

УДК 658.7:664.854:519.179.2

doi: 10.32620/reks.2019.1.09

И. В. ШОСТАК, Я. РАХИМИ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОД РАСШИРЕНИЯ МОДЕЛИ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТАВОК, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ В ФОРМЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ ВЛОЖЕННОЙ СЕТИ ПЕТРИ**

*Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой адекватных сетевых моделей процессов создания, развертывания и поддержки функционирования полной логистической цепи поставок сухофруктов (ЦПС) в Украину. Показано, что при создании и функционировании ЦПС, по сравнению с другими системами класса SCM, возникает ряд специфических проблем, обусловленных сложностью взаимодействия поставщиков сырья (свежих фруктов), предприятий-изготовителей конечной продукции (сушка, упаковка), складских терминалов, дистрибьюторов, 3PL и 4PL-провайдеров (розничных торговцев). Эти проблемы обусловлены тем, что взаимодействие участников бизнес процессов в ЦПС порождает множество материальных, финансовых и информационных потоков, а также потоков услуг от источников исходного сырья до конечного потребителя. Многообразие регионов мира, из которых осуществляются поставки в Украину сухофруктов, широкая номенклатура поставляемой продукции, урожайность, колебание курсов валют, сезонность являются причинами возникновения высокого уровня неопределенности в процессах формирования и принятия решений участниками ЦПС. Обоснована актуальность задачи, суть которой состоит в разработке темпорального компонента в составе сетевой модели ЦПС, адекватным образом отражающего во времени логистические процессы, имеющие место при функционировании цепи поставок. Рассмотрена модель полной ЦПС в форме двухуровневой вложенной сети Петри (ВСП). При этом сетевая модель функционирования ЦПС в форме ВСП включает объекты двух типов – центральное звено, отражающее деятельность фокусной компании по переработке исходного сырья (сухофруктов), и ряд подсетей, моделирующих деятельность поставщиков сырья и реализаторов готовой продукции. Указано, что для прогноза последствий текущей (или некоторой заданной) ситуации и для ответов на запросы о будущем состоянии элементов ЦПС может быть использована прогнозная модель, которая явно учитывает временные зависимости. При этом запросы могут быть как о времени появления некоторых событий, так и о факте наличия некоторых обстоятельств в определенный момент времени. Описан метод расширения временем сетевой модели ЦПС для соблюдения принципа 'just-in-time' при моделировании бизнес процессов, которые имеют место в цепи поставок.*

**Ключевые слова:** поставки сухофруктов; полная логистическая цепь поставок; фокусная компания; моделирование бизнес процессов; вложенная сеть Петри; темпоральные логики

**Введение**

Для анализа функционирования логистических систем, в частности, полных цепей поставок, в настоящее время имеется обширный инструментарий, который дает возможность адекватного представления в динамике любого из конкретных вариантов реализации цепи [1, 2]. Вместе с тем, актуальной задачей является совершенствование логистических методов управления, в том числе моделирования и анализа цепей поставок в системах SCM продуктов питания, поскольку в современных условиях экономика Украины ориентирована, преимущественно, на увеличение объема импорта и развитие розничной торговли. Типичным объектом рассматриваемого типа является цепь поставок сухофруктов в Украину (ЦПС) [3], которая представляет собой сложную социо-техничко-экономическую систему, состоящую из множества поставщиков сырья

(свежих фруктов), предприятий-изготовителей конечной продукции (сушка, упаковка), складских терминалов, дистрибьюторов, 3PL и 4PL-провайдеров (розничных торговцев), которые обладают определенными ресурсами. Взаимодействие участников бизнес процессов в ЦПС отражается множеством материальных, финансовых и информационных потоков, а также потоков услуг от источников исходного сырья до конечного потребителя. Многообразие регионов мира, из которых осуществляются поставки в Украину сухофруктов, широкая номенклатура поставляемой продукции, урожайность, колебание курсов валют, сезонность являются причинами возникновения высокого уровня неопределенности в процессах формирования и принятия решений участниками ЦПС [4, 5].

Характерной чертой современных логистических систем, в частности ЦПС, является сравнительно высокая динамика их функционирования,

которая проявляется в сравнительно быстром изменении данных и знаний об объектах логистической цепи, необходимых для принятия адекватных управленческих решений. Каждое такое изменение происходит во времени, будь то процесс сбора свежего сырья, выполнение заготовительных операций, упаковки, транспортировки готовой продукции и т.д. Для мониторинга и управления процессом функционирования ЦПС необходимо четко отслеживать и представлять во времени процессы и события, а также прогнозировать развитие процессов, которые существенно влияют на эффективность цепи [2].

Для представления временных зависимостей, имеющих место при функционировании ЦПС, возможно построение временных логик, в которых имеется различный набор исходных аксиом, и которые основаны на необходимых для описания предметной области свойствах времени. Анализ направлений в области инженерии знаний, позволил выделить ряд задач, для которых использование фактора времени является ключевым [5].

К таким задачам относятся:

1. Диагностика. Идентификация текущего состояния объекта управления на основе признаков, влияющих на принятие решения лицом, принимающим решение (ЛПР).

2. Мониторинг. Наблюдение за состоянием объекта управления в масштабе времени, близком к реальному, с оповещением ЛПР о возникновении критических ситуаций.

3. Помощь. Описание состояния объекта управления в некоторый наступивший момент времени, являющийся причиной текущего состояния объекта управления.

4. Прогнозирование. Определение состояния объекта управления в будущем, в заданный ЛПР момент времени.

5. Правила вариации. Построение множества правил, регламентирующих изменения в темпоральных закономерностях рассматриваемой предметной области.

При организации ЦПС важной задачей является прогнозирование состояния как сырья, процессов ее переработки и упаковки, так и качества готовой продукции [5]. Для описания взаимоотношений между причинами и их последствиями необходимо представить соответствующие временные зависимости в явном виде. Исходя из этого, следует выделить следующие составляющие знаний о предметной области:

– причинно-следственные зависимости о событиях и значениях параметров в рассматриваемой предметной области;

– временные зависимости, описывающие взаимное положение причин, их последствий и продолжительности процессов, происходящих при функционировании ЦПС, или свойств, которыми обладает каждый из элементов логистической цепи.

Для прогноза последствий текущей (или некоторой заданной) ситуации и для ответов на запросы о будущем состоянии элементов ЦПС может быть использована прогнозная модель, которая явно учитывает временные зависимости. При этом запросы могут быть как о времени появления некоторых событий, так и о факте наличия некоторых обстоятельств в определенный момент времени. Таким образом, актуальной является разработка темпорального компонента в составе сетевой модели ЦПС, то есть такого, который адекватным образом отражает во времени логистические процессы.

**Цель статьи** состоит в изложении метода отражения временных зависимостей между элементами полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину, путем дополнения сетевой модели ЦПС, представленной в форме двухуровневой вложенной сети Петри (ВСП). Такое расширение ВСП обеспечит повышение, эффективности бизнес процессов в цепи за счет соблюдения принципа 'just-in-time'.

## 1. Синтез сетевой модели ЦПС с использованием аппарата ВСП

В отличие от классической, сетевой модели управления, сетевая модель ЦПС имеет ряд особенностей [6]:

- основными элементами цепи поставок являются звенья и материальные потоки;
- цели подсетей в составе ЦПС различаются;
- в сетевой модели ЦПС всегда присутствует центральное звено и подсети;
- для сетевой модели ЦПС отсутствует понятие «критический путь»;
- поставки одной подсети рамках одной ЦПС относительно независимы от поставок другой подсети.

Сетевая модель ЦПС в форме ВСП представляет собой кортеж:

$$IPN = \langle N, C, W, G, \Omega, M_0 \rangle, \quad (1)$$

где  $N = (P, T, F)$  – конечная сеть с множеством позиций  $P$ , множеством переходов  $T$ ; отношением инцидентности  $F$ ;  $C : P \rightarrow \Omega$  – функция раскраски позиций, ставящая в соответствие каждой позиции

$p \in P$  ее цвет  $C(p)$ ;  $W$  – функция, которая приписывает дугам сети  $N$  выражения типа

$$((p, t), (t', p')) \in F : (\text{Type}(W(p, t)) = M(C(p))) \vee (\text{Type}(W(t', p')) = M(C(p'))); \quad (2)$$

где  $G : T \rightarrow L$  - функция, которая каждому переходу  $t \in T$  ставит в соответствие некоторые логические выражения, отражающие соответствующее событие;  $M_0$  – функция, которая каждой позиции  $p \in P$  ставит в соответствие следующее выражение:

$$\forall p \in P : (\text{Type}(M_0(p)) = M(C(p))). \quad (3)$$

Функция  $M_0$  определяет начальную разметку ВСП. Начальная разметка ВСП, включая определение цвета маркеров, отображает конкретную ситуацию в рамках функционирования ЦПС, обусловленную фактом наличия на складе предприятия готовой продукции.

Поскольку двухуровневые ВСП по своей природе имеют иерархическую структуру, с такими моделями производственных ситуаций в процессе

моделирования ЦПС могут быть однозначно сопоставлены онтологические структуры, на основе которых целесообразно построить базу знаний экспертной системы для решения задач, возникающих при управлении полной ЦПС.

Процесс создания, развертывания и поддержки функционирования ЦПС представляется в виде иерархической двухуровневой вложенной сети Петри (ВСП) [7, 8]:

$$IPN = \langle SN^{(1)}, EN_1^{(2)}, \dots, EN_m^{(2)} \rangle, \quad (4)$$

где  $SN^{(1)}$  – системная сеть, моделирующая логистические процессы в фокусной компании;  $EN_1^{(2)}, \dots, EN_n^{(2)}$  – множество элементарных сетей Петри, каждая из которых моделирует процессы сбора свежих фруктов, производства и упаковки готовой продукции на различных звеньях логистической цепи. На рисунке показано графическое представление ВСП для реализации ЦПС, а в таблицах 1 и 2 – интерпретация условий наступления событий и самих событий в сетевой модели.

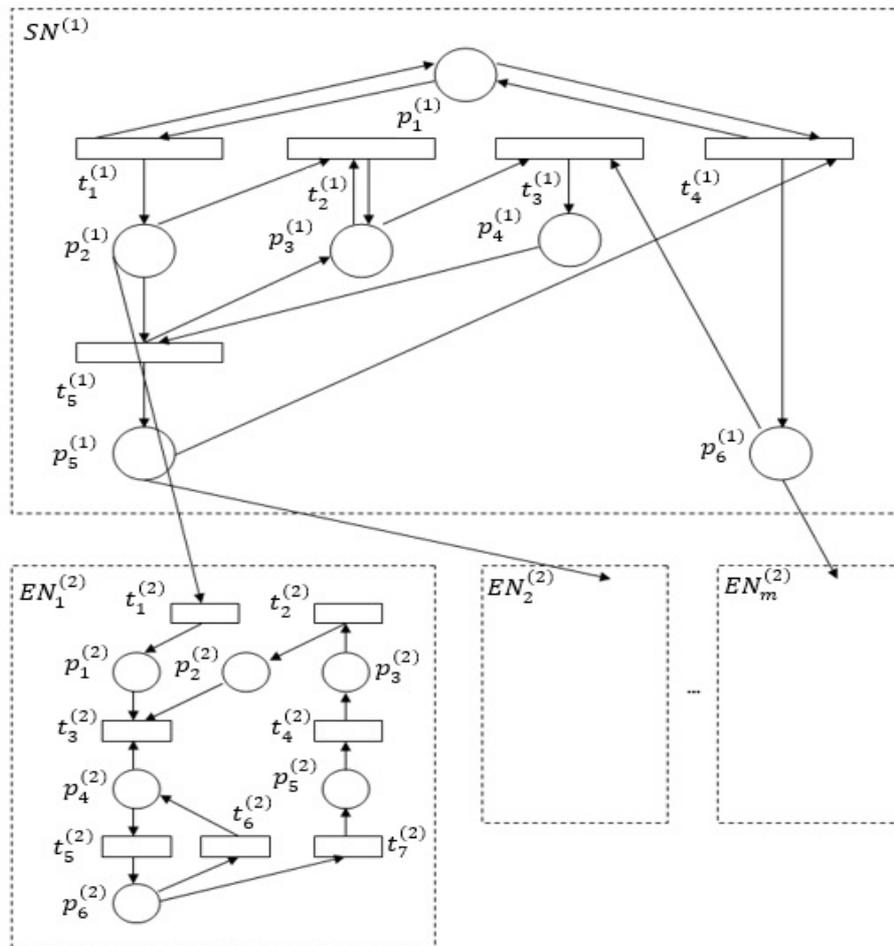


Рис. 1. Структура сетевой модели ЦПС в форме ВСП

Таблица 1

Интерпретация событий при функционировании ЦПС переходами ВСП

Условия	Содержание условий
$p_1^{(1)}$	Наличие у поставщиков производственной базы установлено
$p_2^{(1)}$	Наличие на складе поставщика достаточного количества данного вида продукции установлено
$p_3^{(1)}$	Отсутствие варианта замены поставщика установлено
$p_4^{(1)}$	Необходимый объем продукции на складе поставщика установлен
$p_5^{(1)}$	Уведомление о необходимости заказа определенного вида продукции отправлено
$p_6^{(1)}$	Заказ для $m$ -го вида продукции оформлен
$p_1^{(2)} - p_6^{(2)}$	Условия заключения договоров на поставки конкретных видов продукции

Таблица 2

Интерпретация условий в сетевой модели в форме ВСП, которые привели к наступлению событий при функционировании ЦПС

События	Суть событий
$t_1^{(1)}$	Прибытие партии продукции от внешнего поставщика на склад фокусной компании
$t_2^{(1)}$	Анализ причин срыва поставок продукции в прошлом
$t_3^{(1)}$	Определение необходимого объема продукции на складе фокусной компании
$t_4^{(1)}$	Заказ партии продукции у внешних поставщиков
$t_5^{(1)}$	Уведомление менеджменту фокусной компании об отсутствии на складе необходимого количества конкретного вида продукции
$t_1^{(2)} - t_7^{(2)}$	Перечень действий, предусмотренных таможенным законодательством при организации поставок импортной продукции

## 2. Дополнение сетевой модели ЦПС элементами темпоральной логики

Для построения модели явного представления времени о процессах функционирования ЦПС необходимо выполнить следующие этапы [9, 10]:

1. Выбрать базовые примитивы времени и задать базовые отношения между ними.
2. Ввести необходимые элементарные функции преобразования примитивов и отношений.
3. Определить свойства структуры времени с помощью аксиом, описывающих основные свойства времени и свойства базовых отношений.
4. Описать способ представления временных зависимостей  $\Phi^T$ .
5. Выбрать метод связывания логических утверждений со временем.
6. Синтезировать теорию временных утверждений.

Информация о текущем состоянии заданий, запланированных к выполнению, актуализируется в модели  $SN^{(1)}$  на основании данных, поступающих от моделей нижнего уровня  $EN_1^{(2)}, \dots, EN_n^{(2)}$ . Согласно регламенту функционирования ЦПС, выполняется проверка выполнения заданий с целью определения фактов отклонений и величин опозданий заданий.

Множество всех плановых заданий обозначим  $Z$ . При этом имеет место отображение  $ZP: Z \rightarrow P$ , задающее соответствие состояния производственных заданий позициям сети  $SN^{(1)}$ . Текущее состояние задания  $z_i \in Z$  имеет признак Статус, определяющий принадлежность  $z_i$  к множествам начавшихся  $\Phi^n$ , находящихся в процессе выполнения  $\Phi^w$  или завершенных заданий. Своевременность реализации заданий характеризуется признаком Своевременность, который определяет принадлежность задания  $z_i$  к  $\bar{W}$  или  $\tilde{W}$ , где  $\bar{W}$  - множество выданных или выполненных заданий без отклоне-

ния от графика поставок, а  $\tilde{W}$  - множество заданий, время выполнения или выдачи которых было задержано из-за влияния различного рода внешних или параметрических возмущений, причем  $\bar{W} \cap \tilde{W} = \emptyset$  и существует отображение, такое, что  $ZW : Z \rightarrow (\bar{W} \cup \tilde{W})$ . Задания разделяются на заготовительные  $Z^k$  (заготовка сырья, производство и упаковка) и транспортные  $Z^a$ ,  $Z = \{Z^k \cup Z^a\}$ , при этом  $Z^k \cap Z^a = \emptyset$ . Имеют место биективные отображения  $Z^k \rightarrow B$  и  $Z^a \rightarrow ((P \setminus B) \setminus R)$ .

Для активизации модели  $SN^{(1)}$  множество событий, являющееся следствием выполнения заданий в процессе функционирования ЦПС, отображается элементами множества  $E^a = \{E^{p\phi} \cup E^d\}$  всех событий, где  $E^{p\phi}$  - события фактического или планового начала/завершения выполнения задания, при этом  $E^{p\phi} \rightarrow E$ ,  $E^d$  - события проверки состояния задания в начале каждого цикла мониторинга. События из множества  $E^a$  изменяют признаки заданий в моменты времени из множества  $T = \{T^p \cup T^f\}$ ,  $T^p \cap T^f = \emptyset$ , где  $T^p$  - множество моментов времени проверок в начале каждого цикла мониторинга, которые имели место с начала запуска ЦПС,  $T^f$  - множество моментов времени проверок в начале каждого цикла мониторинга текущего состояния ЦПС.

Целью описанного ниже метода является выявление отклонений от графика при выполнении заданий в ходе функционирования ЦПС и формирование указаний по стабилизации текущего состояния ЦПС.

Первый этап метода (шаги 1-4) осуществляется параллельно, асинхронно и циклически во время каждого цикла мониторинга звеньев логистической цепи, это дает возможность в процессе поддержки принятия решений по реализации ЦПС учитывать текущее состояние отдельных ее звеньев.

Второй этап метода (шаги 5-8), в случае временных задержек, дает возможность сформировать решения по стабилизации функционирования ЦПС.

Начальная ситуация (запуск ЦПС) задается следующим образом:  $\forall z_i \in \bar{W} \wedge \forall z_i \in \Phi^n$ ,  $\exists Z^p : Z^k \rightarrow Z^a$ .

1. Отражение в системе управления ЦПС фактов возникновения событий. В случае возникновения событий  $e_j^\phi \in E^{p\phi}$  фактических изменений со-

стояния задания, где  $j \in \{\text{нач, оконч}\}$ , нач - начало выполнения задания, оконч - окончание выполнения задания:

- если  $e_{\text{нач}z_i}^\phi$  - происходит изменение состава множеств  $\Phi^n$  и  $\Phi^w$  путем:  $\Phi_k^n = \Phi_{k-1}^n - \phi_{z_i}^n \wedge \Phi_k^w = \Phi_{k-1}^w + \phi_{z_i}^n$ , где  $k$  - очередной цикл мониторинга текущего состояния ЦПС;

- если  $e_{\text{нач}z_i}^\phi$  - происходит изменение состава множеств  $\Phi^n$  и  $\Phi^w$  путем:  $\Phi_k^n = \Phi_{k-1}^n - \phi_{z_i}^n \wedge \Phi_k^w = \Phi_{k-1}^w + \phi_{z_i}^n$ , где  $k$  - очередной цикл мониторинга текущего состояния ЦПС;

- если  $e_{\text{оконч}z_i}^\phi$  - происходит изменение состава множеств  $\Phi^w$  и  $\Phi^r$  путем:  $\Phi_k^w = \Phi_{k-1}^w - \phi_{z_i}^w \wedge \Phi_k^r = \Phi_{k-1}^r + \phi_{z_i}^w$ , где  $k$  - очередной цикл мониторинга текущего состояния ЦПС;

- если для любого задания не возникает ни одного из этих событий - переход к шагу 2.

2. Отслеживание состояния процесса выполнения плановых заданий в ЦПС. В случае возникновения событий  $e_j^{pl} \in E^{p\phi}$  плановых изменений состояния задания, где  $j \in \{\text{нач, оконч}\}$ , нач - начало выполнения задания, оконч - окончание выполнения:

- если  $e_{\text{нач}z_i}^{pl}$  для  $\forall z_i | z_i \in \bar{W} \wedge z_i \in \Phi^n \wedge t_{\text{нач}z_i}^{pl} \in T^p \wedge t_{\text{нач}z_i}^\phi \in T^f$  - происходит изменение состава множеств  $\bar{W}$  и  $\tilde{W}$  путем:  $\bar{W}_k = \bar{W}_{k-1} - \omega_{z_i}^{\bar{W}} \wedge \tilde{W}_k = \tilde{W}_{k-1} + \omega_{z_i}^{\tilde{W}}$ ;

- если  $e_{\text{оконч}z_i}^{pl}$  для  $\forall z_i | z_i \in \bar{W} \wedge \forall z_i \in \Phi^w \wedge t_{\text{оконч}z_i}^{pl} \in T^p \wedge t_{\text{оконч}z_i}^\phi \in T^f$  - происходит изменение состава множеств  $\bar{W}$  и  $\tilde{W}$  путем:  $\bar{W}_k = \bar{W}_{k-1} - \omega_{z_i}^{\bar{W}} \wedge \tilde{W}_k = \tilde{W}_{k-1} + \omega_{z_i}^{\tilde{W}}$ ;

- если  $e_{\text{оконч}z_i}^{pl}$  для  $\forall z_i | z_i \in \tilde{W} \wedge z_i \in \Phi^r \wedge (t_{\text{оконч}z_i}^\phi \leq t_{\text{оконч}z_i}^{pl})$  - происходит изменение состава множеств  $\bar{W}$  и  $\tilde{W}$  путем:  $\tilde{W}_k = \tilde{W}_{k-1} - \omega_{z_i}^{\tilde{W}} \wedge \bar{W}_k = \bar{W}_{k-1} + \omega_{z_i}^{\bar{W}}$ ;

– если для любого задания не возникает ни одно из этих событий – переход к шагу 3.

3. Контроль своевременности выполнения плановых заданий в ЦПС. В случае инициирования событий  $e_{K_j}^{ch} \in E^d$  проверки выполнения задания, где  $K$  – множество индексов,  $K = \{\phi\phi, \omega\omega, bb\}$ ,  $\phi\phi$  – проверка состояния задания,  $\omega\omega$  – проверка своевременности выполнения задания,  $bb$  – проверка запаздывания с выдачей задания:

– если  $e_{\phi\phi, z_i}^{ch}$  для  $\forall z_i | z_i \in \Phi^w \wedge t_{оконч, z_i}^{pl} \in T^f \wedge t_{оконч, z_i}^{\phi} \in T^f \wedge t_{проверки, z_i}$  – вычисления текущей

длительности выполнения задания  $dur_{z_i}^w = t_{проверки, z_i} - t_{нач, z_i}^{\phi}$  ;

– если  $e_{\omega\omega, z_i}^{ch}$  для  $\forall z_i | z_i \in \Phi^w \wedge z_i \in \tilde{W} \wedge t_{проверки, z_i}$  – вычисление текущей длительности запаздывания задания

$dur_{z_i}^r = t_{проверки, z_i} - t_{оконч, z_i}^{pl}$  ;

– если  $e_{bb, z_i}^{ch}$  для  $\forall z_i | z_i \in \Phi^r \wedge z_i \in \tilde{W} \wedge (t_{оконч, z_i}^{pl} \leq t_{оконч, z_i}^{\phi})$  – происходит изменение

состава множеств  $\bar{W}$  и  $\tilde{W}$  путем:  $\tilde{W}_k = \tilde{W}_{k-1} - \omega_{z_i}^{\tilde{W}} \wedge \bar{W}_k = \bar{W}_{k-1} + \omega_{z_i}^{\tilde{W}}$ .

– если для любого задания не имеет место ни одно из этих событий - переход к шагу 4.

4. Контроль запаздывания выполнения плановых заданий в ЦПС. Для каждого задания  $z_i \in Z^a$ , которое должно быть выполнено при функционировании ЦПС, осуществляется проверка запаздывания выполнения  $dur_{z_i}^r$  заданий, входящих в него, определение величины запаздывания  $dur_{max} = \max_i(dur_{z_i}^r)$  и установление факта, что  $dur_{max}$  и будет запаздыванием в рамках всей ЦПС.

5. Определение потребителя для задания  $z_i \in Z$  путем анализа маршрута доставки и передача информации об отклонении в ходе функционирования ЦПС лицу, принимающему решения.

6. Определение наличия критической ситуации путем сравнения длительности запаздывания  $dur_{max}$  задания  $z_i \in Z$  с критическими значениями запаздывания заданий.

7. Активация правил решающей позиции в сетевой модели  $SN^{(1)}$  и формирование решений по стабилизации состояния ЦПС.

8. Выполнение процедур завершится при условиях, если текущее состояние всех заданий будет иметь статус „Выполнено”, то есть функционирование ЦПС достигнет всех поставленных целей.

### 3. Эскиз темпорального компонента в составе сетевой модели ЦПС

Для реализации компонента представления временных зависимостей в составе сетевой модели формирования решений по управлению ЦПС, были разработаны правила, по которым реализуются первые четыре этапа метода, то есть выявление фактов отставания выполнения заданий от графика. В зависимости от наступившего события (инициированного ЛПР или автоматически системой управления ЦПС) активизируется соответствующее правило.

События, формируемые в ЦПС и активируемые сетевой моделью  $SN^{(1)}$ :

– ПнМІ(Начало\_выполнения(задание), t) – по факту выдачи задания;

– ПнМІ(Конец\_выполнения(задание), t) – по факту завершения задания;

События, формируемые и активируемые в ЦПС:

– ПнМІ(Плановое\_начало\_выполнения(задание), t) – по графику;

– ПнМІ(Плановый\_конец\_выполнения(задание), t) – по графику;

– ПнМІ(Проверка\_опоздания(z), t) – ежедневно;

– ПнМІ(Проверка\_статуса(z), t) – ежедневно.

Ниже описан фрагмент временной модели функционирования ЦПС в виде набора из восьми правил, представленных в форме темпорально-логических высказываний.

1. В момент наступления события «начало\_выполнения (задания)» параметр задания *Status* изменяется на «в\_работе»

$\forall z_i \in \text{задание}, \exists i, j \in \text{Interval}, \exists t \in \text{Time}$   
 $\text{ПнМІ(Начало\_выполнения}(z_i), t) \wedge \text{ВнІ(Статус}(z_i, \text{не\_выдано}), i) \wedge \text{end}(i)=t \Rightarrow \text{ВнІ(Статус}(z_i, \text{в\_работе}), j) \wedge \text{meets}(i, j).$

2. В момент наступления события «конец\_выполнения(задания)» параметр задания *Status* изменяется на «завершено»

$\forall z_i \in \text{задание}, \exists i, j \in \text{Interval}, \exists t \in \text{Time}$

ПнМІ(Конец\_выполнения( $z_i$ ),  $t$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Статус( $z_i$ , в\_работе),  $i$ )  $\wedge$  end( $i$ )= $t$   $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  ВнІ(Статус( $z_i$ , сдано),  $j$ )  $\wedge$  meets( $i$ ,  $j$ ).

3. В момент наступления события «плановое начало выполнения(задания)» и параметр Статус «не\_выдано», параметр задания Своевременность изменяется на «запаздывает»

$\forall z_i \in$  задание,  $\exists i, j, k \in$  Interval,  $\exists t \in$  Time  
 ПнМІ(Плановое\_начало\_выполнения( $z_i$ ),  $t$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Статус( $z_i$ , не\_выдано),  $i$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Своевременность ( $z_i$ , своевременно),  $j$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  end( $j$ )= $t$   $\Rightarrow$  ВнІ(Своевременность ( $z_i$ , запаздывает),  $k$ )  $\wedge$  meets( $j$ ,  $k$ ).

4. В момент наступления события «плановый\_конец\_выполнения(задания)» параметр задания Своевременность изменяется на «зааздывает»

$\forall z_i \in$  задание,  $\exists i, j, k \in$  Interval,  $\exists t \in$  Time  
 ПнМІ(Плановый\_конец\_выполнения( $z_i$ ),  $t$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Статус( $z_i$ , в\_работе),  $i$ )  $\wedge$   
 ВнІ(Своевременность ( $z_i$ , своевременно),  $j$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  end( $j$ )= $t$   $\Rightarrow$  ВнІ(Своевременность ( $z_i$ , запаздывает),  $k$ )  $\wedge$  meets ( $j$ ,  $k$ ).

5. В момент наступления события «плановый\_конец\_выполнения(задания)», параметр задания Статус «завершено» и ранее определенном опоздании, параметр задания Своевременность изменяется на «своевременно»

$\forall z_i \in$  задание,  $\exists i, j, k \in$  Interval,  $\exists t \in$  Time  
 ПнМІ(Плановый\_конец\_выполнения( $z_i$ ),  $t$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Статус( $z_i$ , завершено),  $i$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Своевременность ( $z_i$ , запаздывает),  $j$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  (begin( $i$ )= $t$   $\vee$  begin( $i$ )< $t$ )  $\wedge$  end( $j$ )= $t$   $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  ВнІ(Своевременность ( $z_i$ , своевременно),  $k$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  meets ( $j$ ,  $k$ ).

6. Формирование события «просрочена выдача»

$\forall z \in$  задание,  $\exists i, j, k \in$  Interval  
 ВнІ(Своевременность ( $z$ , запаздывает),  $i$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Статус( $z$ , не\_выдано),  $j$ )  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  ПнМІ(Просрочена\_выдача( $z$ ),  $k$ )  $\wedge$  equal( $i$ ,  $k$ ).

7. Подсчет длительности задержки завершения задания

$\forall z \in$  задание,  $\exists i, j, k \in$  Interval,  $\exists t \in$  Time  
 ПнМІ(Проверка\_запаздывания( $z$ ),  $t$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Своевременность ( $z$ , запаздывает),  $i$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Статус( $z$ , в\_работе),  $j$ )  $\wedge$  t=end( $i$ )  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  ВнІ(Своевременность ( $z$ , запаздывает),  $k$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  Запаздывание( $z$ ,  $d$ )  $\wedge$  d=duration( $k$ )  $\wedge$  start( $k$ ,  $i$ ).

8. Проверка статуса задания

$\forall z \in$  задание,  $\exists i, j, k \in$  Interval,  $\exists t \in$  Time  
 ПнМІ(Проверка\_статуса( $z$ ),  $t$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ВнІ(Статус( $z$ , в\_работе),  $i$ )  $\wedge$  t=end( $i$ )  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  start( $j$ ,  $i$ )  $\wedge$  ВнІ(Статус( $z$ ),  $j$ ).

Правило, формирующее факты о предполагаемом запаздывании задания

$\exists P1, P2 \in z$ ,  $\exists dur_{max} \in$  Duration  
 Содержит( $P1$ ,  $P2$ )  $\wedge$  Запаздывание( $P2$ ,  $dur_{max}$ )  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  Предполагаемое\_запаздывание( $P1$ ,  $dur_{max}$ ).

Правило, формирующее факты о критическом запаздывании задания

$\forall P \in z$ ,  $\exists d \in$  Duration  
 Запаздывание( $P$ ,  $d$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  Критическое\_запаздывание( $P$ ,  $l$ )  $\wedge$   
 $\wedge$  ( $d=1$   $\vee$   $d<1$ )  $\Rightarrow$  Критическая\_ситуация( $P$ ,  $d$ ).

## Выводы

Анализ особенностей реализации двухуровневой вложенной сети Петри в качестве модели управления полной логистической цепью поставок сухофруктов в Украину дал возможность обосновать необходимость дополнения такой модели специальным компонентом для моделирования временных зависимостей между бизнес процессами в рамках ЦПС. Разработан метод выявления отклонений от графика при функционировании ЦПС и оценки их критичности для соблюдения принципа 'just-in-time'. Описанные в статье результаты могут стать теоретическим базисом для организации широкого класса логистических систем, с учетом специфики их функционирования.

## Литература

1. Сток, Дж. Р. Стратегическое управление логистикой [Текст] / Джеймс Р. Сток, Дуглас М. Ламберт. – М. : ИНФРА-М, 2005. – 831 с.
2. Бауэрсокс, Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок [Текст] / Д. Дж. Бауэрсокс, Д. Дж. Клосс. – 2-е изд. – М. : ЗАО «Олимп-Бизнес», 2008. – 640 с.
3. Основы логистики и управление цепями поставок [Текст] / Б. А. Аникин и др. – М. : Проспект, 2012. – 339 с.
4. Сергеева, В. И. Инновационные технологии в логистике и управлении цепями поставок [Текст] / В. И. Сергеева. – М., 2015. – 156 с.
5. Рахими, Я. Знаниеориентированный подход к организации поддержки принятия решений по формированию полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину [Текст] / Я. Рахими // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – Вип. 6 (46). – С. 197-201.
6. Шостак, И. В. Моделирование полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину с применением вложенных сетей Петри [Текст] / И. В. Шостак, Я. Рахими // Сучасні інформаційні системи. – 2018. – Т. 2, № 4. – С. 45-48.

7. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем [Текст] / Дж. Питерсон. – Москва : Мир, 1984. – 264 с.

8. Ломазова, И. А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой [Текст] / И. А. Ломазова. – М. : Научный мир, 2004. – 208 с.

9. Andr'eka, H. Modal logics and bounded fragments of predicate logic [Text] / H. Andr'eka, J. van Benthem, and I. N'emeti // *Journal of Philosophical Logic*. – 1998. – No. 27. – P. 217–274.

10. Pnueli, A. The temporal logic of programs [Text] / A. Pnueli // *Proceedings of the 18th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 1977*. – P. 46-67.

## References

1. Stok, Dzh. R., Lambert Douglas M. *Strategicheskoe upravleniye logistykoj* [Strategic Logistics Management]. Moscow, Y`NFRA-M Publ., 2005. 831 p.

2. Bauэrsoks, D. Dzh., Kloss, D. Dzh. *Logistyka: yntegryrovannaya cep` postavok* [Logistics: integrated supply chain]. Moscow, ЗАО «Olymp-Byznes» Publ., 2008. 640 p.

3. Anikin, B. A. *Osnovyi logistiki i upravlenie tsepyami postavok* [Basics of Logistics and Supply Chain Management]. Moscow, Prospekt Publ., 2012. 339 p.

4. Sergeeva, V. I. *Innovatsionnyie tehnologii v logistike i upravlenii tsepyami postavok* [Innovative

technologies in logistics and supply chain management]. Moscow, 2015. 156 p.

5. Raxymy, Yashar. *Znanyeoryentyrovannyi podkhod k organizatsiyu podderzhky prynyatyia resheniy po formirovaniyu polnoj logysticheskoy cepy postavok sukhofruktov v Ukrainu* [Knowledge-oriented approach to the organization of decision-making support for the formation of a complete logistics supply chain of dried fruit in Ukraine]. *Systemy upravlinnya, navigatsiyi ta zvyazku – Systems of Control, Navigation and Communication*, 2017, vol. 6 (46), pp. 197-201.

6. Shostak, I., Raxymy, Y. *Modelyrovanye polnoj logysticheskoy cepy postavok sukhofruktov v Ukrainu s pryemeneniyem vlozhennykh setej Petry* [Modeling of the complete logistics supply chain of dried fruits to Ukraine using embedded Petri nets]. *Suchasni Informatsiyini sistemi – Advanced Information Systems*, 2018. Vol. 2, no. 4. pp. 45-48.

7. Pyterson, Dzh. *Teoriya setej Petry i modelyrovanye sistem* [Petri nets theory and systems modeling]. Moscow, Mir Publ., 1984. 264 p.

8. Lomazova, I. A. *Vlozhennyye sety Petry: modelyrovanye y analiz raspredelennykh sistem s ob'ektnoy strukturoj* [Nested Petri nets: modeling and analysis of distributed systems with the object structure]. Moscow, Nauchnij myr Publ., 2004. 208 p.

9. Andr'eka, H., van Benthem, J., N'emeti, I. Modal logics and bounded fragments of predicate logic. *Journal of Philosophical Logic*, 1998, no. 27, pp. 217–274.

10. Pnueli, A. The temporal logic of programs. *Proceedings of the 18th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 1977*, pp. 46-67.

Поступила в редакцію 12.0.2019, рассмотрена на редколлегии 15.03.2019

## МЕТОД РОЗШИРЕННЯ МОДЕЛІ ЛОГІСТИЧНОГО ЛАНЦЮГА ПОСТАВОК, ЩО ПОДАНО У ФОРМІ ДВОРІВНЕВОЇ ВКЛАДЕНОЇ МЕРЕЖІ ПЕТРІ

**І. В. Шостак, Я. Рахімі**

Розглянуто питання, що пов'язані з розробкою адекватних мережевих моделей процесів створення, розгортання та підтримки функціонування повного логістичного ланцюга поставок сухофруктів (ЛПС) в Україні. Показано, що при створенні і функціонуванні ЛПС, у порівнянні з іншими системами класу SCM, виникає ряд специфічних проблем, зумовлених складністю взаємодії постачальників сировини (свіжих фруктів), підприємств-виробників кінцевої продукції (сушіння, упакування), складських терміналів, дистриб'юторів, 3PL і 4PL-провайдерів (роздрібних торговців). Ці проблеми обумовлені тим, що взаємодія учасників бізнес процесів в ЛПС породжує безліч матеріальних, фінансових та інформаційних потоків, а також потоків послуг від джерел вихідної сировини до кінцевого споживача. Різноманіття регіонів світу, з яких здійснюються поставки в Україну сухофруктів, широка номенклатура продукції, що поставляється, врожайність, коливання курсів валют, сезонність є причинами виникнення високого рівня невизначеності в процесах формування та прийняття рішень учасниками ЛПС. Обґрунтовано актуальність завдання, суть якого полягає в розробці темпорального компонента в складі мережевої моделі ЛПС, що адекватним чином відображає в часі логістичні процеси, які відбуваються при функціонуванні ланцюга поставок. Розглянуто модель повної ЛПС в формі дворівневої вкладеної мережі Петрі (ВМП). При цьому мережева модель функціонування ЛПС в фо-

рмі ВМП включає об'єкти двох типів - центральну ланку, що відображає діяльність фокусної компанії з переробки вихідної сировини (сухофруктів), і ряд підмереж, що моделюють діяльність постачальників сировини та реалізаторів готової продукції. Зазначено, що для прогнозу наслідків поточної (або деякої заданої) ситуації і для відповідей на запити про майбутній стан елементів ЛПС може бути використана прогнозна модель, яка явно враховує часові залежності. При цьому запити можуть бути як про час появи деяких подій, так і про факт наявності деяких обставин в певний момент часу. Описано метод розширення часом мережевої моделі ЛПС для дотримання принципу 'just-in-time' при моделюванні бізнес процесів, які мають місце в ланцюзі поставок.

**Ключові слова:** поставки сухофруктів; повний логістичний ланцюг поставок; фокусна компанія; моделювання бізнес процесів; вкладена мережа Петрі; темпоральні логіки

## EXPANSION METHOD OF LOGISTIC SUPPLY CHAIN MODEL, PRESENTED IN THE FORM OF A TWO-LEVEL NESTED PETRI NETS

*I. V. Shostak, Y. Rahimi*

The issues related to the development of adequate network models of the processes of creating, deploying and supporting the functioning of the full logistics supply chain of dried fruit (SCDF) in Ukraine are considered. It is shown that the creation and operation of the SCDF, compared to other SCM class systems, raises a number of specific problems caused by the complexity of the interaction of raw material suppliers (fresh fruit), manufacturers of final products (drying, packaging), storage terminals, distributors, 3PL and 4PL providers (retailers). These problems are due to the fact that the interaction of participants in business processes in the SCDF generates a lot of material, financial and information flows, as well as flows of services from sources of raw materials to the final consumer. The variety of world regions from which dried fruit is delivered to Ukraine, a wide range of products supplied, yield, currency fluctuations, seasonality are the causes of a high level of uncertainty in the processes of formation and decision-making by the SCDF participants. The urgency of the problem is substantiated, the essence of which is to develop a temporal component in the network model of the SCDF, which adequately reflects in time the logistic processes that take place during the operation of the supply chain. A model of a full SCDF in the form of a two-level nested Petri net (NPN) is considered. At the same time, the network model of SCDF functioning in the form of a NPN includes two types of objects - the central link reflecting the activity of the focusing company on processing raw materials (dried fruits), and a number of subnets that simulate the activity of suppliers of raw materials and distributors of finished products. It is indicated that to predict the consequences of the current (or some predetermined) situation and to respond to inquiries about the future state of elements of the SCDF, a predictive model can be used that explicitly takes into account time dependencies. In this case, requests can be about the time of occurrence of certain events, and the fact that certain circumstances are present at a certain point in time. A method is described for extending the network model of the SCDF to comply with the 'just-in-time' principle when modeling business processes that take place supply chain.

**Keywords:** dried fruit supply, full logistics supply chain, focus company, business process modeling, nested Petri net, temporal logics.

**Шостак Игорь Владимирович** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. инженерии программного обеспечения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Рахими Яшар** – аспирант каф. инженерии программного обеспечения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Shostak Igor Vladimirovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: i.shostak@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-3051-0488.

**Rahimi Yashar** – Postgraduate Student, Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: k603@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-5468-9726.