

К. т. н. В. А. БОЛТЕНКОВ, В. И. КУВАЕВА, к. т. н. П. П. ЧЕРВОНЕНКО

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: vaboltenkov@gmail.com

## МЕТОД ЭКСПЕРТНОГО ВЫБОРА ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ

*Рассмотрена задача выбора программируемых логических микроконтроллеров для систем промышленной автоматизации на основе коллективного экспертного оценивания. Разработан метод коллективного экспертного выбора на базе марковской цепи. Метод основан на представлении набора индивидуальных ранжирований альтернатив, выполненных группой экспертов, в виде матрицы переходных вероятностей. На марковском графе, построенном по переходной матрице, для ранжирования альтернатив применяется правило Коупленда. Метод апробирован при коллективном экспертном выборе рационального варианта при закупке промышленной партии программируемых логических микроконтроллеров.*

*Ключевые слова:* программируемый логический микроконтроллер, промышленная автоматика, экспертное оценивание, коллективное ранжирование, ранговая шкала, марковская цепь.

На современном рынке цифровых компонентов для систем промышленной автоматизации, в частности программируемых логических микроконтроллеров, конкурирующими производителями предлагается широкий спектр аналогичных по назначению изделий. При этом экспертная оценка и обоснованный выбор наиболее подходящих цифровых компонентов является сложной и ответственной задачей, для решения которой известные методы проведения экспертиз [1, 2] не вполне подходят в связи с трудоемкостью обработки результатов. Поэтому разработка метода экспертного выбора цифровых компонентов, позволяющего по сравнению с известными методами более быстро получать обобщенную коллективную экспертную оценку (КЭО), оценивать согласованность мнений экспертов и принимать обоснованные решения, является весьма актуальной задачей.

### Анализ существующих методов экспертного оценивания и выбора

Основными требованиями к коллективной экспертной оценке являются ее достоверность, а также оперативность ее формирования. Современная экспертиза проводится, как правило, в ранговой шкале, т. е. группе экспертов предлагается множество  $n$  альтернативных вариантов  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , подлежащих упорядочению по какому-либо критерию (или ряду критериев). Каждый из экспертов упорядочивает варианты и представляет индивидуальное ранжирование. Например, для множества

$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$  может быть установлено ранжирование  $\langle a_1 \succ a_2 \succ a_3 \prec a_4 \succ a_5 \rangle$ , где знаки  $\succ$  и  $\prec$  означают «более предпочтительно, чем ...» и «менее предпочтительно, чем ...» соответственно. Каждое индивидуальное ранжирование может быть представлено в виде таблицы  $P^k = \{q_1^k, q_2^k, \dots, q_n^k\}$ , где  $q_i^k$  — позиция, занимаемая  $i$ -й альтернативой в ранжировании  $k$ -го эксперта (или ранг). Главной задачей коллективного экспертного оценивания является формирование коллективного (или консенсусного) ранжирования, отражающего наилучшим образом оценки вариантов, сформированные каждым экспертом.

Методы формирования коллективного ранжирования делятся на несколько групп. Первая из них — методы медианных ранжирований, из которых наиболее известна медиана Кемени [3–5], менее известны медиана Кука — Сейфорда и медиана Литвака [2, 6]. Они основаны на концепции расстояния между ранжированиями и заключаются в определении ранжирования, ближайшего по некоторой математической мере ко всем индивидуальным мнениям экспертов. Эта группа методов считается наиболее достоверной и математически обоснованной. Методы построены на определенной аксиоматике и являются максимально правдоподобными оценками на ранговых шкалах [2, 6]. Главным недостатком медианных методов ранжирования является их вычислительная трудоемкость. В частности, доказано, что все три вида медиан являют-

ся NP-полными задачами, время счета для которых растет значительно быстрее полиномиального с увеличением числа ранжируемых альтернатив. Так, в [7] показано, что для формирования коллективной оценки по медиане Кемени вычислительная сложность задачи оценивается как  $O(n!)$ . Поскольку  $n!$  стремительно растет с ростом  $n$ , решение для 10-элементного множества альтернатив на современном компьютере средней производительности можно получить в течение долей секунды, 11-элементного — за 3 с, 12-элементного — за 30 с, 15-элементного — более чем за сутки.

Другая группа методов — методы КЭО, основанные на принципах социального выбора (или голосования), они более экономны в вычислительном отношении [8, 9]. Наиболее известным из них является метод Борда, согласно которому в ранжировании каждого эксперта наиболее предпочтительный вариант занимает первое место и получает  $n$  баллов, следующий за ним по предпочтительности  $n-1$  баллов и так далее, до конца списка. Коллективное ранжирование выражается в виде числа баллов, набранных каждым из вариантов по сумме индивидуальных ранжирований. В группе КЭО известен также метод Кондорсе, в котором для каждой пары альтернатив определяется, сколько экспертов предпочитает одну другой, и победителем становится альтернатива, побеждающая все остальные при парном сравнении. Другие существующие многочисленные методы социального выбора являются развитием или комбинацией методов Борда и Кондорсе. Недостатком этой группы методов формирования коллективного ранжирования являются известные «парадоксы голосования», которые выражаются, в частности, в возможном возникновении нетранзитивности результирующего ранжирования [8, 9].

Отдельную группу методов КЭО составляют методы многокритериального выбора, в частности очень популярный метод анализа иерархий (МАИ) (англ. analytic hierarchy process, АНР) Т. Саати, и его развитие — метод аналитических сетей [10, 11]. Эти методы более сложны для работы экспертов, поскольку каждый вариант необходимо сравнить с другими по конечному множеству критериев, в то время как в медианных методах и методах социального выбора варианты нужно просто упорядочить по предпочтительности (проранжировать). Соответственно, усложняется и обработка результатов экспертизы, осуществляемая на каждом уровне иерархического выбора. Кроме того, установлено, что МАИ имеет ряд недостатков, пробелов и ошибочных допущений [12, 13]. Главное здесь то,

что шкалы, в которых осуществляется оценивание степеней предпочтений вариантов по каждому из критериев, полагаются шкалами отношений, и притом не связанными друг с другом и с приоритетами критериев. Это допущение в свете математической теории измерений неправомерно. В [12, 13] представлены примеры, доказывающие, что МАИ, основанный на указанном допущении, может привести к явно ошибочным результатам.

Еще одной группой методов выбора, близких к КЭО, являются задачи Web-поиска, основанные на алгоритме PageRank и ему подобных [14, 15]. Эти методы достаточно успешно применяются для формирования многоагентных решений на базе оцениваемых вариантов с применением марковских моделей [16, 17], они обладают высоким быстродействием и лишены многих недостатков, присущих перечисленным методам КЭО. Web-поиск, основанный на марковских моделях, обычно связан с поиском стационарных состояний марковской цепи, расчетом спектра собственных чисел марковской матрицы, при котором часто требуется ее регуляризация [18, 19].

В настоящей работе представлен разработанный авторами метод обработки коллективной экспертной оценки, основанный на использовании цепи Маркова, что позволило упростить процедуру выбора рационального варианта и сократить время вычислений по сравнению с известными методами.

#### Разработка метода экспертного выбора на основе цепей Маркова

Рассмотрим метод коллективного выбора, основанный на модели марковской цепи. По определению, цепь Маркова — это последовательность случайных событий (дискретный случайный процесс) с конечным числом состояний, характеризующаяся тем, что при фиксированном настоящем состоянии будущее состояние не зависит от прошлого [20]. Процесс в каждый момент времени находится в одном из  $n$  состояний. При этом из состояния с номером  $i$  он перейдет в состояние  $j$  с вероятностью  $p_{ij}$ . Матрицу  $\mathbf{P} = (p_{ij})_{n \times n}$  называют матрицей переходных вероятностей (переходов). Она является стохастической при выполнении следующих условий:

- $p_{ij} \geq 0$  (матрица неотрицательна);
- $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$  (сумма элементов каждой строки матрицы равна единице).

Марковскую цепь можно представить в виде графа, в котором вершины — это состояния процесса, а дуги — переходы между состояниями.

Каждой дуге графа  $(i, j)$  соответствует вероятность перехода из  $i$  в  $j$ , то есть  $p_{ij}$ . Согласно марковской модели агрегирования экспертных предпочтений каждую альтернативу в ранжированиях можно представить как состояние марковской цепи, в процессе агрегирования индивидуальных предпочтений экспертов можно оценить вероятность переходов  $p_{ij}$ .

Марковский граф строится на основании матрицы переходов. Далее для его вершин рассчитывается число Коупленда (*CopelandNumb*), равное разности чисел дуг, входящих в вершину и выходящих из нее [21, 22], и альтернативы упорядочиваются в соответствии с убыванием числа Коупленда. По своему содержанию число Коупленда обобщает гипотезу Коупленда [22] о консенсусном ранжировании альтернатив по «количеству попаданий в конкурсы (индивидуальные ранжирования), которые они выиграли». В коллективном ранжировании альтернативы располагаются по убыванию числа Коупленда.

Сформулируем метод формирования коллективного ранжирования.

Входной информацией являются  $K$  индивидуальных ранжирований  $n$  вариантов, представленных  $K$  экспертами. Для каждого из  $K$  индивидуальных ранжирований строится матрица  $Q_k = (q_k(i, j))_{n \times n}$  ( $k = 1, \dots, K$ ) по правилу подсчета превосходства альтернатив в индивидуальных ранжированиях (подсчет «числа побед и проигрышей»):

$$q_k(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } j \succ i \text{ в } k\text{-м ранжировании;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Из полученных матриц формируется суммарная матрица

$$Q = (q(i, j))_{n \times n} = \sum_k Q_k. \quad (2)$$

От матрицы  $Q$  осуществляется переход к матрице переходных вероятностей Маркова. Существует ряд правил перехода, мы воспользуемся так называемым правилом МС4 [8], согласно которому переходная матрица  $P = |(p(i, j))_{n \times n}|$  формируется так:

$$p(i, j) = \begin{cases} 1/n, & \text{если } q(i, j) > q(j, i); \\ (n-m)/n, & \text{если } i = j; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

На основании построенной матрицы переходов строится направленный марковский граф, вершины которого соответствуют сравниваемым альтернативам, а дугам приписываются соответствующие переходные вероятности. Сравнимые альтернативы упорядочиваются по убыванию числа Коупленда.

### Применение разработанного метода для выбора программируемых логических микроконтроллеров

Рассмотрим применение предлагаемого метода для реальной экспертной оценки.

На предприятии ПКФ «Криопром» (г. Одесса) в рамках масштабного проекта по автоматизации блоков очистки промышленно выпускаемых воздухоразделительных установок [23] было принято решение о закупке крупной партии программируемых логических микроконтроллеров (ПЛМ). Изначально были выбраны пять альтернативных вариантов ( $a-e$ ) ПЛМ:

- Siemens SIMATIC S7-300/200 ( $a$ );
- Moeller XC-100/200 ( $b$ );
- Advantech ADAM-5000/APAX-500 ( $c$ );
- Schneider Modicon M340/Modicon Quantum ( $d$ );
- ICPDAS XPAC-8000/LinPAC-8000/WinPAC-8000 ( $e$ ).

Для коллективного консенсусного выбора лучшего варианта была сформирована группа из девяти экспертов – ведущих специалистов предприятия «Криопром» и ведущих преподавателей и инженеров Института компьютерных систем ОНПУ. Экспертам было предложено составить профили индивидуальных предпочтений альтернатив, принимая во внимание специфику автоматизации воздухоразделительных установок, а также такие характеристики ПЛМ как цена, быстродействие и диапазон средств для его программирования, определяющий универсальность применения ПЛМ. В результате экспертного оценивания был получен профиль, приведенный в **табл. 1**.

Для проверки согласованности мнений экспертов был рассчитан коэффициент конкордации Кэнделла [2]. Для этого был осуществлен

Таблица 1

Профиль индивидуальных предпочтений экспертов

Эксперт	Индивидуальные предпочтения
Э1	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$
Э2	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$
Э3	$c \succ e \succ b \succ d \succ a$
Э4	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$
Э5	$e \succ c \succ d \succ a \succ b$
Э6	$e \succ d \succ c \succ a \succ b$
Э7	$e \succ c \succ d \succ a \succ b$
Э8	$b \succ e \succ d \succ c \succ a$
Э9	$d \succ b \succ e \succ c \succ a$

переход от таблицы предпочтений к матрице рангов  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{9 \times 5}$ . В каждой строке матрицы предпочтений наилучшей альтернативе присваивается ранг  $r(1) = 1$ . Следующей за ней по предпочтительности альтернативе присваивается ранг  $r(k) = r(k-1) + 1$ .

Ранговая матрица выглядит следующим образом:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 5 & 4 & 1 & 3 & 2 \\ 5 & 4 & 1 & 3 & 2 \\ 5 & 3 & 1 & 4 & 2 \\ 5 & 4 & 1 & 3 & 2 \\ 4 & 5 & 2 & 3 & 1 \\ 4 & 5 & 3 & 2 & 1 \\ 4 & 5 & 2 & 3 & 1 \\ 5 & 1 & 4 & 3 & 2 \\ 5 & 2 & 4 & 1 & 3 \end{pmatrix}.$$

Дисперсионный коэффициент конкордации Кэнделла рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{12S}{K^2(n^3 - n)}, \quad (4)$$

где  $S$  – оценка дисперсии;

$K$  – количество экспертов;

$n$  – число альтернатив.

Оценка дисперсии определяется как

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{k=1}^K r_{ik} - \bar{r} \right)^2, \quad (5)$$

где  $k$  – индекс эксперта ( $k = 1, 2, \dots, K$ );

$r_{ik}$  – значение ранга, присвоенного  $k$ -м экспертом  $i$ -й альтернативе;

$\bar{r}$  – оценка среднего значения рангов по альтернативам, определяемая как

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K r_{ik}. \quad (6)$$

Коэффициент конкордации равен 1, если все ранжирования экспертов в группе одинаковы, и равен 0, если все они различны. Для рассматриваемой экспертной табл. 1 коэффициент конкордации  $W = 0,56$ , что говорит о достаточно высокой согласованности индивидуальных ранжирований экспертов. Поскольку коэффициент конкордации есть случайная величина, распределенная по распределению  $\chi^2$  с числом степеней свободы  $\nu = m-1$  при числе альтернатив  $n > 7$ , состоятельность ее статистической оценки проверена и подтверждена по  $\chi^2$  – критерию Пирсона с уровнем значимости 0,95.

Применим к табл. 1 описанный выше метод.

Матрицы  $(\mathbf{Q}_k)_{5 \times 5}$  ( $k = 1, \dots, 9$ ), рассчитанные по соотношению (1), имеют следующий вид:

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q}_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_5 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q}_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q}_8 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$

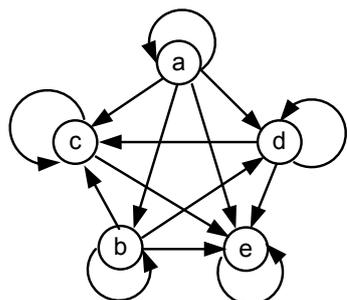
$$\mathbf{Q}_9 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Суммированием всех этих матриц получаем матрицу

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & 6 & 9 & 9 & 9 \\ 3 & 0 & 7 & 8 & 7 \\ 0 & 2 & 0 & 2 & 5 \\ 0 & 1 & 6 & 0 & 7 \\ 1 & 3 & 5 & 2 & 0 \end{pmatrix}.$$

В соответствии с правилом (3) получаем матрицу переходных вероятностей

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 \\ 0 & 2/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 \\ 0 & 0 & 4/5 & 0 & 1/5 \\ 0 & 0 & 1/5 & 3/5 & 1/5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$



Марковский граф для коллективного ранжирования

Марковский граф, построенный по матрице (7), приведен на **рисунке**. Вершины графа соответствуют состояниям марковской цепи (т. е. рассматриваемым альтернативам). Направленные дуги графа строятся в соответствии с вероятностями переходов в соответствующие состояния, указанными в матрице, — от менее вероятных состояний к более вероятным (или на языке бинарных отношений — от менее предпочтительных вариантов к более предпочтительным).

В **табл. 2** приведены числа Коупленда для вершин марковского графа (без учета циклических дуг, вносящих нулевой вклад), соответствующие альтернативным вариантам ПЛМ. Тогда в

Таблица 2

Числа Коупленда для вершин марковского графа

Вариант	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Число Коупленда	-4	-2	2	1	4

соответствии с правилом Коупленда полученное итоговое ранжирование имеет вид:  $e > c > d > b > a$ .

Таким образом, согласно коллективной экспертной оценке предпочтительным является вариант *e*, т. е. для закупки рекомендуются микроконтроллеры ICPDAS XPAC-8000 / LinPAC-8000 / WinPAC-8000.

Для проверки состоятельности предложенного метода результаты экспертного опроса, приведенные в табл. 1, были обработаны с использованием комплекса Matlab-программ, основанных на решении задачи поиска медианы Кемени как задачи целочисленного программирования с использованием метода ветвей и границ [24]. Результаты обработки по предложенному методу и по методу медианы Кемени [24] полностью совпадают между собой.

Для решения задачи коллективного выбора по предложенному методу составлена программа в системе компьютерной алгебры Scilab. С

целью оценки ее быстродействия проведен вычислительный эксперимент со 150 синтезированными таблицами коллективных предпочтений, сгенерированными случайным образом. Эксперимент на программно-аппаратной платформе CPU: Intel Core i5 2450M 2,5 ГГц; RAM: 6 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Win7 для числа альтернативных вариантов  $n = 5 - 12$  и числа экспертов  $K = 5 - 15$  показал, что процессорное время вычислений не превышает 35–80 мс, что в 80–200 раз меньше, чем при решении тех же задач в системе Matlab с использованием медианы Кемени [24].

### Выводы

Изложенные результаты позволяют заключить, что предложенный метод может эффективно применяться при решении задач формирования коллективной экспертной оценки сложных компонентов систем автоматизации, например представленных на рынке программируемых логических микроконтроллеров. Как показал вычислительный эксперимент, метод обладает значительно более высоким быстродействием, чем известные аналоги, при этом он прост для программной реализации, поскольку основан на стандартных матричных операциях и сравнениях.

В дальнейших исследованиях будет решаться задача анализа такой ситуации, в которой допускается присвоение экспертом одинаковых рангов различным альтернативным вариантам.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пиганов М. Н., Подлипов Г. А. Экспертные оценки в управлении качеством радиоэлектронных средств. — Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва, 2004.
2. Самохвалов Ю. Я., Науменко Е. М. Экспертное оценивание. Методический аспект. — Киев: ДУИКТ, 2007.
3. Bury H., Wagner D. Application of Kemeny's median for group decision support // In book: Applied Decision Support with Soft Computing. Series: Studies in Fuzziness and Soft Computing. Vol. 124. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. — P. 235–262. — [https://doi.org/10.1007/978-3-540-37008-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-37008-6_10)
4. Didehvar F., Eslahchi Ch. An algorithm for rank aggregation problem // Applied Mathematics and Computation. — 2007. — Vol. 189 (2). — P.1847–1858. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2006.12.065>
5. Davenport A., Kalagnanam J. A computational study of the Kemeny Rule for preference aggregation proceeding // AAAI'04 Proc. of the 19<sup>th</sup> National Conference on Artificial Intelligence. — San Jose, California. — 2004. — P. 697–702.
6. Болтенков В. А., Куваева В. И., Позняк А. В. Анализ медианных методов консенсусного агрегирования ранговых предпочтений // Информатика та математичні методи в моделюванні. — 2017. — Т. 7, №4. — С. 307–317.

7. Гехман А. В., Якунин Ю. Ю., Даничев А. А., Володин А. А. Обработка результатов экспертиз в реестре научных технических разработок // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. — 2010. — Вып. 6 (32). — С. 30–34.
8. Hannu Nurmi. Voting systems for social choice // In: Handbook of Group Decision. Advances in Group Decision and Negotiation. Vol. 4. — Springer: 2010. — P. 167–182. doi <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-9097-3>
9. Петровский А. Б. Теория принятия решений. — Москва: Академия, 2009.
10. Saaty Th. L., Vargas L. G. Decision Making with the Analytic Network Process Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. — N.-Y.: Springer Science+Business Media, 2013.
11. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. — Москва: ЛКИ, 2008.
12. Подиновский В. В., Подиновская О. В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. — 2011. — № 1. — С. 8–13.
13. Подиновский В. В., Подиновская О. В. Еще раз о некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. — 2012. — № 2. — С. 75–78.
14. Langville A. N., Meyer C. D. Who's #1? The Science of Rating and Ranking. — Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2013.
15. Dwork C., Kumar R., Noar M., Sivakumar D. Rank aggregation methods for the Web // In book: International Conf. on the World Wide Web. — ACM Press and Addison Wesley, 2001. — P. 613–622. — <http://dx.doi.org/10.1145/371920.372165>.
16. Patchmuthu, R. K., Goh, K. L. A., Singh, A. K. Application of Markov chain in the PageRank algorithm // Proc. of the 3<sup>rd</sup> CUTSE International Conference. — Miri, Sarawak, Malaysia: Curtin University, 2011. — P. 116–121.
17. Prerna Rai, Arvind Lal. Google PageRank algorithm: Markov chain model and hidden Markov model // Int. Journal of Computer Applications. — 2016. — Vol. 138, N 9. — P. 9–13. — <http://dx.doi.org/10.5120/ijca2016908942>
18. Polyak B. T., Timonina A. V. PageRank: New regularizations and simulation models // IFAC Proceedings Volumes. — 2011. — Vol. 44, iss. 1. — P. 11202–11207. — <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01870>
19. Nesterov Y., Nemirovski A. Finding the stationary states of Markov chains by iterative methods // Applied Mathematics and Computation. — N 255. — P. 58–65. — <https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.04.053>
20. Турчин В. Н., Турчин Е. В. Марковские цепи. Основные понятия, примеры, задачи. — Днепропетровск: LizunoffPress, 2016.
21. Вольский В. И. Процедуры голосования в малых группах с древнейших времен до начала XX века: препринт WP7/2014/02. — Москва: Изд. дом Высшей школы экономики, 2014.
22. Dixit A. K., Skeath S., Reiley Jr. D. H. Games of Strategy. — N.-Y., London: W. W. Norton & Company, 2014.
23. Червоненко П. П., Болтенков В. А. Підвищення рівня автоматизації блоку очищення установки розділення повітря // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. — 2016. — Т. 8, № 1. — С. 28–32.
24. Compute the median ranking according to the Kemeny axiomatic approach [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52235-compute-the-median-ranking-according-to-the-kemeny-axiomatic-approach> (Дата обращения: 30.03.2018).

Дата поступления рукописи  
в редакцию 03.04 2018 г.

В. О. БОЛТОНКОВ, В. І. КУВАЄВА, П. П. ЧЕРВОНЕНКО

Україна, Одеський національний політехнічний університет  
E-mail: vaboltentkov@gmail.com

## МЕТОД ЕКСПЕРТНОГО ВИБОРУ ЦИФРОВИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВІ МАРКІВСЬКОЇ МОДЕЛІ

*Експертна оцінка і обґрунтований вибір цифрових компонентів на ринку мікроелектроніки є складною і відповідальною задачею. Для її вирішення відомі методи проведення експертиз підходять не в повній мірі в зв'язку з трудомісткістю обробки результатів. Розробка методу експертного вибору цифрових компонентів, що дозволяє швидко отримувати узагальнену колективну експертну оцінку (КЕО), оцінювати узгодженість думок експертів і приймати обґрунтовані рішення, є достатньо актуальною.*

*Задача дослідження – розробка методу формування КЕО для вибору цифрових компонентів систем промислової автоматики на основі ланцюга Маркова і його перевірка в реальній практичній ситуації. Запропоновано метод формування КЕО складних компонентів систем автоматики на основі марківської моделі. При агрегуванні експертних переваг кожна альтернатива представляється як стан марківського ланцюга. Далі для вершин марківського графа розраховується число Коупленда, дорівнює різниці числа дуг, що входять в вершину і виходять з неї. У колективному ранжируванні альтернативи розташовуються по спадаючому значенню числа Коупленда.*

*Розроблений метод продемонстрував високу швидкодiю в порiвняннi з вiдомими аналогами. Правильнiсть запропонованого методу, його працездатнiсть i швидкодiя пiдтвердженi на реальнiй експертизи i в процесi комп'ютерного моделювання.*

*Проведенi дослідження показали, що розроблений метод формування колективної експертної оцiнки працює в 80-200 разiв швидше, нiж метод КЕО на основi медiани Кеменi. Практична значимiсть запропонованого методу продемонстрована на реальнiй експертизи, проведенiй на пiдприємствi «Криопром» (м.Одеса, Україна) при закупiвлi партii програмованих логiчних мiкроконтролерiв в рамках масштабного проекту по автоматизацiї блокiв очистки повітродоздiльних установок, що промислово випускаються.*

*Ключовi слова: програмований логiчний мiкроконтролер, промислова автоматика, експертне оцiнювання, колективне ранжування, рангова шкала, маркивський ланцюг.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2018.2.21  
UDC 519.816:004.33(035)

V. A. BOLTENKOV, V. I. KUVAIEVA, P. P. CHERVONENKO

Ukraine, Odessa National Polytechnic University  
E-mail: vaboltentkov@gmail.com

## METHOD FOR EXPERT CHOISE OF INDUSTRIAL AUTOMATION DIGITAL COMPONENTS ON THE BASIS OF MARKOV'S MODEL

*Expert evaluation and reasonable selection of digital components in the microelectronic market is a complex and responsible task. For its solution, the known methods of carrying out expert estimations do not fit fully in connection with the laboriousness of the results processing. The development of an expert choice method for digital components that allows you to quickly obtain a generalized collective expert evaluation (CEE), evaluate the consistency of expert opinions and make informed decisions is a quite actually.*

*The goal of the study is to develop a method for forming a voucher for the selection of digital components of industrial automation systems based on the Markov chain and its verification in the real practical situation. A method is proposed for CEE forming for complex components of automation systems based on the Markov model. When aggregating expert preferences, each alternative is represented as a state of the Markov chain. Next, for the vertices of a Markov graph, the Copeland number is calculated, equal to the difference between the number of arcs entering and leaving the vertex. In collective ranking, alternatives are arranged in descending Copeland numbers.*

*The developed method has a high speed in comparison with the known analogs. The correctness of the proposed method, its efficiency and speed has been confirmed by real expertise and in the process of computer modeling. The executed researches showed that the developed method for the collective expert evaluation forming works 80-200 times faster than the method based on the median Kemeni. The practical significance of the proposed method has been demonstrated on the real expertise carried out at the enterprise «Krioprom» (Odessa, Ukraine) when purchasing a batch of programmable logic microcontrollers within the large-scale project framework for cleaning units automation of industrial air-separation plants.*

*Keywords: programmable logic microcontroller, industrial automation, expert estimation, collective ranking, rank scale, Markov chain.*

### REFERENCES

1. Piganov M.N., Podlipnov G.A. *Ekspertnye otsenki v upravlenii kachestvom radioelektronnykh sredstv* [Expert assessments in the management of the quality of radio electronic means]. Samara State Aerospace University, 2004, 122 p. (Rus)
2. Samohvalov Yu.Ya., Naumenko E.M. *Ekspertnoe otsenivanie. Metodicheskii aspekt* [Expert estimation. Methodical aspect]. Kiev, DUCT, 2007, 262 p. (Rus)
3. Bury H., Wagner D. Application of Kemeny's median for group decision support. In: Yu X., Kacprzyk J. (eds) *Applied Decision Support with Soft Computing. Studies in*

*Fuzziness and Soft Computing*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2003, vol. 124, pp. 235-262. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-37008-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-37008-6_10)

4. Didehvar F., Eslahchi Ch. An Algorithm for rank aggregation problem. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, vol. 189(2), pp. 1847-1858. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2006.12.065>

5. Davenport A., Kalagnanam J. A computational study of the Kemeny rule for preference aggregation proceeding. *AAAI'04 Proceedings of the 19th National Conference on Artificial Intelligence*. San Jose, California, 2004, pp. 697-702.

6. Boltenkov V.A., Kuvaeva V.I., Pozniak A.V. [Analysis of median methods for consensus rank preferences aggregation]. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 307-317. (Rus).
7. Gehman A.V., Iakunin Iu.Iu., Danichev A.A., Volodin A.A. [Processing of the results of examinations in the register of scientific and technical developments]. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Ajerokosmicheskogo Universiteta Imeni Akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University], 2010, iss. 6 (32), pp. 30-34. (Rus).
8. Hannu Nurmi. Voting Systems for Social Choice. In: *Handbook of Group Decision. Part of the Advances in Group Decision and Negotiation book series* (AGDN, vol. 4). Springer, 2010, pp. 167-182. doi <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-9097-3>
9. Petrovskiy A.B. *Teoriya prinyatiya reshenii* [The theory of decision-making]. Moscow, Academy, 2009, 400 p. (Rus).
10. Saaty T. L., Vargas L. G. *Decision Making with the Analytic Network Process Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*, N.-Y., Springer Science+Business Media, 2013, 363 p.
11. Saaty T. L. *Prinyatie reshenii pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskie seti* [Decision making with dependence and feedback: The analytic network process], Moscow, LKI Ed., 2008, 360 p. (Rus)
12. Podinovskiy V.V., Podinovskaya O.V. [On the incorrectness of the analytic hierarchy process]. *Control Sciences*, 2011, no. 1, pp. 8-13. (Rus)
13. Podinovskiy V.V., Podinovskaya O.V. [Once again about the incorrectness of the analytic hierarchy process]. *Control Sciences*, 2012, no. 2, pp. 75-78. (Rus).
14. Langville A. N., Meyer C. D. *Who's #1? The Science of Rating and Ranking*, Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2013, 247 p.
15. Dwork C., Kumar R., Noar M., Sivakumar D. Rank aggregation methods for the Web. In book: *Int. Conf. on the World Wide Web*, ACM Press and Addison Wesley, 2001, pp. 613-622. <http://dx.doi.org/10.1145/371920.372165>.
16. Patchmuthu, R.K., Goh, K.L.A., Singh, A.K. 2011. Application of Markov chain in the PageRank algorithm. In: *Proc. of the 3rd CUTSE International Conference*, Miri, Sarawak, Malaysia: Curtin University, 2011, pp. 116-121.
17. Prerna Rai, Arvind Lal. Google PageRank algorithm: Markov chain model and hidden Markov model. *Int. Journal of Computer Applications*, 2016, vol. 138, no. 9, pp. 9-13. <http://dx.doi.org/10.5120/ijca2016908942>
18. Polyak B. T., Timonina A. V. PageRank: New regularizations and simulation models. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, vol. 44, iss. 1, pp.11202-11207. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01870>
19. Nesterov Y., Nemirovski A. Finding the stationary states of Markov chains by iterative methods. *Applied Mathematics and Computation*, no. 255, pp. 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.04.053>
20. Turchin V.N., Turchin E.V. *Markovskie tsepi. Osnovnye ponyatiya, primery, zadachi* [Markov Chains. Basic Concepts, Examples, Tasks]. Dnepropetrovsk, Lizun off Press, 2016, 196 p. (Rus).
21. Volskiy V. I. *Protsedury golosovaniya v malykh grupakh s drevneishikh vremen do nachala XX veka* [Voting Procedures in Small Groups from Ancient Times to the Beginning of the 20th Century]. Preprint WP7 / 2014/02, Moscow, Publ. House of Higher School of Economics, 2014, 76 p. (Rus).
22. Dixit A. K., Skeath S., Reiley D. H. Jr. *Games of Strategy*, N.-Y., London, W. W. Norton & Company, 2014, 768 p.
23. Chervonenko P. P., Boltenkov V. A. Increasing the level of automation of the air purification device in the air separation unit. *Automation of Technological and Business Processes*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 28-32. (Ukr)
24. Compute the median ranking according to the Kemeny axiomatic approach [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52235-compute-the-median-ranking-according-to-the-kemeny-axiomatic-approach> (date of the application: 30.03.2018).

**Описание статьи для цитирования:**

Болтенков В. А., Куваева В. И., Червоненко П. П. Метод экспертного выбора цифровых компонентов систем промышленной автоматизации на основе марковской модели. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 2, с. 21—28. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.21>

**Cite the article as:**

Boltenkov V. A., Kuvaeva V. I., Chervonenko P. P. Method for expert choice of industrial automation digital components on the basis of markov's model. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2018, no. 2, pp. 21-28. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.21>