

УДК 381.324

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ МЕТОДАМИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ



В.М. БЕЗРУК, Д.В. ЧЕБОТАРЁВА

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – The features of the use of multicriteria optimization methods to solve design problems of mobile communication networks are considered. The article is aimed to solve the relevant scientific and applied problem of planning and optimization of cellular mobile connection networks along with taking into account the complex of quality parameters based on the application of multicriterial optimization methods. The application of multicriterial optimization for the selection of optimal project variants on the nominal planning stage for mobile connection radio network development was proposed for the first time. Such an approach allows to perform an exact account of the array of contradicting demands on the strictly formalized level and evaluate the multi-dimensional potential network characteristics and parameters exchange diagrams, as well as eliminate the definitely inadequate variants of mobile connection network development and decrease the amount of cellular mobile connection networks reconfigurations. A specialized programming complex was developed that carries out the proposed methods of optimal project solution selection with taking into account the complex of quality parameters. The program represents a technology for automatized planning on the nominal development stage for mobile connection cellular networks. This makes it possible to develop an automated mobile connection cellular network, which reduces the duration and cost planning. Examples illustrating how to select optimal design decisions while mobile networks planning taking into account the set of quality factors are given.

Анотація – Розглядаються особливості використання методів багатокритеріальної оптимізації для вирішення задач проектування мереж мобільного зв'язку. Наводяться приклади вирішення задач вибору оптимальних проектних варіантів при плануванні мереж мобільного зв'язку з урахуванням сукупності показників якості.

Аннотация – Рассматриваются особенности использования методов многокритериальной оптимизации для решения задач проектирования сетей мобильной связи. Приводятся примеры решения задач выбора оптимальных проектных вариантов при планировании сетей мобильной связи с учётом совокупности показателей качества.

Введение

Важность телекоммуникационного сектора в динамическом развитии инфокоммуникационной структуры общества и сильная конкуренция в этом секторе заставляет телекоммуникационных операторов использовать современные методы оптимизации и компьютеризированные средства при проектировании сетей мобильной связи (СМС) [1]. Планирование является важным этапом проектирования СМС, на котором в значительной степени должны учитываться противоречивые технико-экономические требования оператора, которые задаются некоторой совокупностью связанных и конкурирующих между собой показателей качества. Это определяет необходимость использования методов многокритериальной оптимизации при выборе оптимальных проектных решений на этапе планирования СМС. Однако в существующих методах и программных комплексах проектирования процесс планирования СМС не рассматривается как задача многокритериальной оптимизации [2, 3]. Поэтому проектные решения, полученные в результате планирования СМС и

которые используются на последующих этапах проектирования и вводятся в эксплуатацию, не являются оптимальными с точки зрения совокупности противоречивых требований телекоммуникационных операторов, а это приводит к необходимости перепланирования в процессе эксплуатации СМС.

Многокритериальный анализ и оптимизация достаточно широко используются в различных технических приложениях, однако они ещё недостаточно широко используются в телекоммуникациях, в частности, при планировании СМС. Одна из причин состоит в том, что проектировщики ещё не полностью осознали широкие возможности математических методов многокритериальной оптимизации и возрастающие возможности компьютеров при решении практических задач выбора оптимальных проектных решений в планировании СМС с учетом совокупности показателей качества.

В данной статье рассмотрены теоретические и практические аспекты выбора оптимальных проектных решений с учётом совокупности показателей качества. Представлены методы выбора оптимальных проектных вариантов, основанных на теории многокритериальной оптимизации. Приведены некоторые примеры решения задач многокритериальной оптимизации проектных решений при планировании радиосетей, а также транспортной сети мобильной связи поколений 2G, 3G и 4G [4 – 8].

I. Методология многокритериального выбора оптимальных проектных вариантов СМС

Кратко рассмотрим некоторые особенности методологии выбора оптимальных проектных вариантов СМС с учётом совокупности показателей качества [6].

Во многих случаях из-за плохих исходных представлений об оптимальности проектных вариантов невозможно в формализованном виде установить скалярный критерий оптимальности, приводящий к выбору единственного проектного решения $\phi^{(i)}$, который определяется соотношением $\phi^{(i)} = \underset{\phi \in \Phi_a}{\text{arg extr}}[k(\phi)]$.

Поэтому на начальных этапах планирования ценность проектных вариантов характеризуют не одним, а некоторой совокупностью показателей качества и связанной с ними векторной целевой функцией

$$\vec{k}(\phi) = (k_1(\phi), k_2(\phi), \dots, k_m(\phi)). \quad (1)$$

Показатели качества системы могут быть трёх типов: нейтральные, согласованные между собой и конкурирующие (антагонистические) между собой. В первых двух случаях оптимизация сети может быть выполнена отдельно по каждому показателю качества. В третьем случае достижение потенциально возможного значения каждого показателя качества в отдельности может оказаться недостижимым. При этом может быть достигнут лишь согласованный оптимум противоречивых между собой целевых функций (оптимум по критерию Парето). Такой оптимум подразумевает, что достигается потенциально возможное значение каждого показателя качества в отдельности без ухудшения других показателей качества сети. При этом дальнейшее улучшение показателей качества может быть достигнуто только лишь за

счёт ухудшения других показателей качества. Согласованному оптимуму значений показателей качества соответствуют недоминируемые по критерию Парето варианты системы. Формализованная процедура получения подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов в критериальном пространстве $V = \vec{k}(\Phi_a)$ определяется соотношением

$$P(V) = \{\vec{k}(\phi^o) \in V | \forall \vec{k}(\phi) : \vec{k}(\phi) \geq \vec{k}(\phi^o)\}. \quad (2)$$

Рассмотренная задача выбора подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов с учетом совокупности показателей качества это задача многокритериальной (векторной) оптимизации. Как правило, найденное в результате решения подмножество Парето содержит не один вариант, а некоторое множество оптимальных проектных вариантов.

Потенциально возможные значения показателей качества, соответствующие согласованному оптимуму по Парето, представляют собой многомерные потенциальные характеристики проектируемой системы. В критериальном пространстве показателей качества совокупность Парето-оптимальных значений представляет собой Парето-оптимальную поверхность и связанные с ней многомерные диаграммы обмена выбранных показателей качества системы.

Нахождение оптимальных по критерию Парето проектных вариантов системы может осуществляться в критериальном пространстве оценок показателей качества (1) путем сравнения всех допустимых вариантов Φ_δ по безусловному критерию предпочтения согласно (2) либо с использованием специальных методов, например, весового метода, метода рабочих характеристик, метода последовательных уступок и др.

Формальная модель задачи Парето-оптимизации не содержит информации для выбора единственного варианта. Множество допустимых проектных вариантов сужается лишь к подмножеству Парето-оптимальных решений за счет исключения безусловно худших вариантов по безусловному критерию предпочтения (критерию оптимальности Парето).

В принципе каждый вариант из подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов может быть выбран для дальнейших этапов проектирования системы, поскольку они являются несравнимыми по безусловному критерию предпочтения – критерию Парето. Если для последующих этапов проектирования и реализации должен быть выбран только один предпочтительный вариант системы, возникает необходимость сужения подмножества Парето-оптимальных решений до единственного проектного варианта. Для этого должна быть использована некоторая дополнительная информация о предпочтениях заказчика системы. Эта информация получается после всестороннего анализа Парето-оптимальных проектных вариантов, в частности, структуры и параметров системы, рабочих характеристик полученных вариантов системы, относительной важности показателей качества и т.д. Полученная дополнительная информация используется для формирования условного критерия предпочтения, использование которого приводит к выбору из подмножества Парето единственного проектного варианта системы.

Условный критерий предпочтения может сводиться к нахождению экстремума скалярной функции ценности в виде

$$F(k_1, \dots, k_m) = \sum_{j=1}^m c_j f_j(k_j), \quad (3)$$

где c_j – масштабные коэффициенты, определяющие относительную важность соответствующих показателей качества, $f_j(k_j)$ некоторые одномерные функции ценности, которые являются оценками ценности варианта системы ϕ с точки зрения показателя качества $k_j(\phi)$.

Выбор единственного проектного варианта может быть основан на основных положениях теории размытых множеств. При этом условный критерий предпочтения сводится к нахождению экстремума функции принадлежности в виде

$$\xi_k(k_1, \dots, k_m) = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{l=1}^m [\xi_{k_l}(k_l)]^\beta \right\}^{\frac{1}{\beta}}. \quad (4)$$

Преимущество такой формы состоит в том, что в зависимости от значения параметра β реализуется широкий класс функции принадлежности: от линейной аддитивной формы при $\beta=1$ до сугубо нелинейной при $\beta \rightarrow \infty$.

Выбор единственного проектного варианта может быть основан на лексикографических отношениях, которые используют информацию об относительной важности показателей качества. Это означает, что группа показателей k_1, \dots, k_m строго упорядочена с точки зрения их важности. В частности, возможен случай, когда показатель k_1 более важен, чем другие: k_2, \dots, k_m ; показатель k_2 более важный, чем другие показатели: k_3, \dots, k_m , и т.д. Это соответствует определению лексикографических отношений, которые могут применяться при сравнении полученных Парето-оптимальных проектных вариантов и выборе единственного предпочтительного варианта. В определении лексикографических отношений большое значение имеет порядок нумерации показателей качества. Изменение в нумерации показателей качества приводит к другим лексикографическим отношениям.

II. Некоторые примеры применения методов многокритериального выбора оптимальных проектных вариантов при планировании СМС

Рассмотрим некоторые практические особенности применения методов многокритериальной оптимизации при планировании СМС, в частности, при планировании подсистемы радиосети, а также подсистемы транспортной сети для различных поколений СМС [4-8]. Как следует из методологии многокритериальной оптимизации проектных решений, процесс поиска оптимальных проектных вариантов СМС с учетом учета совокупности показателей качества включает в себя следующие этапы:

- задание набора исходных данных для допустимых проектных вариантов СМС, включающих: радиостандарт, занимаемую полосу частот, число активных абонентов, площадь покрытия, секторизацию и высоту антенн, мощности передатчиков базовых станций, параметры затухания радиоволн и др.;
- определение множества допустимых проектных вариантов с учетом ограничений на структуру и параметры СМС;
- задание показателей качества СМС и вычисление их значений для допустимых проектных вариантов;
- выбор подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов СМС в критериальном пространстве оценок значений показателей качества;
- анализ полученных Парето-оптимальных проектных вариантов, многомерных потенциальных характеристик и многомерных диаграмм обмена показателей качества СМС;
- формирование условного критерия предпочтения с привлечением полученной дополнительной информации и выбор единственного проектного варианта СМС.

Многокритериальный выбор оптимальных проектных решений при планировании радиосети СМС 2G

Рассмотрен пример применения методов многокритериальной оптимизации на номинальном этапе планирования радиосети СМС стандарта GSM. Было сформировано множество допустимых вариантов СМС. При этом заданы разные исходные данные, включающие планируемое количество абонентов в сети, размер площади покрытия, активность абонентов в час наибольшей загрузки, занимаемую полосу частот, размеры кластеров; возможную вероятность блокировки вызовов и процент времени ухудшения качества связи.

Выбраны следующие показатели качества: вероятность ошибки, емкость сети, количество базовых станций в сети, эффективность использования радиочастотного спектра, вероятность блокировки, площадь покрытия. В критериальном пространстве оценок указанных показателей качества было выделено подмножество Парето-оптимальных вариантов, включающее 71 проектный вариант СМС. При этом было исключено 29 безусловно худших проектных вариантов.

Для иллюстрации на рис. 1 приведены проектные варианты СМС в критериальном пространстве оценок показателей качества, нормированных и приведенных к сопоставимому виду. При этом уменьшение значения показателя качества приводит к улучшению варианта сети. В частности, значения показателей определялись в следующем виде:

в следующем виде: $k(N_{BTS}) = \frac{N_{BTS}}{(N_{BTS})_{\max}}$, где N_{BTS} – количество базовых станций в сети;

$k(N_a) = 1 - \frac{N_a}{(N_a)_{\max}}$, где N_a – количество активных абонентов в сети. Парето-

оптимальные варианты помечены белыми точками и соответствуют левой нижней границе исходного множества вариантов. Этим вариантам соответствуют многомер-

ные потенциальные характеристики – потенциально достижимые значения одного из показателей качества при фиксированных значениях другого показателя.

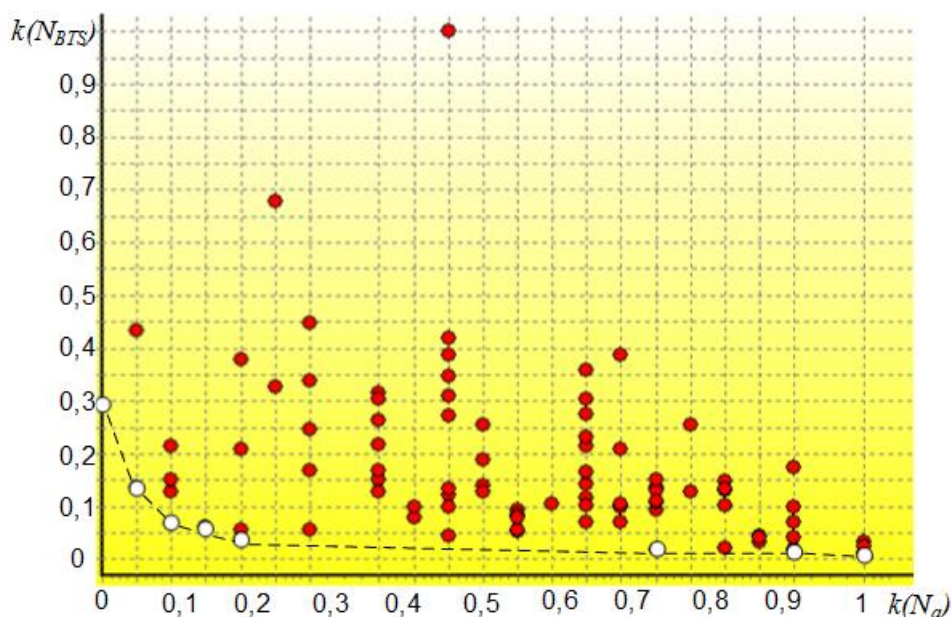


Рис. 1. Проектные варианты СМС 2G в критериальном пространстве нормированных оценок показателей качества

Единственный проектный вариант СМС из подмножества Парето-оптимальных был выбран из условия минимизации условного критерия предпочтения (3). Он характеризуется следующими данными: количество абонентов - 30000; площадь обслуживания - 320 км²; активность абонентов - 0.025 Эрл; занимаемая полоса частот - 4 МГц; возможная вероятность блокировки вызова - 0.01; процент времени ухудшения качества связи - 0.07; плотность обслуживания - 94 активных абонентов на км²; размер кластера - 7 сот; количество базовых станций в сети - 133; количество абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией - 226; телефонная нагрузка - 3.326 Эрл; вероятность ошибки - $5.277 \cdot 10^{-7}$.

Многокритериальный выбор оптимальных проектных решений при планировании радиосети СМС 3G

Рассмотрены особенности решения задачи оптимизации радиосети по совокупности показателей качества на номинальном этапе планирования радиосети СМС стандарта UMTS. Сформированное множество допустимых проектных вариантов, которые определяются разными исходными данными, в частности, планируемое количество абонентов в сети, площадь обслуживаемой территории, предполагаемая активность абонентов, допустимая вероятность блокировки вызова. Заданы показатели качества радиосети: вероятность отказа в обслуживании, плотность обслуживаемых абонентов и необходимое количество базовых станций. Множество допустимых проектных вариантов отображено в критериальное пространство нормированных и приведенных к сопоставимому виду оценок показателей качества. Для приме-

ра на рис. 2 приведены проектные варианты СМС 3G в критериальном пространстве оценок некоторых показателей качества. В частности, значения показателей определялись в следующем виде: $k(P_{\text{бл}}) = \frac{P_{\text{бл}}}{(P_{\text{бл}})_{\text{max}}}$, где $P_{\text{бл}}$ – вероятность блокировки вызова;

$k(N_{\text{BTS}}) = \frac{N_{\text{BTS}}}{(N_{\text{BTS}})_{\text{max}}}$, где N_{BTS} – количество базовых станций в сети. Парето-оптимальные варианты помечены белыми точками.

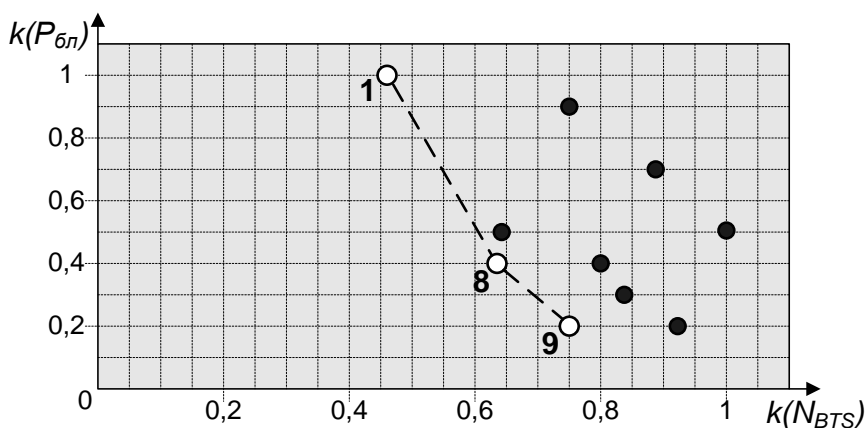


Рис. 2. Проектные варианты СМС 3G в критериальном пространстве нормированных оценок показателей качества

Из подмножества Парето-оптимальных решений с помощью лексикографического подхода выбран единственный проектный вариант радиосети СМС, который характеризуется следующими данными: вероятность блокировки – 0,02; плотность обслуживаемых абонентов – 183 аб/км², количество базовых станций – 18.

Многокритериальный выбор оптимальных проектных решений при планировании транспортной сети СМС

Получены результаты решения задачи оптимизации топологии транспортной сети СМС по двум показателями качества: относительной стоимости транспортной сети и коэффициента неготовности сети [6]. В рассмотренном примере для номинального плана радиосети, которая содержит 26 базовых станций и 1 базовый контроллер, сформировано множество допустимых вариантов топологий транспортной сети. Для каждой из топологий транспортной сети найдены оценки введенных показателей качества. Для примера на рис. 3 приведены проектные варианты топологий транспортной сети в критериальном пространстве оценок нормированных показателей качества. В частности, значения показателей определялись в следующем виде:

$k(S) = \frac{S}{(S)_{\text{max}}}$, где S – относительная стоимость сети; $k(N) = \frac{N}{(N)_{\text{max}}}$, где N – коэффициент неготовности сети.

В критериальном пространстве оценок показателей качества выделено подмножество Парето-оптимальных проектных вариантов, включающих 3 топологии транспортной сети, которые соответствуют белым точкам.

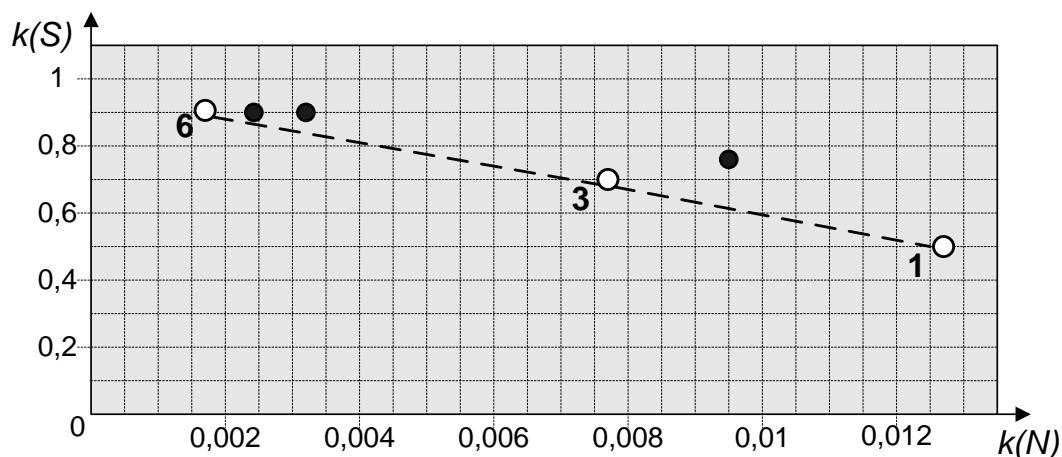


Рис. 3. Проектные варианты транспортной сети в критериальном пространстве нормированных оценок показателей качества

Единственный проектный вариант топологии транспортной сети (№6) был выбран с помощью метода, основанного на лексикографических отношениях. Эта топология имеет комбинированную структуру, использующую древовидные и кольцевые соединения.

Многокритериальный выбор оптимальных проектных решений при планировании СМС 4G

Рассмотрены особенности применения методов многокритериальной оптимизации при планировании радиосети СМС, основанной на технологии LTE. По результатам анализа трафика в сети проведен расчет радиопокрытия; выбраны частотные параметры радиосети, минимизирующие интерференцию; выбраны параметры базовых станций (мощности, частоты, диаграммы направленности антенн и их высота подвески). В результате планирования получены значения зоны обслуживания, уровни интерференции, нагрузки трафика на базовые станции, скорости передачи, вероятности ошибок и др.

При оптимизации радиосети были заданы следующие показатели качества: доступность связи, количество битовых ошибок, скорость передачи на линии вверх, время задержки пакетов, площадь радиопокрытия, пропускная способность, ёмкость сети, эффективность использования радиоспектра.

В результате применения методологии многокритериального выбора оптимальных проектных вариантов с учётом заданных показателей качества выделено подмножество Парето-оптимальных проектных вариантов. При этом в критериальном пространстве были получены потенциально достижимые значения показателей качества, представляющие собой многомерные потенциальные характеристики, а также многомерные диаграммы обмена показателей качества радиосети. Для выбора единственного проектного варианта использован условный критерий предпочтения на основе целевой функции в виде (4).

Программный комплекс для многокритериального выбора оптимальных проектных решений

Для выбора оптимальных проектных решений на основе методов многокритериальной оптимизации использован разработанный программный комплекс, который решает задачи задания исходных данных и расчет технических параметров множества допустимых вариантов СМС, выбор подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов и сужение его к единственному проектному варианту. Имеется возможность выбора и задания значений показателей качества при многокритериальной оптимизации конкретных СМС. Для иллюстрации и проведения анализа на экран выдается информация о Парето-оптимальных проектных вариантах, значениях многомерных потенциальных характеристик проектируемых СМС, а также выводятся многомерные диаграммы обмена показателей качества. Кроме того, имеется возможность задания вида условного критерия предпочтения и значений соответствующих коэффициентов в выбранных скалярных целевых функциях, которые используются для единственного предпочтительного проектного варианта.

Выводы

1. Предложенные методы и соответствующие программные средства многокритериального выбора оптимальных проектных решений дают возможность формализованного учета противоречивых требований при планировании СМС и могут быть использованы в существующих системах автоматизированного планирования СМС.

2. В результате Парето-оптимизации на этапе планирования исключаются безусловно худшие проектные варианты СМС, что приводит к сокращению числа перепланирований в процессе эксплуатации сети.

3. Рассмотренные примеры иллюстрируют возможности применения методов многокритериального выбора для решения различных типов задач планирования радиосетей и транспортных сетей мобильной связи 2G, 3G и 4G.

Список литературы:

1. *Granat J., Wierzbicki A.P.* Multicriteria analysis in telecommunications // Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences, 2004. – P. 1-6.

2. UMTS Radio Network Planning, Optimization and QOS Management. For Practical Engineering Tasks / Edited by *J. Lempidinen and M. Manninen*. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 343 p.

3. *Mishra A.R.* Advanced Cellular Network Planning and Optimisation. 2G/2.5G/3G Evolution TO 4G. /Edited by *Ajay R. Mishra*. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 542 p.

4. *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физматлит, 2002. – 176 с.

5. *Bezruk V.M., Bukhanko A.N., Chebotaryova D.V., Varich V.V.* Multicriteria optimization in telecommunication networks planning, designing and controlling // Open Book "Telecommunications Networks". Chapter 11. – Rijeka: INTECH, 2012. – P. 251–274.

6. Чеботарёва Д.В., Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи. – Х. : Компания СМІТ, 2013. – 148 с.

7. Безрук В.М., Буханько А.Н., Чеботарева Д.В., Варич В.С., Скорик Ю.В. Применение методов многокритериальной оптимизации в планировании, проектировании и управлении телекоммуникационных сетей [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 2 (7). – С. 18 – 35. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/2/1/122_bezruk_multicriteria.pdf.

8. Bezruk V., Chebotareva D., Jo M., Ivanenko S. Multicriteria Optimization in Planning of Mobile Communication Networks // 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. MIKON 2014, June 16-18, Gdansk, Poland, 2014. – P. 633 – 639.