

УДК 621.37/39.029.3

Н. Г. Стародубцев, Ф. В. Фомовский, В. В. Невлюдова, И. А. Малая, Н. П. Демская

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБОРА ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

**Предметом** исследования являются методы и модели извлечения информации о процессах жизненного цикла радиоэлектронных средств на этапах проектирования, производства и эксплуатации. **Целью** является разработка основ теории целостного мониторинга ЖЦ РЭС на этапах их проектирования, производства и эксплуатации, в частности развитие информационных моделей для мониторинга показателей жизненного цикла в производстве РЭС. Достижение поставленной цели обеспечивается путем решения таких **задач**: исследование и разработка методологии решения задач выбора информативных признаков, характеризующих состояние ЖЦ РЭС; выбор информативных признаков, характеризующих состояние процессов ЖЦ РЭС; идентификация состояния процессов ЖЦ РЭС. Для решения поставленных задач использовались общенаучные **методы**: основные положения функционального анализа, неравновесной термодинамики, оценивания и предсказания случайных процессов, методы оптимизации, распознавания образов. Получены следующие **результаты**. Разработаны методы решения задач выбора информативных признаков для мониторинга ЖЦ РЭС путем классификации состояний РЭС и процессов ЖЦ в пространстве признаков, каждый из которых имеет определенную значимость, что позволило найти комплексный критерий и формализовать процедуры выбора. При недостаточном для корректной классификации количестве априорных данных предложены эвристические методы выбора по критериям использования базовых прототипов и информационных приоритетов. **Выводы**. Представлено решение задачи математического моделирования функций эффективности процессов жизненного цикла радиоэлектронных средств и выбора информативных признаков для мониторинга ЖЦ РЭС, путем классификации состояний РЭС и процессов жизненного цикла в пространстве признаков, каждый из которых имеет определенную значимость, которое позволило найти комплексный критерий и формализовать процедуры выбора. Решение задачи идентификации ЖЦ РЭС предусматривает создание правил, которые определяют состояние радиоэлектронных средств. Рассматриваются случаи недостаточного для корректной классификации количества априорных данных, предложены приближенные методы выбора по критериям использования базовых прототипов и информационных приоритетов. Применение функции для деления множеств в пространстве параметров и формулирования правил, которые регулируют соответствие между наборами параметров и значениями показателей эффективности, дают возможность обеспечить идентификацию состояний в процессе мониторинга жизненного цикла радиоэлектронных средств.

**Ключевые слова:** информативные признаки, идентификация состояний РЭС, мониторинг жизненного цикла.

### Введение

Функциональная задача выбора информативных признаков для мониторинга жизненного цикла радиоэлектронных средств (ЖЦ РЭС) может решаться в рамках методологии разработки словаря признаков в системах классификации и распознавания состояния объектов [1–4].

В рабочем словаре следует использовать лишь признаки, которые, с одной стороны, наиболее информативны и, с другой стороны, могут быть доступными для измерения.

Определение словаря признаков в условиях ограничений на стоимость создания технических средств наблюдений имеет особенности. Если признаки объектов обозначить через  $\delta_j$ ,  $j=1,2,\dots,N$ , то каждый объект в  $N$ -мерном пространстве признаков может быть представлен в виде вектора  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , координаты которого характеризуют свойства объектов.

Для определения меры близости или подобия между объектами в  $N$ -мерном векторном пространстве признаков вводится метрика. Можно пользоваться евклидовой метрикой

$$d^2(w_{pk}, w_{ql}) = \sum_{j=1}^N (x_{pk}^j - x_{ql}^j)^2, \quad (1)$$

$$p, q = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, k_p; l = 1, 2, \dots, k_q,$$

где  $x_{pk}^j$  – есть значения  $j$ -го признака  $k$ -го объекта  $p$ -го класса, т.е. объекта  $q$ -го класса, т.е. объекта  $w_{ql}$ .

В качестве меры близости между объектами данного класса  $\Omega_p$ ,  $p = 1, 2, \dots, m$ , будем использовать величину [5]

$$S(\Omega_p) = \sqrt{\frac{2}{k_p} \frac{1}{k_{p-1}} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_p} d^2(w_{pk}, w_{pl})}, \quad (2)$$

которая имеет смысл среднеквадратичного разброса класса или среднеквадратичного разброса объектов внутри класса  $\Omega_p$ , в качестве меры близости между объектами данной пары классов  $\Omega_p$  и  $\Omega_q$ ,  $p, q = 1, \dots, m$ , – величину

$$R(\Omega_p, \Omega_q) = \sqrt{\frac{1}{k_p k_q} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_q} d^2(w_{pk}, w_{ql})}, \quad (3)$$

которая имеет смысл среднеквадратичного разброса объектов классов  $\Omega_p$  и  $\Omega_q$ .

Совокупность признаков объектов, используемых в рабочем словаре, можно описать  $N$ -мерным вектором  $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ , компоненты

которого принимают значения 1 или 0 в зависимости от того, имеется или отсутствует возможность определения соответствующего признака объекта.

С учетом  $\alpha$  квадрат расстояния между двумя объектами  $w_{pk}$  и  $w_{ql}$

$$d^2(w_{pk}, w_{ql}) = \sum_{j=1}^N \alpha_j (x_{pk}^{(j)} - x_{ql}^{(j)})^2. \quad (4)$$

Следовательно, среднеквадратичные разбросы класса  $\Omega_p$  и объектов классов  $\Omega_p$  и  $\Omega_q$  могут быть записаны соответственно так

$$S(\Omega_p) = \sqrt{\frac{2}{k_p} \frac{1}{k_p - 1} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_p} \sum_{j=1}^N \alpha_j (x_{pk}^{(j)} - x_{pl}^{(j)})^2} \quad (5)$$

$$R(\Omega_p, \Omega_q) = \sqrt{\frac{1}{k_p} \frac{1}{k_q} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_q} \sum_{j=1}^N \alpha_j (x_{pk}^{(j)} - x_{pl}^{(j)})^2} \quad (6)$$

Можно исходить из того, что затраты на использование признака пропорциональны их информативности, т.е. тому количеству признаков объектов, которые с их помощью могут быть определены. Это предположение (оставляя в стороне вопрос о точностных характеристиках средств наблюдений) носит достаточно общий характер.

Таким образом, затраты на использование признаков

$$C = C(\alpha_1, \dots, \alpha_N) = \sum_{j=1}^N C_j \alpha_j, \quad (7)$$

где  $C_j$  – затраты на определение  $j$ -го признака.

В качестве показателя качества или эффективности проектируемой системы распознавания рассмотрим функционал, зависящий в общем случае от функции  $S(\Omega_p)$ ,  $R(\Omega_p, \Omega_q)$  решающего правила  $L(w, \{w_g\})$

$$I = F[S(\Omega_p); R(\Omega_p, \Omega_q); L(w, \{w_g\})]. \quad (8)$$

Пусть величина  $L(w, \{w_g\})$  представляет собой меру близости между распознаваемым объектом  $w$  и классом  $\Omega_g$ ,  $g = 1, 2, \dots, m$ , заданным своими объектами  $\{w_g\}$ . В качестве этой меры близости рассмотрим величину

$$L(w, \{w_g\}) = \sqrt{\frac{1}{k_g} \sum_{g=1}^{k_g} d^2(w, w_g)}, \quad (9)$$

которая является среднеквадратичным расстоянием между объектом  $w$  и объектами класса  $\Omega_p$ .

Решающее правило состоит в следующем  $w \in \Omega_g$ , если

$$L(w, \{w_g\}) = \text{extr } L(w, \{w_i\}). \quad (10)$$

Важно отметить, что уменьшение величины  $S(\Omega_p)$ , "сжатие" объектов, принадлежащих каждому данному классу, при одновременном увеличении  $R(\Omega_p, \Omega_q)$ , т.е. "разведение" объектов, принадлежащих разным классам, обеспечивает, в конечном счете, улучшение качества системы распознавания. Поэтому повышение эффективности системы будем связывать с достижением экстремума функционала  $I$ .

### Постановка задачи исследования

Постановка задачи исследования может быть сформулирована следующим образом.

Пусть все множество объектов подразделено на классы  $\Omega_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , априорно описаны все классы на языке признаков  $x_j$ ,  $j = 1, \dots, N$ , и на создание технических средств наблюдений выделены средства, величина которых равна  $C_0$ . Требуется, не превышая выделенной суммы средств, построить рабочий словарь признаков, обеспечивающий максимально возможную эффективность системы.

Таким образом, задача сводится к нахождению условного экстремума функционала вида (8), т.е. к определению  $A$  реализующего  $\text{extr } I = \text{extr } F [S(\Omega_p); R(\Omega_p, \Omega_q); L(w, \{w_g\})]$

$$C = \sum_{j=1}^N C_j \alpha_j \leq C_0. \quad (11)$$

Возможные виды функционала. Рассмотрим некоторые частные виды функционала (11). Если требуемая эффективность системы распознавания может быть достигнута за счет более компактного расположения объектов каждого класса при соблюдении некоторых условий относительно величины  $R(\Omega_p, \Omega_q)$ , то задача сводится к нахождению

$$\min_{\alpha} \max_{i=1, \dots, m} [S(\Omega_i)] \quad (12)$$

при

$$\sum_{j=1}^N C_j \alpha_j \leq C_0 \text{ и } R(\Omega_p, \Omega_q) \geq R_0^{(pq)}. \quad (13)$$

Если требуемая эффективность системы может быть достигнута за счет "удаления" друг от друга объектов, принадлежащих разным классам при соблюдении некоторых условий относительно величины  $S(\Omega_i)$ ,  $i = 1, \dots, m$ , то задача сводится к нахождению

$$\max_{\alpha} \min_{p, q=1, \dots, m} [R(\Omega_p, \Omega_q)] \quad (14)$$

при

$$\sum_{j=1}^N C_j \alpha_j \leq C_0 \text{ и } S(\Omega_i) \leq S_0^i. \quad (15)$$

Если надлежащая эффективность системы может быть достигнута только за счет увеличения отношения расстояний между классами к среднеквадратичным разбросам объектов внутри классов, то задача сводится к нахождению

$$\max_{\alpha} \min_{p,q=1,\dots,m} \left[ \frac{R^2(\Omega_p, \Omega_q)}{S(\Omega_p)S(\Omega_q)} \right] \quad (16)$$

при

$$\sum_{j=1}^N C_j \alpha_j \leq C_0. \quad (17)$$

### Решение задачи выбора информативных признаков, характеризующих состояние процессов ЖЦ РЭС

Рассмотренная выше задача – обобщение задачи нелинейного программирования. Условия оптимальности для нее можно сформулировать следующим образом: для того чтобы вектор  $C^0$  являлся оптимальной стратегией, необходимо, чтобы существовали скаляр  $\beta \geq 0$  и вектор  $\mu = \{\mu_1, \dots, \mu_n\}$  такие, что

$$\left. \begin{aligned} \left[ \sum_{r=1}^n \mu_r \rho_r^j \right] \frac{dP_j(C_j^0)}{dC_j} &= \beta, \quad j=1, \dots, N_p; \\ \sum_{j=1}^{N_p} C_j^0 &= C_0; \\ \sum_{r=1}^n \mu_r &= 1, \mu_r = 0, \text{ если } \sum_{j=1}^{N_p} \rho_r^j P_j(C_j^0) > W(C^0). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Введение в рассмотрение скаляра  $\beta$  и вектора  $\mu$  увеличивает количество неизвестных  $C_j^0$ ,  $\mu_r$  и  $\beta$  до величины  $N_p + n + 1$ . Однако число уравнений равно числу неизвестных, так как для любого  $r$  либо  $\mu_r = 0$ , либо

$$\sum_{j=1}^{N_p} \rho_r^j P_j(C_j^0) = W(C^0). \quad (19)$$

Таким образом, решение системы уравнений (18) дает возможность определить состав признаков рабочего словаря и оптимальное распределение затрат на создание средств наблюдений системы распознавания в условиях предположения о зависимости  $P_j = P_j(C_j)$  и ограничений на общую стоимость этих средств.

При ограничениях, связанных с возможностью использования всего словаря признаков, возникает задача выбора ограниченного списка (вплоть до

2–3 признаков). Здесь можно ориентироваться на расположение отдельных компонент вектора признаков относительно границ области работоспособности объектов мониторинга.

Так как при граничном значении параметра  $y_{zp}^j$ , конец вектора  $X$  должен находиться на границе области работоспособности, необходимо чтобы выполнялось равенство

$$x_{zp}^j = a_{ij}^i y_{zp}^j. \quad (20)$$

При статистическом оценивании дополнительным критерием для выбора может служить коэффициент корреляции  $r_{ij}$  между параметрами. Так как максимальный коэффициент корреляции обеспечивает максимальное количество информации

$$J(y^j) = H(y^i) - H\left(\frac{y^j}{y^i}\right), \quad (21)$$

содержащейся в параметре  $y^i$ . Здесь  $H(y^i)$  – начальная энтропия;  $H\left(\frac{y^j}{y^i}\right)$  – условная энтропия объекта после измерения параметра  $y^j$ .

Использование бинарных корреляционных алгоритмов дает возможность при участии лица принимающего решение (ЛПР) формализовать и автоматизировать процессы ввода, обработки и распознавания получаемого изображения.

### Идентификация состояния процессов ЖЦ РЭС

Решение задачи идентификации ЖЦ РЭС, предполагает создание правил, определяющих состояния РЭС. Признаками, позволяющими различать состояния объекта мониторинга, являются показатели эффективности, которые для выделенного состояния будут иметь заданное или экстремальное значение. Для идентификации в процессе мониторинга состояния РЭС по наблюдаемым параметрам необходимо выделить множество параметров, на котором значение показателей эффективности будут иметь заданные или экстремальные значения.

Объекты наблюдений – параметры и характеристики РЭС можно рассматривать, как точки векторных и функциональных пространств. Для всевозможных пар точек на множестве  $Q$ , существует бинарное отношение сравнительной эффективности: точка  $x$  эффективнее  $y$  тогда и только тогда, когда  $(x, y \in \Phi)$  или в иной записи  $x \Phi y$ . При обеспечении ЖЦ РЭС решается задача выделения ядра – множества максимальных элементов из  $X$  по бинарному отношению  $\Phi: X^* = \text{Max}(Q, \Phi)$ . Предполагается, что решение задачи существует, т.е. множество  $X^*$  не пусто. Во многих задачах можно считать, что решение – множество  $X^*$  – состоит из одного элемента, а отношения между элементами устанавливается с

помощью функционалов  $\Lambda(x)$ . Например, точка  $x$  эффективнее  $y$  тогда, когда  $\Lambda(x) < \Lambda(y)$  или  $\Lambda(x) > \Lambda(y)$ . Можно показать, что в задачах определения эффективных точек  $x_0 \in X^*$  при наличии ограничений  $x \in Q_1$ , функционал  $f = \lambda \Lambda'(x_0)$ , где  $\Lambda'(x_0)$  – производная Фреше в точке  $x_0$ , является опорным функционалом к  $Q_1$ , в точке  $x_0$  (т.е.  $(f, x_0) < (f, x)$  для всех  $x \in Q_1$ ).

Таким образом, задача анализа результатов наблюдений в процессе мониторинга сводится к определению опорных функционалов в точках наблюдения, что дает возможность оценить отклонение наблюдаемых точек от эффективных.

В терминах функционального анализа [6,7]: пусть  $Q$  – некоторое множество в линейном топологическом пространстве  $E$ ,  $E'$  – сопряженное пространство,  $x_0 \in Q$  – крайняя точка  $Q$ ,  $K_b$  – конус возможных направлений в  $Q$  в точке  $x_0$ ,  $K_k$  – конус касательных направлений для  $Q$  в  $x_0$ . Если множество линейных функционалов, опорных к  $Q$  в точке  $x_0$ , обозначить через  $Q^*$ , то  $Q^* = \{f \in E', f(x) \geq f(x_0)\}$  для всех  $x \in Q$ , т.е. опорный функционал и крайняя точка  $x_0 \in Q$  дают возможность выделять множество  $Q$ . Можно показать, что, если  $Q$  – замкнутое выпуклое множество, то  $Q^* = K_k^*$ , т.е. образует конусы, образованные множеством линейных функционалов, опорных к  $Q$  в  $x_0$ . Конус касательных направлений может определяться производными Фреше от операторов (выпуклых функций), которые связывают множества параметров и показателей эффективности.

Рассмотрим методы нахождения  $K^*$  для способов задания  $K$  с помощью различных функционалов.

Вариант 1. Для конуса направлений убывания  $K_0$ . Функционал  $\Lambda(x)$  в линейном пространстве  $E$  имеет производную  $\Lambda'(x_0, g)$  в точке  $x_0$  по направлению  $g$ , т.е. существует

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow +0} \frac{\Lambda(x_0 + \varepsilon g) - \Lambda(x_0)}{\varepsilon} = f(x_0, g). \quad (22)$$

$\Lambda(x)$  удовлетворяет условию Липшица в окрестности  $x_0$  (для некоторого  $\varepsilon_0 > 0$  будет  $|\Lambda(x_1) - \Lambda(x_2)| \leq \beta \|x_1 - x_2\|$  при всех  $(\|x_1 - x_0\| \leq \varepsilon_0, \|x_2 - x_0\| \leq \varepsilon_0)$ ) и  $\Lambda'(x_0, g) < 0$ , тогда  $\Lambda(x)$  – правильно убывающий в  $x_0$ , и  $K = \{g : \Lambda'(x_0, g) < 0\}$ .

Вариант 2. Для конуса возможных направлений. В случае множества, которое не задается с помощью функционала. Если  $Q$  – выпуклое множество, тогда множество направления убывания  $K_b$  в точке  $x_0$  имеет вид  $K_b = \{\lambda(Q - x_0), \lambda > 0\}$ ,

(т.е.  $K_b = \{g : g = \lambda(x - x_0), x \in Q, \lambda > 0\}$ ).

Вариант 3. Для конуса возможных направлений. В случае определения  $Q$  с помощью аффинных множеств:  $E = E_1 \times E_2$ ,  $E_1, E_2$  – линейные топологические пространства, в  $E_2$  определяется множество признаков эффективности,  $D$  – линейный оператор из  $E_1$  в  $E_2$ ,  $K = \{x \in E, x = (x_1, x_2) : Dx_1 = x_2\}$ ,  $K^* = \{f \in E', f = (f_1, f_2) : f_1 = -D^* f_2\}$ , а в качестве опорной разделяющей функции можно использовать

$$f(x) = (-D^* f_2, x_1) + (f_2, x_2) = -(f_2, D^* x_1 - x_2).$$

Применение этой функции для разделения множеств в пространстве параметров и формулировке правил, устанавливающих соответствие между множествами параметров и значениями показателей эффективности, может обеспечить идентификацию состояний в процессе мониторинга ЖЦ РЭС.

Вариант 4. Для конуса касательных направлений.  $P(x)$  – оператор из  $E_1$  в  $E_2$ , дифференцируемый в окрестности точки  $x_0$ ,  $P'(x)$  непрерывна в окрестности  $x_0$ , а  $P'(x_0)$  отображает  $E_1$  на все  $E_2$  (т.е. линейное уравнение  $P'(x_0)g = b$  имеет решение  $g$  для всякого  $b \in E_2$ ), совокупность касательных направлений  $K$  к множеству  $Q = \{x : P(x) = 0\}$  в точке  $x_0$  есть подпространство  $K = \{g : P'(x_0)g = 0\}$ .

Вариант 5. Для конуса касательных направлений – типичный случай. Пусть  $x \in R^m$ ,  $Q = \{x : G_i(x) = 0, i = 1, \dots, n\}$ , где  $G_i(x)$  – функции, непрерывно дифференцируемые в окрестности точки  $x_0$ ,  $G_i(x_0) = 0, i = 1, \dots, n$ , и векторы  $G_i'(x_0)$ , линейно независимы. Тогда  $K = \{g \in R^m : (G_i'(x_0), g) = 0, i = 1, \dots, n\}$ . Здесь  $E_1 = R^m, E_2 = R^n, P(x) = (C_1(x), \dots, G_n(x)), P'(x_0)$  – матрица  $m \times n$ ,  $i$ -й столбец которой равен  $G_i'(x_0)$ .

Вариант 6. В процессе мониторинга нужно определить обеспечивается ли эффективное значение функции – характеристики РЭС  $w(z)$ , в простейшем случае экстремальное значение дифференцируемой целевой функции одного переменного, для чего необходимо проверить равна ли производная нулю при наблюдаемом значении параметра. Для многомерных целевых функций и их аргументов эта задача может рассматриваться в рамках теории множеств и функционального анализа.

Формализация в задаче наблюдения оптимальной настройки, как одного из процессов ЖЦ РЭС, заключается в том, что необходимо оценить оптимальность функции процесса настройки  $v(z) \in M$  где  $z$  – параметр, определяющий числовое значение требуемой характеристики  $w(z)$  объекта настройки для обеспечения такой фазовой траектории, которая обеспечивает равенство  $w(0) = c, w(Z) = d$  и экстремальное значения интегрального функционала

$\int_0^z \Phi(w(z), v(z), z) dz$ , при наличии связи, задаваемой

дифференциальным уравнением  $\frac{dw(z)}{dz} = \phi(w(z), v(z), z)$ .

В задачах, требующих максимального соответствия оптимизируемой характеристики и некоторой желаемой, находит применение критерий минимума среднего квадратического отклонения

$$W_2(X) = \overline{(Y(X) - Y^*)^2}, \quad (23)$$

где  $Y^*$  – желаемое или требуемое по техническому заданию значение характеристики.

Для характеристики, заданной дискретным набором точек, целевая функция

$$W_2(X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i (Y(X, p_i) - Y_i^*)^2, \quad (24)$$

где  $N$  – число точек дискретизации независимой переменной  $p$ ;

$Y(X, p_i)$  – значение оптимизируемой характеристики в  $i$ -ой точке интервала дискретизации;

$\gamma_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го значения оптимизируемой характеристики, отражающей важность  $i$ -ой точки по сравнению с другими (как правило,  $0 < \gamma_i < 1$ ).

В некоторых задачах оптимизации необходимо обеспечить превышение или не превышение оптимизируемой характеристикой некоторого заданного уровня. Эти критерии оптимальности реализуются следующими функциями:

- для обеспечения превышения заданного уровня

$$W_3(X) = \begin{cases} 0 & \text{при } Y(X) \geq Y_H^*, \\ (Y - Y(X))^2 & \text{при } Y(X) < Y_H^*; \end{cases} \quad (25)$$

- для обеспечения не превышения заданного уровня

$$W_4(X) = \begin{cases} 0 & \text{при } Y(X) \leq Y_B^*, \\ (Y(X) - Y_B^*)^2 & \text{при } Y(X) > Y_B^*, \end{cases} \quad (26)$$

где  $Y_H^*$ ,  $Y_B^*$  – нижняя и верхняя границы допустимой области для характеристики  $Y(X)$ .

Если необходимо, чтобы оптимизируемая характеристика проходила в некоторой допустимой зоне (коридоре), используют комбинацию двух предыдущих критериев оптимальности

$$W(X) = \begin{cases} 0 & \text{при } Y_H^* \leq Y(X) \leq Y_B^*, \\ (Y(X) - Y_B^*)^2 & \text{при } Y(X) > Y_B^*, \\ (Y_H^* - Y(X))^2 & \text{при } Y(X) < Y_H^*. \end{cases} \quad (27)$$

В тех случаях, когда требуется реализовать лишь форму кривой, игнорируя при этом постоянное смещение по вертикали, используется критерий сдвига

$$W_6(X) = \sum_{i=1}^N \gamma_i (Y_i^* - Y(X, p_i) - Y_{cp})^2, \quad (28)$$

$$\text{где } Y_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i^* - Y(X, p_i)).$$

От вида целевой функции зависят важные характеристики вычислительного процесса и, в первую очередь, сходимость процесса оптимизации. Знаки производных целевой функции по управляемым параметрам не остаются постоянными во всей допустимой области, последнее обстоятельство ведет к их овражному характеру (например, задачи схемотехнического проектирования), что приводит к большим вычислительным затратам и требует особого внимания к выбору метода оптимизации.

Другой особенностью целевых функций является то, что они обычно многоэкстремальные и наряду с глобальным минимумом имеются локальные минимумы.

Общий класс задач идентификации множества эффективных решений составляют задачи многокритериальной оптимизации. Они характеризуются тем, что бинарное отношение на множестве альтернатив, из которого следует осуществить выбор, связано с набором показателей – критериев, образующих векторный критерий эффективности. Это бинарное отношение порождается различными способами. Так, если

$$W(x) = (W^1(x), \dots, W^m(x)) \quad (29)$$

векторный критерий на множестве  $X$ , то бинарное отношение может быть отношением Парето или отношением Слейтера. В других случаях бинарное отношение на  $X$  задается системой предпочтений ЛПР. Предполагается, что основным источником информации является человек, располагающий сведениями, достаточными для принятия (единственного) решения. Выявление системы предпочтений ЛПР представляет собой одну из главных проблем при решении многокритериальных задач. Обычно процедуры выявления предпочтений ЛПР строятся на языке векторных оценок альтернатив, т.е. на основе значений векторного критерия.

Принятие решений ЛПР способствует отысканию множества Парето или множества Слейтера по критерию (29), здесь методологические проблемы в значительной степени теряют остроту, поскольку уже четко определено понятия решения многокритериальной задачи. Остаются трудности вычислительного характера, типичные для экстремальных задач.

Методы решения задачи поиска эффективных (оптимальных по Парето) и слабоэффективных (оптимальных по Слейтеру) альтернатив интенсивно развиваются [8–10], имеются реализованные на ЭВМ программы, пакеты программ и программные системы.

Большой "наглядностью" обладают алгоритмы, основанные на скаляризации – сведении к параметрическому семейству задач скалярной оптимизации.

Из выпуклого анализа следует, что если  $x_* \in P(X, W)$  – эффективная точка в линейной многокритериальной задаче (с линейными критериями в многограннике  $X$ ), то существует вектор  $\Lambda$

$$\lambda \in \Lambda = \left\{ \lambda \in E^m / \lambda_i > 0, i = 1, \dots, m; \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \right\},$$

такой, что  $x_*$  является решением задачи линейного и нелинейного программирования

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i W^i(x) \rightarrow \max_{x \in X}. \quad (30)$$

Обратно, для любого  $\lambda \in \Lambda$  решение задачи (30) является эффективной точкой.

Отсюда вытекает, что для отыскания  $P(X, W)$  можно использовать хорошо разработанные методы линейного и нелинейного программирования и использовать результат как эффективное множество в процессе отображении ситуации, связанной с расположением множества реальных значений параметров признаков, относительно множества их эффективных значений при реализации мониторинга ЖЦ РЭС.

#### Список литературы

1. Бирюков С. И. Оптимизация. Элементы теории. Москва: МЗ-Пресс, 2003. 246 с.
2. Васильев В. И. Распознающие системы. Справочник. Киев: Наукова думка, 1983. 422 с.
3. Невлюдов И. Ш., Андрусевич А. А., Донсков А. Н. Разработка и применение методов мониторинга процессов проектирования, производства и эксплуатации ЖЦ РЭС // Научно-технический журнал "АСУ и Приборы автоматизи". 2011. Вып. 156. С. 82-89.
4. Kulak D., Guiney E. Use Cases. New York: Addison Wesley, 2003. 272 p.
5. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания : учеб. пособие для вузов. М.: "Вышш. школа", 1977. 222 с.
6. Александров П. С. Введение в теорию множеств и общую топологию. Москва: Наука, 1977. 368 с.
7. Канторович Л. В., Акилов Г. П. Функциональный анализ в нормированных пространствах. Москва: Наука, 1984. 368 с.
8. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач : монография. Изд. 2-е, испр. и доп. Москва: Физматлит, 2007. 255 с.
9. Вишнеков А. В., Иванова Е. М., Сафонова И. Е. Методы принятия решений в распределенных CAD/CAM/CAE системах. Методы комплексной оценки вариантов в условиях определенности исходной информации // Качество и ИПИ(CALS)-технологии. 2006. № 3 (11). С. 35-40.
10. Кожевников А. М. Методы CALS-технологии при оптимизации выбора электрических и тепловых режимов электрорадио изделий // ИТПП. 2000. № 3. С.23-26.

#### References

1. Birjukov, S. (2003), *Optimization. Elements of the theory*, MZ-Press, Moscow, 246 p.
2. Vasil'ev, V. (1983), *Recognized by the system. Directory*, Naukova dumka, Kiev, 422 p.
3. Nevljudov, I., Andrusевич, A., Donskov, A., (2011), "Development and application of methods for monitoring the design, manufacture and operation lifecycle of electronic means", *Scientific and technical journal "Automated Control Systems and Automation Devices"* [Razrobotka i primeneniye metodov monitoringa processov proektirovaniya, proizvodstva i jekspluatatsii ZhC RJeS, Nauchno-tehnicheskij zhurnal "ASU i Pribory avtomatiki"], Vol. 156, pp. 82-89.
4. Kulak, D., Guiney, E. (2003), *Use Cases*, Addison Wesley, New York, 272 p.
5. Gorelik, A., Skripkin, V. (1977), *Methods of recognition*, Higher education school, Moscow, 222 p.
6. Aleksandrov, P. (1977), *Introduction to set theory and general topology*, Nauka, Moscow, 368 p.
7. Kantorovich, L., Akilov, G. (1984), *Functional analysis in normed spaces*, Nauka, Moscow, 368 p.
8. Podinovskij, V., Nogin, V. (2007), *Pareto-optimal solutions of multiobjective problems: monograph* [Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nyh zadach: monografija], Fizmatlit, Moscow, 255 p.
9. Vishnekov, A., Ivanova, E., Safonova, I. (2006), "Methods of decision-making in distributed CAD/CAM/CAE systems. Methods for a comprehensive assessment of options under the definition of initial in-formation", *Quality and FPI (CAL)S technology* [Metody prinjatija reshenij v raspredelennyh CAD/SAM/CAE sistemah. Metody kompleksnoj ocenki variantov v usloviyah opredelennosti ishodnoj informacii, Kachestvo i IPI(CALS)-tehnologii], Vol. 3 (11), pp. 35-40.

#### Выводы

Авторами разработаны методы решения задач выбора информативных признаков для мониторинга ЖЦ РЭС, путем классификации состояний РЭС и процессов ЖЦ в пространстве признаков, каждый и из которых имеет определенную значимость, что позволило найти комплексный критерий и формализовать процедуры выбора информативных признаков. При недостаточном для корректной классификации количестве априорных данных предложены эвристические методы выбора информативных признаков по критериям использования базовых прототипов и информационных приоритетов.

Исследованы методы решения задач выбора информативных признаков процессов ЖЦ РЭС, что даёт возможность обеспечить выполнение требований в части представления данных и доступа к ним на принципах наглядного, соответствующего методам визуального анализа, содержательного описания процессов ЖЦ РЭС для реализации процедур принятия решения в человеко-машинных системах обеспечения ЖЦ.

10. Kozhevnikov, A. (2000), "Methods of CALS-technologies for optimizing the choice of electric and thermal modes of electrical radio products" ["CALS-tehnologii pri optimizacii vybora jelektricheskikh i teplovykh rezhimov jelektroradio izdelij"], *ITPP*, Vol. 3, pp. 23-26.

Поступила 14.06.2017

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Стародубцев Микола Григорович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, м. Харків, Україна; e-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua, ORCID: 0000-0001-7856-5771.

**Стародубцев Николай Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, г. Харьков, Украина; e-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua, ORCID: 0000-0001-7856-5771.

**Strodubtsev Nikolai** – Candidate of Sciences (Engineering), Assistant Professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, Assistant Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua, ORCID: 0000-0001-7856-5771.

**Фомовський Фелікс Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, доцент кафедри електронних апаратів, м. Кременчук, Україна; e-mail: 2fill.fo@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3989-3689.

**Фомовский Феликс Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского, доцент кафедры электронных аппаратов, г. Кременчуг, Украина; e-mail: 2fill.fo@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3989-3689.

**Fomovsky Felix** – Candidate of Sciences (Engineering), Assistant Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor of the Department of Electronic Devices, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: 2fill.fo@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3989-3689.

**Невлюдова Вікторія Валеріївна** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, м. Харків, Україна; e-mail: d\_tapr@nure.ua, ORCID: 0000-0002-1158-5089.

**Невлюдова Виктория Валерьевна** – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, г. Харьков, Украина; e-mail: d\_tapr@nure.ua, ORCID: 0000-0002-1158-5089.

**Nevliudova Viktoriia** – Candidate of Sciences (Engineering), Kharkiv National University of Radioelectronics, Senior Lecturer of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: d\_tapr@nure.ua, ORCID: 0000-0002-1158-5089.

**Мала Інна Олександрівна** – ДП "Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості", інженер, м. Харків, Україна; e-mail: yuzhgar\_nio@i.ua; ORCID: 0000-0002-4307-8102.

**Малая Инна Александровна** – ГП "Южный государственный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт авиационной промышленности", инженер, г. Харьков, Украина; e-mail: yuzhgar\_nio@i.ua; ORCID: 0000-0002-4307-8102.

**Malaya Inna** – SE "Southern National Design & Research Institute of Aerospace Industries", Engineer, Kharkiv, Ukraine; e-mail: yuzhgar\_nio@i.ua; ORCID: 0000-0002-4307-8102.

**Демська Наталія Павлівна** – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, м. Харків, Україна; e-mail: demska.nataliia@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9931-9964.

**Демская Наталья Павловна** – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, г. Харьков, Украина; e-mail: demska.nataliia@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9931-9964.

**Demska Nataliia** – Kharkiv National University of Radioelectronics, Senior Lecturer of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: demska.nataliia@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9931-9964.

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИБОРУ ІНФОРМАТИВНИХ ОЗНАК ДЛЯ АНАЛІЗУ СТАНУ ПРОЦЕСІВ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

**Предметом** дослідження є методи та моделі здобування інформації про процеси життєвого циклу радіоелектронних засобів (ЖЦ РЕЗ) на етапах проектування, виробництва і експлуатації. **Метою** є розробка основ теорії цілісного моніторингу ЖЦ РЕЗ на етапах їх проектування, виробництва і експлуатації, зокрема розвиток інформаційних моделей для моніторингу показників життєвого циклу у виробництві РЕЗ. Досягнення поставленої мети забезпечується в роботі шляхом вирішення таких **задач**: дослідження і розробка методології розв'язання задач вибору інформативних ознак, що характеризують стан ЖЦ РЕЗ; вибір інформативних ознак, що характеризують стан процесів ЖЦ РЕЗ; ідентифікація стану процесів ЖЦ РЕЗ. Для вирішення поставлених задач використовувалися загальнонаукові **методи**: основні положення функціонального аналізу, нерівноважної термодинаміки, оцінювання і прогнозування випадкових процесів, методи оптимізації і розпізнавання образів. Отримано такі **результати**. Розроблено методи розв'язання задач вибору інформативних ознак для моніторингу ЖЦ РЕЗ шляхом класифікації станів РЕЗ і процесів ЖЦ у просторі ознак, кожний з яких має певну значимість, що дозволило знайти комплексний критерій і формалізувати процедури вибору. При недостатній для коректної класифікації кількості апріорних даних запропоновано евристичні методи вибору за критеріями використання базових прототипів і інформаційних пріоритетів. **Висновки**. Наводиться рішення задачі математичного моделювання функцій ефективності процесів життєвого

циклу радіоелектронних засобів і вибору інформативних ознак для моніторингу ЖЦ РЕЗ, шляхом класифікації станів РЕЗ і процесів життєвого циклу в просторі ознак, кожен і з яких має певну значимість, що дозволило знайти комплексний критерій і формалізувати процедури вибору. Рішення задачі ідентифікації ЖЦ РЕЗ передбачає створення правил, що визначають стан радіоелектронних засобів. Розглядаються випадки недостатньої для коректної класифікації кількості апріорних даних, запропоновано наближені методи вибору за критеріями використання базових прототипів і інформаційних пріоритетів. Застосування функції для поділу множин в просторі параметрів і формулювання правил, що регулюють відповідність між наборами параметрів і значеннями показників ефективності, дають можливість забезпечити ідентифікацію станів в процесі моніторингу життєвого циклу електронних засобів.

**Ключові слова:** інформативні ознаки, ідентифікація станів РЕЗ, моніторинг життєвого циклу.

## MATHEMATICAL MODELLING OF SELECTING INFORMATIVE FEATURES FOR ANALYZING THE LIFE CYCLE PROCESSES OF RADIO-ELECTRONIC MEANS

The **subject** of the study are methods and models for extracting information about the processes of the life cycle of radio electronic means at the design, production and operation stages. The **goal** is to develop the fundamentals of the theory of holistic monitoring of the life cycle of radio electronic means at the stages of their design, production and operation, in particular the development of information models for monitoring life cycle indicators in the production of radio electronic means. The attainment of this goal is achieved by solving such **problems**: research and development of a methodology for solving the problems of selecting informative features characterizing the state of the life cycle of radio electronic means; choice of informative features characterizing the state of the life cycle processes of radio electronic means; identification of the state of the life cycle processes of radio electronic means. To solve these problems, general scientific **methods** were used: the main provisions of functional analysis, nonequilibrium thermodynamics, estimation and prediction of random processes, optimization methods, pattern recognition. The following **results** are obtained. Methods for solving the problems of selecting informative features for monitoring the life cycle of radioelectronic facilities are developed by classifying the states of radioelectronic means and the processes of LC in the space of characteristics, each of which has a certain significance, which allowed finding a complex criterion and formalizing the selection procedures. When the number of a priori data is insufficient for a correct classification, heuristic methods of selection according to the criteria for using basic prototypes and information priorities are proposed. **Conclusions.** The solution of the problem of mathematical modeling of the efficiency functions of the processes of the life cycle of radioelectronic facilities and the choice of informative features for monitoring the life cycle of radio electronic means is presented, by classifying the states of radioelectronic means and life cycle processes in the space of characteristics, each of which has a certain significance, which allowed finding a complex criterion and formalize the selection procedure. The solution of the task of identifying the life cycle of radio electronic means involves the creation of rules that determine the state of radio electronic means. The cases of insufficient for a correct classification of the number of a priori data are considered, approximate methods of selection according to criteria for using basic prototypes and information priorities are proposed. The application of a function for dividing sets in parameter space and formulating rules that regulate the correspondence between sets of parameters and values of performance indicators makes it possible to provide identification of states in the process of monitoring the life cycle of radio electronic means.

**Keywords:** informative signs, identification of conditions of radio electronic equipment, monitoring of the life cycle.

### *Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

Стародубцев М. Г., Фомовський Ф. В., Невлюдова В. В., Мала І. О., Демська Н. П. Математичне моделювання вибору інформативних ознак для аналізу стану процесів життєвого циклу радіоелектронних засобів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Харків. 2017. № 1 (1). С. 82–89.

Стародубцев М. Г., Фомовский Ф. В., Невлюдова В. В., Мала И. О., Демска Н. П. Математическое моделирование выбора информативных признаков для анализа состояния процессов жизненного цикла радиоэлектронных средств. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Харків. 2017. № 1 (1). С. 82–89.

Starodubtsev N., Fomovsky F., Nevludova V., Malaja I., Demska N. **Mathematical modelling of selecting informative features for analyzing the life cycle processes of radio-electronic means.** *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. Kharkiv. 2017. No. 1 (1). P. 82–89.