

УДК 004.021, 65.012.26

DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_64

А.Н. Санников, М.А. Степаненко, В.И. Голованов, Т.И. Балашова, С.Н. Капранов

ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОВАРОПРОВОДЯЩЕЙ СЕТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА ЕЕ ОБЪЕКТОВ

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева

Представлена новая постановка задачи функционирования товаропроводящей сети, приведены методы оптимального распределения продукции и внедрения мер планово-предупредительных ремонтов в процесс моделирования, способствующие повышению устойчивости работоспособности сети. Выполнено тестирование производительности и нагрузочное тестирование рассматриваемых алгоритмов, произведен сравнительный анализ алгоритмов. Предложены рекомендации по использованию рассмотренных методов при моделировании функционирования товаропроводящих сетей.

Ключевые слова: логистика, товаропроводящая сеть, устойчивость сети, управление цепями поставок, планово-предупредительный ремонт.

Введение

В настоящее время в России в условиях становления цифровой экономики происходит активное внедрение автоматизированных систем при автоматизации основных бизнес-процессов компаний. Вместе с тем, бурное развитие получила транспортно-логистическая функция, основной задачей которой является управление цепями поставок, предполагающее улучшение качества обслуживания потребителей, минимизацию расходной части предприятия, увеличение прибыли и рациональное распределение произведенной продукции.

Наиболее часто используемой схемой управления цепями поставок является распространенная в мире логистическая концепция «just in time» или «точно в срок», согласно которой поставка необходимого товара потребителю осуществляется в строго отведенное время. Таким образом, проблемы обеспечения бесперебойных поставок товара и удовлетворение потребительского спроса являются одними из главных в механизме управления цепями поставок «just in time».

Цель работы заключается в оптимизации распределения произведенной продукции при введении в производственный процесс планово-предупредительного ремонта, позволяющего проводить профилактические меры, которые сводят к минимуму риск внепланового выхода оборудования из строя.

Объект исследования

Товаропроводящая сеть (ТПС) – это совокупность хозяйствующих субъектов, располагающихся на полигоне товарного обслуживания, находящихся в определенных отношениях и связях между собой, имеющих развитые коммуникации, обеспечивающих эффективное взаимодействие между поставщиками, перевозчиками и потребителями товарной продукции и услуг в соответствии с их потребностями [1].

Товаропроводящая сеть представлена в виде ориентированного графа $G=(V,E)$ без контуров и петель [2], построенного на множестве вершин $V=\{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{ij}\}$ и ребер $E=\{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{ij}\}$. Каждой вершине графа соответствует узел сети одного из трех видов: v_{1j} – производитель ($i=1$), v_{2j} – складские помещения ($i=2$) и v_{3j} – потребитель ($i=3$). Дуги графа – маршруты транспортировки продукции между узлами сети.

Графовая визуализация товаропроводящей сети, имеющая пять пунктов производства, шесть складов и пять пунктов потребления, представлена на рис. 1.

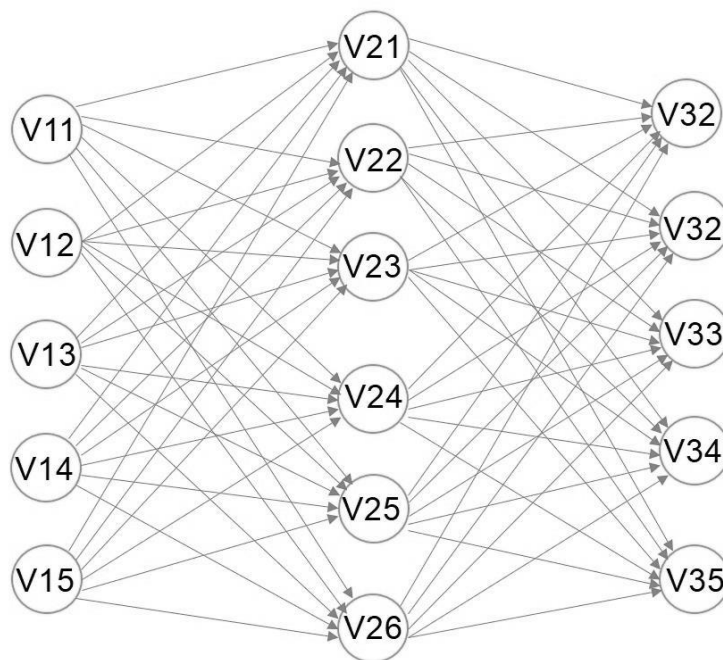


Рис. 1. Визуализация товаропроводящей сети

Постановка задачи

Функционирование сети, представленной на рис. 1, носит динамический характер и происходит в дискретные моменты времени, разбитые на такты. Такт – единица времени, в течение которого выполняется следующий алгоритм.

1. Производство продукции на j -ом пункте V_{1j} согласно функции производства.
2. Произведенная продукция распределяется по складским помещениям по маршрутам транспортировки.
3. Продукция со складских помещений распределяется по пунктам потребления в соответствии с функцией потребления.

Цель моделирования – определить оптимальные значения объемов производства товаров, при котором ТПС будет находиться в устойчивом (работоспособном) состоянии. Для минимизации выхода из строя компонентов сети используется система планово-предупредительных ремонтов (ППР) [3].

Для внедрения системы планово-предупредительного ремонта в моделирование работы ТПС, необходимо составить бинарную матрицу $repair$ (1), которая будет определять участие j -ого пункта производства в профилактических мерах на текущем такте.

Элемент матрицы

$$repair[i, j] = \begin{cases} 1 & \text{– в случае участия в ППР} \\ 0 & \text{– в случае работы пункта производства в штатном режиме} \end{cases} \quad i = \overline{1..n}, j = \overline{1..m}$$

Матрица для товаропроводящей сети, представленной на рис. 1, в которой предусмотрены профилактические меры пунктов производства V_{12} на четвертом, пятом, шестом и седьмом тактах и V_{15} на втором, третьем и четвертом тактах соответственно, примет следующий вид (1):

$$repair = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ограничениями в данной задаче будут выступать:

1. Время выполнения ППР, которое рассчитывается по формуле (2):

$$\sum_{j=1}^n t_j b_j \leq T \quad (2)$$

где t_j – время, за которое происходит ППР j -ого пункта производства,
 b_j – определяет принадлежность пункта производства к ремонту, $b_j \in \{0,1\}$,
 T – плановое время ремонта.

2. Переполняемость складов, которая рассчитывается по формуле (3):

$$Val_i \leq Val_{\max i} \quad (3)$$

где Val_i – вместимость i -ого склада, $i \in 1..n$

Алгоритмы моделирования

Для моделирования функционирования товаропроводящей сети были последовательно использованы два алгоритма: двухэтапная транспортная задача и уровневый алгоритм заполняемости складских помещений.

Двухэтапная транспортная задача – частный случай классической транспортной задачи об оптимальном плане перевозок продукта из пункта производства в пункт потребления. Ее целью является доставка продукции в определенное время и место при минимальных совокупных затратах на трудовые, материальные и финансовые ресурсы [4]. Описание алгоритма двухэтапной транспортной задачи [5] имеет следующий вид.

Пусть имеется m пунктов производства продукции, при этом известны объемы производства a_i в каждом из пунктов. Имеется s пунктов складирования продукции с максимально возможными объемами хранилища q_k . Имеются также n пунктов потребления готовой продукции с объемами потребностей b_j . Кроме того, известны:

C_{ik}^1 – затраты на производство единицы продукции в i -ом пункте производства и ее транспортировку в k -ый склад;

C_{kj}^2 – затраты на переработку единицы продукции в k -ом складе и ее транспортировку в j -ый пункт потребления.

Требуется определить объемы переработки продукции в промежуточных пунктах (при условии $\sum_{k=1}^s q_k > \sum_{i=1}^m a_i$) и определить план перевозок из пунктов производства в пункты потребления через складские помещения (из i -ых в k -ые, а из k -ых в j -ые) при условии, что общие издержки на производство, переработку и транспортировку были минимальными. Целевая функция и ограничения задачи представлены в системе (4).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^s C_{ik}^1 X_{ik}^1 + \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^n C_{kj}^2 X_{kj}^2 \rightarrow \min \\ \sum_{k=1}^s X_{ik}^1 = a_i \\ \sum_{k=1}^m X_{ik}^1 = q_k \\ \sum_{j=1}^n X_{kj}^2 = q_k \\ \sum_{k=1}^s X_{kj}^2 = b_j \\ i = \overline{1..m}, \quad j = \overline{1..n}, \quad k = \overline{1..s} \end{array} \right. \quad (4)$$

В системе 4:

X_{ik}^1 – объемы перевозки продукции из i -го пункта производства в k -ый склад;

X_{kj}^2 – объемы перевозки продукции из k -го склада в j -ый пункт потребления.

Решение двухэтапной транспортной задачи выполняется по следующим шагам:

1 – решается транспортная задача перевозок из пунктов производства в складские помещения;

2 – устанавливается запрет на транспортировку из пунктов производства в пункты потребления, минуя складские помещения. Стоимость такой перевозки $C_{ij} = +\infty$;

3 – решается транспортная задача перевозок из складских помещений в пункты потребления.

Дальнейшее решение заключается в последовательном моделировании данных шагов и производится по методу потенциалов, схема которого представлена на рис. 2.

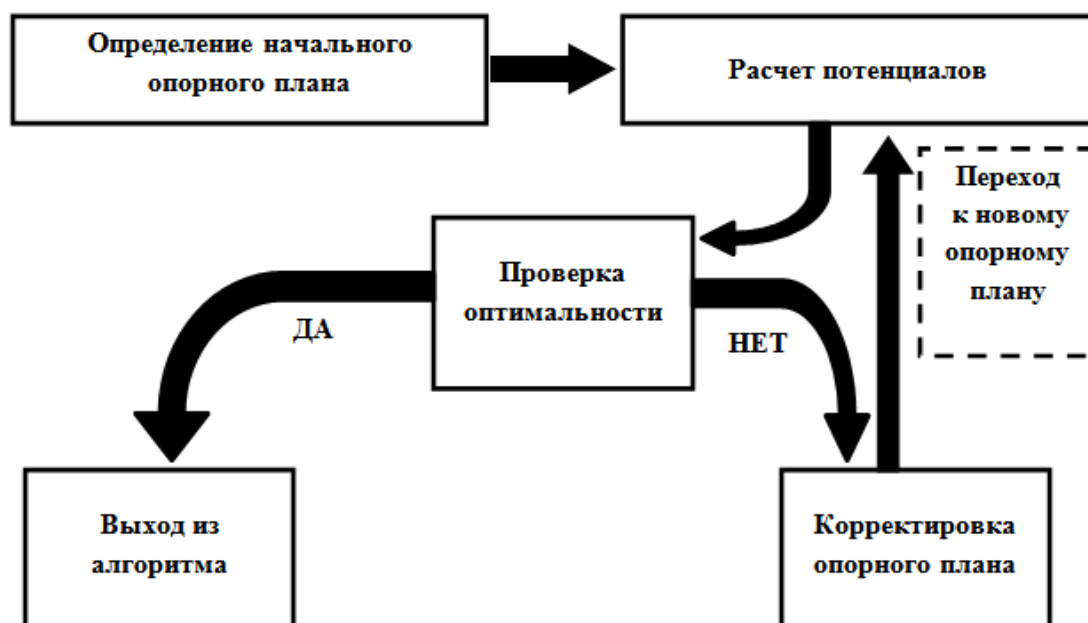


Рис. 2. Базовая схема метода потенциалов

В результате при решении транспортной задачи на шаге 1 найден оптимальный план перевозок из пунктов производства в склады, на 4 шаге – оптимальный план перевозок из складов в пункты потребления, а полученные результаты на 3 шаге иллюстрируют суммарную продукцию на складах до распределения на k -ом такте – запас продукции.

Решение задачи уровневым алгоритмом распределения продукции по складам выполняется по следующим шагам:

1 – определяются значения уровней заполняемости складов (минимальный, рабочий, критический);

2 – проверка включения пункта производства в планово – предупредительный ремонт на k -ом такте;

3 – согласно установленным в шаге 1 уровням заполняемости производится распределение на k -ом такте по j -ым складам;

4 – удовлетворение функции производства путем перемещения продукции из складских помещений в вершины v_{3j} .

Базовая схема уровневого алгоритма распределения продукции по складам представлена на рис. 3.



Рис. 3. Базовая схема уровневого алгоритма

Сравнительный анализ алгоритмов

С целью определения быстродействия работы алгоритмов произведено тестирование производительности. Для тестирования алгоритмов и моделирования работы ТПС был использован персональный компьютер Lenovo B50-70. Компьютер оборудован двухъядерным процессором Intel Core i3-4030U с частотой 1,9 ГГц, графическим контроллером AMD Radeon R5 230 2ГБ. Оперативная память Lenovo B50-70 составляет 6Гб.

Тестирование производительности выполнялось на товаропроводящей сети, состоящей из 15 элементов, в которой количество пунктов производства, складских помещений и пунктов потребления варьировалось от 3 до 7 при связи вершин графа «все со всеми».

В результате моделирования работы товаропроводящей сети с помощью рассмотренных методов можно сделать следующие выводы:

1. Оба алгоритма показали свою устойчивость при моделировании ТПС до 100 временных тактов.
2. В отличие от двухэтапной транспортной задачи в уровневом алгоритме задействованы все склады, а не только те, которые определяют оптимальный опорный план, но уровеньный алгоритм не подразумевает оптимизацию затрат на транспортировку в отличие от транспортной задачи.
3. Быстродействие алгоритмов представлено на рис. 4.

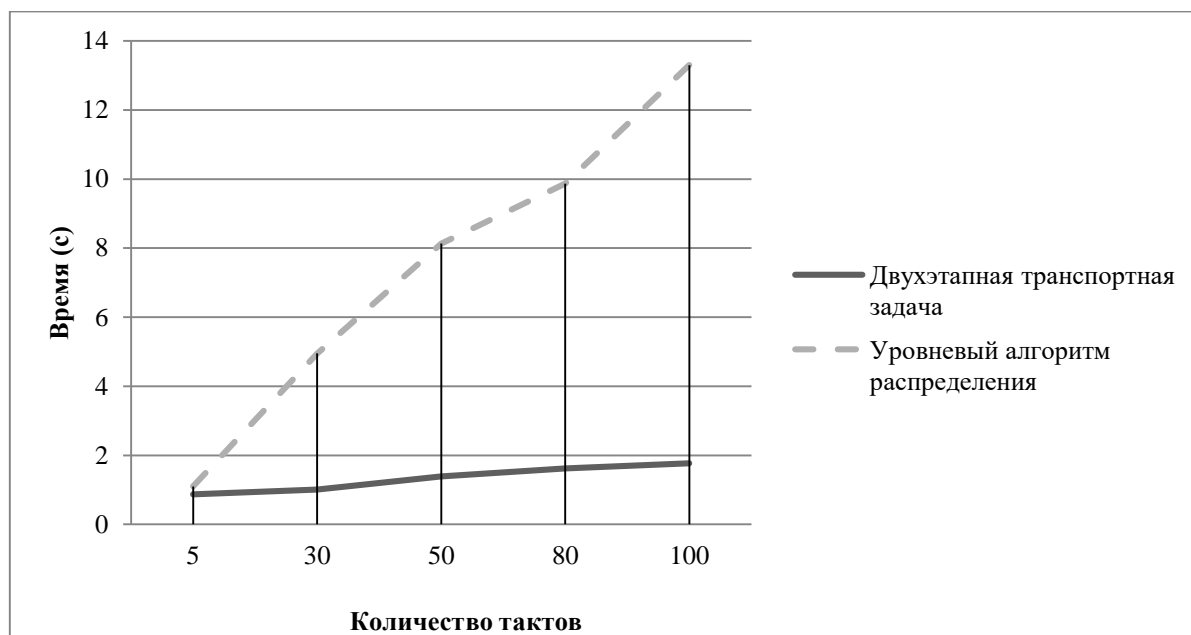


Рис. 4. Сравнительный анализ работоспособности алгоритмов по времени от количества тактов моделирования ТПС

Исходя из приведенного на рис. 4 графика видно, что двухэтапная транспортная задача в несколько раз быстрее справляется с поставленной целью, однако уровеньный алгоритм распределения дает более точный результат, поскольку данный метод учитывает рентабельность складов путем участия каждого из них в процессе распределения продукции. Этот аспект способствует увеличению потока товара, проходящего через каждый склад, что позволяет оптимально распределить продукцию по складским помещениям и увеличить устойчивость сети.

Для определения максимального времени моделирования оптимального распределения продукции при указанных выше характеристиках компьютера было проведено нагрузочное тестирование, согласно которому работоспособность рассматриваемой товаропроводя-

щей сети возможна до 200 тактов при методе двухэтапной транспортной задачи и до 150 тактов при уровне алгоритме соответственно.

Исходя из полученных результатов, алгоритм двухэтапной транспортной задачи имеет ряд преимуществ: высокое быстродействие и устойчивость при моделировании сети на длительном промежутке времени. Однако уровень алгоритм, уступая в быстродействии, эффективен при оптимизации распределения продукции при краткосрочном моделировании, поскольку при его работе задействованы все складские помещения, а не только те, которые были включены в опорный план транспортной задачи на рассматриваемом такте.

Таким образом, уровень алгоритм эффективно использовать при моделировании работы товаропроводящей сети на короткие промежутки времени (до 100 тактов), а метод двухэтапной транспортной задачи – на длительном функционировании ТПС.

Заключение

В результате исследования были рассмотрены и реализованы методы оптимизации распределения продукции в товаропроводящих сетях при использовании планово-предупредительного ремонта. Произведена оценка эффективности данных методов путем проведения нагрузочного тестирования и тестирования производительности, выполнен сравнительный анализ по основным критериям.

В дальнейшем предполагается апробация рассматриваемых алгоритмов на товаропроводящих сетях с большим количеством элементов и адаптация методов с целью повышения эффективности их работы.

Библиографический список

1. **Аникин, Б.А.** Логистика. Теория и практика. Управление цепями поставок / Б.А. Аникин, Т.А. Родкина. – М.: Проспект, 2019. – 216 с.
2. **Балашова, Т.И.** Слияние товаропроводящих сетей на основе эвристических алгоритмов оптимизации по критерию минимальных стоимостей путей / Т.И. Балашова, В.И. Голованов, С.Н. Капранов, М.А. Степаненко, И.В. Лисин // Материалы XXV международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии. ИСТ – 2019», 2019.
3. **Фаскиев, Р.С.** Техническая эксплуатация и ремонт технологического оборудования: учебное пособие / Р.С. Фаскиев, Е.В. Бондаренко, Е.Г. Кеян, Р.Х. Хасанов. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т ОГУ, 2011. – 261 с.
4. **Цыплакова, О.Н.** Транспортная задача и её применение в решении экономических задач / О.Н. Цыплакова, Ю.В. Цысь, А.В. Кобылина // Материалы VI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». – 2014. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014005189>, свободный (дата обращения: 13.11.2019).
5. **Жданова, А.И.** Двухэтапная транспортная задача / А.И. Жданова, Д.С. Завалицин // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум», 2018. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018002092>, свободный. (дата обращения: 21.11.2019).
6. **Санников, А.Н.** Алгоритм анализа устойчивости товаропроводящей сети при условии несоблюдения графика планово-предупредительного ремонта / А.Н. Санников, М.А. Степаненко, Т.И. Балашова // Будущее технической науки: сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-техн. конф. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. – 545 с.
7. **Бродецкий, Л.Г.** Экономико-математические методы и модели в логистике. Процедуры оптимизации / Л.Г. Бродецкий, Д.А. Гусев. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 195 с.
8. **Гвинн, Р.** Управление современным складом / Р. Гвинн. – М.: Эксмо, 2017. – 496 с.

*Дата поступления
в редакцию: 20.03.2020*

A.N. Sannikov, M.A. Stepanenko, V.I. Golovanov, T.I. Balashova, S.N. Kapranov

**OPTIMIZATION OF FUNCTIONING GOOD'S DISTRIBUTION NETWORK DURING
SCHEDULED PREVENTIVE REPAIRS OBJEKTS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The task of optimal distribution of manufactured products on the objects of the distribution network is one of the urgent tasks of modern logistics. The purpose of the work is to optimize the distribution of industrial products across the warehouse when scheduled preventive repairs are introduced into the production process.

Methodology: This article presents the statement of the problem of the functioning of the distribution network. The methods of optimal distribution of products are presented: an algorithm of a two-stage task and a level method for the distribution of products in warehouses.

Implications: The article includes the results of performance testing and load testing. A comparative analysis of the considered methods was carried out, confirming the effectiveness of the results. Recommendations on the use of the considered methods in modeling the functioning of distribution networks are suggested.

Key words: logistics, distribution network, network resilience, supply chain management, preventive maintenance.