УДК 658.7

А.Ю. Тюрин, профессор, д-р экон. наук
(КузГТУ, г. Кемерово)
Tyurin A.Yu., professor, D.Sc. (Economy)
(KuzSTU, Kemerovo)

НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕЛИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДОСТАВКИ ТОВАРОВ ПОТРЕБИТЕЛЯМ

AREAS OF APPLICATION AND PROBLEMS OF IMPLEMENTING A MODEL OF PERIODIC DELIVERY OF GOODS TO CONSUMERS

В статье рассматриваются проблемы внедрения модели периодической доставки товаров потребителям. Указываются необходимость комплексного решения этих проблем, причины и источники возникновения проблемы, описываются метрики управления системой периодической доставки товаров. Проводится краткий анализ статей в данной области исследования, отражаются направления улучшения процессов взаимодействия поставщиков, потребителей и посредников в системе периодической доставки товаров.

The article discusses the problems of introducing a model of periodic delivery of goods to consumers. The need for a comprehensive solution to these problems, the causes and sources of the problem are indicated, and metrics for managing the periodic delivery of goods are described. A brief analysis of articles in this field of research is carried out, and the directions for improving the processes of interaction between suppliers, consumers and intermediaries in the periodic delivery of goods are reflected.

При проектировании маршрутов доставки грузов на оперативном уровне принятия решения в качестве временного интервала обычно берется 1 день. Но на практике часто встречаются ситуации, когда время доставки составляет более одних суток, либо необходимо обслужить потребителя с некоторой периодичностью.

В связи с этим проектировщики сталкиваются с задачей периодической доставки товаров потребителям (PVRP) [1]. Практическое применение таких задач встречается в различных отраслях экономики и сферах жизнедеятельности человека.

Например, в [2] авторы применили сегментированную версию PVRP к задаче вывоза медицинских отходов в городе в штате Парана (Бразилия). Ключевая идея – разделить генераторы отходов на группы по объёму (крупные и мелкие), чтобы точнее планировать маршруты.

В [3] авторы посвятили свою работу варианту PVRP с временными окнами и ограничениями на разброс времени прибытия. Такая постановка характерна для транспортировки высокоценных грузов. Применение эвристических методов решения задачи позволило сократить операционные издержки обслуживания потребителей.

Но основная сфера практического применения задачи периодической доставки товаров потребителям – сетевая торговля и дистрибуция. В этой сфере требуется учет времени доставки товаров, жесткой периодичности [4], определенной последовательности доставки товаров различной номенклатуры [5] и т.д.

При внедрении PVRP есть набор метрик и параметров, которые чаще всего становятся «узкими местами» при внедрении результатов математической модели на практике. Их можно разделить на две группы: те, что бьют по вычислительной сложности модели, и те, что создают операционные риски уже после запуска.

Что усложняет саму оптимизацию? В первую очередь, это количество клиентов и точек. Чем больше узлов в задаче, тем экспоненциально растёт число возможных комбинаций при распределении дней посещения и построении маршрутов. Это напрямую увеличивает «разрыв» между найденным решением и теоретическим оптимумом – программа может не успеть найти хорошее решение за разумное время.

Во вторую очередь, это сложность ограничений. Когда в модель одновременно закладывают несколько жёстких условий (несколько складов, разнородный парк машин, жёсткие временные окна, ограничения на разброс времени прибытия, требования к согласованности – чтобы одного клиента всегда обслуживала одна и та же машина), задача становится гораздо сложнее. Исследования показывают: при минимизации максимальной длительности маршрута сложность растёт особенно заметно.

В третью очередь, это неточность или неполнота входных данных. Если в модель попадают ошибочные данные (неверные объёмы спроса, некорректные адреса, завышенные/заниженные временные окна), это сразу ведёт к дисбалансу: либо система не найдёт допустимого решения (не сможет распределить всё в рамках ограничений), либо сгенерирует план, который в реальности приведёт к перегрузкам или срыву сроков.

В последнюю очередь, это размер парка. Если количество автомобилей близко к минимально необходимому для покрытия спроса, система становится крайне чувствительной к любым отклонениям. Малейшая задержка на одном участке может «завалить» весь план.

Что создаёт операционные риски после внедрения? Во-первых, соблюдение временных окон. Даже идеально построенный план может дать сбой, если в реальности клиенты часто сдвигают время приёма. Жёсткие временные окна в PVRP требуют очень гибкого механизма перестроения маршрутов при изменениях.

Во-вторых, динамичность спроса. Если объём заказа или частота визитов для какого-то клиента резко меняются (например, из-за сезонности или акции), статичный план на период быстро устаревает. Возникает потребность в периодической реоптимизации, что добавляет сложности в операционную рутину.

В-третьих, внешние факторы. Пробки, закрытия дорог, погодные условия, задержки на погрузке – всё это в реальности приводит к срыву запланированные сроки доставки. Метрики вроде «процент срывов сроков доставки» или «среднее отклонение от плана» в таких условиях резко ухудшаются, если в модели не заложен механизм адаптации.

В-четвертых, баланс целей. Часто возникает конфликт: попытка сильно минимизировать пробег или количество машин приводит к тому, что какие-то клиенты начинают получать сервис хуже (редкие визиты, неудобное время). Метрика «уровень сервиса» в таких сценариях становится болезненной – компания может сэкономить на логистике, но потерять лояльность клиентов.

В-пятых, человеческий фактор. Если водители не понимают логики автоматизированного планирования или видят, что новые маршруты часто приводят к переработкам или неудобным сменам, это порождает сопротивление. Важно, чтобы метрики эффективности (например, удовлетворённость водителей, время на ручное исправление маршрутов) тоже учитывались при внедрении.

При внедрении результатов модели на практике необходимо следующее:

• Провести чувствительный анализ. Выявить, какие именно параметры (число клиентов, размер парка, жёсткость окон) сильнее всего влияют на целевую функцию и на способность программы найти допустимое решение.

• Заложить буфер и механизмы адаптации. Даже если модель идеальна в статике, в реальности всегда есть случайные воздействия. Полезно предусмотреть правила для динамической корректировки плана и чётко прописать ключевые показатели эффективности, которые балансируют стоимость и качество сервиса.

Рассмотрим условный пример, иллюстрирующий возможность применения модели периодической маршрутизации на практике. В данной модели будем использовать временной интервал в 5 дней, в течение которых необходимо разработать план маршрутизации и обслуживания 75 потребителей.

Исходные данные по потребителям представлены в таблице 1. В данной таблице указаны координаты пунктов (склад – номер 0), спрос в условных единицах, частота посещения пункта в течение 5 дней, количество возможных комбинаций посещения пункта в течение 5 дней, а также возможные дни посещения.

Таблица 1 – Исходные данные по пунктам сети обслуживания

№ п/п	Координата X	Координата Y	Спрос, усл. ед.	Частота посещения	Количество комбинаций	Возможные дни посещения
0	40	40	0	0	0	
1	22	22	18	2	3	1,3,2,4,3,5
2	36	26	26	2	3	1,3,2,4,3,5
3	21	45	11	1	5	1,2,3,4,5
4	45	35	30	5	1	1,2,3,4,5
5	55	20	21	2	3	1,3,2,4,3,5
6	33	34	19	2	3	1,3,2,4,3,5
7	50	50	15	1	5	1,2,3,4,5
8	55	45	16	2	3	1,3,2,4,3,5
9	26	59	29	5	1	1,2,3,4,5
10	40	66	26	2	3	1,3,2,4,3,5
11	55	65	37	5	1	1,2,3,4,5
12	35	51	16	2	3	1,3,2,4,3,5
13	62	35	12	1	5	1,2,3,4,5
14	62	57	31	5	1	1,2,3,4,5
15	62	24	8	1	5	1,2,3,4,5
16	21	36	19	2	3	1,3,2,4,3,5
17	33	44	20	2	3	1,3,2,4,3,5
18	9	56	13	1	5	1,2,3,4,5
19	62	48	15	1	5	1,2,3,4,5
20	66	14	22	2	3	1,3,2,4,3,5
21	44	13	28	5	1	1,2,3,4,5
22	26	13	12	1	5	1,2,3,4,5
23	11	28	6	1	5	1,2,3,4,5
24	7	43	27	2	3	1,3,2,4,3,5
25	17	64	14	1	5	1,2,3,4,5
26	41	46	18	2	3	1,3,2,4,3,5
27	55	34	17	2	3	1,3,2,4,3,5
28	35	16	29	5	1	1,2,3,4,5
29	52	26	13	1	5	1,2,3,4,5
30	43	26	22	2	3	1,3,2,4,3,5
31	31	76	25	2	3	1,3,2,4,3,5
32	22	53	28	5	1	1,2,3,4,5
33	26	29	27	2	3	1,3,2,4,3,5
34	50	40	19	2	3	1,3,2,4,3,5
35	55	50	10	1	5	1,2,3,4,5
36	54	10	12	1	5	1,2,3,4,5
37	60	15	14	1	5	1,2,3,4,5
38	47	66	24	2	3	1,3,2,4,3,5
39	30	60	16	2	3	1,3,2,4,3,5
40	30	50	33	5	1	1,2,3,4,5
41	12	17	15	1	5	1,2,3,4,5
42	15	14	11	1	5	1,2,3,4,5
43	16	19	18	2	3	1,3,2,4,3,5
44	21	48	17	2	3	1,3,2,4,3,5
45	50	30	21	2	3	1,3,2,4,3,5
46	51	42	27	2	3	1,3,2,4,3,5
47	50	15	19	2	3	1,3,2,4,3,5
48	48	21	20	2	3	1,3,2,4,3,5

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Координата X	Координата Y	Спрос, усл. ед.	Частота посещения	Количество комбинаций	Возможные дни посещения
49	12	38	5	1	5	1,2,3,4,5
50	15	56	22	2	3	1,3,2,4,3,5
51	29	39	12	1	5	1,2,3,4,5
52	54	38	19	2	3	1,3,2,4,3,5
53	55	57	22	2	3	1,3,2,4,3,5
54	67	41	16	2	3	1,3,2,4,3,5
55	10	70	7	1	5	1,2,3,4,5
56	6	25	26	2	3	1,3,2,4,3,5
57	65	27	14	1	5	1,2,3,4,5
58	40	60	21	2	3	1,3,2,4,3,5
59	70	64	24	2	3	1,3,2,4,3,5
60	64	4	13	1	5	1,2,3,4,5
61	36	6	15	1	5	1,2,3,4,5
62	30	20	18	2	3	1,3,2,4,3,5
63	20	30	11	1	5	1,2,3,4,5
64	15	5	28	5	1	1,2,3,4,5
65	50	70	9	1	5	1,2,3,4,5
66	57	72	37	5	1	1,2,3,4,5
67	45	42	30	5	1	1,2,3,4,5
68	38	33	10	1	5	1,2,3,4,5
69	50	4	8	1	5	1,2,3,4,5
70	66	8	11	1	5	1,2,3,4,5
71	59	5	3	1	5	1,2,3,4,5
72	35	60	1	1	5	1,2,3,4,5
73	27	24	6	1	5	1,2,3,4,5
74	40	20	10	1	5	1,2,3,4,5
75	40	37	20	2	3	1,3,2,4,3,5

Для доставки товаров будем использовать автомобиль с максимальной загрузкой 140 условных единиц. В модели для расчета расстояний используется евклидова метрика. Для расчета времени рейса принимается скорость движения 40 км/ч и время погрузки-разгрузки из расчета 0,01 ч на 1 условную единицу. Частота посещений в таблице 1 определяет, сколько раз в течение 5 дней автомобиль должен привезти продукцию в данный пункт. Количество комбинаций показывает число вариантов возможного посещения потребителя в течение 5 дней. Например, для потребителя 1 в таблице 1 указана частота посещения – 2, количество комбинаций – 3 и возможные дни посещений – 1,3,2,4,3,5. Таким образом, потребитель 1 должен быть обслужен 2 раза в течение 5 дней по 3 различным вариантам: первый вариант – дни 1 и 3, второй вариант – дни 2 и 4, третий вариант – дни 3 и 5. Для потребителя 4 указана частота посещения – 5, количество комбинаций – 1 и возможные дни посещений – 1,2,3,4,5. Таким образом, данный потребитель обслуживается ежедневно в течение 5 дней. И, наконец, для потребителя 7 указана частота посещения – 1, количество комбинаций – 5 и возможные дни посещений – 1,2,3,4,5. В данном случае потре-

битель 7 должен быть обслужен 1 раз в течение 5 дней по 5 различным вариантам: либо в 1 день, либо во 2 день, либо в 3 день, либо в 4 день, либо в 5 день.

Учитывая все вышеперечисленное, решается задача маршрутизации. Дополнительно вводится механизм балансировки нагрузки по дням с целью выравнивания объемов перевозок по дням обслуживания потребителей, чтобы не было дней с «авральным» спросом, когда не хватает автомобилей для вывоза продукции и дней с «пустыми» рейсами, когда степень загрузки автомобилей низка.

Результаты маршрутизации представлены в таблице 2. В ней отражаются все маршруты, которые необходимо организовать для осуществления обслуживания потребителей с заранее установленной частотой и периодичностью, указанными в таблице 1.

Таблица 2 – Результаты маршрутизации

День	№ автомобиля	Порядок объезда пунктов	Расстояние, км	Время рейса, ч	Объем перевозок, усл. ед.
1	1	0,67,34,46,8,13,54,29,71,72,0	162,00	5,42	137
1	2	0,4,6,17,40,32,49,0	90,46	3,61	135
1	3	0,73,1,43,41,56,23,24,50,0	113,48	4,22	138
1	4	0,9,31,65,11,66,0	111,83	4,17	137
1	5	0,28,21,61,64,14,0	163,55	5,40	131
2	1	0,67,34,4,45,48,74,69,0	98,43	3,84	138
2	2	0,26,12,40,32,9,39,0	61,23	2,93	140
2	3	0,6,51,16,43,56,64,62,0	119,05	4,38	140
2	4	0,2,28,21,19,14,0	110,26	4,05	129
2	5	0,53,11,66,31,25,0	115,94	4,25	135
3	1	0,67,4,30,28,21,0	71,19	3,17	139
3	2	0,40,32,9,10,38,0	79,48	3,39	140
3	3	0,52,57,15,5,47,20,14,0	136,09	4,74	134
3	4	0,16,1,64,55,66,59,0	217,75	6,77	133
4	1	0,75,68,2,62,28,21,0	66,42	2,97	131
4	2	0,67,4,45,27,52,7,0	56,77	2,74	132
4	3	0,40,32,44,9,39,18,0	100,25	3,87	136
4	4	0,33,48,36,54,14,58,0	146,33	4,93	127
4	5	0,11,66,24,64,0	176,08	5,69	129
5	1	0,75,4,67,26,12,17,0	44,19	2,44	134
5	2	0,46,8,35,53,14,58,3,0	101,24	3,91	138
5	3	0,40,32,44,50,9,63,0	101,16	3,93	140
5	4	0,27,5,37,70,60,21,28,0	106,85	4,00	133
5	5	0,33,22,42,64,11,0	155,12	5,03	115
5	6	0,66,0	72,47	2,18	37

При этом суммарное количество автомобилей не должно превышать 6 единиц, что установлено начальными данными. Маршруты все начинаются и заканчиваются на складе (пункт 0). При выполнении рейса учитывается максимальная продолжительность работы автомобиля в течение дня, которая составляет 8 ч. Загрузка автомобиля близка к максимально возможной в 149 единиц, кроме последнего рейса, на котором перевозятся остатки грузов. Рассмотрим соответствие полученных рейсов заявленным требованиям. Например, для потребителя 1 необходимо было совершить 2 рейса за 5 дней. Они совершаются в 1 день 3 автомобилем и в 3 день 4 автомобилем, т.е. одна из возможных комбинаций (день 1 и 3) срабатывает.

Для потребителя 4 необходимо было совершить 5 рейсов за 5 дней. Они совершаются в 1 день 2 автомобилем, во 2 день 1 автомобилем, в 3 день 1 автомобилем, в 4 день 2 автомобилем и в 5 день 1 автомобилем, т.е. ежедневное посещение учтено.

Для потребителя 7 необходимо было совершить 1 рейс за 5 дней. Он совершается в 4 день 2 автомобилем, т.е. частота посещений учтена.

Ключевые выводы по внедрению периодической доставки товаров.

Баланс между частотой обслуживания и затратами. Периодичность выбирают под требования клиентов и свойства груза: скоропортящиеся – ежедневно, промтовары – 2-3 раза в неделю. Слишком частая доставка повышает себестоимость, редкая – ухудшает сервис и может приводить к дефициту.

Кластеризация по дням обслуживания – основа планирования. Клиентов группируют не только по географии, но и по требуемой периодичности (группа А – каждый день, В – пн/ср/пт, С – вт/чт). Это позволяет строить компактные маршруты внутри каждого дня и избегать «размазывания» точек по разным сменам.

Учёт окна доставки и приоритетности. Даже при периодическом графике важно учитывать временные окна (например, «только до 10:00») и приоритеты (аптеки, больницы, срочные заказы). Их включают в ограничения при построении маршрутов.

Неравномерность нагрузки по дням. В зависимости от распределения клиентов по дням недели нагрузка на транспорт и водителей может сильно колебаться (например, пик в понедельник и пятницу).

Важность буфера и резерва мощностей. Периодическая схема создаёт предсказуемость, но не страхует от форс-мажоров (пробки, поломки, рост объёмов).

Список литературы:

1. Тюрин, А. Ю. Модели транспортного обслуживания в цепях поставок пищевой промышленности / А. Ю. Тюрин. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – №4. – С.89-92.

2. Castillo Ulloa M. I. Sustainability and Algorithmic Comparison of Segmented PVRP for Healthcare Waste Collection: A Brazilian Case Study / M. I. Castillo Ulloa, D. A. Ramos Huarachi, V. Moretti, C. Hluszko, F. Silva. – Direct text // Sustainability. – 2025. – 17(19). P. 1-30.

3. Silva F. The PVRP with time windows and time spread constraints (PVRP-TWTS) / F. Silva, L. S. Ochi. – Direct text // International Journal of Optimization and Control: Theories and Applications. – 2025. – 15(1). – P. 10-23.

4. Тюрин, А. Ю. Применение периодической маршрутизации при обслуживании потребителей пищевой промышленности / А.Ю. Тюрин. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы автомобильного транспорта (АВАТ-2024) : Сборник статей всероссийской научно-практической конференции. – Барнаул, 2025. – С. 55-58.

5. Тюрин, А. Ю. Особенности выбора схем транспортировки продукции предприятий пищевой промышленности с различными сроками годности / А. Ю. Тюрин. – Текст : непосредственный // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2010. – № 1. – С. 136-139.