



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ПРИ ВЫБОРЕ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

БЕЗРУК В.М., СКОРИК Ю.В.

Рассматриваются теоретические и практические аспекты выбора предпочтительного варианта системы с учетом совокупности показателей качества на основе метода анализа иерархий.

1. Введение

Средства телекоммуникаций (устройства, технологии) являются важными компонентами современных инфокоммуникаций [1,2]. При их проектировании возникают требования строгого учета совокупности противоречивых показателей качества. Это определяет необходимость применения методов многокритериальной оптимизации при выборе оптимальных проектных решений из множества допустимых вариантов [2-4].

Решением задач многокритериальной оптимизации является нахождение, в общем случае, не одного, а некоторого множества Парето-оптимальных решений, которые могут быть использованы при проектировании [3,4]. Часто для дальнейших этапов создания инфокоммуникаций требуется выбирать единственный проектный вариант средств телекоммуникаций. Для сужения множества Парето до единственного проектного решения могут быть использованы разные методы, основанные на привлечении дополнительной информации о предпочтениях заказчика.

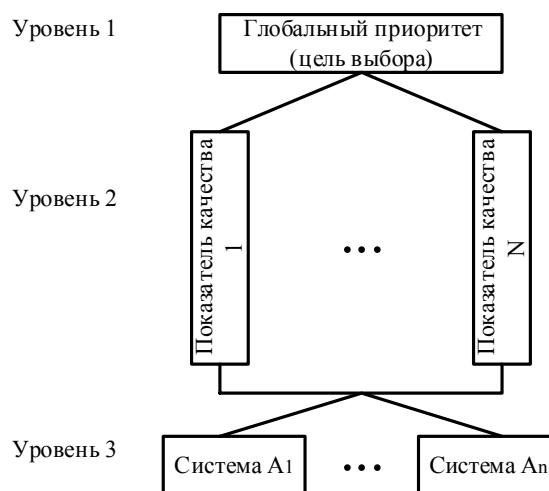
В данной статье предлагается для выбора единственного проектного варианта средств телекоммуникаций использовать метод анализа иерархий (МАИ) [5]. Приводятся практические особенности применения МАИ на примерах сравнительного анализа и выбора единственного проектного варианта разных типов средств телекоммуникаций.

2. Особенности метода анализа иерархий

Метод анализа иерархий состоит: в декомпозиции проблемы выбора единственного проектного варианта некоторой системы на простые составляющие части и получении суждений экспертов по парным сравнениям различных элементов проблемы выбора [1]. В

результате обработки полученных численных данных суждений экспертов согласно определенной математической процедуре получают компоненты глобального вектора приоритетов, которые характеризуют приоритетность выбора вариантов проектируемой системы и определяют выбор единственного проектного варианта системы [2].

Принцип декомпозиции предусматривает структурирование проблемы выбора в виде иерархии уровней, что является первым этапом применения МАИ. На рисунке представлена в наиболее общем виде иерархия проблемы выбора, которая строится с вершины (цель выбора) через промежуточные уровни (показатели качества системы) к самому низкому уровню (альтернативные варианты построения системы).



Декомпозиция задачи выбора в иерархию уровней

Принцип сравнительных суждений экспертов в МАИ состоит в том, что объекты проблемы выбора сравниваются экспертами попарно по важности. Попарно сравниваются важности разных вариантов систем (на уровне 3) и разных показателей качества (на уровне 2). Результаты парных сравнений приводятся к матричной форме:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Оценки парных сравнений элементов a_{ij} находятся с использованием субъективных суждений экспертов, численно определяемых по шкале относительной важности элементов.

Далее выполняется некоторая обработка матриц парных сравнений элементов иерархий на уровнях 2 и 3. С математической точки зрения эти задачи обработки сводятся к вычислению главного собственного вектора, который после определенной нормировки становится вектором приоритетов элементов на соответствующем уровне иерархии.

Компоненты главного собственного вектора вычисляются как среднее геометрическое значение в строке матрицы парных сравнений элементов на каждом уровне

$$V_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Компоненты вектора приоритетов элементов вычисляются через главный собственный вектор как:

$$P_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Вначале на основе матрицы парных сравнений показателей качества (1), полученной на уровне 2, вычисляются компоненты главного собственного вектора (2) и вектора приоритетов (3) показателей качества системы \vec{P} .

Аналогично находятся оценки матриц парных сравнений вариантов систем на уровне 3 в отдельности по отношению к каждому показателю качества системы. На основе этих матриц вычисляются компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов $\vec{Q}_i, i = \overline{1, n}$ по отношению к показателям качества. С использованием этих данных вычисляются значения компонентов вектора глобальных приоритетов \vec{C} согласно:

$$C_j = \sum_{i=1}^n P_i Q_{ij}, \quad j = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где n – число показателей качества; N – число сравниваемых вариантов систем.

По максимальному значению компонентов вектора глобальных приоритетов (4) выбирается наиболее предпочтительный вариант системы.

Рассмотрим практические особенности использования МАИ на примерах выбора наиболее предпочтительного варианта средств телекоммуникаций из некоторого множества допустимых вариантов с учетом совокупности показателей качества.

3. Сравнительный анализ и выбор систем связи с различными видами модуляции

Для сравнительного анализа были выбраны системы цифровой связи с когерентной MPSK и некогерентной MFSK с различным числом позиций M при вероятности битовой ошибки $P_b = 10^{-5}$ [3]. В качестве показателей качества выбраны отношение сигнал/шум $K_1 = E_b/N_0$ при различном числе позиций M и эффективность использования полосы пропускания $K_2 = R/W$.

Предполагается, что до модуляции осуществляется фильтрация по Найквисту (идеальная прямоугольная), так что минимальная двойная полоса пропускания на промежуточной частоте (intermediate frequency – IF) $W_{IF} = 1/T$, где T – длительность символа. Таким образом, эффективность использования полосы частот $R/W = \log_2 M$. При модуляции MPSK R/W растет с увеличением M . Предполагается, что полоса передачи равна $W_{IF} = M/T$. Эффективность использования полосы частот равна $R/W = (\log_2 M)/M$. При модуляции MFSK значение R/W снижается с увеличением M . Эффективность применения полосы частот изменяется с коэффициентом модуляции (разнесение частот, деленное на скорость передачи).

В табл. 1 представлены исходные данные для сравнения вариантов систем связи с MPSK и MFSK при разном числе позиций M [3].

Таблица 1

Показатели качества	Вид модуляции							
	MPSK				MFSK			
	M				M			
	2	4	8	16	2	4	8	16
	1	2	3	4	5	6	7	8
K_1	10	10	13	18	13	10	8	7
K_2	1	2	3	4	1/2	1/2	1/3	1/4

Исходные значения показателей качества K_1 и K_2 нормированы к максимальному значению и приведены к сопоставимому виду. Затем с учетом суждений экспертов сформированы матрицы парных сравнений указанных показателей качества, а также разных вариантов систем по отношению к каждому показателю качества. По этим матрицам вычислены компоненты главных собственных векторов и векторов приоритетов согласно (2), (3) и (4) с использованием программного комплекса, созданного в среде EXEL.

В табл. 2 для примера приведены вычисленные оценки компоненты главного собственного вектора и компоненты вектора приоритетов показателей качества.

Таблица 2

Показатели качества	K_1	K_2	\vec{V}	\vec{P}
K_1	1	1/2	0,707	0,333
K_2	2	1	1,414	0,667

Вычисленные значения компонент вектора приоритетов вариантов модуляции в системе связи по отношению к показателям качества приведены в табл. 3 (первые два столбца). Здесь же в последней строке приведен вектор приоритетов показателей качества.

Компоненты вектора глобальных приоритетов \vec{C} приведены в последнем столбце табл. 3.

Таблица 3

Варианты	K_1	K_2	\vec{C}
1	0,117	0,078	0,09087
2	0,098	0,179	0,15227
3	0,045	0,25	0,18235
4	0,021	0,366	0,25215
5	0,038	0,049	0,04537
6	0,082	0,042	0,0552
7	0,214	0,02	0,08402
8	0,384	0,015	0,13667
\bar{P}	0,33	0,67	

В рассмотренном множестве вариантов модуляций в цифровой системе связи по максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов наиболее предпочтительным вариантом модуляции является вариант. Ему соответствует система связи с когерентной MPSK при числе позиций $M = 16$, отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 18$ дБ, эффективности использования полосы пропускания $R/W = 4$ бит/с/Гц.

4. Сравнительный анализ и выбор вариантов построения сети мобильной связи 3-го поколения

При проведении сравнительного анализа вариантов построения сотовых сетей мобильной связи (ССМС) стандарта UMTS выбраны следующие параметры сети: вероятность блокировки $P_{\text{бл}}$, плотность обслуживаемых абонентов N_a/S_0 (N_a – число обслуживаемых абонентов, S_0 – площадь обслуживаемой территории), необходимое количество базовых станций в сети N_{BTS} . Эти параметры характеризуют качество работы сети и могут быть использованы как показатели качества сети K_1 . В табл. 4 представлены исходные данные для $P_{\text{бл}}$, а также рассчитанные параметры N_a/S_0 и N_{BTS} [4].

Таблица 4

№ варианта ССМС	K_1	K_2	K_3
	$P_{\text{бл}}$	N_a/S_0	N_{BTS}
1	0,1	166	11
2	0,07	192	21
3	0,04	142	15
4	0,02	183	18
5	0,02	189	22

В табл. 5 приведена матрица парных сравнений показателей качества и вычисленные оценки компонент главного собственного вектора и вектора приоритетов показателей качества.

Таблица 5

Показатели качества	K_1	K_2	K_3	\vec{V}	\bar{P}
K_1	1	5	3	2,46	0,62
K_2	1/5	1	1/5	0,34	0,09
K_3	1/3	5	1	1,19	0,29

Полученные значения компонент вектора приоритетов вариантов систем по отношению к показателям качества, а также компоненты вектора глобальных приоритетов \vec{C} приведены в табл. 6.

Таблица 6

Номер варианта ССМС	K_1	K_2	K_3	\vec{C}
1	0,03	0,07	0,51	0,1779
2	0,04	0,45	0,07	0,0863
3	0,11	0,04	0,26	0,1498
4	0,47	0,16	0,12	0,3418
5	0,35	0,29	0,04	0,2551
\bar{P}	0,62	0,09	0,3	

Максимальному значению компонент вектора \vec{C} соответствует наиболее предпочтительный вариант ССМС, который характеризуется минимальной допустимой вероятностью блокировки $P_{\text{бл}} = 0,02$, плотностью обслуживаемых абонентов $N_a/S_0 = 183$ аб./км² и количеством базовых станций $N_{\text{BTS}} = 18$.

5. Сравнительный анализ и выбор технологий мобильной связи HSPA, WiMAX и LTE

Для сравнительного анализа были выбраны технологии мобильной связи (МС) HSPA, WiMAX и LTE [7-9]. В результате развития создана технология HSPA+ (HSPA - релиз 7 и отдельные поправки релиза 8). В нисходящем канале их отличает модуляция 64-QAM с SIMO (1x2) или 64-QAM с SIMO (2x2). В восходящем канале добавлена модуляция 64-QAM и улучшены возможности для VoIP. Поправки в соответствии с релизом 8 позволяют использовать в нисходящем канале режим MIMO (2x2) с модуляцией 64-QAM, рассматривается возможность применения MIMO больших порядков в нисходящем канале и MIMO (2x2) – в восходящем.

Сети мобильной связи WiMAX предоставляют сервисы как подвижным, так и неподвижным пользователям. Мобильный WiMAX (релиз 1.5) имеет сравнимые с HSPA+ (релиз 8) пиковые скорости в нисходящем канале при одинаковой модуляции, скорости кодирования и ширине канала. При этом у мобильного WiMAX в восходящем канале пиковая скорость выше в 2-3 раза. Мобильный WiMAX поддерживает ширину полосы частот канала до 20 МГц при частотном и временном дуплексировании. Его частотные профили планируются в диапазонах 700, 1700, 2300, 2500 и 3500 МГц. Мобильный WiMAX обеспечивает «гладкую IP - сеть» (из конца в конец).

Следующим шагом эволюции систем 3GPP являются системы Long Term Evolution (LTE). Их отличает технология OFDMA в нисходящем канале и SC-FDMA – в восходящем. Модуляция – до 64-QAM, ширина канала – до 20 МГц, дуплексирование TDD и FDD. Применяются адаптивные антенные системы, гибкая сеть доступа. Сетевая архитектура – полностью IP-сеть. В системе LTE применяются технологии и методы, уже используемые в мобильном WiMAX. Системы LTE – это революционное улучшение 3G. LTE представляет собой переход от систем CDMA к системам OFDMA, а также переход к полностью IP-системе с коммуникацией пакетов. Поэтому внедрение этой технологии на существующих сетях мобильной связи означает необходимость новых радиочастотных ресурсов для получения преимущества от широкого канала.

Мобильный WiMAX представляет гладкую IP-сеть, сеть LTE более сложна. Если сеть WiMAX основывается полностью на IP-протоколах IEEE, то сеть LTE более сложна, включает больше протоколов.

В табл. 7 представлены исходные значения показателей качества разных стандартов сотовой сети связи: K_1 – спектральная эффективность (нисходящий канал), K_2 – радиус действия, K_3 – скорость передачи данных.

Таблица 7

Показатели качества	HSPA		WiMAX	LTE
	Релиз 7	Релиз 8	Релиз 1.5	
Спектральная эффективность	0,87	1,75	1,59	1,57
Радиус действия, км	30	40	50	5
Скорость Мбит/с	21	35	48	75

Для рассмотренных технологий на основе суждений экспертов сформированы матрицы парных сравнений указанных показателей качества и вариантов технологий по отношению к показателям качества. В табл. 8 приведены вычисленные оценки компоненты главного собственного вектора показателей качества и компонент вектора приоритетов показателей качества.

Таблица 8

Показатели качества	K_1	K_2	K_3	\vec{V}	\vec{P}
K_1	1	3	1/3	1	0,258
K_2	1/3	1	1/5	0,405	0,105
K_3	3	5	1	2,464	0,637

Вычисленные значения компонент вектора приоритетов вариантов технологий по отношению к каждому показателю качества, а также компоненты вектора глобальных приоритетов \vec{C} приведены в табл. 9.

Максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов \vec{C} соответствует наиболее пред-

почтительный вариант технологии мобильной связи. Это технология LTE со скоростью передачи данных 75 Мбит/с, спектральной эффективностью 1,57 бит/Гц/с и радиусом действия 5 км.

Таблица 9

МС	K_1	K_2	K_3	\vec{C}
1	0,057	0,13	0,043	0,05534
2	0,494	0,279	0,093	0,21586
3	0,285	0,548	0,359	0,35866
4	0,165	0,043	0,505	0,3704
\vec{P}	0,26	0,1	0,64	

6. Выводы

Научная новизна работы состоит в применении метода анализа иерархий для сравнительного анализа и выбора наиболее предпочтительного варианта средств телекоммуникаций с учетом совокупности показателей качества.

Приведены примеры решения задач сравнительного анализа и выбора наиболее предпочтительного проектного варианта для разных типов средств телекоммуникаций, в частности, для цифровых систем связи с разным видом модуляции, разных технологий сетей мобильной связи 4-го поколения, разных вариантов построения сети мобильной связи 3-го поколения.

Практическая значимость результатов состоит в том, что сформулированы рекомендации по применению метода анализа иерархий при выборе наиболее предпочтительных проектных вариантов средств телекоммуникаций.

Литература: 1. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 236с. 2. Безрук В.М. Принятие оптимальных решений в инфокоммуникациях с учетом совокупности показателей качества // Научные труды в инфокоммуникациях: обработка и защита информации / В.М. Безрук, А.Н. Буханько, Д.В. Чеботарёва. Харьков: ХНУРЭ, 2013. С. 104 – 125. 3. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 176с. 4. Чеботарёва Д.В., Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи. Х.: Компания СМИТ, 2013. 148с. 5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связи, 1993. 278с. 6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104с. 7. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи. М.: Эко-Трендз, 2007. 230с. 8. Holma H., Toskala A. LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access. Finland. John Wiley s Sons, Ltd. 2009. 433с. 9. Вишневский В., Портной С., Шахнович И. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. Техносфера, 2009. 472с.

Поступила в редколлегию 21.11.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Лошаков В.А

Безрук Валерий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Сети связи» ХНУРЭ. Научные интересы: многокритериальная оптимизация и моделирование сложных технических систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14. E-mail: bezruk@kture.kharkov.ua

Скорик Юлия Валериевна, аспирантка кафедры «Сети связи» ХНУРЭ. Научные интересы: многокритериальная оптимизация сетей связи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14. E-mail: Skorik_Y@list.ru.