необходимо потратить на управление мощностью передачи.

В целом, рассматривая работу радиосистемы в цифровых режимах, можно сделать вывод, что при наступлении энергетических и временных ограничений скорость расхода ресурсов уменьшается, а эффективность работы системы снижается.

Рассматривая эффективность работы радиосистемы в режимах передачи речи и данных, можно сделать вывод, что при наступлении временных ограничений эффективно управление мощностью передатчика (увеличение энергетики радиолинии). Однако при работе в цифровых режимах передачи речи снижение эффективности происходит значительно медленнее, чем при использовании режимов передачи данных. Анализ работы радиосистемы при энергетических ограничениях также показывает более медленное снижение эффективности в цифровых режимах передачи речи. Кроме того, в речевых режимах значительно снижается скорость

расхода ресурсов, в то время как в режимах передачи данных она резко возрастает.

Таким образом, на примере анализа передачи речи и данных в цифровых режимах показан принцип выбора оптимальных параметров работы радиосистемы с использованием предложенного алгоритма управления параметрами.

#### Библиографические ссылки

1. Rupali B.P., Kulat K.D., Gandhi A.S. SDR Based Energy Detection Spectrum Sensing in Cognitive Radio for Real Time Video Transmission. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2018, Article ID 2424305, 10 p. doi: org/10.1155/2018/2424305.
2. Tanveer A., Khan Z.U., Malik A.N., Qureshi I.M., Lee S. Flexible Queuing Model for Number of Active Users in Cognitive Radio Network Environment. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018. doi.org/10.1155/2018/8349486.
3. Halloush R., Musa A., Salameh H.B., Halloush M., Almalkawi I. A resource sharing platform for resource-constrained software defined cognitive radio networks. *Fifth International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, Barcelona, 2018, pp. 32-39. doi: 10.1109/SDS.2018.8370419.
4. Fabio Principe, Giacomo Bacci, Filippo Giannetti, Marco Luise. Software-Defined Radio Technologies for GNSS Receivers: A Tutorial Approach to a Simple Design and Implementation. *International Journal of Navigation and Observation*, 2011, Article ID 979815, 27 p. doi: org/10.1155/2011/979815.
5. Van Tam Nguyen, Frederic Villain, Yann Le Guillou. Cognitive Radio RF: Overview and Challenges. *VLSI Design*, 2012, Article ID 716476, 13 p. doi: org/10.1155/2012/716476.
6. Хворенков В. В., Батулин И. С., Савельев А. В. Автоматизированное рабочее место главного конструктора радиоэлектронных средств на основе теории многоагентных систем // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 4. С. 77–81. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-4-77-81.
7. Использование технологии «интернет вещей» для создания автоматизированных систем контроля и тестирования радиосистем / А. Н. Копысов, В. В. Хворенков, А. А. Зыкин, М. М. Марков, А. А. Богданов // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 12. С. 71–76. DOI: 10.18127/j20700784-201812-15.
8. Растрин Л. А. Адаптация сложных систем. Рига : Зинатне, 1981. 375 с.
9. Анализ иерархической модели автоматизированной системы управления параметрами радиолиний когнитивной радиосистемы / Г. А. Благодатский, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков, И. С. Батулин // Научно-технические проблемы в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10, № 6. С. 51–67. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10187.
10. Blagodatsky G.A., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Baturin I.S. Research and development of hier-

archical models of automated control systems for the parameters of the radio line of the cognitive radio system // Сб. тр. V Междунар. конф. молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, 21–24 мая 2019 г.). Самара : Новая техника, 2019. С. 1–11.

11. Канторович Л. В. Математико-экономические работы. Новосибирск : Наука, 2011. 760 с.

12. Dantzig G.B. and Thapa M.N. Linear programming. *Springer-Verlag*, 2003, 448 p. doi: 10.1007/b97283.

13. Мюшик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. М. : Мир, 1990. 208 с.

14. Triantaphyllou, Evangelos. Multi-criteria decision making methods: a comparative study. *Applied optimization*. 44. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publ., 2000, 320 p. doi: 10.1007/978-1-4757-3157-6.

15. Brockmann Erich N., Anthony William P. Tacit knowledge and strategic decision making. *Group & Organization Management*, December 2016, 27, pp. 436-455. doi: 10.1177/1059601102238356.

16. Jonathan Rosenhead, Martin Elton, Shiv K. Gupta. Robustness and Optimality as Criteria for Strategic Decisions. *Operational Research Quarterly*, 1972, 23, pp. 413-431.

17. Saaty Thomas L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process. *Review of the Royal Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, Series A: Mathematics (RACSAM)*, 2008, vol. 102, no. 2, pp. 251-318. doi: 10.1007/bf03191825.

18. Liu Z., Huang M., Tang Z., Liu T. Selection and Evaluation of Assembly Dimension Chain Based on Analytical Hierarchy Process. *Proc. of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics: Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2000, vol. 588. Singapore, Springer. DOI: 10.1007/978-981-32-9437-0\_89.

19. Zhidyayev A., Zagidullin Yu.T., Kopysov A., Khvorenkov V., Klimov I. Development of signal detection algorithm for multi-rate HF telecommunication system. *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016) (May 12-14, 2016)*. IEEE, 2016, pp. 866-869. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491834.

20. Kopysov A., Klimov I., Zagidullin Yu., Muravev V., Muraveva O. The use of polarization characteristic of ionosphere for data communications. *Proc. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. IEEE, 2014, pp. 1-2. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986926.

## References

1. Rupali B.P., Kulat K.D., Gandhi A.S. SDR Based Energy Detection Spectrum Sensing in Cognitive Radio for Real Time Video Transmission. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2018, Article ID 2424305, 10 p. doi: org/10.1155/2018/2424305.

2. Tanveer A., Khan Z.U., Malik A.N., Qureshi I.M., Lee S. Flexible Queuing Model for Number of Active

Users in Cognitive Radio Network Environment. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018. doi.org/10.1155/2018/8349486.

3. Halloush R., Musa A., Salameh H.B., Halloush M., Almalkawi I. A resource sharing platform for resource-constrained software defined cognitive radio networks. *Fifth International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, Barcelona, 2018, pp. 32-39. doi: 10.1109/SDS.2018.8370419.

4. Fabio Principe, Giacomo Bacci, Filippo Giannetti, Marco Luise. Software-Defined Radio Technologies for GNSS Receivers: A Tutorial Approach to a Simple Design and Implementation. *International Journal of Navigation and Observation*, 2011, Article ID 979815, 27 p. doi: org/10.1155/2011/979815.

5. Van Tam Nguyen, Frederic Villain, Yann Le Guillou. Cognitive Radio RF: Overview and Challenges. *VLSI Design*, 2012, Article ID 716476, 13 p. doi: org/10.1155/2012/716476.

6. Khvorenkov V.V., Baturin I.S., Savel'ev A.V. [Automated workplace of the chief designer of electronic equipment based on the theory of multi-agent systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 77-81 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2017-4-77-81.

7. Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Zykin A.A., Markov M.M., Bogdanov A.A. [Using the Internet of Things technology to create automated systems for monitoring and testing radio systems]. *Journal Achievements of Modern Radio electronics*, 2018, no. 12, pp. 71-76 (in Russ.). DOI: 10.18127/j20700784-201812-15.

8. Rastrigin L.A. *Adaptacija slozhnyh system* [Adaptation of complex systems]. Riga, Zinatne Publ., 1981, 375 p. (in Russ.)

9. Blagodatsky G.A., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Baturin I.S. [Analysis of the hierarchical model of the automated control system of the parameters of the radio lines of the cognitive radio system]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 51-67. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10187 (in Russ.).

10. Blagodatsky G.A., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Baturin I.S. [Research and development of hierarchical models of automated control systems for the parameters of the radio line of the cognitive radiosystem]. *Materialy V Mezhdunarodnoi konferentsii i molo-dezhnoi shkoly "Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii" (Samara, 21-24 maya 2019)* [Proc. International Conference and Youth School "Information Technologies and Nanotechnologies" (Samara, May 21-24, 2019)]. Samara, Novaya Tekhnika Publ., 2019, pp. 1-11.

11. Kantorovich L.V. *Matematiko-jekonomicheskie raboty* [Mathematical and economic work]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2011, 760 p. (in Russ.)

12. Dantzig G.B. and Thapa M.N. Linear programming. *Springer-Verlag*, 2003, 448 p. doi: 10.1007/b97283.

13. Mjushik Je., Mjuller P. *Metody prinjatija tehnikeskikh reshenij* [Technological decision making methods]. Moscow, Mir Publ., 1990, 208 p. (in Russ.)

14. Triantaphyllou, Evangelos. Multi-criteria decision making methods: a comparative study. *Applied optimization*

tion. 44. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publ., 2000, 320 p. doi: 10.1007/978-1-4757-3157-6.

15. Brockmann Erich N., Anthony William P. Tacit knowledge and strategic decision making. *Group & Organization Management*, December 2016, 27, pp. 436-455. doi: 10.1177/1059601102238356.

16. Jonathan Rosenhead, Martin Elton, Shiv K. Gupta. Robustness and Optimality as Criteria for Strategic Decisions. *Operational Research Quarterly*, 1972, 23, pp. 413-431.

17. Saaty Thomas L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process. *Review of the Royal Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, Series A: Mathematics (RACSAM)*, 2008, vol. 102, no. 2, pp. 251-318. doi: 10.1007/bf03191825.

18. Liu Z., Huang M., Tang Z., Liu T. Selection and Evaluation of Assembly Dimension Chain Based on Analytical Hierarchy Process. *Proc. of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics: Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2000, vol. 588. Singapore, Springer. DOI: 10.1007/978-981-32-9437-0\_89.

19. Zhidyayev A., Zagidullin Yu.T., Kopysov A., Khvorenkov V., Klimov I. Development of signal detection algorithm for multi-rate HF telecommunication system. *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016) (May 12-14, 2016)*. IEEE, 2016, pp. 866-869. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491834.

20. Kopysov A., Klimov I., Zagidullin Yu., Muravev V., Muraveva O. The use of polarization characteristic of ionosphere for data communications. *Proc. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. IEEE, 2014, pp. 1-2. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986926.

### Cognitive Radio System Operational Control Algorithm

G.A. Blagodatsky, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.A. Kopysov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I.S. Baturin, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The paper presents an algorithm for optimal control of the cognitive radio communication system. The algorithm is based on the application of decision-making criteria in a dynamic environment. The basis of the algorithm is to solve the optimization problem of maximizing the coefficient of efficiency of the system in a given mode. Thus, the cognitive radio system can choose the most optimal mode of operation, both in a specific situation  $T_j$  and choose the general preferred  $E_i$  in the integrated assessment of the external situation.*

*For efficient information transfer, with a significantly discharged battery, the radio system needs to switch to E3 (power 1, 3, 10 W; speed 2400, 9600 bps; CCM type (modulation type) 4FSK, QPSK, QPSK; frequency 30 ... 300 VHF MHz; Band 6.25 / 12.5; 6.25 / 12.5; 25/50/100/150 kHz) mode. To increase the efficiency of information transfer in this mode, it is also advisable to continue the control of signal-code constructions. When continuing to work in time constraints, it is necessary to switch to the E4 (power 1, 3, 10 W; speed 2400, 9600 bps; CCM type (modulation type) 4FSK, QPSK, QPSK; Frequency 300 ... 3000 UHF MHz; Band 6.25 / 12.5; 6.25 / 12.5; 25/50/100/150 12.5 kHz) operating mode and direct the resources of the radio system to control the transmission power, thereby increasing the efficiency by increasing the energy of the radio line. To transmit the digital speech with a discharged battery, it is necessary to switch to E1 (power 1, 10, 100 W; speed 2400, 1200, 800 bit / s; CCM type (modulation type) OFDM (SSB), QPSK; Frequency 3 ... 30, HF MHz; 3.1 kHz band) mode and to increase the efficiency; and the control of signal-code structures is required here. When time constraints occur, the radio system needs to switch to E2 (power 1, 3, 10 W; speed 2400, 1200, 800 bit / s; CCM type (modulation type) 4FSK, QPSK, QPSK; Frequency 30 ... 300, VHF (VHF) MHz; Band 6.25 / 12.5; 6.25 / 12.5; 25/50/100/150 kHz) mode of operation and to increase the reliability of reception and transmission; and the resources are required to be spent on transmit power control.*

*Considering the efficiency of the radio system in analog and digital modes, we can conclude that, when time constraints occur, it is effective to control the transmitter power (increase the energy of the radio line). However, when working in digital modes, the decrease in efficiency is much slower than when using analog modes. Analysis of operation within radio power limitations also shows a slower decrease in the efficiency with digital modes; moreover, the resource consumption rate is significantly reduced in digital modes, while it is sharply increased in analog modes.*

**Keywords:** cognitive, radio, optimal control, efficiency, decision making, stochastic environment.

### Образец цитирования

Алгоритм управления режимами работы системы когнитивного радио / Г. А. Благодатский, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков, И. С. Батурин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 93–106. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-93-106.

### For Citation

Blagodatskii G.A., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Baturin I.S. [Cognitive Radio System Operational Control Algorithm]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 93-106 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-93-106.