

УДК 65.012.123

О. Е. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, О. А. ГАЙДЕНКО<sup>1</sup>, В. А. ПУЙДЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», Украина*<sup>2</sup> *Харьковский радиотехнический техникум, Украина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ УЯЗВИМОСТЕЙ И ВОЗНИКАЮЩИХ УЩЕРБОВ В ЛОГИСТИКЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Поставлена и решена задача исследования уязвимостей и их влияния на возникновение возможных ущербов в логистике распределенного производства. Благодаря предложенному подходу анализируется множество потенциально возможных уязвимостей в логистике производства, оцениваются ущербы при проявлении уязвимостей, формируется множество мероприятий, направленных на минимизацию угроз и ущербов, моделируются логистические процессы с учётом уязвимостей и ущербов в логистике производства. Исследование проводилось по направлениям: выявление множества уязвимостей и оценка возможных ущербов, оптимизация затрат на мероприятия по уменьшению рисков проявления уязвимостей, моделирование логистических процессов с учётом рисков и ущербов. Анализируется множество возможных уязвимостей для выявления критических. Оценивается влияние комбинаций уязвимостей на величину ущерба с помощью полнофакторного планирования эксперимента и оценок экспертов. Для минимизации затрат, связанных с уменьшением рисков проявления уязвимостей, использован метод булевого линейного программирования. Проведено мультиагентное моделирование логистической цепи распределённого производства «снабжение-производство-сбыт» с учётом угроз уязвимостей для определения величины ущербов в отдельных элементах цепи. Для проведения исследования использованы методы экспертного оценивания, многокритериальной оптимизации, лексикографического упорядочивания вариантов, агентного имитационного моделирования.*

**Ключевые слова:** *распределенное производство, уязвимости в логистике производства, ущербы и потери в производстве, затраты на мероприятия по устранению угроз от уязвимостей, оптимизация затрат, имитационное моделирование.*

### Введение

Глобализация экономики привела к появлению распределенных производственных систем (РПС) (аэрокосмос, энергетика, транспорт), эффективность которых, в большей мере, зависит от рационально спланированных логистических процессов [1]. Традиционная логистическая цепь «снабжение–производство–сбыт», из-за её распределенности, характеризуется множеством рисков как внешнего, так и внутреннего характера (блокировка транспорта, террористические акты, поломки оборудования) [2]. В настоящее время, количество рисков и разнообразие их проявления (техногенные, климатические, террористические и т.д.) привело к необходимости выделения дополнительных затрат, связанных с минимизацией рисков или их возможной нейтрализацией. Поэтому, актуальная тема предлагаемой публикации, в которой предложены методы исследования уязвимостей и возникающих возможных ущербов социально-экономического характера в логистике распределенного производства (экономические потери, воздействие на окружающую среду, возможные человеческие жертвы и т.д.)

### Постановка задачи исследования

Исследование проводилось по следующим направлениям:

1. Выявление множества уязвимостей и оценка возможных ущербов от их проявления.
2. Оптимизация затрат, связанных с мероприятиями, направленными на уменьшение рисков и потерь при проявлении уязвимостей.
3. Моделирование логистических процессов и ущербов, связанных с проявлением уязвимостей.

### Решение задачи исследования

Для определения множества уязвимостей воспользуемся экспертными оценками и существующей статистикой их появления. Множество уязвимостей  $V$  разобьём на три подмножества:  $V_i \in V$ , где  $V_1$  – подмножество уязвимостей, возникающих на этапе снабжения распределённого производства;  $V_2$  – подмножество уязвимостей, возникающих на этапе основного производственного процесса;  $V_3$  – подмножество уязвимостей, возникающих на этапе сбыта произведенной продукции.

Каждая из возможных уязвимостей  $V_i \in V$  должна быть проанализирована экспертами и оценена величина ущерба от её проявления. Так как возможно проявление не одной, а нескольких связанных логически уязвимостей (эффект «домино») (Чернобыль, Фокусима), то целесообразно перебрать и оценить все возможные их комбинации. Для этого воспользуемся полнофакторным планированием, где количество строк плана проведения экспериментов (в данном случае эксперимент представляет собой оценивание экспертом ущербов от комбинации возникающих уязвимостей)  $N=2^n$ , где  $n$  – общее количество уязвимостей (множество  $V$ ) в логистике исследуемого распределенного производства [3].

Приведем иллюстрированный пример оценивания ущербов, возникающих при проявлении уязвимостей.

Пусть  $n=3$ , где первая уязвимость, связана со снабжением РПС, вторая – с производством, третья – со сбытом. На табл. 1 представлен полнофакторный план эксперимента.

Таблица 1

Оценивание ущербов  
от возникающих уязвимостей

№ эксп.	Факторы (уязвимости)			Оценка ущербов
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	
1	0	0	0	0
2	0	0	1	2
3	0	1	0	6
4	0	1	1	8
5	1	0	0	1
6	1	0	1	3
7	1	1	0	7
8	1	1	1	9

Крайний столбец содержит оценки экспертов (например, в десятибалльной шкале). В плане «1» – означает проявление уязвимости, «0» – отсутствие проявления уязвимости. Первая строка плана соответствует отсутствию уязвимостей, а значит нулевой величине ущербов. Для оценки влияния уязвимостей, а также возможных их комбинаций, воспользуемся регрессионной зависимостью (линейная или неполноквадратическая зависимости), используя расчётные формулы полнофакторного эксперимента (ПФЭ). В расчетах 1 означает «+1», 0 означает «-1» [3]. В результате получим зависимость величины ущерба от влияния уязвимостей (факторов):

$$Y = 0,5 \cdot V_1 + 3 \cdot V_2 + V_3.$$

В данном примере наибольшее влияние на ущерб оказывает уязвимость, связанная с производством, второе место по влиянию оказывает уязвимость, связанная со сбытом, и третья – уязвимость, связанная со снабжением.

Учитывая ограниченные финансово-экономические возможности отечественных предприятий, необходимо минимизировать затраты, связанные с рисками проявления уязвимостей, в логистике распределенного производства. Для этого необходимо проанализировать множество мероприятий направленных на снижение рисков. Пусть для каждой уязвимости  $V_{ij}$  возможны варианты проведения мероприятий с разными затратами. Введём переменную  $x_{ijk}$ , для которой  $x_{ijk} = 1$ , если для  $j$ -ой уязвимости  $i$ -го логистического этапа РПС выбран  $k$ -й вариант проведения мероприятий, в противном случае  $x_{ijk} = 0$ . Введем следующие технико-экономические показатели РПС, с учетом влияния уязвимостей и появления ущербов:  $P$  – величина ущерба (социально-экономический, экологический и т.д.), которая может быть представлена в абсолютных или относительных единицах;  $R$  – риски, связанные с появлением уязвимостей;  $W$  – затраты связанные с уменьшением влияния уязвимостей или нейтрализацией угроз.

Для оптимизации затрат воспользуемся методом целочисленного (булевого) линейного программирования [3]. В этом случае показатели будут представлены следующим образом:

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} p_{ijk} \cdot x_{ijk},$$

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} r_{ijk} \cdot x_{ijk},$$

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} w_{ijk} \cdot x_{ijk},$$

где  $p_{ijk}$  – величина ущерба от проявления уязвимости на  $i$ -ом этапе РПС после проведения  $k$ -го мероприятия по минимизации угрозы уязвимости;  $r_{ijk}$  – риск проявления  $j$ -ой уязвимости на  $i$ -ом логистическом этапе РПС, после проведения  $k$ -го мероприятия по минимизации угрозы уязвимости;  $w_{ijk}$  – затраты, связанные с проведением  $k$ -го мероприятия для уменьшения риска проявления  $j$ -ой уязвимости на  $i$ -ом логистическом этапе РПС.

В качестве целевой функции в оптимизации используем затраты, связанные с уменьшением влияния (или нейтрализацией угроз) уязвимостей. Необходимо минимизировать:

$$\min W, W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} w_{ijk} \cdot x_{ijk},$$

с учётом выполнения ограничений:

$$R \leq R', R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} r_{ijk} \cdot x_{ijk}$$

$$P \leq P', W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} w_{ijk} \cdot x_{ijk},$$

где  $R'$  – допустимые риски появления уязвимостей;  
 $P'$  – допустимый ущерб, связанный с проявлением уязвимостей.

Если, в результате анализа, количество выделенных уязвимостей на этапах логистической цепи «снабжение–производство–сбыт» и число вариантов проведения мероприятий относительно невелико, то для определения мероприятий можно воспользоваться качественными оценками и лексикографическим упорядочиванием оценок для вариантов проведения мероприятий [3].

Пусть для оценки уязвимостей используются лингвистические переменные, которые принимают качественные значения, представленные в виде букв латинского алфавита. Тогда, показатели для оценки уязвимостей, будут иметь следующее представление:

$$P_{ijk} = \begin{cases} A - \text{незначительный ущерб}; \\ B - \text{относительно небольшой ущерб}; \\ C - \text{значительный ущерб}; \\ D - \text{угрожающий ущерб}. \end{cases}$$

$$r_{ijk} = \begin{cases} A - \text{угрожающий риск}; \\ B - \text{значительный риск}; \\ C - \text{относительно небольшой риск}; \\ D - \text{незначительный риск}. \end{cases}$$

$$w_{ijk} = \begin{cases} A - \text{небольшие затраты}; \\ B - \text{удовлетворительные затраты}; \\ C - \text{большие затраты}; \\ D - \text{очень большие затраты}. \end{cases}$$

Каждую возможную уязвимость, с вариантами проведения мероприятий для минимизации её последствий, представим в виде кортежа оценок  $P_{ijk}$ ,  $r_{ijk}$ ,  $w_{ijk}$ , где на первом месте, по важности влияния на эффективность распределённого производства, будут находиться затраты, на втором – риски, связанные с появлением уязвимостей и на третьем – затраты, связанные с минимизацией возможных

ущербов. Такой подход правомерен, так как в мировой практике опыт проведения мероприятий по устранению влияния угроз от уязвимостей в техногенных системах, связан, в первую очередь, с анализом величины ущерба от их проявления, и только затем оценивается риск, связанный с появлением уязвимостей. Например, социально-экономические ущербы от техногенных аварий на атомных электростанциях (Фукусима, Чернобыль), блокировки железнодорожного транспорта, при перевозке стратегически важных грузов и т.д.

Рассмотрим иллюстративный пример, связанный с определением множества вариантов проведения мероприятий по устранению влияния уязвимостей. Пусть для этапа «снабжение» эксперты выделили одну уязвимость с двумя возможными вариантами проведения мероприятий и их оценками:

B, C, C  
A, C, D

Для этапа «производство» выделена одна уязвимость и три варианта проведения мероприятий:

C, B, A  
B, B, C  
A, B, D

Для этапа «сбыта» выделена одна уязвимость и два варианта проведения мероприятий:

B, A, C  
C, A, A

Представим множество вариантов мероприятий с их оценками в виде списка:

1. B, C, C  
2. A, C, D  
3. C, B, A  
4. B, B, C  
5. A, B, D  
6. B, A, C  
7. C, A, A

Лексикографически упорядочим варианты (как в словаре). Получим:

5. A, B, D  
2. A, C, D  
6. B, A, C  
4. B, B, C  
1. B, C, C  
7. C, A, A  
3. C, B, A

Учитывая ограниченные возможности предприятий, отбросим варианты мероприятий с очень большими затратами. В результате получим множество вариантов:

- 6. В, А, С
- 4. В, В, С
- 1. В, С, С
- 7. С, А, А
- 3. С, В, А

Выделим по одному варианту проведения мероприятий на каждом этапе логистической цепи «снабжение–производство–сбыт». Получим окончательный список мероприятий для уменьшения влияния угроз от уязвимостей:

- 6. В, А, С
- 4. В, В, С
- 7. С, А, А

Для исследования динамических процессов, связанных с проявлением уязвимостей в логистике распределённого производства, воспользуемся агентным моделированием (платформа JADE). Структура агентов сформирована на основе событийного имитационного моделирования [3]. В состав агентов входят:

1. «Агент–уязвимость». С помощью этого агента формируется, случайным образом, проявление уязвимости с учётом оценок рисков.

2. «Агент–снабжение». Имитирует во времени динамический процесс, связанный со снабжением производства.

3. «Агент–сбыт». Имитирует во времени динамический процесс, связанный со сбытом продукции.

4. «Агент–производство». Распределённое производство состоит из связанных между собой, с помощью логистики, агентов отдельных производственных объектов (производств). Имитирует динамический процесс, связанный с реализацией производственного цикла.

5. «Агент–заказ». Имитирует появление заказа (плановое или случайное).

6. «Агент–ущерб». Имитирует появление ущерба (величина ущерба задана заранее или случайно) в ходе моделирования логистики производства.

7. «Агент–статистика». Формирует статистику по результатам моделирования (проявление конкретных уязвимостей, величины ущерба).

8. «Агент–мероприятие». Имитирует затраты на мероприятия и изменение рисков и величины ущерба после проведения мероприятий.

9. «Агент–управление». Обеспечивает управление и взаимодействие агентов между собой по заранее заданному сценарию

На рис. 1 представлена структурная схема агентной модели.



Рис. 1. Структурная схема агентной модели

## Выводы

Предложенный подход позволяет исследовать не только логистику существующего производства, но и проводить оценку влияния угроз от уязвимостей на стадии проектирования распределённой производственной системы. Это даёт возможность оценить дополнительные затраты, связанные с проведением превентивных мероприятий, направленных на уменьшение или устранение влияния угроз от уязвимостей.

## Литература

1. Греков, Л. Д. *Геопространственные производственные системы. Часть 2. Размещение на земной поверхности, оптимизация магистральных систем, космический мониторинг: моногр. [Текст] / Л. Д. Греков, В. М. Илюшко, О. Е. Федорович. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – 206 с.*
2. Федорович, О. Е. *Исследование логистики снабжения и сбыта в разнородной транспортной инфраструктуре грузоперевозок: моногр. [Текст] / О. Е. Федорович, Э. Е. Рубин, Н. В. Еременко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 198 с.*
3. Федорович, О. Е. *Модели и методы обеспечения качества в жизненном цикле и логистике высокотехнологического производства продукции*

*развивающихся предприятий: моногр. [Текст] / О. Е. Федорович, Ю. Л. Прончаков, Ю. А. Лещенко. – Х. : ФОП Лысенко И. Б., 2017. – 255 с.*

## References

1. Grekov, L. D, Ilyushko, V. M., Fedorovich, O. E. *Geoprostranstvennyye proizvodstvennyye sistemy. Chast' 2. Razmeshcheniye na zemnoy poverkhnosti, optimizatsiya magistral'nykh sistem, kosmicheskij monitoring: monogr [Geospatial production systems. Part 2. Location on the Earth surface, optimization of trunk systems, space monitoring]. Kharkov, Nac. ajero-kosm. un-t «Har'k. aviac. in-t» Publ., 2014. 206 p.*
2. Fedorovich, O. E., Rubin, Je. E., Eremenko, N. V. *Issledovanie logistiki snabzheniya i sbyta v raznorodnoj transportnoj infrastrukture gruzoperevozok: monogr [Research of logistics of supply and sale in diverse transport infrastructure of a cargo transportation]. Kharkov, Nac. ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t» Publ., 2016. 198 p.*
3. Fedorovich, O. E., Pronchakov, Ju. L. Leshchenko, Ju. A. *Modeli i metody obes-pecheniya kachestva v zhiznennom cikle i logistike vysokotekhnologicheskogo proizvodstva produkcii razvivajushhihsja predpriyatij: monogr [Models and methods of ensuring quality in life cycle and logistics of high-tech production of the developing enterprises]. Kharkov, FOP Lysenko I. B. Publ., 2017. 255 p.*

*Поступила в редакцию 4.09.2017, рассмотрена на редколлегии 14.09.2017*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВРАЗЛИВОСТЕЙ І ВИНІКАЮЧИХ ЗБИТКІВ У ЛОГІСТИЦІ РОЗПОДІЛЕНОГО ВИРОБНИЦТВА

*О. Є. Федорович, О. О. Гайденко, В. О. Пуйденко*

Поставлено та розв'язано задачу дослідження вразливостей і їх впливу на виникнення можливих збитків в логістиці розподіленого виробництва. Завдяки запропонованому підходу аналізується безліч потенційно можливих вразливостей в логістиці виробництва, оцінюються збитки при прояві вразливостей, формується безліч заходів, спрямованих на мінімізацію загроз і збитків, моделюються логістичні процеси з урахуванням вразливостей і збитків в логістиці виробництва. Дослідження проводилося за напрямками: виявлення безлічі вразливостей і оцінка можливих збитків, оптимізація витрат на заходи щодо зменшення ризиків проявлення вразливостей, моделювання логістичних процесів з урахуванням ризиків і збитків. Аналізується безліч можливих вразливостей для виявлення критичних. Оцінюється вплив комбінацій вразливостей на величину збитку за допомогою повнофакторного планування експерименту і оцінок експертів. Для мінімізації витрат, пов'язаних зі зменшенням ризиків прояви вразливостей, використано метод булевого лінійного програмування. Проведено мультиагентне моделювання логістичного ланцюга розподіленого виробництва «постачання-виробництво-збут» з урахуванням загроз вразливостей для визначення величини збитків у окремих елементах ланцюга. Для проведення дослідження використано методи експертного оцінювання, багатокритеріальної оптимізації, лексикографічного упорядкування варіантів, агентного імітаційного моделювання.

**Ключові слова:** розподілене виробництво, вразливість в логістиці виробництва, збитки і втрати у виробництві, витрати на заходи щодо усунення загроз від вразливостей, оптимізація витрат, імітаційне моделювання.

**INVESTIGATION OF VULNERABILITIES AND LOSSES  
IN LOGISTICS OF DISTRIBUTED PRODUCTION**

*O. Ye. Fedorovich, O. A. Gaydenko, V. A. Puydenko*

The problem of researching vulnerabilities and their impact on the occurrence of possible losses in the logistics of distributed production has been stated and solved. Due to the proposed approach a set of potential vulnerabilities in production logistics is analyzed, losses in case of vulnerabilities are assessed, a set of actions is taken to minimize the threats and losses, and logistical processes are simulated taking into account vulnerabilities and losses in production logistics. The research is carried out in the following areas: identification of multiple vulnerabilities and assessment of possible losses, optimization of costs on measures to reduce the risks of vulnerabilities, the simulation of logistics processes taking into account risks and losses. The set of possible vulnerabilities are analyzed in order to identify the critical ones. The impact of combinations of vulnerabilities on the losses is assessed by means of full-factorial experiment planning and expert evaluations. In order to minimize the costs related to the reducing of vulnerabilities risks the method of Boolean linear programming is used. A multi-agent simulation of the distributed production logistics chain “supply-production-sales” is carried out taking into account the vulnerability threats to define the losses in each individual element of the chain. In order to conduct the research, methods of expert evaluation, multi-criteria optimization, lexicographic ordering of variants and agent simulation are used.

**Keywords:** distributed production, vulnerabilities in production logistics, damages and losses in production, costs of measures to eliminate vulnerability threats, cost optimization, simulation.

**Федорович Олег Евгеньевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: o.fedorovich@khai.edu.

**Гайденко Олег Александрович** – аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: o.gaydenko@khai.edu.

**Пуйденко Вадим Алексеевич** – преподаватель компьютерных дисциплин, специалист первой категории, Харьковский радиотехнический техникум, Харьков, Украина, e-mail: vpuysenko@mail.ru.

**Fedorovich Oleg Yevgenyevich** – Doctor of Science on Engineering, Professor, the head of the department of information managing directors of systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.fedorovich@khai.edu.

**Gaydenko Oleg Aleksandrovich** – Ph.D. student, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.gaydenko@khai.edu.

**Puydenko Vadim Alekseevich** – teacher of computer disciplines, the expert of the first category, Kharkov radio technical school, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vpuysenko@mail.ru.