

УДК 338.312:658.7

**А.Е. Радаев, В.В. Кобзев****ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ  
АДАПТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ ПОСТАВОК  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ****A.E. Radaev, V.V. Kobzev****OPTIMIZATION MODEL FOR ADAPTIVE FUNCTIONING  
OF SUPPLY NETWORK INCLUDING INDUSTRIAL ENTERPRISES**

---

Рассмотрены существующие проблемы обеспечения адаптивности сетей поставок промышленных предприятий. Разработана оптимизационная модель адаптивного функционирования сети поставок промышленных предприятий, обеспечивающая формирование оптимальных характеристик объекта, адекватных изменениям во внешней среде.

АДАПТИВНОСТЬ. СЕТЬ ПОСТАВОК. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.

Paper covers present issues concerning adaptability ensuring for supply networks including industrial enterprises. Optimization model for adaptive functioning of industrial enterprises' supply network is created to determine optimal characteristics of the mentioned object in line with external environment's changes.

ADAPTABILITY. SUPPLY NETWORK. INDUSTRIAL ENTERPRISE. MODELING. OPTIMIZATION MODEL.

---

Современные условия развития высокотехнологичных производств промышленных предприятий характеризуются стремительным усложнением структуры материальных потоков, а также процедур преобразования последних с целью получения инновационной наукоемкой продукции, конкурентоспособной на мировых рынках. При этом особую значимость приобретают вопросы организационного проектирования и организации функционирования сетей поставок, содержащих в своем составе промышленные предприятия с высокотехнологичными производствами, в соответствии с требуемыми показателями надежности, гибкости и адаптивности для наиболее полного удовлетворения потребностей конечных потребителей.

Важно отметить, что ввиду непрерывно изменяющихся условий внешней среды именно адаптивность сетей поставок является ключевым показателем оценки степени удовлетворения потребностей потребителей, напрямую определяющей конкурентоспособность предприятий сети поставок и, как следствие, их

устойчивое развитие на перспективу. Данное обстоятельство определило целесообразность разработки оптимизационной модели адаптивного функционирования сети поставок промышленных предприятий.

**Постановка задачи.** Основная задача исследования — разработка оптимизационной модели адаптивного функционирования сети поставок промышленных предприятий. Модель предполагается использовать в процессе выполнения проекта в рамках сети поставок промышленных предприятий для определения характеристик сети поставок, обеспечивающих наиболее эффективное ее функционирование при изменении влияния факторов внешней среды. При этом переход исследуемой системы от текущих характеристик к полученным в рамках оптимизационного эксперимента является адаптацией сети поставок к условиям внешней среды. Соответствующее процессу адаптации свойство системы — адаптивность — определяет ее способность точно настраивать свое предложение на текущее или ожидаемое состояние

изменяющегося спроса. По отношению к сети поставок свойство адаптивности проявляется в способности системы удовлетворять требования потребителей при изменяющихся условиях поставки (по составу и размеру партии, качеству продукции, срокам, месту, получателю, затратам) [7]. В качестве основы для разработки оптимизационной модели адаптивного функционирования сети поставок промышленных предприятий выбрана принципиальная модель управления системой на основе проектно-ориентированного сетевого подхода по принципу удовлетворения потребностей конечных потребителей в части ассортимента, количества, качества, сроков и затрат, связанных с выполнением заказа [3].

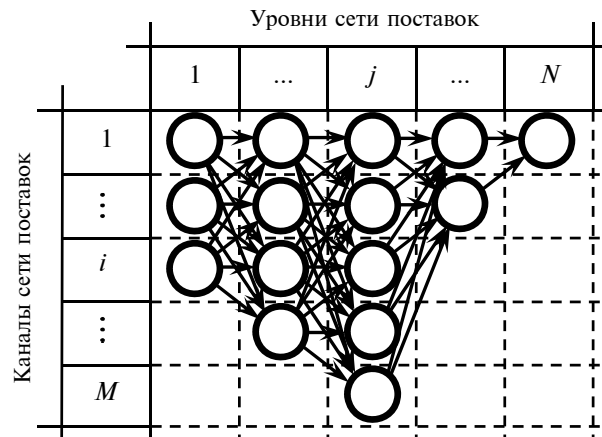
**Описание оптимизационной модели.** Основные положения разработанной модели следующие:

- сеть поставок представляет собой двухмерную (матричную) структуру (см. рисунок), описывающую взаимосвязи предприятий-участников по каналам и организационным уровням. Для графического описания сети поставок целесообразно использовать элементы теории графов, применяемые при описании транспортных задач [2, 12], т. е. вершины, описывающие предприятия-участники сети поставок, и ориентированные дуги, характеризующие направленное движение материальных потоков;

- каждое предприятие-участник сети поставок, расположенное на текущем организационном уровне, может взаимодействовать только с теми предприятиями, которые расположены на предшествующем или последующем уровнях;

- предприятия-участники сети поставок осуществляют функции преобразования (заготовительные, обрабатывающие, сборочные производства, комплекточные склады) и хранения (перевалочные склады) элементов материальных потоков;

- длительность операций приемки/отгрузки продукции предприятием-участником сети поставок пренебрежимо мала по сравнению с длительностью основных производственных операций.



Структура сети поставок промышленных предприятий

Основные параметры исследуемой сети поставок:

- количество каналов  $M$  сети поставок;
- количество организационных уровней  $N$  сети поставок;
- количество типов  $K_j^{in}$  предметов производства, поступающих на предприятия  $j$ -го организационного уровня сети поставок,  $j = \overline{1, N}$ ;
- количество типов  $K_j^{out}$  предметов производства, убывающих с предприятий  $j$ -го организационного уровня сети поставок,  $j = \overline{1, N}$ .

Основные параметры предприятий-участников сети поставок:

- количество  $q_{ij}^{k' in}$  и  $q_{ij}^{k out}$  предметов производства соответственно  $k'$ -го и  $k$ -го типа на входе и выходе предприятия, соответствующего  $i$ -му каналу и  $j$ -му организационному уровню сети поставок,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $k' = \overline{1, K_j^{in}}$ ,  $k = \overline{1, K_j^{out}}$ ;

- стоимость  $C_{ij}^{k' in}$  и  $C_{ij}^{k out}$  предметов производства соответственно  $k'$ -го и  $k$ -го типа на входе и выходе предприятия, соответствующего  $i$ -му каналу и  $j$ -му организационному уровню сети поставок,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $k' = \overline{1, K_j^{in}}$ ,  $k = \overline{1, K_j^{out}}$ .

- моменты времени  $t_{ij}^{k' in}$  и  $t_{ij}^{k out}$  соответственно приемки и отгрузки предметов про-

изводства  $k'$ -го и  $k$ -го типа на входе и выходе предприятия, соответствующего  $i$ -му каналу и  $j$ -му организационному уровню сети поставок,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $k' = \overline{1, K_j^{in}}$ ,  $k = \overline{1, K_j^{out}}$ .

К основным параметрам преобразования материальных потоков внутри предприятий-участников сети поставок относятся:

- количество заготовок  $k$ -го типа  $\Delta q_{ij k'}^k \text{ заг}$ , получаемое при обработке единицы  $k'$ -го типа материального ресурса в рамках заготовительного предприятия, соответствующего  $i$ -му каналу и  $j$ -му организационному уровню сети поставок,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $k' = \overline{1, K_j^{in}}$ ,  $k = \overline{1, K_j^{out}}$ ;

- количество предметов производства  $k'$ -го типа  $\Delta q_{ij k'}^k \text{ сб}$ , необходимое для сборки единицы  $k$ -го изделия в рамках сборочного предприятия, соответствующего  $i$ -му каналу и  $j$ -му организационному уровню сети поставок,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $k' = \overline{1, K_j^{in}}$ ,  $k = \overline{1, K_j^{out}}$ ;

- денежные  $\Delta c_{ij}^k \text{ пр}$  и временные  $\Delta t_{ij}^k \text{ пр}$  затраты на получение единицы  $k$ -го типа предмета производства (элемента выходного потока) в рамках предприятия, соответствующего  $i$ -му каналу и  $j$ -му организационному уровню сети поставок  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $k = \overline{1, K_j^{out}}$ .

Для описания процессов движения материальных потоков по сети поставок используются:

- логические переменные  $l_{ij}^{jk}$ , определяющие наличие взаимодействия в части  $k$ -го типа предмета производства между предприятием  $i_j$ -го канала на текущем  $j$ -м организационном уровне сети поставок и предприятием  $i_{j+1}$ -го канала на следующем  $j+1$ -м уровне по принципу

$$l_{ij i_{j+1}}^{jk} = \begin{cases} 1 & \text{— если предприятия} \\ & \text{взаимодействуют,} \\ 0 & \text{— в противном случае,} \end{cases}$$

$$i_j, i_{j+1} = \overline{1, M}, j = \overline{1, N-1}, k = \overline{1, K_j^{out}};$$

- объем  $\Delta q_{ij i_{j+1}}^{jk \text{ тр}}$  транспортной партии для перемещения  $k$ -го типа предметов производства

между предприятием  $i_j$ -го канала на текущем организационном уровне сети поставок и предприятием  $i_{j+1}$ -го канала на следующем уровне,  $i_j, i_{j+1} = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N-1}$ ,  $k = \overline{1, K_j^{out}}$ ;

- денежные  $\Delta c_{ij i_{j+1}}^{jk \text{ тр}}$  и временные  $\Delta t_{ij i_{j+1}}^{jk \text{ тр}}$  затраты на перемещение одной транспортной партии предметов производства  $k$ -го типа между предприятием  $i_j$ -го канала на текущем организационном уровне сети поставок и предприятием  $i_{j+1}$ -го канала на следующем уровне,  $i_j, i_{j+1} = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N-1}$ ,  $k = \overline{1, K_j^{out}}$ .

Внешняя среда – исходные поставщики и конечные потребители – описывается следующими основными параметрами:

- выделенное количество  $q_i^{k' \text{ гив}}$ , начальная стоимость  $c_i^{k' \text{ гив}}$ , начальное время обработки  $t_i^{k' \text{ гив}}$   $k'$ -го типа материальных ресурсов у исходного поставщика в  $i$ -м канале сети поставок,  $i = \overline{1, M}$ ,  $k' = \overline{1, K_1^{in}}$ ;

- требуемые количество  $q_{req}^k$ , стоимость  $c_{req}^k$ , время доставки  $t_{req}^k$  изделий  $k$ -го типа на выходе сети поставок,  $k = \overline{1, K_N^{out}}$ .

Изменение параметров материального потока в процессе преобразования в рамках предприятия-участника сети поставок, соответствующего  $i$ -му каналу и  $j$ -му организационному уровню, описывается выражениями:

$$q_{ij}^{k \text{ out}} = \begin{cases} q_{ij}^{k' \text{ in}} \Delta q_{ij k'}^k \text{ заг} & \text{— для заготовительного} \\ & \text{предприятия,} \\ q_{ij}^{k' \text{ in}} & \text{— для обрабатывающего} \\ & \text{предприятия,} \\ \min_{k' \in K_{jk}^*} \left\{ \frac{q_{ij}^{k' \text{ in}}}{\Delta q_{ij k'}^k \text{ сб}} \right\} & \text{— для сборочного} \\ & \text{предприятия,} \end{cases}$$

$$c_{ij}^{k \text{ out}} = c_{ij}^{k' \text{ in}} + \Delta c_{ij}^{k \text{ пр}} q_{ij}^{k \text{ out}},$$

$$t_{ij}^{k \text{ out}} = t_{ij}^{k' \text{ in}} + \Delta t_{ij}^{k \text{ пр}} q_{ij}^{k \text{ out}},$$

$$i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}, k \in [1, K_j^{out}] \leftrightarrow k' \in [1, K_j^{in}],$$

где  $K_{jk}^*$  – совокупность типов предметов производства, необходимых для сборки изделия

$k$ -го типа на  $j$ -м организационном уровне сети поставок; [...] – округление расчетного значения до ближайшего меньшего целого.

Изменение параметров материального потока в процессе его движения между предприятием  $i_j$ -го канала на текущем  $j$ -м организационном уровне сети поставок и предприятием  $i_{j+1}$ -го канала на следующем  $j+1$ -м уровне описывается выражениями

$$q_{ij}^{k' in} = \sum_{r=1}^M l_{ri}^{(j-1)k} q_{i(j-1)}^{k out},$$

$$c_{ij}^{k' in} = \sum_{r=1}^M l_{ri}^{(j-1)k} \left( \Delta c_{ri}^{(j-1)k} \left[ \frac{q_{r(j-1)}^{k out}}{\Delta q_{ri}^{(j-1)k \text{ тр}}} \right] + c_{r(j-1)}^{k out} \right),$$

$$t_{ij}^{k' in} = \max_r \left\{ l_{ri}^{(j-1)k} \left( \Delta t_{ri}^{(j-1)k} \left[ \frac{q_{r(j-1)}^{k out}}{\Delta q_{ri}^{(j-1)k \text{ тр}}} \right] + t_{r(j-1)}^{k out} \right) \right\},$$

$$i = \overline{1, M}, j = \overline{2, N}, k' \in [1, K_j^{in}] \leftrightarrow k \in [1, K_{j-1}^{out}],$$

где [...] – округление расчетного значения до ближайшего большего целого.

Целевая функция оптимизационной модели, описывающая стоимость материального потока на выходе из сети поставок, имеет вид

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{K_N^{out}} c_{iN}^{k out} \rightarrow \min.$$

Ограничения модели, определяющие соответствие характеристик рассматриваемой системы параметрам внешней среды, описываются выражениями

$$q_{i1}^{k' in} = q_{i \text{ гив}}^{k'}, c_{i1}^{k' in} = c_{i \text{ гив}}^{k'}, t_{i1}^{k' in} = t_{i \text{ гив}}^{k'}, \\ i = \overline{1, M}, k' = \overline{1, K_1^{in}},$$

$$\sum_{i=1}^M q_{iN}^{k out} = q_{req}^k, \sum_{i=1}^M c_{iN}^{k out} \leq c_{req}^k,$$

$$\max_i \{ t_{iN}^{k out} \} = t_{req}^k, k = \overline{1, K_N^{out}}.$$

Искомые (варьируемые) величины оптимизационной модели назначаются в зависимости от вида адаптации исследуемой системы к изменениям во внешней среде:

– для структурной адаптации сети поставок в качестве оптимизируемых параметров целесообразно назначать логические величины  $l_{ij}^{jk}$ ;

– при параметрической адаптации сети поставок в качестве искомым величин необходимо назначать параметры движения и преобразования материальных потоков ( $\Delta q_{i_{j+1}}^{jk \text{ тр}}$ ,  $\Delta c_{i_{j+1}}^{jk \text{ тр}}$ ,

$$\Delta t_{i_{j+1}}^{jk \text{ тр}}, \Delta q_{ij}^{k \text{ заг}}, \Delta q_{ij}^{k \text{ сб}}, \Delta c_{ij}^{k \text{ пр}}, \Delta t_{ij}^{k \text{ пр}}).$$

**Выводы.** Приведенная оптимизационная модель может быть эффективно использована как в рамках организационного проектирования сети поставок, так и в процессе функционирования последней (выполнения заказа) для определения оптимальных характеристик системы (и, как следствие, мероприятий в области ее адаптации) для конкретных изменений во внешней среде. При этом в качестве показателей оценки адаптивности сети поставок могут быть использованы временные и денежные затраты, связанные с переходом системы от текущего состояния к оптимальному, определенному с использованием разработанной модели.

На последующих этапах исследования предполагается усовершенствование вышеописанной оптимизационной модели на базе существующих научных разработок для достижения большей точности результатов за счет дополнительного учета следующего:

– особенностей скоординированного взаимодействия предприятий-участников сети поставок в условиях изменяющегося спроса при выполнении заказов в долгосрочном периоде [1];

– влияния процессов реинжиниринга технологических процессов предприятий-участников сети поставок на эффективность ее функционирования в долгосрочном периоде [5, 6, 9, 11];

– особенностей функционирования сети поставок на международном уровне, обусловленных влиянием таможенных процедур на характеристики адаптивности сети поставок [4];

– влияния операционных, финансовых и других рисков внутренней и внешней среды предприятий-участников сети поставок на характеристики ее адаптивности [8];

– особенностей информационного взаимодействия предприятий-участников сети поставок, сопровождающего движение и преобразование материальных потоков [10].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабкин, А.В.** Экономика предприятия [Текст]: учеб. пособие / А.В. Бабкин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.
2. **Глухов, В.В.** Математические методы и модели для менеджмента [Текст]: учеб. пособие / В.В. Глухов, М.Д. Медников, С.Б. Коробко. Изд. 3-е. СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2007. 523 с.
3. **Кобзев, В.В.** Методы и модели управления сетью поставок промышленных предприятий [Текст]: моногр. / В.В. Кобзев, А.С. Кривченко. Изд. 2-е. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 205 с.
4. **Медников, М.Д.** Антикризисное управление фирмой [Текст]: учеб. пособие / М.Д. Медников. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 197 с.
5. **Ильин, И.В.** Управление деятельностью предприятия как объекта контрактного взаимодействия [Текст] / И.В. Ильин, А.И. Лёвина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2007. № 3–1. С. 54–61.
6. **Окорочков, В.Р.** Введение в теорию контроллинга [Текст] / В.Р. Окорочков, А.А. Ветров, Ю.А. Соколов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2000. 249 с.
7. **Радаев, А.Е.** Имитационное моделирование производственных систем [Текст]: учеб. пособие / А.Е. Радаев, В.В. Кобзев; под общ. ред. проф. В.В. Кобзева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 156 с.
8. **Силкина, Г.Ю.** Теория риска и моделирование рискованных ситуаций [Текст]: учеб. пособие / Г.Ю. Силкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 109 с.
9. **Соколицын, А.С.** Управление диверсификацией деятельности промышленных предприятий – важнейший механизм развития социально-экономических систем [Текст]: учеб. пособие / А.С. Соколицын, М.В. Иванов, Ю.А. Богомолов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 137 с.
10. **Соколов, Р.В.** Экономико-математические модели выбора траектории предоставления образовательных услуг на основе дистанционных технологий [Текст] / Р.В. Соколов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2012. № 2–1 (144). С. 109–114.
11. **Тютюкин, В.К.** Формирование сбалансированных производственных операций [Текст] / В.К. Тютюкин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 5: Экономика : [научно-теоретический журнал]. СПб., 2011. Вып. 3. С. 137–148.
12. **Юрьев, В.Н.** Методы оптимизации в экономике и менеджменте [Текст]: учеб. пособие / В.Н. Юрьев, В.А. Кузьменков. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 803 с.

### REFERENCES

1. **Babkin A.V.** Ekonomika predpriiatiia: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. (rus)
2. **Glukhov V.V., Mednikov M.D., Korobko S.B.** Matematicheskie metody i modeli dlia menedzhmenta : ucheb. posobie. Izd. 3-e. SPb.; M.; Krasnodar: Lan', 2007. 523 s. (rus)
3. **Kobzev V.V., Krivchenko A.S.** Metody i modeli upravleniia set'iu postavok promyshlennykh predpriatii: monogr. Izd. 2-e. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009. 205 s. (rus)
4. **Mednikov M.D.** Antikrizisnoe upravlenie firmoi: ucheb. posobie. SPb. : Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 197 s. (rus)
5. **I'in I.V., Levina A.I.** Upravlenie deiatel'nost'iu predpriiatiia kak ob'ekta kontraktного vzaimodeistviia. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics.* 2007. № 3–1. S. 54–61. (rus)
6. **Okorokov V.R., Vetrov A.A., Sokolov Iu.A.** Vvedenie v teoriuu kontrollinga. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2000. 249 s. (rus)
7. **Radaev A.E., Kobzev V.V.** Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennykh system : ucheb. posobie; pod obshch. red. prof. V.V. Kobzeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. 156 s. (rus)
8. **Silkina G.Iu.** Teoriia riska i modelirovanie riskovykh situatsii : ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 109 s. (rus)
9. **Sokolitsyn A.S., Ivanov M.V., Bogomolov Iu.A.** Upravlenie diversifikatsiei deiatel'nosti promyshlennykh predpriatii – vazhneishii mekhanizm razvitiia

sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009. 137 s. (rus)

10. **Sokolov R.V.** Ekonomiko-matematicheskie modeli vybora traektorii predstavleniia obrazovatel'nykh uslug na osnove distantsionnykh tekhnologii. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki*. 2012. № 2–1 (144). S. 109–114. (rus)

11. **Tiutiukin V.K.** Formirovanie sbalansirovannykh

proizvodstvennykh operatsii. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 5: Ekonomika* : [nauchno-teoreticheskii zhurnal]. SPb., 2011. Vyp. 3. S. 137–148. (rus)

12. **Iur'ev V.N., Kuz'menkov V.A.** Metody optimizatsii v ekonomike i menedzhmente: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 803 s. (rus)

---

**РАДАЕВ Антон Евгеньевич** – ассистент кафедры «Транспортные и технологические системы» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. Тел. (812)552-84-01. E-mail: TW-inc@yandex.ru

**RADAEV, Anton E.** – Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politekhnikeskaya str. 29, St. Petersburg, Russia. E-mail: tw-inc@yandex.ru

**КОБЗЕВ Владимир Васильевич** – заведующий кафедрой «Экономика и менеджмент в машиностроении» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор экономических наук, профессор.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. Тел. (812)534-74-36. E-mail: emm@spbstu.ru

**KOBZEV Vladimir V.** – Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia. E-mail: emm@spbstu.ru

---