Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования
Сыктывкарского государственного университета. 2019. № 1

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭКОНОМИКИ
AUTOMATION OF ECONOMIC MANAGEMENT PROCESSES

Решение некоторых сетевых задач в среде Excel
Solving some network tasks in Excel

DOI: 10.34130/2070-4992-2019-1-150-159
УДК 519.677

Н. В. Катаргин, *Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Москва, Россия)*

N. V. Katargin, *Financial University under the Government of Russian Federation (Moscow, Russia)*

Цель данной работы – разработка методов решения актуальных задач сетевого моделирования. Предложены принципиально новые алгоритмы для решения в среде Excel двух задач: выбор маршрута в дорожной сети (задача коммивояжёра), размещение и подключение к потребителям электроподстанций с обеспечением минимизации потерь в электросетях. Авторские know how: «короткий план» в задаче о выборе маршрута, позволяющий резко сократить количество варьируемых компьютером переменных, нетривиальное использование сервиса “Поиск решения” (Solver) с применением метода градиентного спуска для варьирования двоичных переменных, а также совместное варьирование действительных и двоичных переменных в задаче о размещении. Решена проблема появления «островов» в задаче о выборе маршрута – узлов, не связанных с основным маршрутом. В алгоритм заложено недопущение возврата по той же дороге, кроме особых случаев – звёздных маршрутов из некоторых пунктов. Алгоритмы реализованы в среде MS Excel, для их использования не требуется программирование, а только заполнение таблиц исходных данных и несложные действия: копирование и суммирование. Выбор маршрута и размещение подстанций опробованы на сетях с 15 узлами, что достаточно для практики. Проложены оптимальные маршруты через реальную дорожную сеть, как без возвращения в исходный пункт, так и кольцевой маршрут, как в классической задаче коммивояжёра. В задаче о размещении объектов также использованы реальные карты (Yandex). Проработаны два варианта – с ограничением подстанций по мощности и без ограничения. Данный алгоритм можно использовать для оптимизации размещения, например баз снабжения топливом и товарами. При размещении объектов в узлах дорожной сети их координаты заменяются на двоичные переменные с незначительными изменениями алгоритма. Результаты могут быть использованы для практической работы в области транспортной логистики и размещения новых производств, а также обучения студентов методам решения производственных задач с использованием математического моделирования и информационных технологий.

Ключевые слова: *сетевое моделирование, маршрут, задача коммивояжёра, размещение объектов, электросети, Excel.*

The aim of this work is to develop methods for solving actual problems of network modeling. Fundamentally, new algorithms for solving two problems in Excel are proposed: the choice of the route in the road network (the traveling salesman problem), the placement and connection to consumers of power substations with the provision of minimizing losses in power grids. The authors know how: «short plan» in the problem of choosing a route, which allows to dramatically reduce the number of variables varied by the computer, non-trivial use of the service Solver using the gradient descent method to vary binary variables, as well as the joint variation of real and binary variables in the problem of placement. The problem of the appearance of «islands» in the problem of choosing a route – nodes that are not connected with the main route is solved. The algo-

rithm is based on the prevention of return on the same way, except in special cases – star routes from some points. The algorithms are implemented in MS Excel, for their use does not require programming, but only filling in the tables of the original data and simple steps: copying and summarizing. Route selection and placement of substations are tested on networks with 15 nodes, which is enough for practice. The optimal routes are laid through the real road network, both without returning to the original point and the ring route, as in the classical traveling salesman problem. The problem of placing objects also uses real maps (Yandex). Two options have been worked out-with the limitation of substations in capacity and without limitation. This algorithm may be used to optimize the location of, for example, fuel and commodity supply bases. When placing objects in road network nodes, their coordinates are replaced by binary variables with minor algorithm changes. The results can be used for practical work in the field of transport logistics and placement of new objects, as well as teaching students how to solve economical problems using mathematical modeling and information technology.

Keywords: *network modeling, routing, traveling salesman problem, object placement, electrical outlets, Excel.*

Введение

В последние годы появилось множество программных продуктов, позволяющих автоматизировать процедуры принятия решений в экономике, как специализированных, типа Project Expert, так и универсальных развивающихся – Python, R. Но во многих случаях специалистам на предприятиях требуется решить конкретную, часто нестандартную задачу сравнительно небольшой размерности. В этом случае нет необходимости тратить деньги на программы и программистов, а решать задачи в простой и наглядной среде, предельно адаптированной к пользователю – Excel. Студентов также удобно учить, используя наглядные таблицы. В данной работе приведены примеры решения двух практических задач: выбор оптимального пути в транспортной сети и размещение электроподстанций. Постановка задач взята из работ [1–4], но для их решения предложены авторские алгоритмы.

В Задаче коммивояжёра требуется выбрать оптимальный маршрут поездки из одного города в другой с заездом в указанные города. В общем виде Задача коммивояжёра не решена, кто решит – получит Абелевскую премию, математический аналог Нобелевской премии. Методы решения задачи коммивояжёра основаны на теории графов: полный лексический перебор [5], жадные алгоритмы (метод ближайшего соседа, метод включения ближайшего города, метод самого дешёвого включения) [6–8], метод минимального остовного дерева [9]. На практике применяются различные модификации более эффективных методов: Метод ветвей и границ, основанный на теории графов [3, с. 177–180], [11–15], метод Гомори [3, с. 164–176], «жадный алгоритм», алгоритм динамического программирования Беллмана [3, с. 230–235]. Интересен так называемый Генетический алгоритм – эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе [16–18]. Мы решим достаточно сложную и интересную задачу: спланируем путешествие по Сыктывкару, посетив 11 достопримечательностей, используя сервис *Поиск решения* (Solver) Excel с методом градиентного спуска (Метод Ньютона, или ОПГ). Кроме того, мы применим этот метод для планирования размещения трансформаторных подстанций и их подключения к группам потребителей – сельских населённых пунктов. Оптимизируются как числовые переменные – координаты подстанций, так и логические – подключения потребителей.

Задачи полезны для логистов-практиков, работающих в транспортных, снабженческих (delivery) и логистических компаниях, хотя возможностей Excel может не хватить, и придётся покупать или заказывать специальную программу.

Выбор оптимального пути в транспортной сети

Транспортная сеть в данном случае состоит из 11 узлов (пунктов), которые соединены магистралями. Надо найти оптимальный маршрут проезда из 1-го пункта в 11-ый с заездом в указанные пункты. Схема представлена на рис. 1. Стоимость проезда по каждой магистрали пропорциональна расстоянию. В данном примере целевая функция – суммарная длина маршрута, а план является дискретным множеством — набором положительных целых чисел, означающих количество поездок от одного пункта до другого или отказ от проезда (0). В классической постановке задачи предполагается однократное посещение каждого пункта, но практика показала, что иногда приходится проехать 2 раза по той же дороге или посетить узел несколько раз, если посещаемые пункты расположены вокруг него.

Расстояния от пункта i в пункт k равна R_{ik}, элементы этой матрицы приведены в табл. 1.

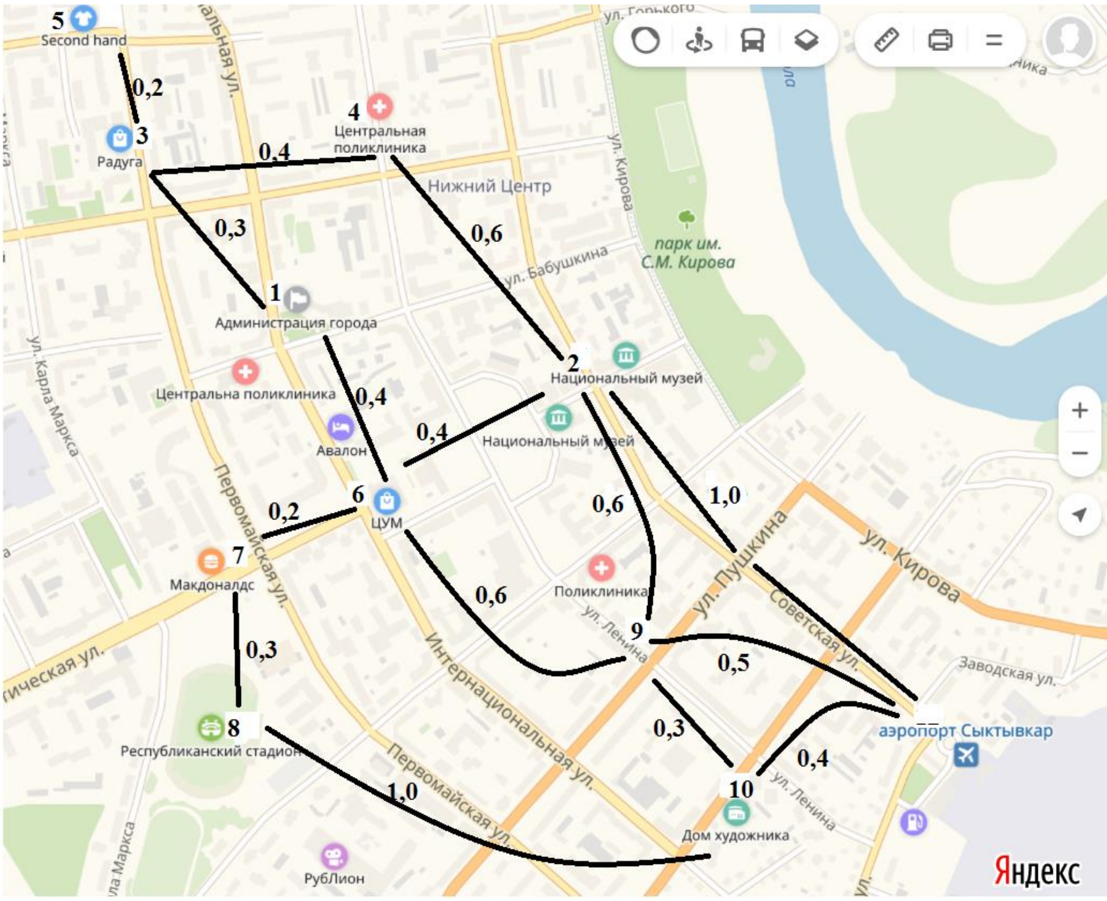

Рис 1. Транспортная сеть: план г. Сыктывкар (Yandex)

Для решения задачи надо построить таблицы: *Расстояния между пунктами* R_{ik} и *План поездки* X_{ik}, который в данном случае представляет из себя матрицу из целых чисел, соответствующих количеству поездок из одного пункта в другой с учётом направления: обычно это 0 или 1 (двоичные, бинарные), но в некоторых случаях придётся проехать несколько раз. Таблицы симметричны относительно диагонали, то есть возможны поездки в любом направлении; это даёт возможность произвольной нумерации пунктов, кроме первого и последнего. Решение задачи сводится к поиску комбинации X_{ik}, обеспечивающей проезд из пункта 1 в пункт 11 при минимальных затратах.

Таблица 1

Расстояния между узлами сети

		D	*E*	*F*	*G*	*H*	*I*	*J*	*K*	*L*	*M*	*N*
		Адм	*Муз*	*Рад*	*Ц.П.*	*S.H*	*ЦУМ*	*Мак*	*Ст.*	*Пол*	*Д.Х.*	*Аэро*
откуда		*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
Администрация.	1			0,3			0,4					
Музей	2				0,6		0,4			0,6		1,0
Радуга	3	0,3			0,4	0,2						
Центр поликл.	4		0,6	0,4								
Sec.Hand	5			0,2								
ЦУМ	6	0,4	0,4					0,2				
Макдоналдс	7						0,2		0,3			
Стадион	8							0,3			1,0	
Поликлиника	9		0,6								0,3	0,5
Дом художника	10								1,0	0,3		0,4
Аэропорт	11		1,0							0,5	0,4	

Таблица 2

Исходный план поездки, Короткий план и Суммы ячеек, симметричных относительно главной диагонали

			D	*E*	*F*	*G*	*H*	*I*	*J*	*K*	*L*	*M*	*N*	*O*
			Адм	*Муз*	*Рад*	*Ц.П.*	*S.H*	*ЦУМ*	*Мак*	*Ст.*	*Пол*	*Д.Х.*	*Аэро*	*Выезды*
	откуда		*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	
23	Администрация	1			1			1						2
24	Музей	2				1		2			1		1	5
25	Радуга	3	1			2	1							4
26	Центр поликл.	4		1	2									3
27	Second Hand	5			3									3
28	ЦУМ	6	2	2					1					5
29	Макдоналдс	7						3		1				4
30	Стадион	8							2			1		3
31	Поликлиника	9		3								2	2	7
32	Дом художника	10								2	2		3	7
33	Аэропорт	11		3							3	3		9
34	Приезды		3	9	6	3	1	6	3	3	6	6	6	
35														
36			Короткий план поездки											
37			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
38			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
39			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
40														
41		Суммы ячеек, симметричных относительно главной диагонали												
42			2	2	4	4	4	3	6					
43			3	4	4	4	3	4						

Целевая функция в данной задаче – сумма произведений таблиц *Расстояния между пунктами* и *План поездки*: $\Sigma X_{ik} R_{ik}$ в данном случае СУММПРОИЗВ(D8:N18; D23:N33).

Её надо минимизировать, изменяя ячейки таблицы *План поездки* X_{ik}, при ограничениях: все X_{ik} *целые* ≥ 0; если есть приезд в пункты 2–10, должен быть выезд; в общем случае не запрещён повторный приезд в начальный и конечный пункты, но число выездов из пункта 1 должно быть на 1 больше числа приездов, число приездов в конечный пункт на 1 больше числа выездов. Для программирования этих условий надо суммировать строки и столбцы таблицы *План поездки* X_{ik}; значение суммы по строке означает количество выездов из соответствующего пункта, из начального обязательно, сумма ≥ 1, то есть в ограничениях O23=D34+1; ненулевое значение в сумме по столбцу означает число приездов в соответствующий пункт, в конечный обязательно, сумма ≥ 1, N34=O33+1. В данном случае не предполагается возвращение к Администрации (п. 1) или выезд из Аэропорта с возвращением (п. 11), и достаточно соблюдения ограничений O23=1, N34=1. Приезд в какой-либо промежуточный пункт, здесь 2–10, требует обязательного выезда из него, т.е. соответствия сумм по строкам суммам по столбцам: здесь O24:O32 = E34:M34.

Таблица *План поездки* X_{ik} формируется на основе таблицы *Расстояния* R_{ik}, так как позиции ячеек R_{ik} и X_{ik} совпадают. Количество ячеек в таблице *Xik* достаточно велико, и компьютер может не справиться с решением задачи. Поэтому **предлагается принципиально новый подход: создание дополнительной таблицы *Короткий План поездки*, из которой копируются значения в зависимые от нее ячейки таблицы *План поездки* X_{ik}.** В непустые ячейки таблицы *План поездки* X_{ik} вносятся формулы, связывающие ее с таблицей *Короткий План поездки*, в столбцы которой вносятся числа 1, 2, 3, что уменьшает вероятность ошибки при заполнении таблицы *План поездки*. Техническая реализация: войти в непустую ячейку таблицы *План поездки* X_{ik}, ввести =, щелкнуть по ячейке таблицы *Короткий План поездки.* В столбце F таблицы *План поездки* четыре значения, в последнее копируется значение из другого столбца *Короткого плана*, E, так как там копируется в *План поездки* всего два значения. Такой приём даёт возможность сократить число строк в *Коротком плане поездки*.

Найдём оптимальный маршрут из п. 1 в п. 11 без дополнительных ограничений. В окне *Поиска решения* следует задать: Целевую ячейку $\Sigma X_{ik} R_{ik}$, Изменяя ячейки: *Короткий План поездки*, Ограничения: *Короткий План поездки* двоичные или: целые, ≥ 0; суммы по строкам таблицы *План поездки* X_{ik} (выезд), начиная со второй (с п. 2) должны равняться суммам по столбцам (приезд), исключая последнее значение, п. 11 (O24:O32 = E34:M34). Сумма по первой строке (выезды из п. 1) должна равняться числу приездов в п. 1 плюс 1; в данном случае O23=1. Сумма по последнему столбцу (приезды в п. 11) должны равняться сумме выездов из п. 11 плюс 1; в данном случае N34=1. Запустите *Выполнить*.

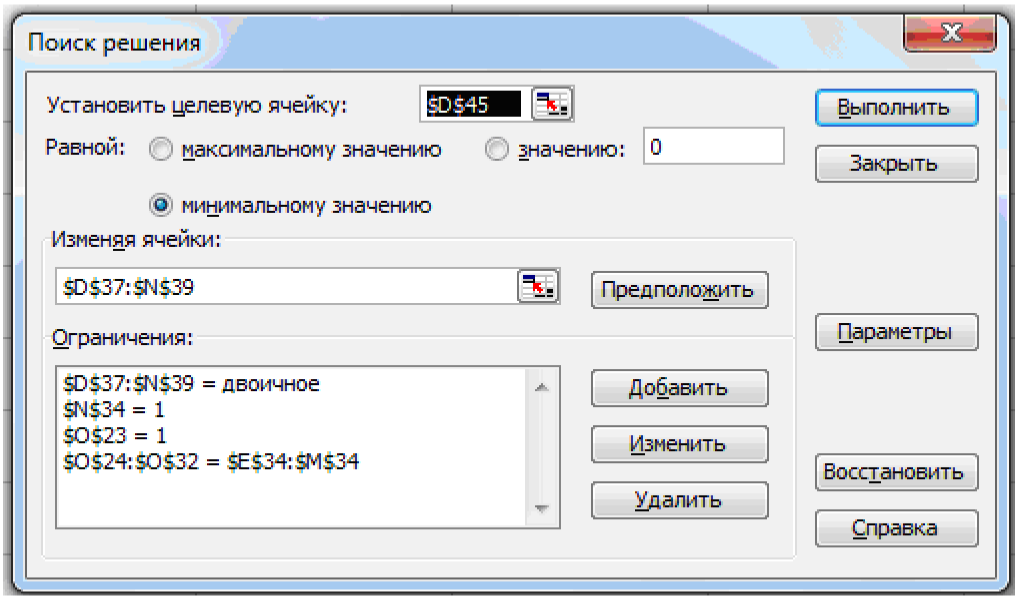

Рис. 2. Окно *Поиска решения* для выбора маршрута без заезда во все пункты

Получится маршрут 1 -> 6 -> 2 -> 11, то есть Администрация – ЦУМ – Музей – Аэропорт, длина 1,8 км.

Эту технологию можно использовать для нахождения критического пути в сетевом графике комплекса работ, только *целевую функцию надо максимизировать*, а ячейки ниже главной диагонали не использовать, так как граф в данном случае направленный [1].

Спланируем маршрут, проходящий через все узлы сети. Для этого надо ввести дополнительное ограничение: все суммы по столбцам таблицы *План поездки* должны быть больше или равны 1. Чтобы обеспечить посещение каждого пункта, надо *Добавить ограничение* D34:M34 ≥ 1. Если необходимо сделать обязательным приезд в одну из групп городов, введите ограничение: сумма по ячейкам приезда в эти города больше или равна единице.

При решении задачи могут образоваться «острова» в стороне от основного маршрута, что связано с особенностями нелинейного программирования.

Чтобы не допустить появление островов и обеспечить связность маршрута, надо ввести дополнительное условие: сумма ячеек, симметричных относительно главной диагонали матрицы *План поездки*, не должны превышать 1, то есть не должно быть возврата по той же дороге. Но в некоторые пункты можно или выгодно попасть именно с возвратом: в данном случае в Second Hand (№ 5) из Радуги (№ 3) и обратно. Эту пару мы в ограничение не включаем. Суммы находятся в ячейках D42:J43, ограничение ≤ 1. Окно *Поиска решения* представлено на рис. 3, результаты расчётов в табл. 3.

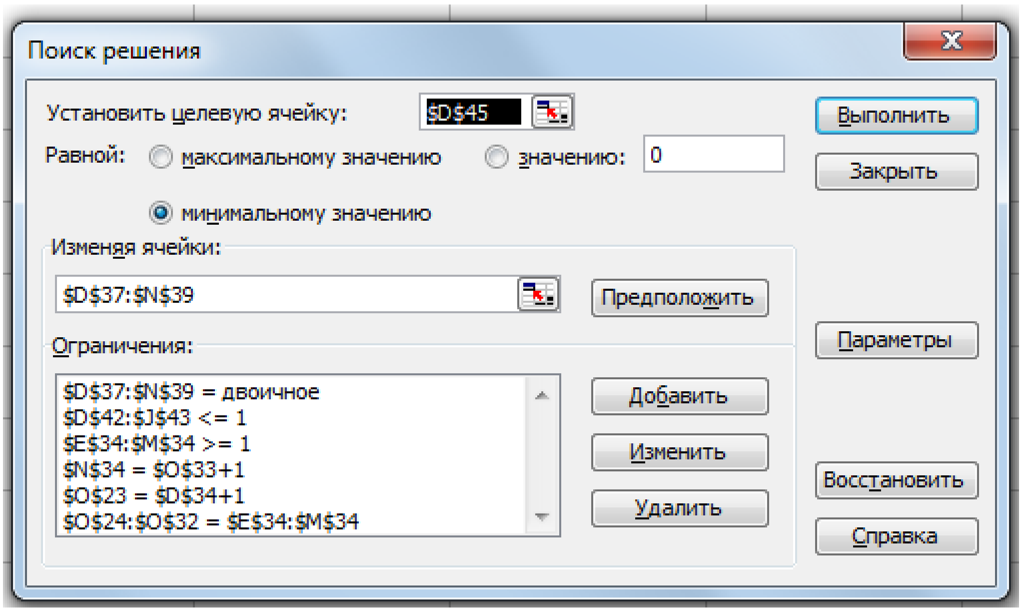

Рис. 3. Окно *Поиска решения* с посещением всех пунктов

Таблица 3

Результаты расчётов *Плана поездки* с посещением всех пунктов.

		Адм	*Муз*	*Рад*	*Ц.П.*	*S.H*	*ЦУМ*	*Мак*	*Ст.*	*Пол*	*Д.Х.*	*Аэро*	*Выезды*
откуда		*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	
Администрация.	1			1			0						1
Музей	2				0		1			0		0	1
Радуга	3	0			1	1							2
Центр поликл.	4		1	0									1
Second Hand	5			1									1
ЦУМ	6	0	0					1					1
Макдоналдс	7						0		1				1
Стадион	8							0			1		1
Поликлиника	9		0								0	1	1
Дом художника	10								0	1		0	1
Аэропорт	11		0							0	0		0
Приезды		0	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	

Результат: маршрут 1 – 3 – 5 – 3– 4 – 2 – 6 – 7 – 8 – 10 – 9 – 11, т.е. Администрация – Радуга – Second Hand – Радуга – Центр. поликлиника – Музей – ЦУМ – Макдональдс – Стадион – Дом Художника – Поликлиника – Аэропорт, длина 4,4 км.

При решении данной и других задач может проявиться свойство задач нелинейного программирования: компьютер может найти различные маршруты, соответствующие локальным минимумам целевой функции в зависимости от опорного плана, или совсем не найти решения. В этом случае надо проверить правильность заполнения таблиц и поэкспериментировать с опорным планом: заполнить *Короткий план поездки* нулями, единицами или случайными числами.

Кольцевые маршруты

Классический вариант данной задачи – объехать все пункты сети с возвращением в исходный пункт. При этом нет выделенных начального и конечного пунктов, вся строка сумм выездов равна столбцу сумм приездов: O23:O33= D34:N34.

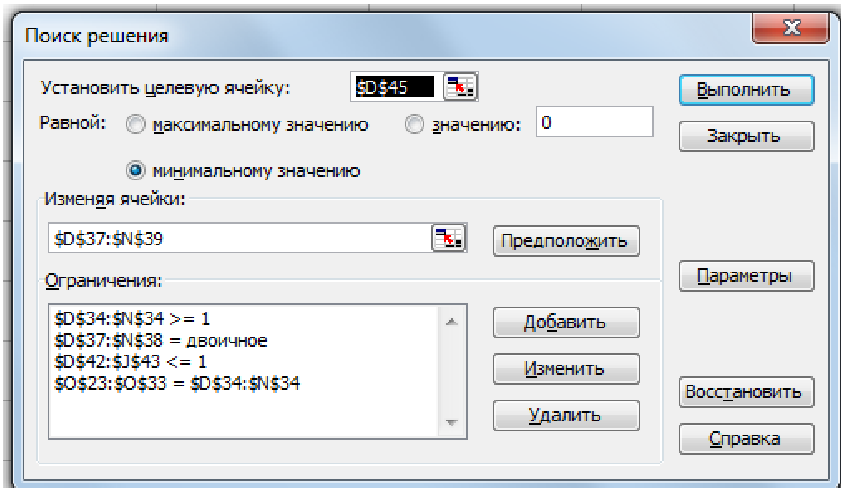

Рис. 4. Окно *Поиска решения* при кольцевом маршруте

Таблица 4

Результаты расчёта *Плана поездки* по кольцевому маршруту

		Адм	*Муз*	*Рад*	*Ц.П.*	*S.H*	*ЦУМ*	*Мак*	*Ст.*	*Пол*	*Д.Х.*	*Аэро*	*Выезды*
откуда		*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	
Администрация.	1			1			0						1
Музей	2				0		0			1		0	1
Радуга	3	0			1	1							2
Центр поликл.	4		1	0									1
Second Hand	5			1									1
ЦУМ	6	1	0					0					1
Макдоналдс	7						1		0				1
Стадион	8							1			0		1
Поликлиника	9		0								0	1	1
Дом художника	10								1	0		0	1
Аэропорт	11		0							0	1		1
Приезды		1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	

Маршрут 1 – 3 – 5 – 3 – 4 – 2 – 9 – 11 – 10 – 8 – 7 – 6 – 1, Администрация – Радуга – Second Hand – Радуга – Центр. поликлиника – Музей – Поликлиника – Аэропорт – Дом Художника – Стадион – Макдональдс – ЦУМ – Администрация, длина 5,1 км.

В некоторых случаях маршрут приходится разбивать на две части: «вперёд» и обратно.

Оптимизация размещения электроподстанций

Постановка задачи: на территории имеются потребители электроэнергии (1–12). Требуется разместить понижающие подстанции A, B, C таким образом, чтобы потери в электросетях были минимальны. Потери в высоковольтных кабелях, подводящих энергию к подстанциям, не учитываем. Предполагается, что потери пропорциональны длине кабеля (расстоянию от подстанции до потребителя) и передаваемой мощности, если потребитель подключён к подстанции. На рисунке 6 показано размещение потребителей и оптимальное размещение подстанций A, B, C при отсутствии ограничений подстанций по мощности (слева) и наличии ограничений (справа), а также схемы подключения потребителей к подстанциям.

Таблица 7 предназначена для проведения расчётов. Расстояние от потребителя k до подстанции i вычисляется по теореме Пифагора:

$$Rik = КОРЕНЬ((Xi - Xk)^2 + (Yi - Yk)^2),$$

потери

$$Wik= КОРЕНЬ((Xi - Xk)^2 + (Yi - Yk)^2) *Pik*Sik,$$

где Xi, Yi – координаты подстанций, i=1…3;
Xk, Yk – координаты потребителей, k=0…11;
Pk – передаваемая (потребляемая) мощность,
Sk – подключение: бинарная переменная 0 или 1.

Целевая функция – сумма Wik, изменяемые ячейки – координаты подстанций (Xi, Yi) и Подключения Sik, объединённые в один блок ячеек.

Ограничения: Подключения Sik бинарные, их суммы по строкам равны 1.

В таблице 7 приведён пример с ограничением: суммы потребляемых мощностей Pk*Sik <= MAXi – предельная мощность подстанции, здесь MAX A=120, MAX B=110, MAX C=190.

Таблица 7

Проведение расчётов в Excel и результаты при ограничениях по нагрузке

					Целевая, min	Sum Wik				MAX	120	110	190
						1226				Sum	120	110	190
	Потребители			Потери Wik			Подключение Sik				Нагрузка Pk*Sik		
k	Pk	Xk	Yk	A	B	C	A	B	C	Sum	A	B	C
1	10	6	14	0	0	60	0	0	1	1	0	0	10
2	20	3	11,5	0	164	0	0	1	0	1	0	20	0
3	30	2	8,5	0	156	0	0	1	0	1	0	30	0
4	40	5	8	0	0	209	0	0	1	1	0	0	40
5	50	2	1	0	117	0	0	1	0	1	0	50	0
6	60	10	9,5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	60
7	20	8	6	100	0	0	1	0	0	1	20	0	0
8	10	7	3	0	46	0	0	1	0	1	0	10	0
9	30	13	13	0	0	138	0	0	1	1	0	0	30
10	50	13	9,5	0	0	150	0	0	1	1	0	0	50
11	20	11,5	2	85	0	0	1	0	0	1	20	0	0
12	80	13	6	0	0	0	1	0	0	1	80	0	0
					Подстан-	Xi	13,0	2,4	10,0				
					ции	Yi	6,0	3,3	9,5				

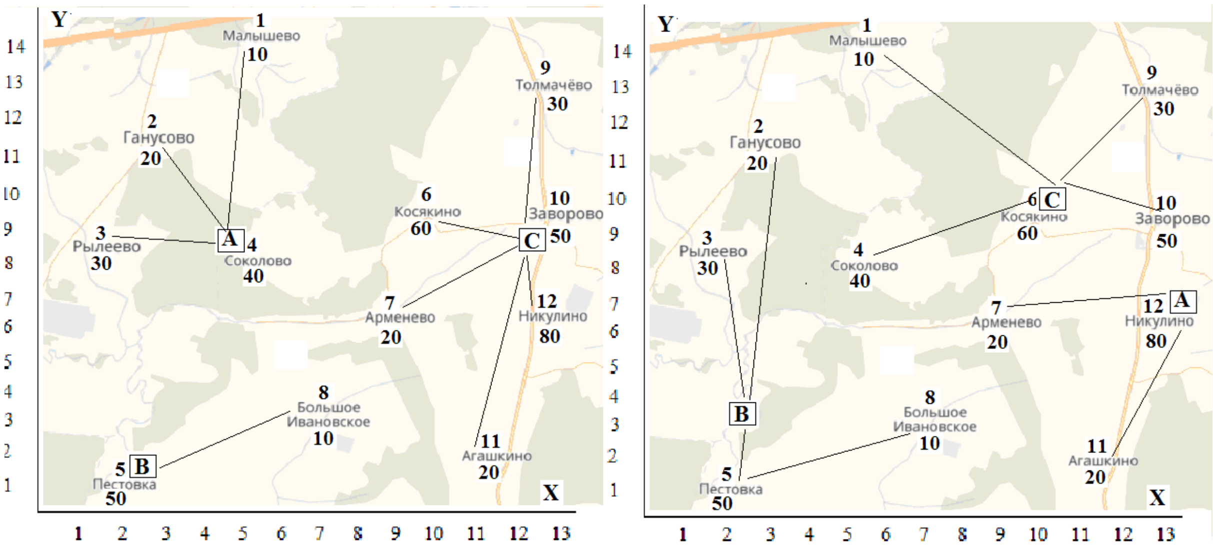

Рис. 5. Размещение потребителей (1–12) и их подключение к подстанциям A, B, C без ограничений по мощностям подстанций (слева) и с ограничениями (справа)

Данный алгоритм можно использовать для оптимизации размещения, например, баз снабжения топливом и товарами.

Список литературы

1. Дыбская В. В., Зайцев Е. И., Сергеев В. И. Логистика. Полный курс MBA: учебник. М.: Эксмо, 2008. С. 30–39.
2. Экономико-математическое моделирование / под ред. И. Н.Дрогобыцкого: учебник. М.: Экзамен, 2006. 798 с.
3. Кремер Н. Ш.и др. Исследование операций в экономике: учебник. М.: Юрайт, 2014. 424 с.
4. Рубчинский А. А. Методы и модели принятия управленческих решений. М.: Юрайт, 2015. С. 111–113.

5. Решение задачи коммивояжёра рекурсивным полным перебором. URL: www.habr.com/ru/post/151151/ (дата обращение: 10.09.2012.)

6. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах: монография. М.: Мир, 1981. С. 241–264.

7. Bellmore M., Nemhuser G. L., 1968. The Travelling Salesman Problem: A Survey. Operations Research, vol. 16, 3: 538–558.

8. Garfinkel R., Namhauser G. L., 1972. Integer Programming. New York: John Wiley, Inc., pp: 354–360.

9. Held M., Karp R., 1971. The Travelling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees, Part II. Math. Programming, vol. 1, 1: 6-25.

10. Steckhan H. A., 1970. Theorem on Symmetric Travelling Salesman Problems. Operations Research, vol. 18, 6: 1163–1167.

11. Галяутдинов Р. Р. Задача коммивояжёра – метод ветвей и границ. galyautdinov.ru/post/zadacha-kommivoyazhera (дата обращения: 18.11.2013)

12. Кормен, Т., Лейзерсон, Ч., Ривест, Р. Алгоритмы. Построение и анализ: монография. М.: МЦНМО, 2002. С. 845–846.

13. Matai, R., Singh, S., & Lal, M., 2010. Traveling salesman problem: An overview of applications, formulations, and solution approaches. In D. Davendra (Ed.), Traveling Salesman Problem, Theory and Applications. InTech. P. 356.

14. Junger, M., Liebling, T., Naddef, D., Nemhauser, G., Pulleyblank, W., Reinelt, G., Rinaldi, G., & Wolsey, L. (Eds.). 2009. 50 years of integer programming, 1958–2008: The early years and state-of-the-art surveys. Heidelberg: Springer. P. 785.

15. Cook, W. 2007. History of the TSP. The Traveling Salesman Problem. URL: www.math.uwaterloo.ca/tsp/history/index.htm (дата обращение: 20.03.2019)

16. Laporte, G. 1992. The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. European Journal of Operational Research, 59(2), 231–247.

17. DAA – Travelling Salesman Problem. URL: www.tutorialspoint.com/design_and_analysis_of_algorithms/design_and_analysis_of_algorithms_travelling_salesman_problem.htm (дата обращения: 23.11.2016)

18. Lee Jacobson. Applying a genetic algorithm to the traveling salesman problem. 2012. URL: www.theprojectspot.com/tutorial-post/applying-a-genetic-algorithm-to-the-travelling-salesman-problem/5 (дата обращения: 20.03.2019)

References

1. Dybskaya V. V., Zaitsev E. I., Sergeev V. I. *Logistika. Polnyy kurs MVA: uchebnik* [Logistics. Full MBA course: textbook]. Moscow: Eksmo, 2008, pp. 30–39. (In Russian).

2. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie / Pod redaktsiyey I.N. Drogobytskogo: uchebnik* [Economic and mathematical modeling / Edited by I. N. Drogobytsky: textbook]. Moscow: Examen, 2006, 798 p. (In Russian)

3. Kremer N. Sh. et al. *Issledovanie operatsii v ekonomike: uchebnik* [Study of operations in economics: textbook]. Moscow: Urait, 2014, 424 p. (In Russian).

4. Rubchinskii A. A. *Metodi i modeli prinyatiya upravlencheskih reshenii* [Methods and models of management decision-making]. Moscow: Urait, 2015, pp. 111–113. (In Russian)

5. *Reshenie zadachi kommivoyazhora rekursivnim polnim pereborom* [The solution to the traveling salesman problem recursive brute force]. Available at: www.habr.com/ru/post/151151/ (accessed: 10.09.2012)

6. Mainika, E. *Algoritmi optimizatsii na setyah i grafah: monografiya* [Optimization algorithms on networks and graphs: monograph]. Moscow: Mir, 1981, pp. 241–264. (In Russian).

7. Bellmore M., Nemhuser G. L., 1968. The Travelling Salesman Problem: A Survey. Operations Research, vol. 16, 3: 538–558.

8. Garfinkel R., Namhauser G. L., 1972. Integer Programming. New York: John Wiley, Inc., pp: 354–360.

9. Held M., Karp R., 1971. The Travelling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees, Part II. Math. Programming, vol. 1, 1: 6–25.

10. Steckhan H. A., 1970. Theorem on Symmetric Travelling Salesman Problems. Operations Research, vol. 18, 6: 1163–1167.

11. Galyautdinov R. R. *Zadacha kommivoyazhora – metod vetvei i granits* [Traveling salesman problem – branch and boundary method]. (In Russian). Available at: www.galyautdinov.ru/post/zadacha-kommivoyazhera (accessed: 18.11.2013)

12. Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R. *Algoritmi. Postroenie i analiz* [Algorithms. The construction and analysis]. Moscow: MCNMO, 2002, pp. 845-846. (In Russian).

13. Matai, R., Singh, S., Lal, M., 2010. Traveling salesman problem: An overview of applications, formulations, and solution approaches. In Traveling Salesman Problem, Theory and Applications, Ed. D. Davendra. InTech, pp: 356.

14. Junger, M., Liebling, T., Naddef, D., Nemhauser, G., Pulleyblank, W., Reinelt, G., Rinaldi, G., Wolsey, L., 2009. 50 years of integer programming, 1958–2008: The early years and state-of-the-art surveys. Heidelberg: Springer, pp: 785.

15. Cook, W., 2007. History of the TSP. The Traveling Salesman Problem. Date Views 20.03.2019 www.math.uwaterloo.ca/tsp/history/index.htm

16. Laporte, G., 1992. The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. European Journal of Operational Research, 59(2): 231–247.

17. DAA – Travelling Salesman Problem. Date Views 23.11.2016. www.tutorialspoint.com/design_and_analysis_of_algorithms/design_and_analysis_of_algorithms_travelling_salesman_problem.htm

18. Jacobson, L. Applying a genetic algorithm to the traveling salesman problem, 2012. Date Views 20.03.2019 www.theprojectspot.com/tutorial-post/applying-a-genetic-algorithm-to-the-travelling-salesman-problem/5

Для цитирования: Катаргин Н. В. Решение некоторых сетевых задач в среде Excel // Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. 2019. № 1. С. 150–159. DOI: 10.34130/2070-4992-2019-1-150-159

For citation: Katargin N. V. Solving some network tasks in Excel. *Corporate Governance and Innovative Economic Development of the North: Bulletin of the Research Center of Corporate Law, Management and Venture Capital of Syktyvkar State University,* 2019, no. 1, pp. 150–159. DOI: 10.34130/2070-4992-2019-1-150-159 (In Russian).