УДК 656.004.89; 656.052//625.173.1

Методы линейного программирования при планировании транспортной инфраструктуры Индонезии

Linear programming methods for planning Indonesia's transport infrastructure

Коваленко Н.И., д.т.н., профессор, Российский университет транспорта (РУТ, МИИТ),
E-mail: kni50@mail.ru, Москва, Россия
Kovalenko N.I., D.ofSci.(Tech.), Professor, Russian University of Transport (RUT, MIIT),
E-mail: kni50@mail.ru, Moscow, Russia

Коваленко Н. А., к.т.н., доцент, Российский университет транспорта (РУТ),
E-mail: nina-alex-kov@mail.ru, Москва, Россия
Kovalenko N.A., Ph.D.(Tech.), Associate Professor, Russian University of Transport (MIIT),
E-mail: nina-alex-kov@mail.ru, Moscow, Russia

Аннотация

Задача исследования состоит в применении методов линейного программирования для формирования бюджетов муниципалитетов на строительство и реконструкцию объектов транспорта с учетом объемов производственного плана подрядных организаций в соответствии с комплексным стратегическим планом развития инфраструктуры региона Индонезии. Приведены результаты исследования транспортных проблем Индонезии для решения задач перевозки, как пассажиров, так и грузов. Такая задача возлагается на железнодорожный транспорт, который включен в программу развития транспорта на островах Суматра, Сулавеси, Калимантан и Папуа, разработанной в Национальной стратегии развития транспорта (РИПНАС) до 2030 года. Рассмотренный вариант матриц формируется на основе сложившихся институциональных отношений между поставщиками и потребителями. Они отражают не только текущую выгоду, но и надежность взаимодействия, что в обычной постановке транспортной задачи игнорируется. Эти матрицы служат основой получения опорного решения. Например, на острове Суматра – это развитие пригородной (между провинциями) железнодорожной сети для снижения транспортной нагрузки на автомагистрали в качестве связующего звена экономической деятельности.

Ключевые слова: транспортная система Индонезии; железнодорожный транспорт; Национальная стратегия развития транспорта (РИПНАС); симплекс-метод; каноническая транспортная задача; комбинаторные методы решения; динамическое программирование.

Abstract

The objective of the study is to apply linear programming methods for the formation of municipal budgets for the construction and reconstruction of transport facilities, taking into account the volume of the production plan of contractors in accordance with the comprehensive strategic plan for the development of infrastructure in the region of Indonesia. The results of the study of transport problems in Indonesia for solving the problems of transportation of both passengers and cargo are presented. This task is assigned to rail transport, which is included in the program for the development of transport on the islands of Sumatra, Sulawesi, Kalimantan and Papua, developed in the National Strategy for the Development of Transport (RIPNAS) until 2030. The considered version of the matrices is formed on the basis of the existing institutional relations between suppliers and consumers. They reflect not only the current benefit, but also the reliability of interaction, which is ignored in the usual formulation of the transport task. These matrices serve as the basis for obtaining a reference solution. For example, on the island of Sumatra, it is the development of a suburban (inter-provincial) railway network to reduce the traffic load on highways as a link of economic activity.

Keywords: Indonesia's transport system; rail transport; National Transport Development Strategy (RIPNAS); simplex method; canonical transport problem; combinatorial methods of solution; dynamic programming.

›››

Введение

Одна из проблем Индонезии, как страны-архипелага, является объединение всех своих территорий устойчивыми транспортными сообщениями [1, 2, 3]. В настоящее время Индонезия является четвертой из 10 стран с самым большим населением в мире, которое составляет около 269,6 миллиона человек. Индонезия – это архипелаг, имеющий более 17000 островов общей площадью 735 355 квадратных миль. Поэтому транспорт представляет важный макроэкономический аспект национальной, региональной и местной экономики, как в сельских, так и в городских районах [4, 5].

Важная задача в решении транспортных проблем Индонезии возлагается на железнодорожный транспорт, позволяющий перевозить как пассажиров, так и грузы, обеспечивать экономию энергозатрат, иметь высокий уровень безопасности при эксплуатации, быть экологически безопасным и более эффективным по сравнению с автомобильными перевозками (по объемам массовых перевозок). Конец 19 века стал началом развития железнодорожного транспорта в Индонезии. В настоящее время работы по развитию и совершенствованию в этой области продолжаются и включены в программу развития железнодорожного транспорта на островах Суматра, Сулавеси, Калимантан и Папуа [6, 7, 8]. Программа развития заложена в Национальной стратегии развития железных дорог (РИПНАС) до 2030 года.

Например, целью развития железнодорожной сети на острове Суматра является соединение существующих несвязанных железнодорожных линий в Ачехе, Северной Суматре, Западной Суматре, Южной Суматре и Лампунге в единую сеть соединенных между собой железных дорог [9, 10]. До 2030 года планируется поэтапное строительство железнодорожной инфраструктуры, включая железнодорожные пути и объекты [1, 2, 3]. Согласно намеченной стратегии [9, 10], разработка сети железных дорог, например, острова Суматра планируется в столице каждой провинции, в которую входят следующие города: Медан (Северная Суматра) протяженность – 230 км; Пеканбару (Риау) – 120 км; Паданг (Западная Суматра) – 330 км; Палембанг (Южная Суматра) – 250 км; Бандар Лампунг (Лампунг) – 170 км и Батам (Острова Батам) – 330 км.

Авторы выражают благодарность Пуспитасари Ю. и Нурдиане Х. студентам из Индонезии, принимавшим активное участие в сборе и обработке информации по состоянию транспортной инфраструктуры Индонезии.

Материалы и методы

В качестве математической модели для решения задачи планирования развития транспортной инфраструктуры Индонезии, анализа факторов, влияющих на строительство и развитие транспорта, может рассматриваться каноническая транспортная задача, в которой используют два типа критериев оптимизации: минимум затрат на строительство и минимум времени на его выполнение.

Задача называется транспортной, но ее применение выходит за рамки транспорта. Названием транспортная задача охватывается широкий круг задач с общей математической моделью [11, 12]. Эти задачи относятся к области линейного программирования [13, 14].

Классическую транспортную задачу можно решить симплекс-методом [15, 16], но при учете её особенностей результат решения может быть другим. Общим недостатком постановки и решения транспортной задачи в ее многочисленных вариантах является то, что она не является рыночной, так как учитывает интересы только одного участника рынка. Часто транспортная задача представляет интересы одного участника рынка и характеризует его предложение. На рынке существует спрос, который является дополнительным фактором. Фактор спроса в решении транспортных задач не учитывается.

Классическая постановка транспортной задачи.

Условия постановки классической транспортной задачи, следующие:

- имеется m – производителей работ (подрядных организаций) (вектор ресурсов),
- имеется n – строительных объектов (вектор потребления),
- заданы коэффициенты затрат c_{ij}, то есть затраты стоимости единицы строительной операции от i-го производителя для j-го строительного объекта (матрица затрат).

В результате решения необходимо определить x_{ij} объем строительных работ от i-го производителя (например, подрядной организации) для j-го пользователя (например, муниципалитета) (искомое решение). Кроме того, необходимо найти план объема строительных работ для каждой пары производитель – пользователь, чтобы по возможности:

1. мощности всех производителей (подрядных организаций) были реализованы,
2. просы всех пользователей (муниципалитетов) были бы удовлетворены,
3. суммарные затраты на производство работ были бы минимальными.

Особенностями постановки классической транспортной задачи являются: система ограничений задана в виде равенств (каноническая форма); коэффициенты при переменных системы 0 или 1; каждая переменная входит в систему ограничений два раза.

Система ограничений имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = M_j \quad (j = 1 \ldots m), \tag{1}$$

где m – число производителей работ (подрядных организаций):

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = N_i \quad (i = 1 \ldots n), \tag{2}$$

где n – число строительных объектов.

Линейная функция может быть выражена в виде:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} c_{ij} x_{ij} \Rightarrow \min \tag{3}$$

При решении поставленной задачи с учетом множества ограничений (1, 2) требуется найти решение X, »»» при котором линейная функция F (формула 3) имеет минимальное значение. Произвольно допустимое решение $X(x_{11}, x_{12},\dots x_{1n}, x_{ij},\dots x_{m1}, x_{mn})$ называют распределением заявок или предложений. Оно задается заполнением таблицы заявок или предложений от производителей к заявителям. Если суммарная мощность производителей равна суммарной потребности заявителей, то такой тип задач называют закрытым, в противном случае задачу называют открытой. Решение транспортной задачи включает два этапа. Первый этап заключается в нахождении первоначального базисного решения. Второй этап включает корректировку и оптимизацию базисного решения.

После нахождения базисного решения плана производства работ, нужно применить один из алгоритмов его улучшения и приближения к оптимальному плану.

Транспортная задача с учетом интересов и конкуренции. В реальной практике транспортная задача решается с учетом опыта взаимодействия между заявителем и производителем. В реальности и на рынке планирования строительных работ существуют интересы производителей (подрядных организаций) и интересы заявителей (например, муниципалитетов). Интересы производителей отражены графом предложений (рисунок 1) и матрицей подрядных организаций по производству строительных работ (рисунок 2). Условно матрица подрядных организаций (поставщиков) обозначена как матрица B.

Граф предложений (рисунок 1) показывает, что отношения между поставщиками не являются комплиментарными. Между ними существует конкуренция и борьба за своего потребителя (муниципалитет). В матрице B предложения обозначены символом t – *tender*. Наличие символа t в строке матрицы качественно отражает интерес поставщика в выполнении определённого объёма строительных работ, определяемого количественно величиной t.

Аналогичная ситуация существует для удовлетворения интересов заявителей (например, муниципалитетов). Интересы потребителя отражает граф спроса (рисунок 3) и матрица потребителя (рисунок 4).

Условно матрица заявителей (например, муниципалитетов) обозначена как матрица A. Граф спроса (рисунок 3) показывает, что между потребителями, как и между поставщиками, существует конкуренция и борьба за своего поставщика (подрядную организацию).

В матрице A предложения обозначены символом r – request. Наличие символа r в строке матрицы качественно отражает интерес потребителя к данному поставщику, который количественно выражает интерес в получении продукта, определяемого количественно величиной r. Величины r и t имеют противоположные знаки. Это обусловлено противоположными направлениями векторов на рисунок 1 и рисунок 3.

Следует отметить, что данная постановка задачи приводит не к одной, а двум матрицам. Эти матрицы отражают не только разные интересы поставщика и потребителя, но внутреннюю конкуренцию между поставщиками и потребителями.

Матрицы A и B, в отличие от математической постановки задачи, формируются на основе реальных ежегодных планов строительства объектов инфраструктуры

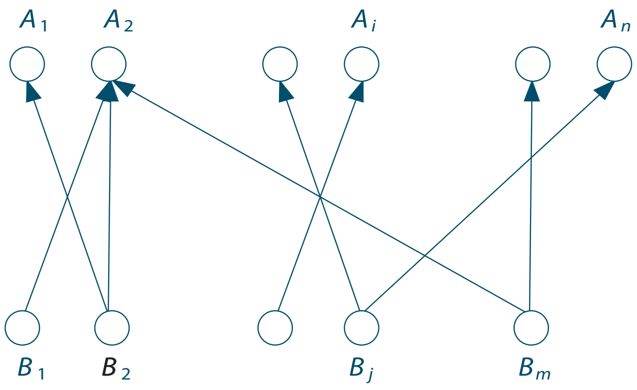

Рисунок 1. **Граф предложений подрядных организаций строительных работ**

	A_1	A_2	....	....	....	A_n
B_1		t				
B_2	t	t	t			
....			t	t	t	
....		t	t		t	t
....			t			t
B_m	t	t		t	t	

Рисунок 2. **Матрица поставщика (подрядных организаций) B**

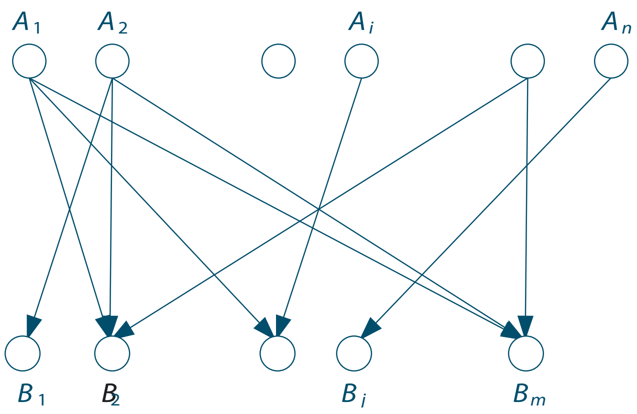

Рисунок 3. **Граф спроса заявителей (например, муниципалитетов)**

	A_1	A_2	....	....	....	A_n
B_1	r	r				r
B_2		r	r			
....			r	r	r	
....		r	r	r	r	
....	r	r		r		r
B_m				r	r	

Рисунок 4. **Матрица заявителей (например, муниципалитетов) A** ›››

или планов потребления продукции. По существу, они могут повторять план предыдущего года с внесением в него корректировок. Поэтому их можно использовать в качестве реального опорного плана. Матричное решение получается путем наложения векторных схем или сложения матриц A и B с элементами, имеющими противоположные знаки.

В идеальном случае, в сбалансированной системе потребления и поставок. Это и будет оптимальным решением.

$$A + B = 0 \quad (4)$$

В реальности:

$$A + B = N \quad (5)$$

где N определяется как матрица несоответствия (рис. 5).

Элементами матрицы несоответствия будут r и t, а также Δr и Δt. Величины r и t, говорят о полном несоответствии по данному направлению (связи поставщик потребитель), а величины Δr и Δt говорят о наличии частичного несоответствия между данным направлением взаимодействия. Таким образом, имеет место избыток ресурсов со стороны производителя t (производителя работ, например подрядной организации) или недостаток в ресурсах r (недостаток финансирования) со стороны потребителя (заявителя, например, муниципалитета). Задача сводится к минимизации матрицы путем взаимного поглощения ее элементов:

$$A + B = \min (N) \quad (6)$$

Эта задача решается методами комбинаторной математики.

Комбинаторные методы решения. Минимизация матрицы может рассматриваться как задача целочисленного программирования. Задача максимизации носит название «Задача о ранце», которая всегда решается. Данная задача формулируется следующим образом [17].

Имеется n объектов строительства инфраструктуры ($c_{ij} = 1, n$) и различные стоимости производства работ c_j. Требуется выбрать такие виды строительных работ, которые имеют минимальную суммарную величину не более b_1 (заданного значения бюджета). Обозначим $x_j = 1$, если j-й вариант выполнения работ выбран и $x_j = 0$ в противном случае. В нашем случае задача состоит в минимизации линейной формы (F_L):

$$F_L(x) = \sum_{j=1}^{n}(c_j x_j) \Rightarrow ......\min \quad .... \quad (7)$$

При линейном ограничении:

$$\sum_{o=1}^{m}(c_j x_j) \le b_i, \quad x_j = \{0,1\} \quad (8)$$

Для решения данной задачи, в основном, предлагаются алгоритмы, основанные на методе динамического программирования [18].

Обобщением задачи является задача целочисленного линейного программирования. По существу, это и есть решение транспортной задачи. В нашем случае требуется минимизировать стоимостные потребности в строительных работах (f_r).

	A_1	A_2	....	....	....	A_n
B_1	r	0	0	0	0	r
B_2	t	0	0	0	0	0
....	0	0	0	0	0	0
....	0	0	0	r	r	0
....	r	r	t	r	0	0
B_m	t	t	0	0	0	0

Рисунок 5. **Матрица несоответствия N**

$$f_r(x) = \sum_{i=1}^{n}(c_j x_j) \quad j = 1,...n \quad (9)$$

При ограничениях:

$$\sum_{j=1}^{n}(a_{i,j}) \le b, \quad (10)$$

где $i = 1..... m; \ j = 1.....n; x_j = \{0,1\}$

Обсуждение результатов

Алгоритмы решения целочисленной задачи линейного программирования используют, главным образом, идею дополнительных секущих плоскостей, предложенной Гомори [19, 20]. Машинные эксперименты, проведенные с этими алгоритмами [21], показали, что они дают хорошие результаты в основном для задач небольшой размерности. Однако даже среди этих задач встречаются такие, для которых алгоритмы секущих плоскостей либо не дают решения за реальное время, либо требуют объема вычислений того же порядка, что и полный перебор.

В задачах комбинаторного типа выделяются две группы: метод локальной оптимизации и метод пошагового получения решений. Пошаговое получение решений включает итеративные, инкрементные и спиральные алгоритмы [22]. В [23] описано исследование по применению метода случайного поиска для решения задачи целочисленного программирования при дополнительном условии, что все параметры a_{ij}, c_j, b неотрицательны.

Формирование бюджета муниципалитетов на строительство и реконструкцию с учетом объемов производственного плана подрядных организаций производится последовательно, начиная с линейного уровня, сформированного производственно-техническим отделом подрядной организации [24, 25] в соответствии с комплексным стратегическим планом развития инфраструктуры региона Индонезии.

Учет интересов не только подрядных организаций, но и заявителя, например, муниципалитетов приводит к необходимости постановки транспортной задачи »» нового типа: в этой задаче вместо одной матрицы используют две матрицы, независимо отражающие интересы подрядных организаций по строительству новых и реконструкции существующих железных дорог и потребителя – заявителя, например, муниципалитетов. Эти матрицы формируются на основе сложившихся институциональных отношений между поставщиками и потребителями. Они отражают не только текущую выгоду, но и надежность взаимодействия, что в обычной постановке транспортной задачи игнорируется. Эти матрицы служат основой получения опорного решения. Например, на острове Суматра это развитие пригородной (между провинциями) железнодорожной сети для снижения транспортной нагрузки на автомагистрали в качестве связующего звена экономической деятельности.

Выводы

Для развития пригородной железнодорожной сети на острове Суматра планируется построить основную магистраль для соединения следующих городов: Банда Ачех – Сигли – Биреун – Локсеумаве (284 км); Локсеумаве – Лангса – Беситанг (199,5 км); Бинджай – Беситанг (156 км); Рантаупрапат – Дури – Думай (251 км); Дури – Пеканбару (100 км); Пеканбару – Муаро (297 км); Пеканбару – Ренгат – Джамби (274 км); Джамби – Бетунг (188 км); Бетунг – Симпанг (124 км); Тарахан – Бакаухени (70 км); Пематанг Сиантар – Данау Тоба (117 км); Кратчайший путь Реджосари – Тарахан (37,752 км); Кратчайший путь Индарунг – Солок (36,2 км); Реконструкция линии Белаван – Габион; Реконструкция линии Паданг – Пуло Аэр; Реконструкция линии Нарас – Сунгай Лимау, и Реконструкция линии Муаро Калабан – Логас.

Дальнейшая оптимизации получается путем обработки результирующей матрицы, причем результирующая матрица может быть дополнена новыми предприятиями по строительству и выполнению ремонтных работ и новыми потребителями – заявителями. В качестве решения результирующей матрицы можно использовать метод решения «Динамической транспортной задачи с задержками» или комбинаторные методы. Таким образом, развитие сети пригородных поездов требует государственной финансовой поддержки в инфраструктуру для достижения максимального качества обслуживания. ■

Список литературы

1. Kementerian Perhubungan. Rencana Induk Perkeretaapian Nasional. Ditjen Perkeretaapian. Jakarta, 2011. – 86 p.
2. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2020 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2020-2024, 2020. –710 p.
3. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2015 tentang Kerjasama Pemerintah dengan Badan Usaha dalam Penyediaan Infrastruktur, 2015. – 37 p.
4. PT. Penjaminan Infrstruktur Indonesia. Proyek KPBU Kereta Api Makassar- Pare-pare, 2018. – 366 c.
5. M. Yamin Jinca. Keterpaduan Sistem Jaringan Antar Moda Transportasi di Pulau Sulawesi. Makassar. 2009. – 14 p.
6. Peraturan Daerah Provinsi Sulawesi Selatan Nomor 1 Tahun 2019 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Provinsi Sulawesi Selatan Tahun 2018-2023. 2019. –655 p.
7. Peraturan Daerah Provinsi Sulawesi Barat Nomor 8 Tahun 2017 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Provinsi Sulawesi Barat Tahun 2017-2022. 2017. – 484 p.
8. Peraturan Daerah Provinsi Sulawesi Utara Nomor 1 Tahun 2014 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Provinsi Sulawesi Utara Tahun 2014-2034. 2014. – 114 p.
9. Badan Pusat Statistik Provinsi Sulawesi Tengah. Provinsi Sulawesi Tengah dalam Angka. 2018. – 607 p.
10. Badan Pusat Statistik Provinsi Sulawesi Barat. Provinsi Sulawesi Barat dalam Angka. 2021. – 651 p.
11. Миловидов С.П., Козлов П.А. Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке //Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1982. – №. 1. – рр. 211-212.
12. Бородинова И.А., Сараев Л.А. Стохастическая транспортная задача // Вестник Самарского государственного университета. 2010. № 81. стр.16–23.
13. Dantzig G. Linear programming and extensions. – Princeton university press, 2016.
14. Gass S. I. Linear programming //Encyclopedia of Statistical Sciences. – 2004. – V. 6.
15. Nelder J. A., Mead R. A simple method for function minimization //The computer journal. – 1965. – V. 7. – №. 4. – p.308-313.
16. Цветков В.Я. Математические методы анализа в экономике. – М.: МАКС Пресс, 2001, – 56с.
17. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Комбинаторное решение транспортной задачи. Наука и технологии железных дорог. 2019. Т. 3. № 1 (9). С. 85-88.
18. Беллман Р., Дрейфус С, Прикладные задачи динамического программирования. «Наука», 1965
19. Gomory R. E. An Algorithm for integer solutions to linear programs. Recent Advances Math. Programm. McGraw-Hill Book, 1963.
20. Gilmore P. C., Gomory R. E. Multi-Stage Gutting Stock Problems of two and more dimensions. Opns. Res., v. 13, No. 1, 1965.
21. Теплицкий Э. Д., Финкелыптейн Ю. Ю. Машинный эксперимент по решению задач целочисленного линейного программирования // Экономико-математические методы, т. IV, № 2. 1968.
22. Цветков, В.Я., Мордвинов В.А. Подход к систематизации алгоритмов // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 7, №4 (26). – С. 388-397.
23. Пятецкий-Шапиро А.Б. и др. Об одном интерактивном методе решения задач целочисленного программирования. Доклад АН СССР, т. 160, т. 169, № 6, 1966.
24. Волков Б.А., Коваленко Н.И., Добрин А.Ю., Коваленко А.Н. О методике планирования расходов на текущую эксплуатацию пути // Путь и путевое хозяйство, № 5, 2018, С. 23-26.
25. Волков Б.А., Коваленко Н.И., Добрин А.Ю., Коваленко А.Н. Сокращение затрат на текущую эксплуатацию пути в зависимости от классификации железнодорожных линий // Путь и путевое хозяйство, № 6, 2019, С. 15-19.