

УДК 65.012.123

**О. Е. ФЕДОРОВИЧ, К. О. ЗАПАДНЯ, О. А. ГАЙДЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ  
ПРОИЗВОДСТВ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА ВЫПУСК  
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ**

*Ставится и решается задача формирования виртуальной производственной системы (ВПС) для выпуска высокотехнологической продукции (авиастроение, автомобилестроение, приборостроение и др.). Для этого выделены три этапа, которые логически увязаны между собой: выбор состава ВПС, подготовка производства высокотехнологической продукции для выполнения портфеля заказов, организация логистической цепи «снабжение – производство – сбыт». Разработаны модели и методы, которые основаны на лексикографическом упорядочивании вариантов, линейном целочисленном программировании с булевыми переменными, агентном имитационном моделировании. Предложенный подход позволяет оценить затраты, время и риски, связанные с организацией ВПС для выполнения портфеля заказов.*

**Ключевые слова:** виртуальная производственная система, портфель заказов, высокотехнологическая продукция, логистика распределенного производства, оптимизация выбора состава производственной системы.

**Введение**

Машиностроительная отрасль страны находится в крайне тяжелом состоянии и требует обновления и реформирования. Это касается не только диверсификации выпуска продукции и рынков сбыта, но и создания новых форм организации производств, которые относительно легко адаптируются к запросам рынка потребителей высокотехнологической продукции. Одной из современных форм организации производства является виртуальное предприятие, которое создается на период выполнения портфеля заказов, сформированного по запросам рынка потребителей. Особенностью производственной сферы страны является наличие простаивающих производственных мощностей, что позволяет сформировать временную производственную систему для выполнения конкретного портфеля заказов [1].

Поэтому актуальна тема предлагаемой публикации, в которой предложены модели и методы для исследования виртуального производства высокотехнологической продукции (авиастроение, автомобилестроение, приборостроение и т.д.).

**Постановка задачи исследования**

Для организации виртуальной производственной системы (ВПС) и выпуска высокотехнологической продукции выделим следующие основные этапы [2]:

1. Формирование состава и структуры виртуальной производственной системы.
2. Подготовка (техническая и технологическая) виртуального производства к выпуску высокотехнологической продукции.
3. Организация логистики снабжения, производства и сбыта виртуальной производственной системы.

**Решение задачи исследования**

1. Формирование состава и структуры виртуальной производственной системы.

Первоначально, с помощью экспертов в управляющем офисе виртуальной производственной системы (УОВПС), необходимо выделить множество возможных предприятий  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_L\}$ , которые могут войти в состав виртуального предприятия для выполнения сформированного в УОВПС портфеля заказов по производству и выпуску высокотехнологической продукции. Оценка «близости» характеристик заказа и технологических характеристик формируемой производственной системы может осуществляться по предметному либо технологическому признакам.

Рассмотрим критерии для оценки «близости» характеристик по предметному признаку. В этом случае, путем тщательного изучения в УОВПС портфеля заказов, выделяется полное множество  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_L\}$  предметов производства, которое

позволяет обеспечить выпуск высокотехнологической продукции всего портфеля заказов (элементы, блоки, узлы, агрегаты и т.д.). Для каждого  $i$ -го предмета необходимо выбрать  $j$ -е предприятие из множества кандидатов  $S$ . В качестве критериев для оценки «близости» можно использовать:

- экспертные оценки «близости» характеристики  $i$ -го предмета заказа и производственных характеристик  $j$ -го выбираемого предприятия ( $e_{ij}$ );

- оценка качества изготовления  $i$ -го предмета (или его аналога) на  $j$ -ом предприятии ( $k_{ij}$ );

- время, затраченное на адаптацию  $j$ -го предприятия для выпуска  $i$ -го предмета ( $t_{ij}$ );

- финансовые затраты, связанные с адаптацией  $j$ -го предприятия для выпуска  $i$ -го предмета ( $f_{ij}$ );

- риски, связанные с выбором  $j$ -го предприятия для выпуска  $i$ -го предмета ( $r_{ij}$ ).

Расположим критерии оценки «близости» для предметов портфеля заказов и характеристик предприятия в ряд по убыванию важности. Например:  $e_{ij}, k_{ij}, t_{ij}, f_{ij}, r_{ij}$ .

Тогда для выбора подходящих, для выполнения портфеля заказов, предприятий, можно воспользоваться лексикографическим упорядочиванием вариантов. Для этого представим значения критериев в виде значений лингвистических переменных (букв латинского алфавита) [3]:

$$e_{ij} = \begin{cases} A - \text{максимальная "близость" характеристик,} \\ B - \text{хорошая "близость" характеристик,} \\ C - \text{удовлетворительная "близость" характеристик,} \\ D - \text{неудовлетворительное значение "близости".} \end{cases}$$

$$k_{ij} = \begin{cases} A - \text{высокое качество продукции,} \\ B - \text{хорошее качество продукции,} \\ C - \text{удовлетворительное качество продукции,} \\ D - \text{неудовлетворительное значение качества.} \end{cases}$$

$$t_{ij} = \begin{cases} A - \text{минимальное время адаптации,} \\ B - \text{удовлетворительное время адаптации,} \\ C - \text{повышенное время адаптации,} \\ D - \text{неудовлетворительное время адаптации.} \end{cases}$$

$$f_{ij} = \begin{cases} A - \text{низкие затраты на адаптацию,} \\ B - \text{удовлетворительные затраты на адаптацию,} \\ C - \text{большие затраты на адаптацию,} \\ D - \text{очень большие затраты на адаптацию.} \end{cases}$$

$$r_{ij} = \begin{cases} A - \text{минимальные риски,} \\ B - \text{удовлетворительные риски,} \\ C - \text{повышенные риски,} \\ D - \text{очень высокие риски.} \end{cases}$$

Рассмотрим иллюстративный пример выбора  $j$ -го предприятия для реализации  $i$ -го предмета высокотехнологической продукции из сформированного с помощью УОВПС портфеля заказов.

Пусть в качестве кандидатов для включения в ВПС по  $j$ -му предмету продукта выступает пять предприятий со следующими оценками «близости»:

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

Упорядочим варианты в лексикографическом смысле (как в словаре):

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

Отбросим варианты с оценкой D как неудовлетворительный для УОВПС, получим:

5. A, C, B, C, B,
2. A, C, C, B, B,
3. B, A, C, A, B.

Наиболее перспективным для выпуска  $i$ -го предмета продукции ВПС является выбор пятого варианта предприятия.

В случае использования «близости» в технологическом смысле критерии оценки «близости»  $j$ -го предприятия по  $i$ -й технологии производства высокотехнологической продукции можно представить в следующем виде:

$e_{ij}$  – оценка «близости» технологических признаков  $j$ -го предприятия к  $i$ -й технологии портфеля заказов;

$k_{ij}$  – качество  $i$ -го технологического процесса на  $j$ -м предприятии;

$t_{ij}$  – время адаптации (настройки)  $j$ -го предприятия к  $i$ -й технологии портфеля заказов;

$f_{ij}$  – затраты на адаптацию (настройку)  $j$ -го предприятия к  $i$ -й технологии портфеля заказов;

$r_{ij}$  – риски, связанные с адаптацией  $j$ -го предприятия к  $i$ -й технологии портфеля заказов.

Для выбора подходящих предприятий с учетом множества технологий портфеля заказов можно воспользоваться вышеописанным методом лексикографического упорядочивания вариантов.

2. Подготовка виртуального производства к выпуску высокотехнологической продукции.

Отобранные на первом этапе предприятия, которые вошли в состав ВПС, требуют проведения подготовки производства в рамках конкретного портфеля заказов. Выделим основные направления подготовки ВПС: – модернизация (закупка нового) оборудования и технологическая подготовка производства; – переподготовка (повышение квалификации) и обновление кадрового состава.

Основными критериями для оценки подготовки ВПС к выпуску высокотехнологической продукции является:

- финансовые затраты  $W$ ;
- время подготовки производства  $T$ .

Для оптимизации (минимизации затрат и времени) воспользуемся методом целочисленного (булевого) программирования [3]. Введём переменную  $x_{ij}$ , значение которой означает:

$x_{ij} = 1$ , в том случае, если осуществлен выбор для  $i$ -й технологии  $j$ -го варианта оборудования;

$x_{ij} = 0$  – в противном случае.

Тогда критерии для оценки подготовки ВПС можно представить следующим образом:

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} (w_{p_{ij}} + w_{k_{ij}}),$$

где  $m_i$  – множество возможных вариантов оборудования для реализации  $i$ -й технологии портфеля заказов;

$n$  – множество технологий, необходимых для выполнения портфеля заказов;

$w_{p_{ij}}$  – финансовые затраты, связанные с модернизацией оборудования по выбранному  $j$ -му варианту для реализации  $i$ -й технологии;

$w_{k_{ij}}$  – финансовые затраты, связанные с переподготовкой и обновлением кадрового состава с

учётом выбора выбранного  $j$ -го варианта оборудования для реализации  $i$ -й технологии.

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} (t_{p_{ij}} + t_{k_{ij}}),$$

где  $t_{p_{ij}}$  – время, затраченное на модернизацию оборудования по  $j$ -му варианту модернизации для реализации  $i$ -й технологии;

$t_{k_{ij}}$  – время, затраченное на переподготовку персонала с учётом выбора  $j$ -го варианта оборудования для реализации  $i$ -й технологии.

Возможны следующие постановки задач оптимизации для подготовки виртуального производства к выпуску высокотехнологической продукции:

1. Оптимизация отдельных критериев ( $W$ ,  $T$ ).

Необходимо найти минимум затрат  $W$ :

$\min W, W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} (w_{p_{ij}} + w_{k_{ij}})$  при выполнении ограничения на время  $T$ :

$$T \leq T', T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} (t_{p_{ij}} + t_{k_{ij}}) \quad \text{и выполнения}$$

условий:

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} = n,$$

где  $T'$  – допустимое время, отведенное на подготовку производства.

Необходимо найти минимум времени  $T$ :

$\min T, T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} (t_{p_{ij}} + t_{k_{ij}})$  при выполнении ограничения на затраты  $W$ :

$$W \leq W', W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} (w_{p_{ij}} + w_{k_{ij}}) \quad \text{и условий:}$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} = n,$$

где  $W'$  – допустимые затраты на подготовку производства.

2. Многокритериальная оптимизация. В этом случае воспользуемся минимизацией комплексного критерия в виде аддитивной свертки критериев  $W$ ,  $T$ :

$$R = \alpha_W \cdot \widehat{W} + \alpha_T \cdot \widehat{T},$$

$$\text{где } \widehat{W} = \frac{W - W^*}{W' - W^*}, \widehat{T} = \frac{T - T^*}{T' - T^*};$$

$W^*, T^*$  – минимальные значения критериев  $W, T$ , полученные в результате оптимизации отдельных критериев;

$\alpha_W, \alpha_T$  – «весовые» значения критериев, заданные экспертами  $\alpha_W + \alpha_T = 1$ .

Необходимо найти минимум  $R$ :

$$\begin{aligned} \min R, \\ R &= \alpha_W \cdot \widehat{W} + \alpha_T \cdot \widehat{T} = \\ &= \frac{\alpha_W \cdot W}{W' - W^*} + \frac{\alpha_T \cdot T}{T' - T^*} - \frac{\alpha_W \cdot W^*}{W' - W^*} - \frac{\alpha_T \cdot T^*}{T' - T^*} = \\ &= \frac{\alpha_W}{W' - W^*} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} (w_{p_{ij}} + w_{k_{ij}}) + \\ &+ \frac{\alpha_T}{T' - T^*} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} (t_{p_{ij}} + t_{k_{ij}}) - \frac{\alpha_W \cdot W^*}{W' - W^*} - \frac{\alpha_T \cdot T^*}{T' - T^*}, \end{aligned}$$

при выполнении ограничений:

$$T \leq T', W \leq W', \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = n.$$

3. Организация логистики снабжения, производства и сбыта виртуальной производственной системы.

Для оценки характеристик логистической цепи (снабжение – производство – сбыт) виртуальной производственной системы, воспользуемся имитационным агентным моделированием. Сформируем множество агентов моделирования:

- агент «снабжение» отвечает за формирование заявок в виде партий материалов, сырья и комплектующих для выполнения портфеля заказов ВПС;

- агент «транспортировка снабжения» отвечает за формирование материального потока от снабженческих предприятий до ВПС;

- агент «складирование снабжения» отвечает за промежуточное складирование материалов, сырья и комплектующих при транспортировке их к ВПС;

- сложный агент «виртуальная производственная система» состоит из агентов «производство предметов» и агентов «технология производства»;

- агент «сбыт» формирует заявки на структуру высокотехнологической продукции ВПС;

- агент «транспортировка сбыта» отвечает за формирование материального потока от ВПС к потребителям;

- агент «складирование сбыта» отвечает за

формирование складов для сбыта высокотехнологической продукции;

- агент «планирование» отвечает за формирование планов реализации портфеля заказов (формирование заявок на запуск отдельных заказов);

- агент «результаты моделирования» отвечает за формирование промежуточных и окончательных результатов моделирования.

В результате моделирования оцениваются:

- время запуска отдельного заказа;

- время выпуска продукции рассматриваемого заказа;

- процент занятости оборудования ВПС при выполнении каждого заказа из портфеля заказов;

- процент простоя оборудования ВПС;

- процент занятости транспортной системы «снабжение»;

- процент занятости транспортной системы «сбыт»;

- загрузка складов по снабжению;

- загрузка складов по сбыту;

- время поступления выполненных заказов (высокотехнологической продукции) потребителям.

На рис. 1 представлена схема имитационного агентного моделирования логистики ВПС.

## Выводы

Предложенный подход целесообразно использовать для обоснования состава предприятий, которые войдут в структуру виртуальной производственной системы и организации логистической цепи «снабжение – производство – сбыт».

## Литература

1. *Геопространственные производственные системы. Часть 1. Анализ, моделирование, проектирование [Текст] : моногр. / О. Е. Федорович, В. М. Илюшко, О. Н. Замирец, Л. Д. Греков. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 250 с.*

2. *Федорович, О. Е. Исследование логистики снабжения и сбыта в разнородной транспортной инфраструктуре грузоперевозок [Текст] : моногр. / 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 [Текст] : моногр. / О. Е. Федорович, Ю. Л. Прончаков, Ю. А. Лещенко. – Х. : ФООП Лысенко И. Б., 2017. – 255 с.*

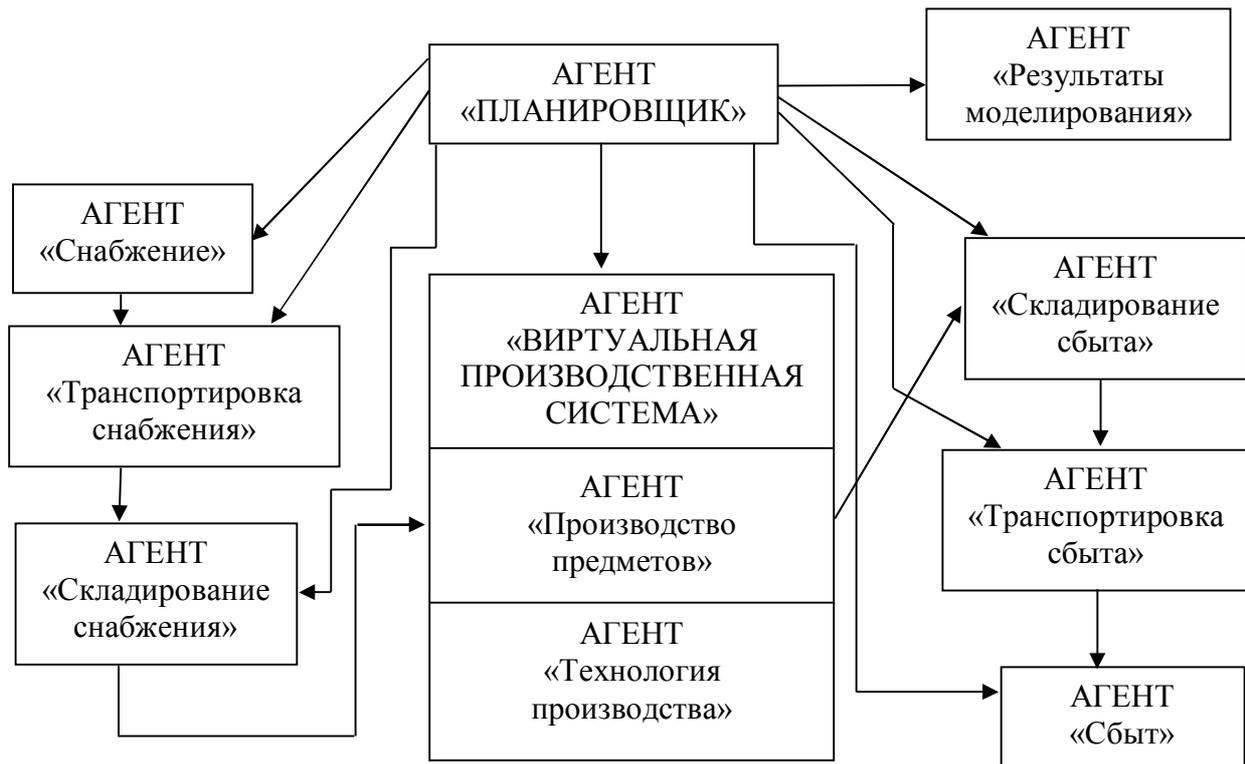


Рис. 1. Схема имитационного агентного моделирования логистики ВПС

## References

1. Fedorovich, O. E., Iljushko, V. M., Zamirec, O. N., Grekov, L. D. *Geoprostranstvennye proizvodstvennye sistemy. Chast' 1. Analiz, modelirovanie, proektirovanie: monogr* [Geospatial production systems. Part 1. Analysis, simulation, design]. Kharkov, Nac. ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t» Publ., 2011. 250 p.
2. Fedorovich, O. E., Rubin, Je. E., Eremenko, N. V. *Issledovanie logistiki snabzhenija i sbyta v raznorodnoj transportnoj infrastrukture gruzoperevozok: monogr* [Research of logistics of supply and sale in di-

verse transport infrastructure of a cargo transportation]. Kharkov, 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 obespechenija kachestva v zhizennom cikle i logistike vysokotekhnologicheskogo proizvodstva produkcii razvivajushhija 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 11.01.2017, рассмотрена на редколлегии 15.02.2017

## МЕТОДИ Й МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ВИРОБНИЦТВ, ОРІЄНТОВАНИХ НА ВИПУСК ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

О. Є. Федорович, К. О. Западня, О. О. Гайденко

Ставиться й вирішується задача формування віртуальної виробничої системи (ВВС) для випуску високотехнологічної продукції (авіабудування, автомобілебудування, приладобудування й ін.). Для цього виділено три етапи, які логічно пов'язані між собою: вибір складу ВВС, підготовка виробництва високотехнологічної продукції для виконання портфеля замовлень, організація логістичного ланцюга «постачання - виробництво - збут». Розроблено моделі й методи, які засновано на лексикографічному впорядкуванні варіантів, лінійному цілочисельному програмуванні з булевими змінними, агентному імітаційному моделюванні. Запропонований підхід дозволяє оцінити витрати, час і ризики, які пов'язані з організацією ВВС для виконання портфеля замовлень.

**Ключові слова:** віртуальна виробнича система, портфель замовлень, високотехнологічна продукція, логістика розподіленого виробництва, оптимізація вибору складу виробничої системи.

**METHODS AND MODELS TO RESEARCH THE VIRTUAL MANUFACTURES  
ORIENTED ON THE ISSUE OF HIGH-TECH PRODUCTS**

*O. Ye. Fedorovich, K. O. Zapadnya, O. A. Gaydenko*

The problem to create the virtual manufacturing system (VMS) for the manufacture of high-tech products (aeronautics, automotive, instrumentation, etc.) is stated and solved. In order to achieve the goal three phases that are logically linked to each other are outlined, such as the selection of VMS composition, preparing of the production of high-tech products to fulfill the orders portfolio, the arrangement of "supply - production - sales" logistics chain. The models and methods based on lexicographical ordering of the alternatives, linear integer programming with Boolean variables and agent-based simulations are developed. The proposed approach makes it possible to evaluate the costs, time and risks associated with VMS organization to fulfill the orders portfolio.

**Key words:** virtual manufacturing system, orders portfolio, high-tech products, logistics of distributed manufacture, optimization of the production system composition.

**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: kafius@ukr.net.

**Западняя Ксения Олеговна** – канд. техн. наук, научный сотрудник каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Гайденко Олег Александрович** – аспирант каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Fedorovich Oleg Yevgenyevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Information Management systems Department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine.

**Zapadnya Ksenia Olegovna** – Candidate of Technical Science, docent, Researcher, Department of Information Management Systems, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute, Kharkov», Ukraine.

**Gaydenko Oleg Aleksandrovich** – Graduate student, Department of Information Management Systems, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine.