

УДК 658.7

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

ЗАДАЧА СОВМЕЩНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ И МАРШРУТИЗАЦИЕЙ

THE TASK OF JOINT PRODUCTION AND ROUTING MANAGEMENT

В статье рассматриваются вопросы интегрированного планирования производства, управления запасами и транспортировкой. Отмечается сложность решения данных задач. Приводится анализ эффективности методов решения задачи. На примере пищевой промышленности показываются примеры решения двух видов задач эвристическими методами.

The article discusses the issues of integrated production planning, inventory management and transportation. The complexity of solving these problems is noted. The analysis of the effectiveness of methods for solving the problem is given. Using the example of the food industry, examples of solving two types of problems using heuristic methods are shown.

Сталкиваясь с растущей жесткой конкуренцией на мировом рынке, компании достигли общего мнения о том, что комплексное планирование двух или более видов деятельности в цепи поставок является одним из ключевых факторов повышения их конкурентоспособности. Быстрое развитие передовых информационных и коммуникационных технологий позволило осуществлять комплексное планирование. Две широко изученные задачи частично интегрированного планирования – это задача прямого распределения продукции (PDP) и задача распределения запасов (IRP). PDP нацелена на составление плана производства и прямой дистрибуции для минимизации производства, запасов (как на заводах, так и у клиентов) и прямых транспортных расходов [1]. Однако PDP не учитывает решения о маршрутизации. В распределительной сети с одним предприятием и несколькими клиентами IRP стремится минимизировать общие затраты на складские запасы и маршрутизацию, определяя сроки и объем каждой поставки своим клиентам и соответствующие маршруты [2]. Однако объемы производства за каждый период заранее указаны в IRP. В последнее время компании внедряют более интегрированные системы планирования, в которых оптимизированы производственные операции, управление запасами и маршрутизация. Задача оптимизации при внедрении такой интегрированной системы планирования известна как PRP, которая привлекает все

большее внимание с тех пор, как была представлена в [3]. PRP может быть определена в сети поставок, где одно производственное предприятие производит и распространяет один и тот же вид продукции среди группы клиентов для удовлетворения их динамичного спроса в течение периода планирования $t=1, \dots, n$. Задача в случае одного предприятия-поставщика и нескольких потребителей представлена на рисунке.

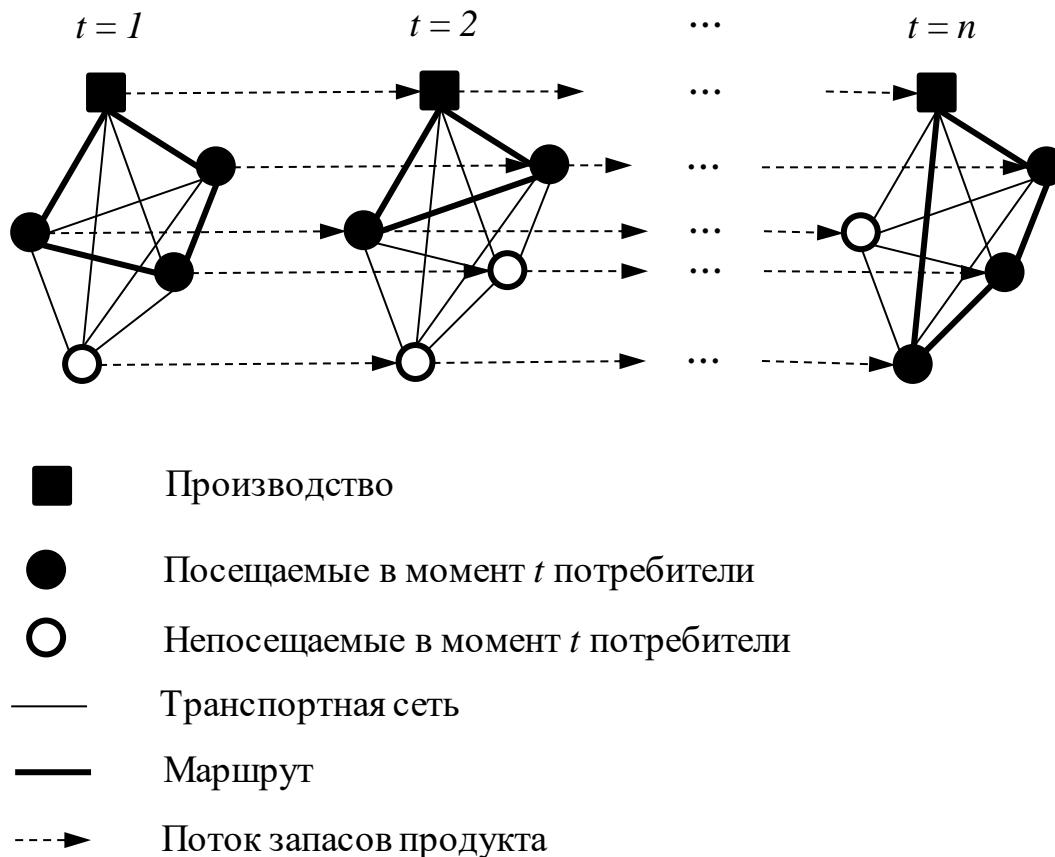


Рисунок – Классическая задача PRP

Классическая задача PRP заключается в одновременной оптимизации производства, управления запасами и маршрутизации, чтобы минимизировать общие затраты. Решение для PRP определяет для каждого периода: 1) сколько производить на заводе; 2) сколько поставлять каждому клиенту; 3) какой объем запасов должен быть на предприятии и у каждого клиента; и 4) как организовать маршруты движения транспортных средств для каждой запланированной поставки. PRP является обобщением PDP и IRP. Она сводится к PDP, если предполагается прямое распределение, и становится IRP, если количество продукции в каждом периоде фиксировано. Различные исследования и практика показали, что внедрение PRP может улучшить синхронизацию, снизить себестоимость продукции и повысить уровень обслуживания. В [4] отмечается, что комплексное планирование производства, запасов и маршрутов может сократить общие операционные расходы на 3-20%. В то же время клиенты могут воспользоваться преиму-

ществами высокого уровня обслуживания при низком риске нехватки товара за счет интеграции производства, хранения и маршрутизации [5]. Несмотря на то, что классическая задача PRP широко исследуется в последние несколько десятилетий, она недостаточно изучена. Например, задаче маршрутизации производства нескольких продуктов (MPRP) не уделялось достаточного внимания, хотя компании часто имеют дело с несколькими продуктами при планировании производства и дистрибуции. Кроме того, большинство существующих исследований, посвященных PRP, посвящены общей цепи поставок, без учета важных характеристик какой-либо конкретной отрасли. В частности, задача маршрутизации производства пищевых продуктов (FPRP) для цепи поставок продуктов питания (FSC), в которой необходимо тщательно контролировать качество и свежесть пищевых продуктов, еще не изучена.

FSC является важным подразделением цепи поставок, целью которого является предоставление клиентам высококачественных пищевых продуктов по низкой цене. FSC играет важную роль в пищевой промышленности и тесно связана с качеством жизни людей. Несмотря на то, что FSC имеет некоторые общие характеристики с общей цепью поставок, у него есть следующие особенности.

1) Большинство продуктов питания имеют относительно короткий срок годности и начинают портиться сразу после производства. В качестве примеров можно привести свежее мясо, свеженарезанные овощи, молочные продукты и хлебобулочные изделия. Ценность или качество скоропортящихся продуктов питания снижается при хранении или доставке [6].

2) В процессе производства, упаковки, хранения и транспортировки пищевых продуктов необходимо соблюдать строгие условия и нормативы. Большая часть скоропортящихся продуктов должна храниться и транспортироваться при определенном диапазоне рекомендуемых температур [7], в противном случае качество и безопасность пищевых продуктов не могут быть гарантированы. Неправильная упаковка, хранение и транспортировка увеличат количество пищевых отходов, потери пищевых продуктов и риск для безопасности пищевых продуктов, в то время как соблюдение этих условий и норм неизбежно приведет к увеличению стоимости [8]. Кроме того, при доставке пищевых продуктов могут соблюдаться более строгие временные окна доставки.

3) Цены на продукты питания сильно колеблются. Поскольку качество продуктов питания снижается, отпускная цена не может оставаться неизменной. На самом деле, скоропортящиеся продукты питания часто продаются по акциям (с определенными скидками). Таким образом, принятая политика скидок может повлиять на общий доход.

Среди методов решения задачи PRP можно выделить точный метод, конструктивный эвристический подход, метаэвристические методы и эвристические методы.

Точный метод. Метод точного решения имеет преимущество в доказательстве оптимальности решений, в то время как он чрезвычайно трудоемок, поэтому с его помощью можно решать только небольшие задачи. Примерами могут служить динамическое программирование, метод ветвей и границ и ветвей и отсечений. В нескольких исследованиях, например, в [9-11] предлагаются эти методы, в результате применения которых за приемлемое время были решения для задач с 40 клиентами и 15 периодами, с 80 клиентами и 8 периодами и с 14 клиентами и 6 периодами соответственно.

Конструктивная эвристика. Конструктивная эвристика часто разрабатывается на основе характеристик задачи. Она может быстро предоставить приемлемое решение для задачи оптимизации с NP-сложной структурой, но не гарантирует, что это решение будет оптимальным. В [3] предлагается трехэтапная конструктивная эвристика, которая состоит из последовательного решения задачи пополнения склада, задачи распределения и процесса консолидации, который позволяет переносить дату поставки клиенту с одного периода на другой. Результаты расчетов показывают, что процесс консолидации может привести к снижению затрат от 3% до 20%.

Метаэвристика. Метаэвристика является наиболее предпочтительным методом решения PRP, поскольку она позволяет использовать пространство решений с помощью процедуры управляемого поиска с накопленным опытом поиска, чтобы избежать попадания в ловушку локального оптимума. Метаэвристика позволяет находить решения, близкие к оптимальным, и может быть легко адаптирована для решения аналогичных задач. Для решения PRP разработано множество метаэвристик, например, жадная рандомизированная процедура адаптивного поиска, меметический алгоритм, в котором генетический алгоритм модифицируется с помощью процедуры локального поиска, эвристика поиска с запретами. В частности, в [12] представлена адаптивная эвристика поиска в больших окрестностях. На основе контрольных примеров показывается небольшой процент расхождений результатов (3-5 %) по отношению к точным решениям.

Применительно к пищевой промышленности задача PRP может быть рассмотрена в двух направлениях:

1. Многопродуктовая задача PRP с использованием аутсорсинга (MPRPOS).

2. Задача производства на нескольких заводах с учетом упаковки и маршрутизации продукции (MFPRP).

Для решения задачи MPRPOS используется смешанная целочисленная линейная программа (MILP). Дополнительно используется трехуровневая эвристика (TLH) [13]. Данная эвристика также способна решать классические задачи PRP.

Для решения задачи MFPRP предлагается модель MILP. Затем для

ее решения используется гибридная математическая модель (НМ) [14]. Эвристика состоит из трех компонентов: 1) двухэтапный итеративный метод для получения хорошего исходного решения; 2) процедура исправления и оптимизации для исправления и улучшения решения; и 3) оптимизация на основе маршрута для дальнейшего улучшения решения.

Рассмотрим решение задачи MPRPOS. Для этого были сгенерированы случайным образом 50 тестовых задач для оценки производительности трехуровневой эвристики. Все тесты выполнялись на ПК с процессором Intel Core i7 (2,5 ГГц) и 8 ГБ оперативной памяти. Результаты для некоторых тестов показаны в таблице 1. В ней указаны n – количество потребителей, T – количество временных периодов, P – количество продуктов. Дополнительно столбцы Затр. ^{*} и Затр. ^с обозначают наилучшее значение затрат, полученное с помощью TLH, и оптимальное значение затрат, предоставленное CPLEX, соответственно. Столбец Откл(%) указывает отклонение в процентах решения TLH от решения CPLEX. Столбцы TLH и CPLEX указывают время вычисления в секундах с помощью TLH и CPLEX соответственно.

Таблица 1 – Решение задачи MPRPOS

n	T	P	Затр. [*]	Затр. ^с	Откл(%)	TLH(с)	CPLEX(с)
10	3	3	15942	15810	0.85	1.3	149.5
		6	32122	32063	0.19	1.8	330.5
		12	52638	52550	0.18	10.7	1971.7
	6	3	32983	31789	3.69	7.8	3525.1
		6	58697	56207	4.43	48.6	4196.8
		12	103295	100573	2.73	506.2	4409.7
14	3	3	20726	20250	2.45	2.4	1619.6
		6	39690	39452	0.62	6.9	1663.0
		12	73163	72967	0.28	17.6	1227.5
	6	3	45553	43661	4.29	17.0	3845.6
		6	78875	77409	1.93	50.5	2812.2
		12	141033	137948	2.25	512.4	4074.8
Среднее			57893	56723	1.99	98.6	2486

Результаты вычислений на примерах MPRPOS показывают, что TLH может эффективно находить приемлемые решения со средними отклонениями в 1,99% и 9,90% при времени вычислений 98,6 с и 706,8 с для экземпляров с числом клиентов до 10 и 14 соответственно. Обширные экспериментальные результаты на тестовых примерах PRP показывают, что TLH в целом превосходит большинство существующих эвристик для PRP как по качеству решения, так и по времени вычислений.

Рассмотрим решение задачи MFPRP. Для этого были сгенерированы

случайным образом 40 тестовых задач для оценки производительности гибридной модели (НМ). Все тесты выполнялись на ПК с процессором Intel Core i7 (2,5 ГГц) и 8 ГБ оперативной памяти. Результаты для некоторых тестов показаны в таблице 2. В ней указаны n – количество потребителей, T – количество временных периодов, P – количество заводов, B – количество видов упаковок. Дополнительно введены следующие обозначения: CP1 – оптимальное решение, полученное CPLEX; CP2 – решение, полученное CPLEX с проверкой альтернативных маршрутов. Столбцы НГ1, НГ2 и НГ3 представляют собой нижние границы (допустимые решения), полученные с помощью CP1, CP2 и НМ соответственно. Верхние границы, предоставляемые CP1 и CP2, указаны в столбцах ВГ1 и ВГ2. Время вычисления в секундах для значений CP1, CP2 и НМ указаны в столбцах Т1, Т2 и Т3 соответственно. В столбце Откл1(%) указаны отклонения решения, полученные с помощью НМ по отношению к лучшему решению, предоставленному CP1 и CP2. Откл2(%) означает отклонение между решением, предоставленным НМ, и наилучшей верхней границей, предоставленной CPLEX.

Таблица 2 – Решение задачи MFPRP

N п/п	P	T	n	B	CP1			CP2			НМ			
					НГ1	ВГ1	Т1 (с)	НГ2	ВГ2	Т2 (с)	НГ3	Т3 (с)	Откл1 (%)	Откл2 (%)
1	2	3	6	2	13187	13187	15.8	13187	13187	4.4	13167	5.7	0.00	0.00
2	2	3	6	3	10611	10611	22.1	10611	10611	4.2	10533	6.3	0.66	0.69
3	2	3	8	2	20772	20772	63.9	20772	20772	12.1	20669	5.8	0.48	0.48
4	2	3	8	3	18441	18441	436.4	18441	18441	60.3	18039	7.4	1.98	2.08
5	2	3	10	2	26664	27425	915.8	27398	27398	403.0	27311	7.6	0.29	0.30
6	2	6	6	2	26916	28916	379.3	28916	28954	835.8	28723	22.9	0.57	0.57
7	2	6	6	3	23944	23944	827.2	23939	24117	1274.0	23601	60.6	1.52	1.55
8	2	6	8	2	37971	40275	2081.0	39993	40691	2547.0	39783	43.4	0.58	1.25
9	2	6	8	3	38123	36129	1151.0	36027	36424	1579.5	35737	53.5	0.79	1.17

Результаты расчетов для примеров таблицы 2 показывают, что НМ может находить решения со средним отклонением в 1,26% и 5,09% по сравнению с нижней и верхней границами, предоставляемыми CPLEX, и требует всего лишь менее 5% времени вычислений по сравнению с CPLEX.

В заключение стоит отметить, что применение эвристического подхода для сложных задач PRP в виде MPRPOS и MFPRP позволяет получить допустимые решения с незначительным процентом отклонения результата от точного решения. При этом существенно сокращается время получения результатов на ПК, что позволяет оперативно реагировать на изменяющиеся условия производства, распределения, доставки и потребления пищевой продукции.

Список литературы

1. Federgruen A, Tzur M. Time-partitioning heuristics: Application to one warehouse, multiitem, multiretailer lot-sizing problems // *Nav Res Logist.* – 1999. – 46(5). – P. 463-486.
2. Campbell A., Savelsbergh M. A decomposition approach for the inventory-routing problem // *Transp Sci.* – 2004. – 38(4). – P. 488-502.
3. Chandra P. A dynamic distribution model with warehouse and customer replenishment requirements // *J Oper Res Soc.* – 1993. – 44(7). – P. 681-692.
4. Chandra P, Fisher M. Coordination of production and distribution planning // *Eur J Oper Res.* – 1994. – 72(3). – P. 503-517.
5. Bard J, Nananukul N. The integrated production-inventory-distribution-routing problem // *J Sched.* – 2009. – 12(3). – P. 257-280.
6. Тюрин, А.Ю. Особенности выбора схем транспортировки продукции предприятий пищевой промышленности с различными сроками годности // *РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция.* – 2010. – № 1. – С. 136-139.
7. Тюрин, А.Ю. Методика планирования маршрутов доставки грузов мелкими партиями на большой сети обслуживания / А.Ю. Тюрин. – Текст : непосредственный // *Вестник Кузбасского государственного технического университета.* – 2010/ - №3. – С.133-136.
8. Тюрин А.Ю. Скорость поставок и оборот капитала // *Российское предпринимательство.* – 2010. - № 1 (выпуск 2). – С. 69-75.
9. Fumero F, Vercellis C. Synchronized development of production, inventory and distribution schedules // *Transp Sci.* – 1999. – 33(3). – P. 330-340.
10. Archetti C, Bertazzi L, Paletta G, Speranza MG. Analysis of the maximum level policy in a production-distribution system // *Comput Oper Res.* – 2011. – 38 (12). – P. 1731-1746.
11. Adulyasak Y, Cordeau JF, Jans R. Formulations and branch and cut algorithms for multi-vehicle production and inventory routing problems // *INF J Comput.* – 2014. – 26(1). – P.103-120.
12. Adulyasak Y, Cordeau JF, Jans R. Optimization-based adaptive large neighborhood search for the production routing problem. *Transp Sci.* – 2014. – 48(1) – P. 20-45.
13. Li Y, Chu F, Chu C, Zhu Z. An Efficient Three-level Heuristic for the Large-scaled Multi-product Production Routing Problem with Outsourcing // *Eur J Oper Res.* – 2019. – 272(3). – P. 914-927.
14. Li Y, Chu F, Feng C, Chu C, Zhou M. Integrated Production Inventory Routing Planning for Intelligent Food Logistics Systems // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* – 2018. – 99. – P. 1-12.