

параметри і характеристики вузла з'єднання. Умови безвтратності забезпечують значно вищу точність синтезу вузла з'єднання порівняно з можливими електродинамічними розв'язками задачі. Рекомендований алгоритм не залежить від робочої частоти, від структури провідникового елемента зв'язку, від типів взаємопов'язаних ліній: ліній з ТЕМ-хвилею і хвилевода. Проблемою залишається точний електродинамічний розрахунок вхідного імпедансу Z , який повинен враховувати усі особливості структури елемента зв'язку.

1. Das B.N. et al. Excitation of waveguide by stripline and microstrip-line-feed slots / *IEEE on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-34, March, №3. – 1986. – P.321. 2. Villegas F.J. et al. A novel waveguide to microstrip transition for millimeter wave-module application / *Antennas and propagation*, vol. Ap. 47, January. – 1999. – №1. – P.48. 3. Williamson A.G. Design of coaxial-line / rectangular waveguide transitions / *Int. J. Electronics*. – 1985. – Vol. 58, №3. – P.425. 4. Захарія Й.А. *Методи прикладної електродинаміки*. – Львів: Вид-во «Бескид-Біт», 2003. – С.352.

УДК 338.984:519.6

В.М. Безрук, Ю.В. Скорик

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА РЕЧЕВЫХ КОДЕКОВ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

© Безрук В.М., Скорик Ю.В., 2009

Рассмотрено методологию выбора речевых кодеков на основе метода анализа иерархий. Теоретические и практические особенности метода анализа иерархий для выбора разговорного кодека с учетом совокупности показателей качества.

In article the methodology of a choice optimum by vector criterion of design decisions on the basis of a method of the analysis of hierarchies is stated. Theoretical and practical features of a method of the analysis of hierarchies for a choice of speech codecs, optimum for choice quality indicators are considered.

При проектировании сетей IP-телефонии возникает необходимость выбора оптимальных речевых кодеков с учетом совокупности показателей качества [1]. Учитывая, что технико-экономические показатели кодеков связаны между собой и антагонистичны, существует необходимость применения при этом методов многокритериальной оптимизации. Многокритериальная оптимизация является достаточно сложной проблемой даже с чисто математической точки зрения. Однако даже после своего формального решения (нахождение подмножества компромиссных, то есть Парето-оптимальных вариантов) [2], остается необходимость формального выбора единственного проектного варианта с учетом субъективной информации, поступающей от эксперта – лица, принимающего решения (ЛПР).

Существуют разные методы сужения подмножества Парето до единственного варианта: на основе теории размытых множеств, при использовании лексографического подхода с применением функций ценности [2]. Широко используется метод анализа иерархий (МАИ), который может быть использован для решения задачи выбора единственного варианта из подмножества Парето-

оптимальных. Основной сутью метода анализа иерархий является оценка относительной важности показателей качества, а также важности вариантов из анализа суждений ЛПР о проектных вариантах с последующим выбором единственного варианта [3].

В данной работе рассмотрены теоретические и практические особенности применения МАИ для выбора оптимальных речевых кодеков с учетом совокупности показателей качества.

1. Многокритериальный подход к выбору оптимальных проектных вариантов

Начальные этапы проектирования сложных систем базируются на основных положениях теории многокритериальной оптимизации, которая определяет правило выбора оптимальных проектных вариантов с учетом совокупности показателей качества.

$$\vec{K} = (K_1, \dots, K_i, \dots, K_m), \quad (1)$$

При этом показатели качества (целевые функции) системы (1) могут быть трех типов: нейтральными, согласованными между собой и конкурировать между собой. В первых двух случаях оптимизация системы может осуществляться в отдельности по каждому из показателей качества. В третьем случае достигнуть потенциального значения каждого из показателей в отдельности не представляется возможным. При этом может быть достигнут лишь компромисс введенных целевых функций, то есть согласованный оптимум по критерию Парето введенных показателей качества. Этот оптимум означает, что дальнейшее улучшение каждого из показателей может быть достигнуто лишь за счет ухудшения остальных показателей качества системы.

Согласованному оптимуму в критериальном пространстве соответствует множество Парето-оптимальных оценок показателей качества соответствующим недоминируемым вариантам системы s_0 , для которых выполняется векторное неравенство

$$\vec{K}(s_0) \geq \vec{K}(s). \quad (2)$$

Нахождение оптимума по критерию Парето может производиться либо непосредственно, согласно (2), путем перебора всех допустимых вариантов системы, либо с использованием специальных методов, например, весового метода, метода рабочих характеристик.

Как правило, для последующих этапов проектирования должен быть выбран единственный вариант системы. Поэтому возникает необходимость сужения подмножества Парето-оптимальных решений до единственного варианта системы с привлечением дополнительной информации об отношении строгого предпочтения. Такая информация появляется в результате всестороннего анализа Парето-оптимальных вариантов системы, в частности их структуры, параметров, рабочих характеристик, относительной важности введенных показателей качества и пр. Полученные при этом дополнительные сведения о предпочтениях ЛПР используются для построения некоторой целевой скалярной функции, оптимизация которой приводит к выбору единственного варианта системы.

Для сужения подмножества Парето-оптимальных решений могут использоваться различные подходы, в частности основанные на теории полезности, теории размытых множеств, лексографический подход [2].

Одним из распространенных способов сужения подмножества Парето является построение скалярной функции ценности, оптимизация которой приводит к выбору одного из Парето-оптимальных вариантов системы. При этом могут быть использованы аддитивная, мультипликативная, полилинейная функции ценности, которые в общем случае имеют вид [2]

$$F(\vec{K}) = \sum_{i=1}^m c_i f(K_i), \quad (3)$$

где c_i – шкалирующие коэффициенты; $f(K_i)$ – некоторые одномерные функции ценности, являющиеся оценками полезности варианта системы по показателю K_i .

При построении функции полезности (ценности) существенно используются сведения, которые получены в результате экспертного оценивания анализируемых вариантов проектируемой системы. Разработаны специальные методики опроса, направленные на получение дополнительной информации о предпочтениях, которые, в частности, основаны на методах экспертного оценивания и анализа иерархий. Существуют специальные пакеты программ, реализующие на ЭВМ указанные методы получения числовых значений параметров выбранных скалярных функций полезности [3].

Задача построения функции ценности (3) сводится к оценке коэффициентов c_i , выбору вида функций $f(K_i)$, проверке их независимости по проверке согласованности построенной функции ценности. В ряде случаев может быть использована функция ценности (3) в виде [2]

$$U(\vec{K}) = \sum_{j=1}^m c_j K_j. \quad (4)$$

При этом используются методы получения дополнительной информации о значениях взвешивающих коэффициентов c_i методом экспертных оценок. Во многих случаях эксперты затрудняются дать прямой ответ о значениях коэффициентов c_i . Они могут дать суждение другого плана, например, в виде оценок парных сравнений, в частности относительной важности показателей, вариантов систем и т. д. На основе этих данных с применением метода анализа иерархий оценивается относительная важность показателей качества [3].

2. Особенности метода анализа иерархий

Метод анализа иерархий, разработанный известным ученым Саати Т.Л., успешно применяется на практике для принятия решений в сложных организационно-технических системах. Оценка вариантов решений с использованием МАИ осуществляется как на основе объективной, так и субъективной исходной информации. В том случае, когда исходная информация получена из объективных источников в полном объеме, а значения оценок непротиворечивы, результаты задач принятия решений однозначны и соответствуют мнению ЛПР.

МАИ состоит в декомпозиции проблемы выбора на простые составляющие части и дальнейшей обработки численных данных суждений ЛПР по парным сравнениям различных элементов проблемы выбора. В результате обработки полученных данных получают коэффициенты, характеризующие приоритетность выбора вариантов проектируемой системы. Эти коэффициенты могут быть использованы для формирования скалярной целевой функции в виде взвешенной суммы показателей качества проектных вариантов системы и последующего выбора единственного варианта.

Принцип декомпозиции предусматривает структурирование проблемы выбора в виде иерархии, что является первым этапом применения МАИ. В наиболее общем виде иерархия строится с вершины через промежуточные уровни к самому низкому уровню (рис.1).

Принцип парных сравнительных суждений состоит в том, что объекты-критерии и объекты-альтернативы задачи многокритериальной оптимизации сравниваются попарно в отношении объектов одинаковой размерности. Результаты парных сравнений приводятся к матричной форме.

С использованием МАИ попарно сравниваются важности разных элементов $\frac{w_i}{w_j}$ соответственно для вариантов систем A_i и A_j

	A_1	A_2	...	A_n
A_1	$\frac{w_1}{w_1}$	$\frac{w_1}{w_2}$		$\frac{w_1}{w_n}$
A_2	$\frac{w_2}{w_1}$	$\frac{w_2}{w_2}$...	$\frac{w_2}{w_n}$
...		...		
A_n	$\frac{w_n}{w_1}$	$\frac{w_n}{w_2}$...	$\frac{w_n}{w_n}$

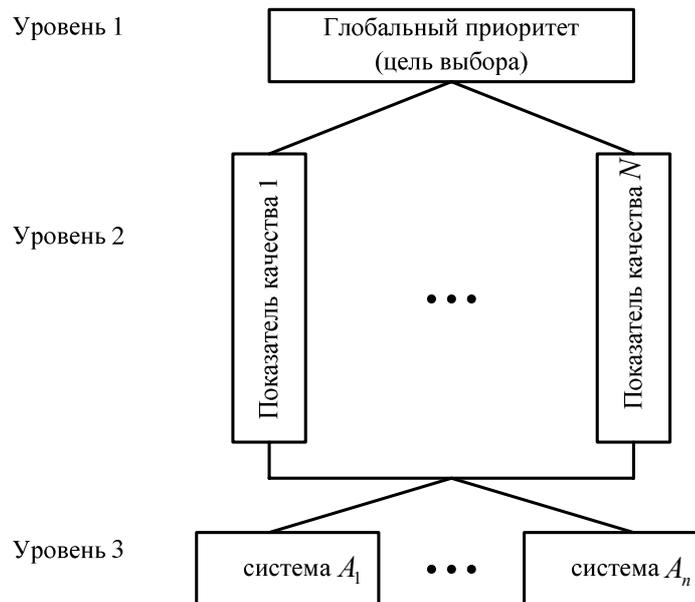


Рис. 1. Декомпозиция задачи выбора в иерархию

Если $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ неизвестны заранее, то парные сравнения элементов производятся с использованием субъективных суждений, численно оцениваемых по шкале, которая описана в табл. 1.

Таблица 1

Шкала относительной важности элементов

Интенсивность относительной важности	Определение
1	Равная важность
3	Умеренное превосходство одного над другим
5	Существенное или сильное превосходство
7	Значительное превосходство
9	Очень сильное превосходство
2,4,6,8	Промежуточные решения между двумя суждениями
Обратные величины приведённых выше чисел	Если при сравнении одного вида деятельности с другим получено одно из вышеуказанных чисел, то при сравнении второго вида деятельности с первым получим обратную величину

Чтобы получить вектор приоритетов сравниваемых систем, необходимо выполнить некоторую обработку матрицы парных сравнений. С математической точки зрения эта задача обработки сводится к вычислению главного собственного вектора, который после нормализации становится вектором приоритетов.

Точный способ вычисления главного собственного вектора для матрицы парных сравнений заключается в возведении матрицы в произвольно большие степени и делении суммы каждой строки на общую сумму элементов матрицы. Этим способом рекомендуется пользоваться, если обработка матрицы ведется на ЭВМ. Для ручного счета рекомендуется следующий способ, который дает хорошее приближение. Рассмотрим его особенности на примере сравнения относительной важности для 5-ти показателей качества систем, которые определяются соотношениями (5), (6), (7).

	Матрица					Вычисление оценки компонент собственного вектора по строкам матрицы (5)	Получение оценки вектора приоритетов P_j
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5		
K_1	$\frac{w_1}{w_1}$	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{w_1}{w_3}$	$\frac{w_1}{w_4}$	$\frac{w_1}{w_5}$	$\sqrt[5]{\frac{w_1}{w_1} \times \frac{w_1}{w_2} \times \frac{w_1}{w_3} \times \frac{w_1}{w_4} \times \frac{w_1}{w_5}} = V_1$	$\frac{V_1}{S} = P_1$
K_2	$\frac{w_2}{w_1}$	$\frac{w_2}{w_2}$	$\frac{w_2}{w_3}$	$\frac{w_2}{w_4}$	$\frac{w_2}{w_5}$	$\sqrt[5]{\frac{w_2}{w_1} \times \frac{w_2}{w_2} \times \frac{w_2}{w_3} \times \frac{w_2}{w_4} \times \frac{w_2}{w_5}} = V_2$	$\frac{V_2}{S} = P_2$
K_3	$\frac{w_3}{w_1}$	$\frac{w_3}{w_2}$	$\frac{w_3}{w_3}$	$\frac{w_3}{w_4}$	$\frac{w_3}{w_5}$	(5) $\sqrt[5]{\frac{w_3}{w_1} \times \frac{w_3}{w_2} \times \frac{w_3}{w_3} \times \frac{w_3}{w_4} \times \frac{w_3}{w_5}} = V_3$	(6) $\frac{V_3}{S} = P_3$ (7)
K_4	$\frac{w_4}{w_1}$	$\frac{w_4}{w_2}$	$\frac{w_4}{w_3}$	$\frac{w_4}{w_4}$	$\frac{w_4}{w_5}$	$\sqrt[5]{\frac{w_4}{w_1} \times \frac{w_4}{w_2} \times \frac{w_4}{w_3} \times \frac{w_4}{w_4} \times \frac{w_4}{w_5}} = V_4$	$\frac{V_4}{S} = P_4$
K_5	$\frac{w_5}{w_1}$	$\frac{w_5}{w_2}$	$\frac{w_5}{w_3}$	$\frac{w_5}{w_4}$	$\frac{w_5}{w_5}$	$\sqrt[5]{\frac{w_5}{w_1} \times \frac{w_5}{w_2} \times \frac{w_5}{w_3} \times \frac{w_5}{w_4} \times \frac{w_5}{w_5}} = V_5$	$\frac{V_5}{S} = P_5$

где $S = \sum_{i=1}^5 V_i$; $\frac{w_i}{w_j} = a_{ij}$ – числовые оценки парных сравнений показателей качества.

Таким образом, согласно (6) компоненты главного собственного вектора вычисляются как среднее геометрическое значение в строке матрицы парных сравнений

$$V_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Компоненты вектора приоритетов согласно (7) вычисляются как нормированные значения главного собственного вектора

$$P_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

В качестве меры согласованности суждений эксперта рассматривают два показателя:

- индекс согласованности (I_c);
- отношение согласованности (OC).

Из теории матриц известно, что согласованность обратно симметричной матрицы парных сравнений в шкале относительной важности эквивалентна требованию равенства ее максимального собственного значения λ_{\max} и числа сравниваемых объектов ($\lambda_{\max} \geq n$). Приближенные значения λ_{\max} для оценки отношения согласованности можно рассчитывать по следующей формуле

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n M_j P_j, \quad (10)$$

где $M_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ – сумма элементов i -го столбца матрицы (5); P_j – компоненты вектора приоритетов анализируемой матрицы (5).

В качестве меры рассогласования рассматривают нормированное отклонение λ_{\max} от n , называемое индексом согласованности:

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

Для того, чтобы оценить, является ли полученное согласование приемлемым или нет, его сравнивают со случайным индексом C_H . Случайным индексом называют индекс согласованности, рассчитанный для квадратной n -мерной положительной обратно симметричной матрицы, элементы которой сгенерированы случайным образом с помощью датчика случайных чисел, распределенных по равномерному закону для интервала значений от 1 до 15. В табл. 2 представлены средние согласованности для случайных матриц порядка от 1 до 15.

Таблица 2

Величина случайного индекса

Размер матрицы, n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Случайный индекс, C_H	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,59

Получив в результате расчета по формуле (11) индекс согласованности и выбрав из табл. 2 случайный индекс для заданного порядка матрицы, рассчитывают отношение согласованности

$$OC = \frac{I_c}{C_H}. \quad (12)$$

Если величина $OC \leq 0,15$, то степень согласованности суждений эксперта следует считать приемлемой. В противном случае эксперту рекомендуется пересмотреть свои суждения. Для этого необходимо выявить те позиции в матрице суждений, которые вносят максимальный вклад в величину отношения согласованности, и попытаться изменить меру несогласованности в меньшую сторону.

3. Практическое применение метода анализа иерархий для выбора оптимальных речевых кодеков с учетом совокупности показателей качества

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий при выборе оптимального речевого кодека в сетях IP-телефонии с учетом совокупности показателей качества.

Для проведения сравнительного анализа речевых кодеков выбрана совокупность технико-экономических показателей, приведенная в табл. 3 [1].

**Сравнительный анализ речевых кодеков
с учетом совокупности показателей качества**

Кодек	Скорость кодирования, кбит/с	Задержка при кодировании, мс	Размер кадра, мс	Сложность реализации	Качество
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
G.711	64	0,75	0,125	-	4,2
G.726	32	1	0,125	8 MIPS	4,3
G.728	16	3-5	0,625	40 MIPS	4,1
G.729	8	10	10	30 MIPS	4,0
G.729.a	8	10	10	20 MIPS	3,4
G.723.1	6,3	30	30	16 MIPS	3,9
G.723.1*	5,3	30	30	16 MIPS	3,7

Временная задержка увеличивается с увеличением размера кадра, а также с увеличением сложности алгоритма кодирования. При передаче речи допустимая задержка в одном направлении не может быть больше 250 мс.

Размер кадра влияет на качество воспроизводимой речи: чем длиннее кадр, тем более эффективно моделируется речь. С другой стороны, большие кадры увеличивают длительность задержки на обработку передаваемой информации. Размер кадра кодека определяется компромиссом между этими требованиями.

Сложность алгоритма кодирования связана с необходимыми вычислениями в реальном времени. Сложность алгоритма определяет скорость обработки, измеряемую в миллионах инструкций в секунду (Millions of Instructions per second – MIPS). Сложность обработки влияет на физические размеры кодирующего, декодирующего или комбинированного устройства, а также на его стоимость и потребляемую мощность.

Оценка *качества* кодирования речи с использованием различных кодеков, которая производится с помощью характеристики MOS (Mean Opinion Score – усредненное совокупное мнение) по 5-бальной шкале.

На рис. 2 показано иерархическое представление задачи выбора оптимального речевого кодека.

Построим матрицу парных сравнений (табл. 4) для показателей качества, т. е. со второго уровня иерархии (на первом уровне цель – выбор системы, на третьем – альтернативы).

Для заполнения этой таблицы с помощью опытного эксперта выполнены парные сравнение важности показателей качества. Диагональ этой матрицы заполнена значениями "1", а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполнены обратными значениями.

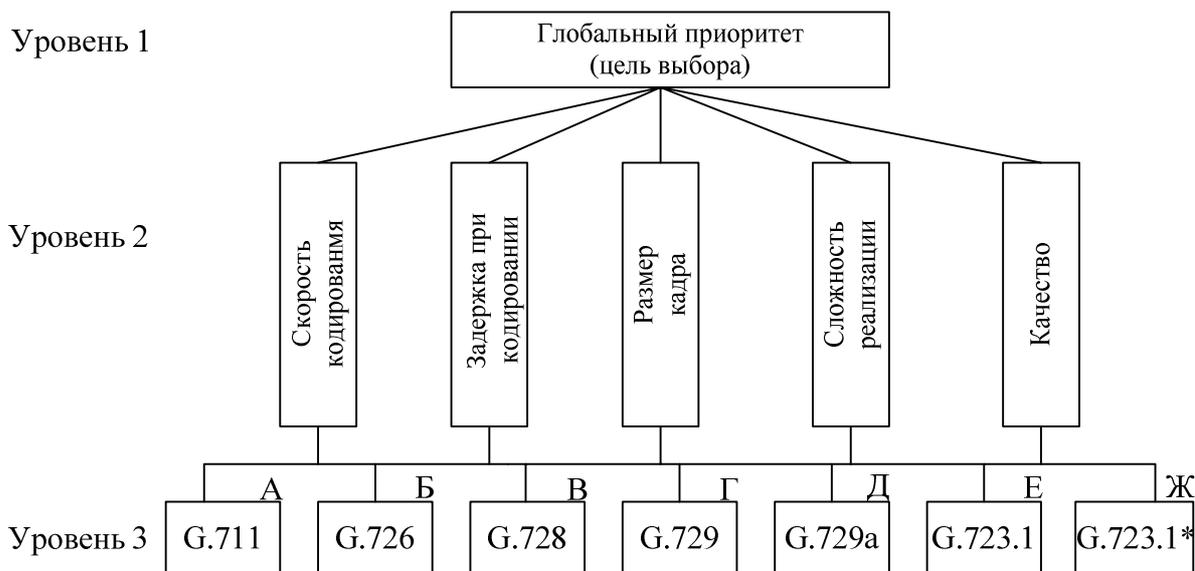


Рис. 2. Декомпозиция задачи выбора в иерархию сравнения кодеков

Таблица 4

Парные сравнение показателей качества

Показатели качества	Скорость кодирования	Задержка при кодировании	Размер кадра	Сложность реализации	Качество	Собственный вектор	Нормированные оценки вектора приоритетов, \vec{P}
Скорость кодирования	1	1/9	1/7	3	1/5	0,4145	0,0535
Задержка при кодировании	9	1	2	9	7	3,4517	0,4454
Размер кадра	7	1/2	1	7	5	2,6159	0,3376
Сложность реализации	1/3	1/9	1/7	1	1/5	0,2671	0,0345
Качество	5	1/7	1/5	5	1	1,0000	0,1290
Сумма:						7,7492	

В табл. 4 приведены вычисленные согласно (6) оценки компонент собственного вектора. По значениям компонент собственного вектора получены согласно (7) оценки компонент вектора приоритетов. Для проверки непротиворечивости суждений ЛПР при составлении матрицы парных сравнений показателей качества рассчитан индекс согласованности матрицы $I_c = 0,1033$. С учетом данных табл. 4 получено отношение согласованности $OC = 0,0922$, что меньше 0,15. Таким образом, степень согласованности суждений эксперта следует считать приемлемой.

Далее выполнены парные сравнения на III уровне иерархии. В частности, выполнены парные сравнения речевых кодеков по отношению к скорости кодирования, к задержке при кодировании, к размеру кадра, к сложности реализации, к качеству кодирования речи. В результате обработки полученных матриц парных сравнений вычислены по описанной ранее методике собственные векторы и векторы приоритетов.

Для примера, в табл. 5 приведена матрица парных сравнений речевых кодеков по отношению к размеру кадра, а также соответствующего ей собственного вектора и вектора приоритетов.

Таблица 5

Парные сравнение речевых кодеков по отношению к размеру кадра

Размер кадра	G.711	G.726	G.728	G.729	G.729a	G.723.1	G.723.1*	Собственный вектор	Нормированные оценки вектора приоритетов
G.711	1	1/2	1/4	1/7	1/7	1/3	1/3	0,3113	0,0303
G.726	2	1	1/4	1/7	1/7	1/3	1/3	0,3795	0,0368
G.728	4	4	1	1/5	1/5	1/3	1/3	0,5859	0,0569
G.729	7	7	5	1	2	5	5	3,8372	0,3728
G.729a	7	7	5	1/2	1	5	5	3,1478	0,3058
G.723.1	3	3	3	1/5	1/5	1	2	1,1163	0,1085
G.723.1*	3	3	3	1/5	1/5	1/2	1	0,9157	0,0889
Отношение согласованности (OC) = 0,0543									

Полученные оценки векторов приоритетов $\vec{P}_j, j = \overline{1,5}$ по отношению к скорости кодирования, к задержке при кодировании, к размеру кадра, к сложности реализации, к качеству кодирования речи в качестве столбцов приведены в табл. 6. В этой таблице приведены также полученные ранее компоненты вектора приоритетов показателей качества \vec{P} . С их использованием вычислены значения компонент глобального вектора приоритетов \vec{C} , которые приведены в табл. 6.

Компоненты глобального вектора приоритетов в целом для решаемой задачи выбора речевых кодеков \vec{C} вычисляются согласно соотношению

$$\vec{C} = \vec{P} \vec{P}_j, \tag{13}$$

где для решаемой задачи

$$C_j = \sum_{i=1}^5 P_i P_{ij}, j = \overline{1,7}. \tag{14}$$

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов \vec{C} выбирается наилучший для сети IP-телефонии речевой кодек с учетом выбранных показателей качества. Таким кодеком является речевой кодек G.729, который характеризуется скоростью кодирования – 8 кбит/с, задержкой при кодировании – 10 мс, размером кадра – 10 мс, сложностью реализации – 30 MIPS и качеством кодирования речи – 4.

Результаты вычисления значения глобального вектора приоритетов

Альтернативные варианты кодеков		Компонента вектора \vec{P}					Значение компонента глобального вектора приоритетов \vec{C}
		0,0535	0,4454	0,3376	0,0345	0,1290	
		Скорость кодирования, P_1	Задержка при кодировании, P_2	Размер кадра, P_3	Сложность реализации, P_4	Качество, P_5	
Значения компонент вектора приоритетов \vec{P}_i	G.711	0,0291	0,0744	0,0303	0,0404	0,2178	0,074413
	G.726	0,0428	0,0821	0,0368	0,0493	0,2655	0,087231
	G.728	0,0844	0,1413	0,0569	0,1793	0,1465	0,111744
	G.729	0,3007	0,3401	0,3728	0,3359	0,1922	0,329807
	G.729a	0,2466	0,2789	0,3058	0,1889	0,0311	0,2511821
	G.723.1	0,1772	0,0457	0,1085	0,1133	0,0901	0,0819963
	G.723.1*	0,1192	0,0375	0,0889	0,0929	0,0568	0,0636245

Выводы

В данной статье рассмотрены особенности практического применения метода анализа иерархий Саати для выбора оптимальных речевых кодеков для сетей IP-телефонии с учетом совокупности показателей качества. На примере 7-ми речевых кодеков серии G, которые характеризуются 5-ю показателями: скоростью кодирования, задержкой при кодировании, размером кадра, сложностью реализации, качеством речи, построена иерархическая структура задачи выбора. В результате опроса экспертов сформированы матрицы парных сравнений, показателей качества, а также речевых кодеков. В результате их обработки были вычислены оценки соответствующих собственных векторов и векторов приоритетов для различных уровней иерархии сравнения кодеков. Эти оценки были использованы для вычисления значений компонент глобального вектора приоритетов. Согласно методу Саати, по максимальному значению компоненты глобального вектора приоритетов выбран речевой кодек G.729, оптимальный с учетом введенных показателей качества.

1. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 240 с. 2. Безрук В.М. Методы многокритериальной оптимизации информационных систем // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – Вып.2/07. – С. 63 – 68. 3. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.