Для цитирования: Минаева Ю.В. Математическая модель оптимизации иерархических многоуровневых систем производственного типа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):140-148. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-140-148

For citation: Minaeva Yu.V. Mathematical model for the optimisation of hierarchical multi-level production systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018;45 (2):140-148. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-140-148

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.3

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-140-148

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТИПА

Минаева Ю.В.

Воронежский государственный технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14, Россия,
e-mail: myuvs@yandex.ru

Резюме. Цель. Целью данного исследования является разработка математической модели, предназначенной для комплексного решения различных задач проектирования и реконструкции технологической системы производственного цеха машиностроительного предприятия. **Метод.** Методологической основой моделирования сложных иерархических производств является теория сложных систем и агрегативно-декомпозиционный подход, позволяющий представлять сложную систему в виде совокупности взаимосвязанных подсистем. **Результат.** Разработана математическая модель, предназначенная для комплексного решения задач формирования оптимальной производственной программы, выбора состава оборудования и закрепления операций по обработке за станками по единому для цеха критерию оптимальности. Отличительными особенностями предложенной в статье оптимизационной модели являются возможность ее применения, как для проектирования, так и для реконструкции технологической системы, а также возможность простого масштабирования до необходимого уровня (цеха в целом или отдельного участка). **Вывод.** В статье представлена комплексная математическая модель оптимизации технологической системы по единому для цеха критерию оптимальности, объединяющая решение основных задач проектирования и реконструкции цеха. Использование единого интегрального критерия оптимизации для нескольких задач позволяет учитывать сильные взаимосвязи между отдельными задачами. В основе модели лежит принцип компоновки модели из набора типовых элементов, что позволяет легко получить модели любых комбинаций подзадач, а также их различные варианты. Благодаря многоуровневой унификации и масштабируемости модели, ее использование позволяет повысить эффективность моделирования и оптимизации сложных многономенклатурных производств.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, математическое моделирование, иерархические системы, декомпозиция, унификация проектных решений

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

MATHEMATICAL MODEL FOR THE OPTIMISATION OF HIERARCHICAL
MULTI-LEVEL PRODUCTION SYSTEMS

Yulia V. Minaeva

¹Voronezh State Technical University,
14, Moscow Avenue, Voronezh 394026, Russia,
e-mail: myuvs@yandex.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a mathematical model for the complex solution of various problems in designing and reconstructing the technological system of a production workshop of a machine-building enterprise. **Methods** Complex system theory and an aggregative decomposition approach are used as the methodological basis for modelling complex hierarchical productions, making it possible to represent a complex system in the form of a set of interconnected sub-systems. **Results** A mathematical model designed for a complex solution of problems associated with the formation of an optimal production programme and selection of equipment was developed. Operative parameters for processing machines according to a single optimisation criterion for the workshop were established. Distinctive features of the optimisation model proposed in the article are the possibility of its application both for design and for the reconstruction of a technological system, as well as the possibility of simple scaling to the required level (i.e. the workshop as a whole or a separate section). **Conclusion** The article presents a complex mathematical model for optimising the technological system based on a single optimisation criterion for the workshop, combining the solution of the main tasks of design and reconstruction of the workshop. The use of a single integral optimisation criterion for several problems allows the strong interrelationships between individual tasks to be taken into account. The model is based on the principle of arranging a model from a set of typical elements, easing the construction of models for any sub-task combinations, as well as their respective options. It is possible to use the model's multi-level unification and scalability to increase modelling efficiency and thus optimise complex multinomenclature productions.

Keywords: optimal design, mathematical modelling, hierarchical systems, decomposition, unification of design solutions

Введение. Современный этап научно-технического прогресса характеризуется увеличением сложности производственных процессов и одновременно высокими требованиями к производственным системам с точки зрения их эффективности и адаптивности к постоянно меняющимся условиям внешнего окружения. К числу основных особенностей функционирования производственных систем в современных условиях относятся [1]:

- неопределенность внешних факторов, оказывающих воздействие на производственный процесс (состояние экономики, политической и социальной сферы и т.д.);
- необходимость оперативного реагирования на изменение внешних условий путем корректировки внутренних параметров системы (номенклатуры выпускаемых изделий, структуры производства, парка оборудования и пр.);
- многоуровневая иерархическая структура производственной системы, связанная, в том числе, с наличием территориально-распределенных подразделений;
- сложность организации производственных процессов, связанная с необходимостью анализа большого числа вариантов возможных решений.

Одним из инструментов поддержки развития сложных многономенклатурных производств является использование автоматизированных средств моделирования и оптимизации производственных процессов.

Методологической основой для описания производственных систем является теория сложных систем, рассматривающая производство как систему, состоящую из большого числа взаимосвязанных элементов, деятельность которых подчиняется глобальным целям [2-3].

Производственная система, состоящая из множества производственных участков и вспомогательных подразделений, как правило, имеет сложную иерархическую структуру, параметры которой определяются сложностью конструкции, номенклатуры выпускаемой продукции и характеристик производственного процесса изготовления [3].

Отдельным классом производственных систем является механосборочное производство, сложность которого обуславливается наличием широкой номенклатуры изделий, большого числа используемых материалов, комплектующих и операций по их обработке, а также разнообразием технологий изготовления изделий и выпускаемого основного и вспомогательного оборудования.

Научная методология технологического проектирования производственных систем в целом и механосборочных производств в частности сформулирована в работах Г.Н. Мельникова [4], В.П. Вороненко, Ю.М. Соломенцева [5-6], М.Е. Егорова [7], Е.Н. Хоботова [8] и др.

Однако если ранее в разрабатываемых проектах закладывалась неизменная структура организации и технологии производственного процесса, а срок службы производственных зданий предусматривал многие годы, то в современных условиях необходимо постоянное усовершенствование производственных систем за счет быстрого внедрения организационных и технологических инноваций и частого изменения номенклатуры выпускаемых изделий. Особое значение придается созданию высокоэффективных автоматизированных производственных участков на базе технического перевооружения и реконструкции действующих производственных систем, перевод их на современное оборудование и внедрение средств автоматизации управления всеми этапами производственного процесса [3].

При проектировании технологических систем подлежат разработке и разрешению экономические, технические и организационные задачи [1, 4-6]. Из-за наличия сильной взаимосвязи между различными классами задач любое техническое решение должно приниматься с учетом экономических и организационных ограничений.

К числу экономических задач относятся: планирование производственной программы, включающей перечень номенклатуры изделий и их количества, определение себестоимости продукции и эффективности затрат, определение размеров основных и оборотных фондов, решение вопросов финансирования и т.д.

К техническим задачам относятся: проектирование технологического процесса обработки сырья и полуфабрикатов, определение требуемого состава основного производственного и вспомогательного оборудования, определение состава и количества рабочих, определение потребного количества сырья и материалов, планировка цехов, компоновка оборудования и вспомогательных устройств на участках цеха.

Организационные задачи включают: построение структуры управления, выбор принципа формирования отдельных подразделений цеха, научную организацию труда, документооборот, организацию служб производства, систему контроля за ходом производства и т.д.

Все перечисленные задачи можно разделить на разные группы в зависимости от их сложности, степени формализации и используемых методов решения.

К числу хорошо формализуемых задач, для которых разработаны эффективные средства решения, не требующие применения методов оптимизации, относятся: определение размеров основных и оборотных фондов, состава и количества рабочих, потребного количества сырья и материалов, организационная структура управления, контроль за ходом производства. Подходы к решению таких задач описаны в [9-10].

Для решения задач, варьируемые параметры которых могут изменяться по случайным законам (например, проектирование технологического процесса обработки сырья и полуфабрикатов), эффективно используются методы имитационного моделирования [8, 11-13].

Постановка задачи. К задачам, для которых наиболее эффективным является применение процедур оптимизации, относятся:

- формирование производственной программы цеха;
- определение состава оборудования участков цеха;
- закрепление операций по обработке деталей за оборудованием.

Для решения перечисленных задач разработано достаточно большое количество оптимизационных моделей [14-16], однако они обладают следующими недостатками:

- задачи проектирования цеха решаются независимо друг от друга и по разным критериям оптимизации, при этом не учитывается обратная связь между задачами;
- предназначены только для проектирования технологической системы и не позволяют проводить ее реконструкцию (частичную замену оборудования).

Следовательно, необходима разработка математической модели, которая будет учитывать взаимное влияние отдельных задач за счет наличия единого для всего цеха критерия оптимизации, и позволит выполнять как проектирование, так и реконструкцию цеха или его отдельных участков.

В результате проведения машинного эксперимента с такой моделью будет получена оптимальная программа производства, рекомендуемый для его реализации состав оборудования и технологические маршруты обработки исходных материалов.

Методы исследования. Обобщенная математическая модель оптимизации технологической системы цеха.

Рассмотрим с точки зрения теории иерархических систем процесс проектирования технологической системы производственного цеха. Обобщенная математическая модель данного процесса объединяет в едином комплексе решение следующих оптимизационных задач [17-18]:

- формирование производственной программы цеха;
- определением состава потребного оборудования;
- закрепление операций по обработке деталей за оборудованием.

Пусть за цехом, состоящим из R участков ($r = 1, 2, \dots, R$), закреплено I наименований деталей ($i = 1, \dots, I$). Технологические процессы изготовления I деталей содержат M операций их обработки ($m = 1, \dots, M$).

Эти операции могут выполняться на различных станках из определенного набора, содержащего J ($j = 1, \dots, J$) моделей, причем m -я операция может обрабатываться не обязательно на всех J моделях станков, а только на подмножестве разрешенных ей моделей станков J_m , соответственно на j -й модели станка может выполняться только ограниченное подмножество операций M_j .

К факторам, ограничивающим подмножество выполняемых операций, относятся назначение и тип станка, а также его рабочие параметры (мощность, производительность и др.).

Введем следующие переменные:

- целочисленные переменные u_{jr} , означающие число станков модели j , которое нужно отвести участку r ;
- булевы переменные s_{mj} , причем $s_{mj} = 1$, если j -я операция выполняется на m -й модели станка, и $s_{mj} = 0$ в противоположном случае.

В качестве критерия оптимальности комплексной модели проектирования (реконструкции) цеха принимается интегральный мультипликативный критерий, представляющий собой векторный функционал

$$\prod_{z=1}^Z k_z f_z \rightarrow \text{ext}, \quad (1)$$

где f_z - частные оптимизационные критерии, k_z - весовые коэффициенты, учитывающие важность частных критериев.

Для задачи формирования производственной программы цеха критерием оптимизации

f_1 является максимальный дисконтированный доход:

$$\left(\sum_{t=1}^T \frac{\sum_{i=1}^I C_{\text{изд},it} x_{it} - \sum_{j=1}^J C_{\text{мат},jt} \sum_i x_{it} \sum_{m=1}^M M_{jim}}{(1+r)^t (1+k_{\text{инф}})^t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I x_{it} C_{\text{знит}} \right) \cdot (1-H) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $C_{\text{изд},it}$ - оптовая цена i -го вида изделий в t -м периоде;

x_{it} - оптимальное количество изделий i -го вида в t -м периоде, которое необходимо определить;

$C_{\text{мат},jt}$ - стоимость единицы измерения j -го вида ресурса в t -м периоде;

M_{jim} - норма расхода j -го материала на единицу i -го изделия на m -й операции $C_{\text{знит}}$ - заработная плата производственных рабочих за производство i -го изделия в t -м периоде, r - проектная ставка дисконтирования;

$k_{\text{инф}}$ - общий коэффициент инфляции.

Для задач определения состава потребного оборудования и закрепления операций по обработке деталей за оборудованием критерием f_2 является критерий минимизации приведенных затрат:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \left(C'_j \left(\sum_{m \in M_j} s_{mj} t_{mj} \right) K_j^{\text{пер}} + C''_j y_{jr} + K_j E_n (\max(y_{jr} - \bar{y}_{jr}, 0)) \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где C'_j - текущие затраты, приходящиеся на 1 ч работы станка вида j , руб.;

t_{mj} - время, необходимое для выполнения годовой программы операций m на станках типа j , ч; C''_j - текущие годовые затраты на амортизацию, ремонт и обслуживание единицы станка j -й модели и приходящейся на нее производственной площади; K_j - капитальные затраты на приобретение и монтаж оборудования, строительство производственных площадей и др., приходящиеся на единицу станка j -й модели, руб; $K_j^{\text{пер}}$ - коэффициент переналадки для станка модели j , учитывающий дополнительное время на переналадку станка; E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $\bar{y}_{jr}$ - число заранее имеющихся на участке r станков модели j .

Предложенный мультипликативный критерий оптимизации позволяет учитывать частные критерии, обладающие качественной разнородностью и различной направленностью воздействия (прямой и обратной) на обобщенный показатель.

Задача ABC имеет следующие ограничения:

1. Минимальный и максимальный объемы производства:

$$x_{it}^{\min} \leq x_{it} \leq x_{it}^{\max}, \quad (4)$$

где $x_{it}^{\min}$ - минимальный объем товаров i -го вида, который необходимо производить в t -м периоде; $x_{it}^{\max}$ - максимальный объем товаров i -го вида, который может быть реализован в t -м периоде на потребительском рынке.

2. Максимальный объем материальных ресурсов

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I x_{it} \sum_{m=1}^M M_{jim} \leq M_{\text{pec},j}, \quad (5)$$

где $M_{\text{рес.}j}$ - объем каждого j -го вида материальных ресурсов, доступный предприятию.

3. На операции m партия деталей может обрабатываться на станках типа j только целиком

$$s_{mj} \in \{0, 1\}, \quad m = 1, \dots, M, \quad j \in J_m. \quad (6)$$

4. Требование обязательности назначения операции одним станком из множества J_m

$$\sum_{j \in J_m} s_{mj} = 1, \quad m = 1, \dots, M; \quad (7)$$

5. Число станков j -й модели на g -м участке должно обеспечить фонд времени $y_{jr}\Phi_j$, достаточный для обработки годовой программы всех операций с деталями, закрепленных за станком этой модели (Φ_j - годовой фонд времени одного станка модели j)

$$y_{jr} = \frac{\left(\sum_{m \in M_{jr}} s_{mj} t_{mj} \right) K_j^{\text{нп}}}{\Phi_j}. \quad (8)$$

6. Капитальные затраты ограничены максимально доступным для цеха значением A .

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J y_{jr} K_j \leq A, \quad (9)$$

7. Число работающих по цеху ограничено максимально возможным значением N

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \left(N'_j \left(\sum_{m \in M_{jr}} s_{mj} t_{mj} \right) K_j^{\text{нп}} + N''_j y_{jr} \right) \leq N, \quad (10)$$

где N'_j - потребное число производственных рабочих, приходящееся на 1 час работы станка; N''_j - потребное число обслуживающих работающих, приходящееся на единицу станка j -й модели.

8. Ограничение по числу переналадок за определенный промежуток времени на станок j -й модели на g -м участке

$$\frac{\sum_{m \in M_{jr}} s_{mj} \sigma_{mj}}{y_{jr}} \leq d_j, \quad (11)$$

где σ_{mj} - заданная величина, равная 1, если данному s_{mj} соответствует признак отдельной операции, и равная 0 в противном случае, d_j - максимально допустимое число переналадок.

Обсуждение результатов. Таким образом, получена задача нелинейного целочисленного программирования с булевыми переменными, причем она имеет большую размерность, т.к. число участков цехов может достигать 20 и более, а на каждом участке число булевых переменных может достигать нескольких тысяч [17]. Предложенная комплексная иерархическая модель позволяет получить модели любой комбинации подзадач проектирования или реконструкции технологической системы производственного цеха, а также их модификации. Возможные варианты моделей представлены на рис. 1 [4-6]. Для получения модели произвольной подзадачи необходимо произвести редукцию комплексной математической модели путем последовательного отсекаания ограничений и удаления из целевой функции переменных, соответствующих ненужным задачам.

Модели участка из комплексной модели цеха получаются автоматически при фиксировании переменной g путем присвоения ей порядкового номера участка. Если необходимо частичное обновление оборудования, то для каждого участка задается список уже имеющегося

оборудования (переменные $\bar{y}_{jr}$), при полном обновлении оборудования $\bar{y}_{jr} = 0$.

Рис. 1. Структурная схема преобразования типовых процедур проектирования технологической системы

Fig. 1. Block diagram of the conversion of standard procedures for the design of a technological system

Для получения модели произвольной подзадачи необходимо произвести редукцию комплексной математической модели путем последовательного отсекаания ограничений и удаления из целевой функции переменных, соответствующих ненужным задачам.

Модели участка из комплексной модели цеха получаются автоматически при фиксировании переменной r путем присвоения ей порядкового номера участка. Если необходимо частичное обновление оборудования, то для каждого участка задается список уже имеющегося оборудования (переменные $\bar{y}_{jr}$), при полном обновлении оборудования $\bar{y}_{jr} = 0$.

Вывод. В работе представлена комплексная математическая модель оптимизации технологической системы по единому для цеха критерию оптимальности, объединяющая решение основных задач проектирования и реконструкции цеха. В основе модели лежит принцип компоновки модели из набора типовых элементов, что позволяет легко получить модели любых комбинаций подзадач, а также их различные варианты. Благодаря многоуровневой унификации и масштабируемости модели ее использование позволяет повысить эффективность моделирования и оптимизации сложных многономенклатурных производств.

Библиографический список:

1. Белецкая С.Ю. Технология оптимального проектирования развивающихся производственных систем / С.Ю. Белецкая, Н.В. Боковая // Системы управления и информационные технологии: научно-технический журнал. 2008. №2.2 (32). С. 223-226.
2. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. М.: Изд-во «Мир», 1973. 343 с.
3. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А.Д. Цвиркун. М.: Наука, 1982. 200 с.
4. Мельников Г.Н. Проектирование механосборочных цехов: учебник для студентов машиностроит. спец. вузов / Г.Н. Мельников, В.П. Вороненко. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
5. Проектирование автоматизированных участков и цехов: учеб. для машиностроит. спец. вузов / В.П. Вороненко, В.А. Егоров, М.Г. Косов; под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш. шк., 2000. 272 с.
6. Проектирование машиностроительного производства: учебник для вузов / В.П. Вороненко, Ю.М. Соломенцев, А.Г. Схиртладзе; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Дрофа, 2006. 380 с.
7. Егоров М.Е. Основы проектирования машиностроительных заводов / М.Е. Егоров. М.: Машиностроение, 1969. 480 с.
8. Хоботов Е. Н. Использование оптимизационно-имитационного подхода для моделирования и

проектирования производственных систем / Е.Н. Хоботов // Автоматика и телемеханика, 1999, № 9, с. 154–161.

9. Радько Т.Н. Экономика предприятия / Т.Н. Радько. М.: КноРус, 2013. 352 с.

10. Экономика предприятия: учебник / В.Я. Горфинкель. М.: ЮНИТИ, 2016. 663 с.

11. Мамиконов А.Г. Проектирование АСУ: учебник для вузов / А.Г. Мамиконов. М.: Высшая школа, 1987. 303 с.

12. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем / Н. Б. Кобелев. М.: Вузовский учебник, 2015. 139 с.

13. Аксенов К.А. Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах: учебное пособие / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 104 с.

14. Кушнер А.А. Производственная программа и ее роль в системе внутрифирменного планирования промышленного предприятия / А.А. Кушнер // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика, 2013, №2. с. 89-94.

15. Мухин О.И. Модели и задачи оптимального управления движением материальных потоков на структурно-перестраиваемых технологических линиях дискретного производства / О.И. Мухин // Системы управления и информационные технологии, 2006, № 3.1. с. 170-174.

16. Минаева Ю.В. Математическая модель выбора состава оборудования при проектировании производственных цехов / Ю.В. Минаева, С.Ю. Белецкая, Н.В. Боковая // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2010, Том 6, №1. с. 41-42.

17. Тетерин Г.П. Математические модели и методы решения задач оптимального технологического проектирования механических цехов / Тетерин Г.П., Авербах С.А. // Экономика и математические методы, 1988, том XXIV, вып. 1, с. 82-93.

18. Минаева Ю.В. Математические модели оптимального проектирования механических цехов / Минаева Ю.В., Белецкая С.Ю., Боковая Н.В. // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2008, том 4, №12, с. 21-23.

References:

1. Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. Tekhnologiya optimal'nogo proektirovaniya razvivayushchikhsya proizvodstvennykh sistem. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2008;2.2(32):223-226. [Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. The technology of optimal design of developing production systems. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2008;2.2(32):223-226. (in Russ.)]
2. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem. M.: Izd-vo "Mir"; 1973. 343 s. [Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. Theory of hierarchical multi-level systems. M.: Izd-vo "Mir"; 1973. 343 p. (in Russ.)]
3. Tsvirkun A.D. Osnovy sinteza struktury slozhnykh sistem. M.: Nauka; 1982. 200 s. [Tsvirkun A.D. Fundamentals of structural synthesis of complex systems. M.: Nauka; 1982. 200 p. (in Russ.)]
4. Mel'nikov G.N., Voronenko V.P. Proektirovanie mekhanosborochnykh tsekhov: uchebnyk dlya studentov mashinostroit. spets. vuzov. M.: Mashinostroenie; 1990. 352 s. [Mel'nikov G.N., Voronenko V.P. Designing machine assembly workshops: a textbook for students of machine building institutions. M.: Mashinostroenie; 1990. 352 p. (in Russ.)]
5. Voronenko V.P., Egorov V.A., Kosov M.G. Proektirovanie avtomatizirovannykh uchastkov i tsekhov: ucheb. dlya mashinostroit. spets. vuzov. Pod red. Yu.M. Solomentseva. M.: Vyssh. shk.; 2000. 272 s. [Voronenko V.P., Egorov V.A., Kosov M.G. Designing of automated sections and workshops: a tutorial for machine building institutions. Ed. Yu.M. Solomentsev. M.: Vyssh. shk.; 2000. 272 p. (in Russ.)]
6. Voronenko V.P., Solomentsev Yu.M., Skhirtladze A.G. Proektirovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva: uchebnyk dlya vuzov. Pod red. Yu.M. Solomentseva. M.: Drofa; 2006. 380 s. [Voronenko V.P., Solomentsev Yu.M., Skhirtladze A.G. Designing of machine-building production: textbook for high schools. Ed. Yu.M. Solomentsev. M.: Drofa; 2006. 380 p. (in Russ.)]
7. Egorov M.E. Osnovy proektirovaniya mashinostroitel'nykh zavodov. M.: Mashinostroenie; 1969. 480 s. [Egorov M.E. Fundamentals of designing machine-building plants. M.: Mashinostroenie; 1969. 480 p. (in Russ.)]
8. Khobotov E.N. Ispol'zovanie optimizatsionno-imitatsionnogo podkhoda dlya modelirovaniya i proektirovaniya proizvodstvennykh sistem. Avtomatika i telemekhanika. 1999;9:154–161. [Khobotov E.N. Use of the optimisation-simulation approach for modeling and design of production systems. Automation and Remote Control. 1999;9:154–161. (in Russ.)]
9. Rad'ko T.N. Ekonomika predpriyatiya. M.: KnoRus; 2013. 352 s. [Rad'ko T.N. Enterprise economics. M.: KnoRus; 2013. 352 p. (in Russ.)]

10. Gorfinkel' V.Ya. *Ekonomika predpriyatiya: uchebnik*. M.: YuNITI; 2016. 663 s. [Gorfinkel' V.Ya. *Enterprise economics: a textbook*. M.: YuNITI; 2016. 663 p. (in Russ.)]
11. Mamikonov A.G. *Proektirovanie ASU: uchebnik dlya vuzov*. M.: Vysshaya shkola; 1987. 303 s. [Mamikonov A.G. *Designing of ICS: textbook for universities*. M.: Vysshaya shkola; 1987. 303 p. (in Russ.)]
12. Kobelev N.B. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya slozhnykh ekonomicheskikh sistem*. M.: Vuzovskii uchebnik; 2015. 139 s. [Kobelev N.B. *Fundamentals of simulation of complex economic systems*. M.: Vuzovskii uchebnik; 2015. 139 p. (in Russ.)]
13. Aksenov K.A., Goncharova N.V. *Modelirovanie i prinyatie reshenii v organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh: uchebnoe posobie*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta; 2015. 104 s. [Aksenov K.A., Goncharova N.V. *Modeling and decision making in organisational and technical systems: a tutorial*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta; 2015. 104 p. (in Russ.)]
14. Kushner A.A. *Proizvodstvennaya programma i ee rol' v sisteme vnutfirmennogo planirovaniya promyshlennogo predpriyatiya*. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. 2013;2:89-94. [Kushner A.A. *The production program and its role in the system of intra-firm planning of an industrial enterprise*. Vestnik of the Astrakhan State Technical University. Series: Economics. 2013;2:89-94. (in Russ.)]
15. Mukhin O.I. *Modeli i zadachi optimal'nogo upravleniya dvizheniem material'nykh potokov na strukturno-perestraivaemykh tekhnologicheskikh liniyakh diskretnogo proizvodstva. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2006;3(1):170-174. [Mukhin O.I. *Models and problems of optimal control over the movement of material flows on structurally-tunable technological lines of discrete production. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2006;3(1):170-174. (in Russ.)]
16. Minaeva Yu.V., Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. *Matematicheskaya model' vybora sostava oborudovaniya pri proektirovanii proizvodstvennykh tsekhov*. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010;6(1):41-42. [Minaeva Yu.V., Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. *Mathematical model of choosing the equipment composition in the design of production workshops*. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2010;6(1):41-42. (in Russ.)]
17. Teterin G.P., Averbakh S.A. *Matematicheskie modeli i metody resheniya zadach optimal'nogo tekhnologicheskogo proektirovaniya mekhanicheskikh tsekhov*. Ekonomika i matematicheskie metody. 1988;XXIV(1):82-93. [Teterin G.P., Averbakh S.A. *Mathematical models and methods for solving problems of optimal technological design of mechanical workshops*. Economics and Mathematical Methods. 1988;XXIV(1):82-93. (in Russ.)]
18. Minaeva Yu.V., Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. *Matematicheskie modeli optimal'nogo proektirovaniya mekhanicheskikh tsekhov*. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2008;4(12):21-23. [Minaeva Yu.V., Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. *Mathematical models of optimal design of mechanical shops*. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2008;4(12):21-23. (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Минаева Юлия Васильевна - старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем.

Information about the author.

Yulia V. Minaeva - Senior Lecturer, Department of Computer Aided Design and Information Systems.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.03.2018.

Принята в печать 30.04.2018.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 12.03.2018.

Accepted for publication 30.04.2018.