

# МОДЕЛИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК

**Д.А. Иванов**

*Берлинская школа экономики и права*  
Германия, 10825, Берлин, Badensche Straße, 52  
E-mail: [dmitri.ivanov@mail.ru](mailto:dmitri.ivanov@mail.ru)

**А.Н. Павлов**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)*  
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39  
E-mail: [pavlov62@list.ru](mailto:pavlov62@list.ru)

**Б.В. Соколов**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)*  
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39  
E-mail: [sokol@iias.spb.su](mailto:sokol@iias.spb.su)

**Ключевые слова:** адаптивные цепи поставок, структурно-функциональная реконфигурация, полимодельный многокритериальный подход

**Аннотация:** В рамках развиваемой теории управления структурной динамикой сложных объектов (СЛО) актуальным является решение проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО. В докладе для динамических (адаптивных) цепей поставок (ДЦП) приведены содержательные и формальные описания задач многокритериального планирования и параметрического синтеза облика указанных объектов, а также проанализированы особенности и возможные пути решения данных задач.

## 1. Введение

Стремительное развитие рынка, ужесточение конкуренции, требование улучшения качества сервиса ставят перед компаниями новые задачи. Чтобы сохранить конкурентоспособность и усилить свои преимущества, современному предприятию необходимо оптимизировать все процессы создания стоимости – от поставки сырья до сервисного обслуживания конечного потребителя. Для решения этих задач руководство компаний и обращается к SCM-решениям (Supply Chain Management – управление цепями поставок). Одним из основных отличий адаптивных цепей поставок (A-SCM) от традиционных SCM является создание дополнительного структурно-функционального резерва из различных альтернативных поставщиков для возможности оперативного

маневра с целью учета колебаний спроса, заказов технологически новых продуктов, нарушений в процессе выполнения работ в SCM.

Основная цель управления резервами адаптивных A-SCM состоит в сохранении заданного уровня живучести SCM, а само управление резервами представляет комплекс мероприятий, ориентированных на выполнение указанной цели и связанных со сбором, оценкой и анализом информации о состоянии SCM, выявлением неработоспособных элементов, подсистем и связей между ними, включением резервных элементов и подсистем.

Поэтому современной тенденцией понимания эффективности SCM является проектирование таких A-SCM, которые бы характеризовались высоким уровнем экономической эффективности и необходимым уровнем живучести [1-4].

При этом можно различать два способа обеспечения живучести SCM. В одном из них идет борьба за сохранение работоспособности SCM за счет имеющейся (заранее введенной) структурной избыточности. Второй способ характерен тем, что, устойчивость достигается с помощью гибкого перераспределения выполняемых A-SCM целей, задач и функций между работоспособными (частично работоспособными) компонентами (структурно-функциональная реконфигурация).

Данные технологии предполагают развитие таких подходов к построению SCM, которые учитывают ее структурную и функциональную распределенность и позволяют наиболее полно использовать реальные и виртуальные ресурсы для сохранения и/или восстановления возможности выполнения возложенных на систему функций при осуществлении неблагоприятных воздействий на ее элементы.

## **2. Модель планирования структурно-функциональной реконфигурации динамической цепи поставок**

Представленное на рис. 1 обобщенное описание реализации адаптивных цепей поставок на практике [1-4] характерно для многих отраслей. Основная идея здесь состоит в следующем: часть операций в цепи поставок является стабильной, а другая часть формируется на основе выбора из нескольких альтернатив, что позволяет: гибко реагировать на индивидуальные требования клиентов к продукции; быстро запускать новые продукты на рынок; продолжать выполнение работ в цепи поставок даже в случае технологических или информационных сбоев и отклонений; сглаживать негативные последствия колебаний спроса.

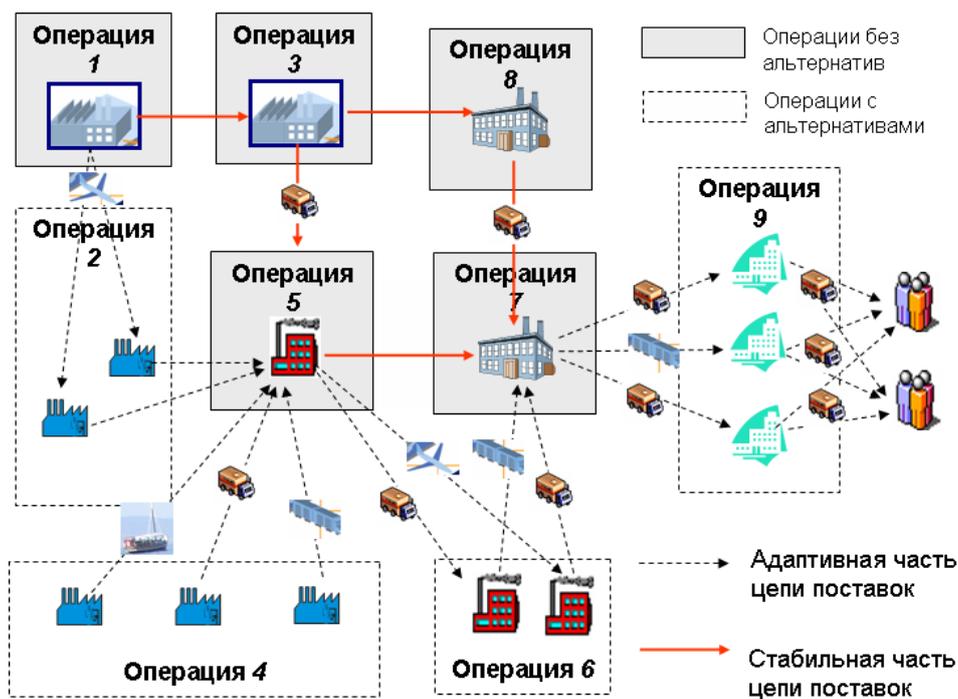


Рис. 1. Обобщенное описание реализации адаптивных цепей поставок на практике.

Дистрибуция является существенным звеном общей цепи поставок компании, охватывающей потоки готовой продукции от производственных площадок или складов поставщиков до конечных потребителей. Дистрибуция – это на самом деле ключевой фактор в получении прибыли, поскольку именно на этом этапе формируется компромисс между логистическими затратами и уровнем обслуживания потребителей.

Обобщенный пример дистрибуционной сети (ДС) SCM (динамической цепи поставок) с конкретными числовыми характеристиками приведен на рис. 2. Из анализа данного рисунка следует, что поставка товаров в рассматриваемой сети осуществляется через узлы 1 и 6.

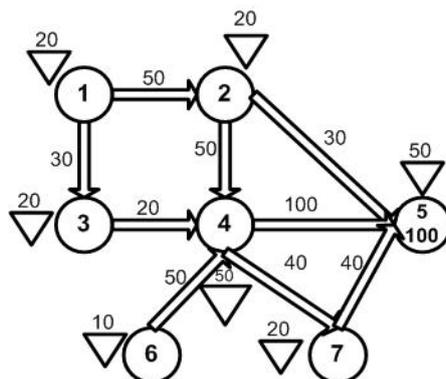


Рис. 2. Дистрибуционная сеть SCM.

Затем товары проходят обработку в центральном узле распределения 4. Товары из узла 1 проходят предварительную обработку в терминалах 2 и 3. Из центра 4 товар перемещается в региональный центр распределения 5, возможности которого ограничены доведением товара до потребителя в каждый период времени (скажем, месяц) 100 единицами. Для компенсации возможных проблем с каналом поставок из 4

узла в 5, в ДС введен терминал аутсорсинга 7 в качестве альтернативного пути доставки товара в центр распределения 5. Кроме того, возможно переместить небольшие количества (максимально 30 единиц за период) товара непосредственно от терминала 2 до центра 5. Объемы транспортировки товара ограничены в каждый рассматриваемый период снабжения величиной на дугах ДС (рис. 2). Узлы ДС имеют ограниченные складские помещения, представленные треугольниками на рис. 2. Поставщики обеспечивают определенные количества заказа товара узлам 1 и 6 в каждый периода времени. Кроме того, предполагается, что для заданных периодов времени на интервале планирования известны возможные сценарии структурной динамики ДС (например, оптимистический и пессимистический сценарии) [6].

При этом будем предполагать, что:

- возможности складских помещений и транспортных каналов могут меняться в каждом периоде времени;
- возможности областного центра распределения могут меняться в каждом периоде,
- любой узел или дуга в ДС могут быть временно недоступны;
- товары, хранящиеся на складах в предыдущие периоды, могут быть использованы в последующих периодах времени;
- затраты на закупку товаров постоянны;
- не обработанный и не сохраненный товар отправляется назад на склад, находящийся не в основной ДС, с учетом дополнительных расходов;
- постоянные и переменные расходы на поставку, транспортировку, обработку, возврат не востребованной продукции, складирование являются линейными функциями от количества товара.

С учетом приведенных предположений на содержательном уровне сформулируем две исследуемые в данном докладе задачи планирования. Первая задача состоит в нахождении плана распределения совокупного потока продукции на динамически изменяющейся ДС с заранее заданными периодами постоянства ее структуры с целью максимизации объема проданной потребителю продукции и минимизации постоянных и переменных затрат на ее поставку, транспортировку, возврат, хранение на складах. Вторая задача заключается в анализе и синтезе структуры ДС, для которой возможно обеспечить требуемый уровень робастности планов при деструктивных воздействиях по элементам ДС.

Далее будем предполагать, что деструктивные воздействия на элементы ДС, приводящие к ее структурной динамике, обусловлены отказами в выполнении различных технологических операций получения, складирования, транспортировки и доставки до потребителя продукции на некотором временном интервале в узлах ДС.

Рассмотрим несколько наиболее важных критичных технологических операций, выполняемых в узлах ДС:

- технологические операции узла 1 – складирование и доставка партий продукции в терминалы 2 и 3;
- технологические операции узла 4 – складирование и непосредственная доставка партий продукции из центрального узла в региональный центр распределения;
- технологические операции узла 7 – складирование и доставка партий продукции из центрального узла в региональный центр распределения через терминал аутсорсинга 7.

Проведенный анализ функционирования ДС SCM позволил выявить следующие основные особенности решаемой задачи: отказы выполнения тех или иных технологических операций или в целом узлов ДС возникают под действием различного рода причин (внутренних, внешних, объективных, субъективных и т.п.) и являются событиями возможными, но невероятными, либо вероятностью которых мала и не может

быть обоснованно оценена в процессе проектирования. Промежуточные структурные состояния ДС не изменяются непрерывно, а являются постоянными на некоторых временных интервалах.

В этих условиях в зависимости от складывающейся обстановки следует оперативно осуществлять перераспределение выполняемых технологических операций между узлами ДС.

С учетом заданных исходных данных, определяющих участки постоянства структурных состояний, мощности источников материальных потоков, интенсивности передачи и обработки продукции, объемов складских помещений на рис. 3, 4 изображена структурная динамика ДС с конкретными потоковыми характеристиками, соответствующая оптимистическому и пессимистическому сценариям изменения обстановки.

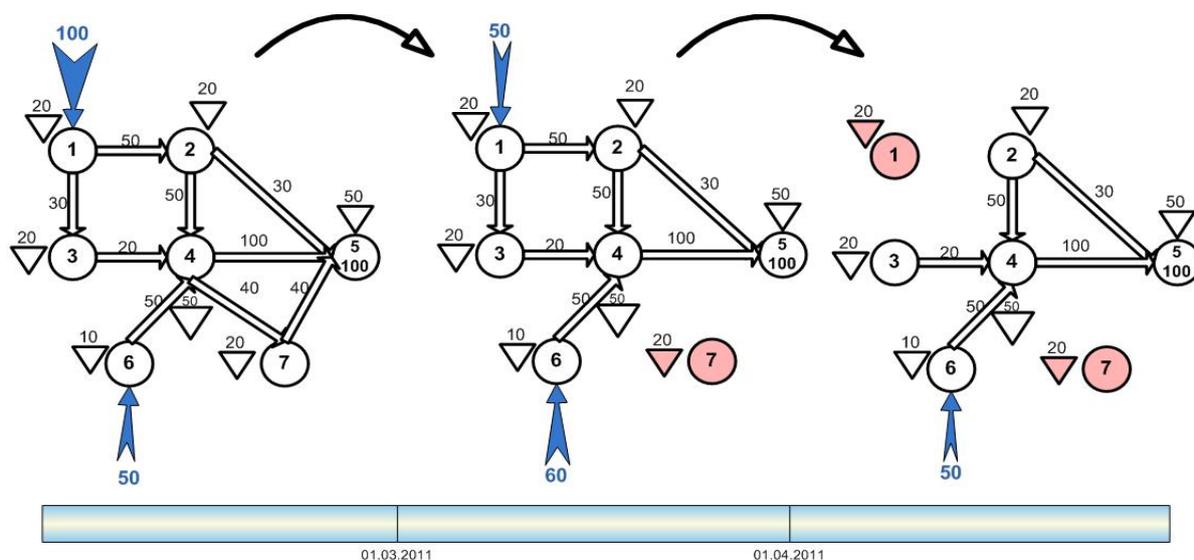


Рис. 3. Оптимистический сценарий реконфигурации ДС SCM.

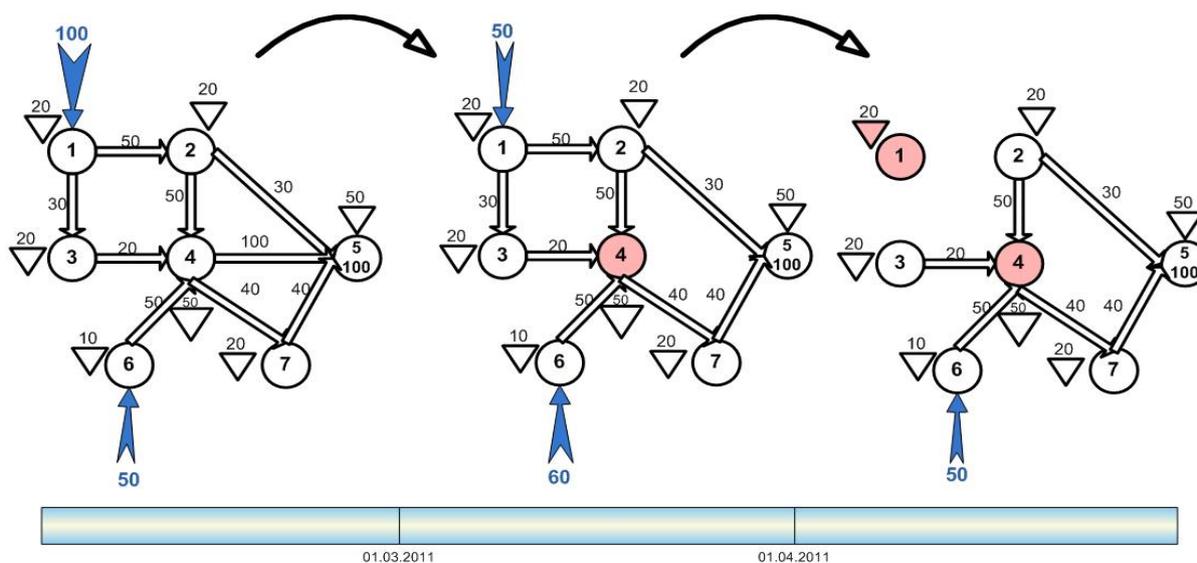


Рис. 4. Пессимистический сценарий реконфигурации ДС SCM.

На рис. 3, 4 приняты следующие условные обозначения. Рассматриваются три интервала постоянства структуры ДС SCM. На первом интервале постоянства ее структуры изображена ДС SCM, соответствующая начальному структурному состоянию данной системы. Задача состоит в максимизации объема доставляемой продукции до потребителя с учетом возможностей провайдера доставлять 300 единиц товара в течение планового периода (трех месяцев - по 100 единиц в каждый месяц), минимизируя расходы, состоящие из хранения, транспортировки, поставки, возврата невостребованной продукции и постоянных затрат.

С учетом принятых допущений планирование структурно-функциональной реконфигурации ДС при оптимистическом или пессимистическом сценариях развития обстановки осуществлялось с использованием многокритериальных моделей линейного программирования с двусторонними ограничениями (1)-(6), представленными в работах [5,6].

$$(1) \quad \left( \sum_{j \in N_{\chi ik}^+} x_{\chi ij\rho k} - \sum_{j \in N_{\chi ik}} x_{\chi ji\rho k} \right) + (y_{\chi i\rho k} - y_{\chi i\rho(k-1)}) + g_{\chi i\rho k} + z_{\chi i\rho k} = I_{\chi i\rho k}.$$

$$(2) \quad 0 \leq x_{\chi ij\rho k} \leq \omega_{\chi ij\rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}); \quad 0 \leq \sum_{\rho=1}^p y_{\chi i\rho k} \leq V_{\chi i}; \quad 0 \leq g_{\chi i\rho k} \leq \phi_{\chi i\rho k} \cdot (t_k - t_{k-1});$$

$$(3) \quad z_{\chi i\rho k} \geq 0, \quad (2) \quad J_{\chi 1} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi i\rho k};$$

$$(4) \quad J_{\chi 2} = \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k};$$

$$(5) \quad J_{\chi 3} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} y_{\chi i\rho k};$$

$$(6) \quad J_{\chi 4} = \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{j=1}^{n_{\chi}} c_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} h_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} y_{\chi i\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} r_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi i\rho k} + \sum_{i=1}^{n_{\chi}} f_i + \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{j=1}^{n_{\chi}} f_{ij}.$$

В обобщенном виде план  $\delta_{\chi}$  реконфигурации ДС для  $Sc_{\chi}$  сценария можно представить следующим вектором  $\delta_{\chi} = \|x_{\chi}, g_{\chi}, y_{\chi}, z_{\chi}\| = \left\| \|x_{\chi ij\rho k}\|, \|g_{\chi i\rho k}\|, \|y_{\chi i\rho k}\|, \|z_{\chi i\rho k}\| \right\|$ , где  $\|x_{\chi ij\rho k}\|$  – объемы транспортируемой продукции,  $\|g_{\chi i\rho k}\|$  – объемы доставленной до потребителя продукции,  $\|y_{\chi i\rho k}\|$  – объемы сохраненной продукции на складах,  $\|z_{\chi i\rho k}\|$  – объемы не востребованной продукции.

Выражения (1), (2) задают множество  $\Delta_{\chi\beta} = \{\delta_{\chi}\}$  допустимых планов структурно-функциональной реконфигурации ДС при  $Sc_{\chi}$  сценарии изменения обстановки. На множестве  $\Delta_{\chi\beta} = \{\delta_{\chi}\}$  осуществляется выбор рациональных планов реконфигурации  $\Delta_{\chi\beta}^* \subseteq \Delta_{\chi\beta}$  с учетом отношений предпочтений, заданных критериальными функциями (3)-(6) ( $J_{\chi 1}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min$ ,  $J_{\chi 2}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max$ ,  $J_{\chi 3}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min$ ,  $J_{\chi 4}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min$ ).

Так как множество допустимых решений  $\Delta_{\chi\beta} = \{\delta_{\chi}\}$  является выпуклым многогранным множеством, а критериальные функции решаемой задачи структурно-функциональной реконфигурации являются линейными, то для нахождения планов структурно-функциональной реконфигурации из области Парето можно использовать скаляризацию заданного векторного показателя в виде аддитивной свертки Лагранжа и введении в модель следующей критериальной функции

$$J_{\text{оцк}}(\delta_{\chi}) = \alpha_3 \alpha_2 J_{\chi 2}(\delta_{\chi}) - \alpha_3 \alpha_1 J_{\chi 1}(\delta_{\chi}) - \alpha_4 J_{\chi 4}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max.$$

где  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ,  $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$  – коэффициенты важности показателей  $J_{\chi_1}, J_{\chi_2}$ ,  $\alpha_3 + \alpha_4 = 1$ ,  $\alpha_3, \alpha_4 \geq 0$  – коэффициенты важности между группой показателей  $\{J_{\chi_1}, J_{\chi_2}\}$  и показателем  $J_{\chi_4}$ , устанавливаемые ЛПР в конкретной обстановке функционирования ДС.

Таким образом, задача структурно-функциональной реконфигурации ДС при  $Sc_\chi$  сценарии изменения обстановки окончательно имеет вид:

$$(7) \quad \alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_\rho \sum_{i=1}^{n_\chi} \sum_{k=1}^{L_\chi} g_{\chi i \rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_\rho \sum_{i=1}^{n_\chi} \sum_{k=1}^{L_\chi} z_{\chi i \rho k} - \alpha_4 v_\chi \rightarrow \max ,$$

$$(8) \quad \left( \sum_{j \in N_{\chi i}^+} x_{\chi ij \rho k} - \sum_{j \in N_{\chi i}^-} x_{\chi ji \rho k} \right) + (y_{\chi i \rho k} - y_{\chi i \rho (k-1)}) + g_{\chi i \rho k} + z_{\chi i \rho k} = I_{\chi i \rho k} ,$$

$$i \in N_\chi, \rho \in P, k = 1, \dots, L_\chi$$

$$(9) \quad v_\chi - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_\chi} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_\chi} x_{\chi ij \rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_\chi} g_{\chi i \rho k} - v_{\chi i} = R_{\chi 0i}, \quad i \in N_\chi ,$$

$$(10) \quad \sum_{\rho=1}^p y_{\chi i \rho k} + \eta_{\chi ik} = V_{\chi i}, \quad i \in N_\chi, k = 1, \dots, L_\chi ,$$

$$(11) \quad 0 \leq x_{\chi ij \rho k} \leq \omega_{\chi ij \rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}), \quad 0 \leq g_{\chi i \rho k} \leq \phi_{\chi i \rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}),$$

$$i \in N_\chi, \rho \in P, k = 1, \dots, L_\chi ,$$

$$(12) \quad y_{\chi i \rho k} \geq 0, \quad z_{\chi i \rho k} \geq 0, \quad v_{\chi i} \geq 0, \quad \eta_{\chi ik} \geq 0,$$

$$v_\chi \geq 0, \quad i \in N_\chi, \rho \in P, k = 1, \dots, L_\chi .$$

### 3. Модель параметрического синтеза облика динамической цепи поставок

В результате решения задачи (7)-(12) структурно-функциональной реконфигурации ДС при  $Sc_\chi$  сценарии изменения обстановки определяется оптимальное решение  $\delta_{\chi^*}$  (в частности, оптимальное распределение потоков  $\delta_{+*}$ ,  $\delta_{-*}$  для оптимистического и пессимистического сценариев).

С практической точки зрения весьма актуальной является задача параметрического синтеза облика ДС с целью обоснования параметров и характеристик узлов ДС и связей между ними, обеспечивающих эффективное ее функционирование при различных деструктивных воздействиях в рамках заданных оптимистических и пессимистических сценариев изменения обстановки.

Таковыми параметрами, характеризующими особенности транспортировки, хранения и доставки продукции различного типа, могут быть:  $Y_i$  – объем складских помещений для каждого  $A_i$  узла ДС;  $\varpi_{ij\rho}$  – интенсивность транспортировки продукции  $\rho$  типа между узлами ДС;  $\varphi_{i\rho}$  – интенсивность доставки продукции  $\rho$  типа до потребителя из каждого  $A_i$  узла ДС.

При этом помимо расходов на транспортировку и хранение  $r_{ij\rho}$  продукции  $\rho$  типа из  $A_i$  узла в  $A_j$  узел, доставку до потребителя  $\pi_{i\rho}$  продукции  $\rho$  типа из  $A_i$  узла, необходимы постоянные расходы на интервале  $T = (t_0, t_f]$  планирования структурно-

функциональной реконфигурации ДС для поддержания требуемых объемов и интенсивностей  $Y_i$ ,  $\varpi_{ij\rho}$ ,  $\varphi_{i\rho}$  синтезируемого облика ДС. Обозначим постоянные расходы на поддержание единицы объема склада, передачи и доставки продукции соответственно  $\Lambda_i$ ,  $R_{ij\rho}$ ,  $\Pi_{i\rho}$ .

Следует отметить, что в процессе параметрического синтеза облика ДС требуется, с одной стороны, минимизировать постоянные расходы на поддержание функционирования ДС на интервале планирования  $T = (t_0, t_f]$ , с другой стороны, достичь при формировании планов структурно-функциональной реконфигурации ДС на оптимистической и пессимистической траекториях ее структурной динамики наилучшего целевого эффекта. В этой связи целесообразно максимизировать нижнюю грань интегрального показателя качества планов структурно-функциональной реконфигурации (7) для оптимистического и пессимистического сценариев изменения обстановки

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} z_{+i\rho k} - \alpha_4 v_+ \geq \zeta,$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} z_{-i\rho k} - \alpha_4 v_- \geq \zeta.$$

Кроме того, переменные

$$\delta_+ = \left\| x_{+ij\rho 1} x_{+ij\rho 2} \dots x_{+ij\rho L_+} \left| g_{+i\rho 1} g_{+i\rho 2} \dots g_{+i\rho L_+} \right| y_{+i\rho 1} y_{+i\rho 2} \dots y_{+i\rho L_+} \left| z_{+i\rho 1} z_{+i\rho 2} \dots z_{+i\rho L_+} \right| v_+ \left| \eta_{+i1} \eta_{+i2} \dots \eta_{+iL_+} \right\|^T$$

и

$$\delta_- = \left\| x_{-ij\rho 1} x_{-ij\rho 2} \dots x_{-ij\rho L_-} \left| g_{-i\rho 1} g_{-i\rho 2} \dots g_{-i\rho L_-} \right| y_{-i\rho 1} y_{-i\rho 2} \dots y_{-i\rho L_-} \left| z_{-i\rho 1} z_{-i\rho 2} \dots z_{-i\rho L_-} \right| v_- \left| \eta_{-i1} \eta_{-i2} \dots \eta_{-iL_-} \right\|^T,$$

отражающие потоки продукции на оптимистической и пессимистической траекториях структурной динамики ДС должны удовлетворять ограничениям (8)-(12) с учетом следующих особенностей:

- предыстория функционирования узлов ДС (предыдущие затраты в узлах) одинакова для различных траекторий, т.е.  $R_{+0i} = R_{-0i} = R_{0i} \forall i = 1, \dots, n$ ,  $n = n_+ = n_-$ ;
- объем складских помещений узлов ДС оптимистической и пессимистической траекторий совпадают  $V_{+i} = V_{-i} = Y_i \forall i$ ;
- интенсивность транспортировки продукции и интенсивность доставки продукции до потребителей на интервале планирования структурно-функциональной реконфигурации одинакова для оптимистической и пессимистической траекторий  $\omega_{+ij\rho k} = \omega_{-ij\rho k} = \varpi_{ij\rho}$ ,  $\phi_{+i\rho k} = \phi_{-i\rho k} = \varphi_{i\rho} \forall i, j, \rho, k$ ;
- технические возможности хранения, транспортировки и доставки продукции ДС ограничены заданными величинами  $Y_i \leq Y_i^{c\ddot{a}d}$ ,  $\varpi_{ij\rho} \leq \varpi_{ij\rho}^{c\ddot{a}d}$ ,  $\varphi_{i\rho} \leq \varphi_{i\rho}^{c\ddot{a}d} \forall i, j, \rho$ .

Учитывая вышесказанное, задачу параметрического синтеза облика ДС можно представить следующим образом:

$$(13) \quad \alpha_5 \zeta - \alpha_6 \left( \sum_{i=1}^n \Lambda_i Y_i + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \Pi_{i\rho} \varphi_{i\rho} (t_f - t_0) + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij\rho} \varpi_{ij\rho} (t_f - t_0) \right) \rightarrow \max,$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} z_{+i\rho k} - \alpha_4 v_+ \geq \zeta,$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} z_{-i\rho k} - \alpha_4 v_- \geq \zeta,$$

$$\begin{aligned}
& \left( \sum_{j \in N_{+i}^+} x_{+ij\rho k} - \sum_{j \in N_{+i}^-} x_{+ji\rho k} \right) + (y_{+i\rho k} - y_{+i\rho(k-1)}) + g_{+i\rho k} + z_{+i\rho k} = I_{+i\rho k}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \\
& \left( \sum_{j \in N_{-i}^+} x_{-ij\rho k} - \sum_{j \in N_{-i}^-} x_{-ji\rho k} \right) + (y_{-i\rho k} - y_{-i\rho(k-1)}) + g_{-i\rho k} + z_{-i\rho k} = I_{-i\rho k}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \\
& v_+ - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^n r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_+} x_{+ij\rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+i\rho k} - v_{+i} = R_{0i}, i \in N, \\
& v_- - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^n r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_-} x_{-ij\rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-i\rho k} - v_{-i} = R_{0i}, i \in N, \\
& \sum_{\rho=1}^p y_{+i\rho k} + \eta_{+ik} = Y_i, i \in N, k = 1, \dots, L_+, \\
& \sum_{\rho=1}^p y_{-i\rho k} + \eta_{-ik} = Y_i, i \in N, k = 1, \dots, L_-, \\
& 0 \leq x_{+ij\rho k} \leq \varpi_{ij\rho} \cdot (t_k^+ - t_{k-1}^+), 0 \leq g_{+i\rho k} \leq \varphi_{i\rho k} \cdot (t_k^+ - t_{k-1}^+), i, j \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \\
& 0 \leq x_{-ij\rho k} \leq \varpi_{ij\rho} \cdot (t_k^- - t_{k-1}^-), 0 \leq g_{-i\rho k} \leq \varphi_{i\rho k} \cdot (t_k^- - t_{k-1}^-), i, j \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \\
& y_{+i\rho k} \geq 0, z_{+i\rho k} \geq 0, v_{+i} \geq 0, \eta_{+ik} \geq 0, v_+ \geq 0, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \\
& y_{-i\rho k} \geq 0, z_{-i\rho k} \geq 0, v_{-i} \geq 0, \eta_{-ik} \geq 0, v_- \geq 0, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \\
& 0 \leq Y_i \leq Y_i^{\text{зад}}, 0 \leq \varpi_{ij\rho} \leq \varpi_{ij\rho}^{\text{зад}}, 0 \leq \varphi_{i\rho k} \leq \varphi_{i\rho k}^{\text{зад}} \quad i, j \in N, \rho \in P
\end{aligned}$$

В целевой функции (13) коэффициенты важности  $\alpha_5, \alpha_6 \geq 0$  ( $\alpha_5 + \alpha_6 = 1$ ) между показателем, отражающим эффективность планов структурно-функциональной реконфигурации ДС, и показателем постоянных расходов на поддержание функционирования ДС на интервале планирования  $T = (t_0, t_f]$ , назначаются ЛПП с учетом конкретной обстановки применения SCM.

## 4. Заключение

В докладе предложены, во-первых, модель многокритериального планирования распределения совокупного потока продукции на динамически изменяющейся дистрибуционной цепи поставок с заранее заданными периодами постоянства ее структуры с целью максимизации объема проданной потребителю продукции и минимизации постоянных и переменных затрат на ее поставку, транспортировку, возврат, хранение на складах, и, во-вторых, модель многокритериального параметрического синтеза структуры указанной цепи поставок, для которой возможно обеспечить требуемый уровень робастности планов при деструктивных воздействиях на ее элементы.

Основные достоинства предложенного комплекса моделей планирования и параметрического синтеза ДС состоят в том, что они позволяют конструктивно описывать те факторы (например, объемы невостребованной продукции, ограничения, связанные с расходами на поддержание единиц объема складов, передачи и доставки продукции и т.п.), которые при динамическом моделировании приводят к соответствующим фазовым ограничениям, трудно учитываемым в условиях большой размерности решаемых задач распределения ресурсов ДС. Кроме того, на основе разработанных моделей формируются исходные данные, перебор которых на динамических моделях был бы не возможен (в этом случае, по сути, определяется агрегированный вариант технологии приема, хранения и обработки данных). И,

наконец, с помощью предложенных моделей удалось в первом приближении учесть факторы распределенности и структурной динамики рассматриваемой ДС, количественно оценить общий запланированный объем принятой, переданной, обработанной или невостребованной продукции.

Исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-07-13119-офи-м-РЖД, 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект №2.11), проекта ESTLATRUS 2.1/ELRI-184/2011/14, проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform»

## Список литературы

1. Корпоративная логистика в вопросах и ответах / Под общей редакцией В.И. Сергеева. М.: ИНФРА-М, 2013. 634 с.
2. Бауэрсокс Дональд Дж., Клосс Дейвид Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок / Пер. с англ. М: Олимп-Бизнес, 2008. 640 с.
3. Иванов Д.А. Управление цепями поставок. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 660 с.
4. Ivanov D., Sokolov B. Adaptive Supply Chain Management. London: Springer, 2010. 269 p.
5. Pavlov A.N., Ivanov D.A., Sokolov B.V. Model-supported and scenario-oriented analysis of optimal distribution plans in supply networks // Proceedings of the 26<sup>th</sup> European Conference on Modelling and Simulation ECMS '2012. Germany, Koblenz, 29 May - 1 June 2012. P. 588-594.
6. Ivanov D., Sokolov B., Pavlov A. Dual problem formulation and its application to optimal redesign of an integrated production-distribution network with structure dynamics and ripple effect considerations // International Journal of Production Research. 2013. Vol. 51, No. 18. P. 5386-5403.