

### Сведения об авторах

*Лапшин Дмитрий Дмитриевич* - ЗАМ. ДИРЕКТОРА ИНСТИТУТА МЕЖДУНАРОДНОГО ОБРАЗОВАНИЯ И СОТРУДНИЧЕСТВА ВГТУ ФГБОУ ВО ВГТУ, к.т.н., доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: lapshin@vgasu.vrn.ru

*Лапшина Марина Леонидовна* – профессор кафедры вычислительной техники и информационных систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: marina\_lapshina@mail.ru

*Юдина Надежда Юрьевна* – доцент кафедры вычислительной техники и информационных систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: unu@list.ru

### Information about authors

*Lapshin Dmitry Dmitrievich* - deputy. Director of the Institute of International Education and Cooperation of VSTU FGBOU VSTU, Ph.D., Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; E-mail: lapshin@vgasu.vrn.ru

*Lapshina Marina Leonidovna* – Professor of Computer Science and information Systems at the Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova, Doctor of Technical Sciences, Voronezh, Russian Federation, e-mail: marina\_lapshina@mail.ru

*Yudina Nadezhda Yurievna* - Associate Professor of Computer Science and Information Systems at the Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova ", candidate of technical sciences, Voronezh, Russian Federation; E-mail: unu@list.ru

DOI: 10.12737/article\_59c2124049cd45.48567850

УДК 004.421.2

### АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБЪЕМНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЗАКАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕБЕЛИ

аспирант **Д. Е. Нырков**<sup>1</sup>

доктор технических наук, доцент **А. В. Стариков**<sup>1</sup>

1-ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,  
Воронеж, Российская Федерация

В статье рассматриваются алгоритмы для использования в автоматизированных системах объемно-календарного планирования позаказного производства мебели. Мелкосерийное и позаказное производство обеспечивает значительную долю мебельного рынка как в России, так и в зарубежных странах. Также оно является перспективным направлением для развития других отраслей промышленности, ориентированных на конечного потребителя. Большинство существующих отечественных систем планирования рассчитаны на крупносерийное и массовое производство, в котором главную роль занимает производительность предприятия. Следовательно, основным показателем, по которому осуществляется оптимизация расписаний, является момент завершения последней работы. Однако позаказное производство имеет намного более сложную структуру показателей, влияющих на успешность предприятия в целом: ключевым показателем в данном случае является не скорейшее окончание всех без исключения работ, а выполнение их не позже установленного времени (т.е. в течение сроков, установленных договорами с заказчиками). Также в позаказном и мелкосерийном производстве важную роль занимает показатель времени, затрачиваемый на переналадку оборудования, связанную с переходом на выпуск продукции другого типа. Если эти и ряд других показателей не имеют значительной роли в крупносерийном производстве, то в мелкосерийном производстве эти показатели имеют значительное влияние

на эффективность работы предприятия и ими уже нельзя пренебречь. Рассмотрены три наиболее перспективных математических алгоритма (алгоритм имитации отжига, генетический алгоритм и искусственные нейронные сети), которые позволяют осуществлять оптимизацию расписаний по нескольким критериям применительно к задаче объёмно-календарного планирования позаказного производства мебели.

**Ключевые слова:** мебельная промышленность, позаказное производство, планирование производства, алгоритм имитации отжига, генетический алгоритм, искусственная нейронная сеть.

### ANALYSIS OF ADVANCED ALGORITHMS MASTER PRODUCTION SCHEDULE FOR CUSTOM MANUFACTURE OF FURNITURE

PhD student **D. E. Nyrkov**<sup>1</sup>

PhD in Engineering, Professor **A. V. Starikov**<sup>1</sup>

1-Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation

#### Abstract

The article discusses the algorithms employed in automated systems for master production scheduling in the applicability of their produce-to-order furniture. Small batch and custom production of furniture occupies a significant market share, as we do, and in the countries of Western Europe. Also, it is a prospective direction of development for other industries, focused on the end user. Most of the existing national planning systems designed for large-scale and mass production, in which the main role takes enterprise performance. Therefore, the main indicator, which is used by the optimization of scheduling, is the moment of completion of the last job. However, custom production is much more complex factors affecting the success of the enterprise as a whole: a key indicator in this case is the completion of all work no later than the specified time, not their early completion (within the terms established by treaties with customers). Also in the custom and small-scale production, it takes an important role time index spent on readjustment of the equipment associated with the transition to a different type of output. If these and other indicators do not have a significant role in large-scale production, the small-scale productions of these indicators have a significant impact on the performance of the enterprise, and they can no longer be neglected. In this paper, the three most promising mathematical algorithms (algorithm simulated annealing, genetic algorithm and artificial neural network), which allow us to optimize schedules based on several criteria applied to the problem of master production scheduling, customized production of furniture.

**Keywords:** furniture industry, custom production, production planning, simulated annealing, genetic algorithm, neural network.

Автоматизированные системы управления предприятием (АСУП) существуют около 50 лет и уже прочно вошли во все сферы экономики, а современные промышленные предприятия практически невозможно представить без подобных систем. В настоящее время существует несколько англоязычных терминов (MES, MRP, MRP II, APS, ERP) в разной степени соответствующие понятию АСУП, которые представляют целые классы систем, отличающихся как принципами работы, так и степенью покрытия задач управления предприятиями.

Но все из них выполняют крайне важную для предприятия задачу планирования производст-

ва. На данный момент ни одна из этих систем не обходится без модуля составления расписаний работы того или иного технологического оборудования – в упрощённом или детализированном виде. Причин такой высокой важности задачи планирования производства для предприятия несколько. Во-первых, это возможность повысить производительность и снизить себестоимость продукции без больших капитальных вложений в оборудование. Во-вторых, возможность обеспечить более равномерную загрузку оборудования. В-третьих, возможность чётко проследить в какой степени загруз-

жено то или иное технологическое оборудование и требуется ли его модернизация на данный момент.

Необходимо отметить, что разработка алгоритма, решающего задачу планирования производства, является весьма сложной задачей. Как было доказано в 1976 году Garey, Johnson и Sethi [1], в математическом плане эта задача относится к NP-сложным, а нахождение наилучшего решения требует перебора  $(n!)^m$  вариантов [2], где  $n$  – число работ, а  $m$  – общее число обрабатываемых станков. И не смотря на создание ещё в 1960 году метода ветвей и границ [3], позволяющего находить оптимальные решения за значительно меньшее число итераций ( $e^n$ ), практические задачи составления расписаний имеют столь значительное число переменных (порядка тысячи [4]), что даже такой, оптимизированный алгоритм - невозможно применять на практике.

По этой причине в практических целях для составления расписаний применяются эвристические методы вместо аналитических, хотя они и не обладают сходимостью, т.е. не позволяют гарантированно достигнуть оптимального решения.

Для целей решения данной задачи исследователи используют практически все, доступные на данный момент, эвристические алгоритмы: симуляция отжига, генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети (ИНС), муравьиный алгоритм, нечёткую логику, сети Петри, системы, основанные на знаниях [5-7]. Обзор научных публикаций [8] не выявляет явного лидера среди этих алгоритмов, что говорит о приблизительно одинаковой их эффективности. Более того, в некоторых случаях в исследованиях используются несколько алгоритмов одновременно, чтобы обойти недостатки одних методов при помощи преимуществ других.

Сложности, связанные с решениями задач объёмно-календарного планирования, стоявшие перед исследователями, требовали максимального упрощения модели предприятия. По этой причине многие факторы, не являющиеся решающими в крупносерийном производстве (вызывающем наибольший интерес у исследователей и производителей промышленных АСУП), попросту опускались,

для ускорения задачи поиска решения, близкого к оптимальному.

Однако некоторые отрасли промышленности (такие как мебельное производство) имеют значительную долю предприятий, работающих в условиях мелкосерийного и позаказного производства. И кроме определённых промышленных отраслей, наблюдается общее сокращение партий (серий), в целом по промышленности [9], что определяет перспективность данного направления развития. Предприятия, работающие в условиях позаказного производства, ещё больше зависят от наличия качественной АСУП, покрывающей как можно большую долю их потребностей в производственном планировании и управлении [10], поскольку от этого существенно зависит себестоимость производимой ими продукции и их конкурентоспособность на рынке.

Требования, предъявляемые в условиях позаказного производства, значительно отличаются: факторы, которые были второстепенными в крупносерийном производстве, здесь выходят на первый план, и требуют учёта в процессе составления расписаний. Это определяет необходимость разработки АСУП, удовлетворяющей этим новым требованиям.

Обычно АСУП ориентируются на степень загруженности оборудования при составлении расписаний, но в позаказном производстве этот фактор не является ключевым в определении эффективности предприятия. Поэтому список показателей, которые требуется учитывать, в данных условиях значительно отличается: это время, затрачиваемое на переналадку оборудования; межоперационные запасы заготовок; запас времени, от завершения сборки заказа, до исполнения его согласно договору. Это вызывает необходимость использования одного из многокритериальных методов оптимизации для нахождения расписания, наиболее подходящего для решения столь комплексной проблемы.

Для реализации АСУП, удовлетворяющей подобным требованиям, наиболее перспективными представляются следующие три метода оптимизации: алгоритм имитация отжига, генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети (ИНС).

Общим для всех трёх алгоритмов являются:

1. Ограничения: по последовательности операций (операции над деталями должны происходить строго последовательно), и по ресурсам (оборудование может быть задействовано лишь в одной операции одновременно).

2. Возможность гибкого регулирования параметров, по которым осуществляется оценка (для алгоритмов имитации отжига и генетического – напрямую, для ИНС – за счёт регулирования весов выходного нейрона).

Сформулируем задачу планирования в общем виде. На производство поступает  $n$  работ, обрабатываемых на  $m$  станках. При этом каждая операция над заготовками однозначно описывается тремя переменными –  $ijk$ , где  $i$  – номер работы,  $j$  – номер станка,  $k$  – номер операции над заготовкой.

Согласно условиям задачи, время выполнения каждой операции  $S_{ijk}$  заранее известно, а операции над заготовками должны выполняться строго последовательно, что описывается следующим неравенством:

$$S_{ijk} - S_{i(j-1)k} - t_{i(j-1)k} \geq 0,$$

где  $S_{ijk}$  – текущая операция,  $S_{i(j-1)k}$  – предыдущая операция,  $t_{i(j-1)k}$  – время выполнения предыдущей операции.

Также согласно условиям известно, что на станке может осуществляться только одна операция с одной заготовкой одновременно, что описывается следующими неравенствами:

$$S_{pjk} - S_{ijk} + H(1 - Y_{ipk}) - t_{ijk} \geq 0$$

$$S_{pjk} - S_{ijk} + H * Y_{ipk} - t_{ijk} \geq 0$$

где  $Y_{ipk} = 1$  при  $S_{ijk} \leq S_{pjk}$ ,  $Y_{ipk} = 0$  при  $S_{ijk} > S_{pjk}$ ,  $H$  – постоянная, больше чем самая длинная работа:

$$H = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m t_{ijk}.$$

Ниже приводится описание проанализированных алгоритмов применительно к задаче оперативно-производственного планирования.

### *Алгоритм имитации отжига*

Метод имитации отжига относится к стохастическим (вероятностным) методам оптимизации.

За основу взят процесс кристаллизации вещества, используемый в металлургии для повышения однородности металла. В процессе отжига металл сначала нагревают до некоторой температуры, что заставляет атомы кристаллической решётки покинуть свои позиции. Затем начинается медленное и контролируемое охлаждение. Атомы стремятся попасть в состояние с меньшей энергией, однако, с определённой вероятностью они могут перейти и в состояние с большей. Эта вероятность уменьшается вместе с понижением температуры. Переход в худшее состояние позволяет в итоге отыскать состояние с энергией меньшей, чем начальная. Процесс завершается, когда температура падает до заранее заданного значения.

Общая схема работы алгоритма имитации отжига применительно к задаче производственного планирования:

1. Генерируется корректное начальное расписание  $X_0$ , которое принимается в качестве текущего расписания, т.е.  $X = X_0$ .

2. Задаётся начальное высокое значение температуры  $T_0$ .

3. Проводится операция мутации, выполняемая с помощью следующих действий: изменением времени операции, взаимной перестановкой двух операций в расписании.

4. Вычисляется значение целевой функции, и ищется её изменение  $\Delta F = F(X') - F(X)$ . Если  $\Delta F > 0$ , то новый вариант становится текущим  $X = X'$ . Если  $\Delta F < 0$ , то с вероятностью  $p = e^{-\Delta F/T}$  выбирается новый вариант, иначе – остаётся старый.

5. Операции 3 и 4 повторяются заданное число итераций.

6. Проверка критериев останова.

7. Понизить текущую температуру и перейти к шагу 3.

Градиент снижения температуры выбирается из расчёта на то, чтобы алгоритм сошёлся к удовлетворительному решению за время его работы - и с ростом сложности задачи, градиент необходимо снижать. Однако чрезмерное занижение градиента с какого-то момента ведёт только к росту

вычислительной сложности, без улучшения качества расписания. Обычно градиент температуры подбирается экспериментально, под конкретную задачу.

### **Генетический алгоритм**

Общая схема работы генетического алгоритма:

1. Формируется начальная популяция из  $X$  особей, удовлетворяющих условиям.

2. Из популяции случайным образом выбираются пары особей, над которыми производится операция скрещивания.

3. Над полученной популяцией производится операция мутации (операции различных работ с определённой вероятностью переставляются местами - если это не нарушает условий). В качестве генов, которыми обмениваются особи - могут выступать и отдельные производственные операции, и полные группы операций, задействованные в изготовлении конкретных изделий. В результате получается  $2X$  особей.

4. Популяция очищается от клонов существующих особей, после чего отбирается  $X$  наилучших особей.

5. Шаги 2-4 повторяются до удовлетворения критериев останова.

Подбор числа особей  $X$  в популяции осуществляется из расчёта достаточности для схождения к удовлетворительному результату. Но достаточно малым, для того чтобы помещаться в оперативной памяти компьютера - иначе происходит резкое снижение скорости работы программы.

В качестве критериев останова, на основе которых принимается решение о прекращении работы алгоритма - выступают:

1. Качество наилучшего из полученных решений.

2. Сравнение последнего наилучшего результата, лучшим результатом за несколько итераций до него (если алгоритм попадает в локальный минимум, и результат перестаёт улучшаться - алгоритм останавливается). Если такое повторяется часто - необходимо увеличить популяцию  $X$ .

3. Ограничение по времени или числу итераций (если алгоритм работает слишком долго - он останавливается).

### **Искусственная нейронная сеть**

Общая схема работы ИНС (в данном случае используется модифицированная сеть Хопфилда [11], впервые представленная Foo и Takefujii [12, 13]) приведена ниже.

Составляющими элементами ИНС являются искусственные нейроны, который представляет собой входной сумматор, и функцию активации (представлен на рисунке 1):

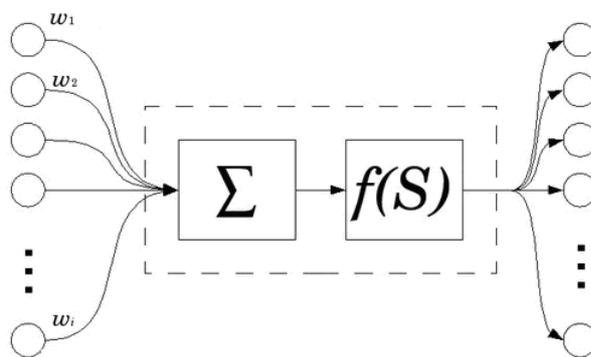


Рис. 1. Структура искусственного нейрона

Сигналы от входов нейронов сети (или от узлов сети, если речь идёт о скрытых слоях) поступают на вход нейрона, и суммируются –  $\Sigma$ . После этого полученная сумма поступает в функцию активации –  $f(S)$ . В качестве функции активации может использоваться любая функция, для которой можно рассчитать производную, но наиболее часто используют следующую:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}},$$

так как расчёт функции, и её производной с помощью вычислительных машин происходит немного быстрее, чем других.

Ограничения последовательности операций представляются с помощью структуры, показанной на рисунке 2:

Если на вход поступает верная последовательность, т.е. стартовое время последующей операции превосходит время старта предыдущей плюс время выполнения предыдущей операции

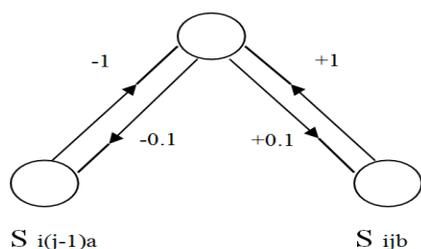


Рис. 2. Представление ограничений последовательности операций

$(S_{i(j-1)a} - S_{ijb} - t_{i(j-1)k} \geq 0)$ , то входящий сигнал усиливается; если это неверно  $(S_{i(j-1)a} - S_{ijb} - t_{i(j-1)k} < 0)$ , то сигнал ослабляется.

Если время выполнения разных операций на одном и том же ресурсе не совпадают, т.е. время старта последующей операции минус время старта предыдущей и минус время выполнения предыдущей операции, больше нуля  $(S_{pjk} - S_{ijk} + H(1 - Y_{ipk}) - t_{ijk} \geq 0)$ , где  $H$  – постоянная, которая больше времени выполнения самой длительной работы, то сигнал усиливается; если нет  $(S_{pjk} - S_{ijk} + H * Y_{ipk} - t_{ijk} < 0)$ , то ослабляется.

$Y_{ipk}$  вычисляется по формуле:

$Y_{ipk} = 1$ , если  $S_{ijk} \leq S_{pjk}$ ;

$Y_{ipk} = 0$ , если  $S_{ijk} > S_{pjk}$ .

Ресурсные ограничения представляются посредством структуры, показанной на рисунке 3:

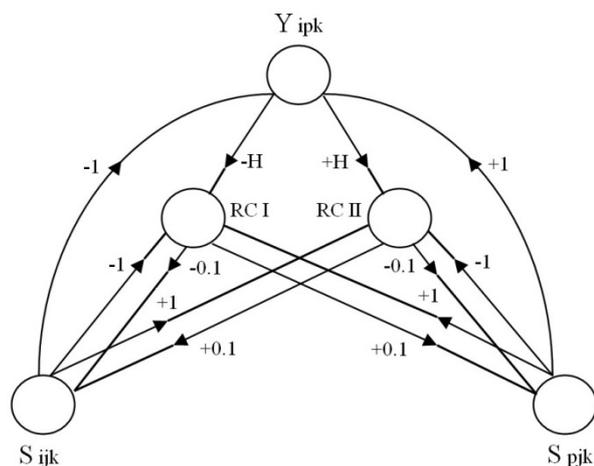


Рис. 3. Представление ресурсных ограничений

Общая схема работы алгоритма на основе ИНС:

1. Веса нейронов иницируются малыми случайными величинами.
2. Рассчитывается выходы каждого узла послойно, начиная от входного.
3. Выходные сигналы сравниваются с полученными.
4. На основе различия желаемого и действительного результатов вычисляются изменения, которые необходимо внести в связи ИНС (вычисляется последовательно, от выходного слоя к входящему).
5. Шаги 2-4 повторяются до удовлетворения критериев останова. В качестве таких критериев для ИНС обычно используют:

1. Сравнение последнего результата, с результатом за несколько итераций до него (если результат перестаёт улучшаться - алгоритм останавливается).

2. Ограничение по времени или числу итераций (если алгоритм работает слишком долго - он останавливается).

Алгоритм работы ИНС предусматривает выбор на старте случайного расписания, без учёта соответствия его заданным ограничениям. По этой причине, для схождения ИНС к допустимому решению используются несколько методик разрешения конфликтов. Принцип их работы предусматривает выбор предпочтительной операции по заданному алгоритму, которая выдвигается вперёд по расписанию. К таким алгоритмам относятся: кратчайшая работа обслуживается первой (shortest job next), работа с наименьшим оставшимся временем обслуживается первой (shortest imminent operation), выполнение работ в порядке их поступления (first in – first out) и другие.

Рассмотренные выше три алгоритма обеспечивают решение многокритериальных задач с помощью метода скалярного ранжирования. Это позволяет подстраивать весовые коэффициенты критериев «на лету», что весьма важно как при настройке алгоритмов, так и при необходимости регулирования критериев в процессе построения расписаний.

## Библиографический список

1. Garey, M. R. The complexity of flowshop and jobshop scheduling [Text] / M. R. Garey, D. S. Johnson, R. Sethi // Mathematics of operations research, 1976. – Vol. 1. – iss. 2. – pp. 117-129.
2. Arisha, A. Job shop scheduling problem: an overview. [Text] / A. Arisha, P. Young, M. El Baradie // International conference for flexible automation and intelligent manufacturing, Dublin, Ireland. – 2001. – pp. 682-893.
3. Land, A.H. An automatic method of solving discrete programming problems [Text] / A. H. Land, A. G. Doig // Econometrica. – Vol. 23. – 1960. – pp. 497-520.
4. Загидуллин, Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP [Текст] / Р. Р. Загидуллин. // Старый Оскол: ТНТ. – 2011. – 372 с.
5. Ouelhadj, D. Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems [Text] / D. Ouelhadj, S. Petrovic // Automated Scheduling, Optimisation and Planning Research Group, School of Computer Science and IT. – 2009. – 27 p.
6. Jones, A. Survey of job shop scheduling techniques [Text] / A. Jones, L. C. Rabelo, A. T. Sharawi // Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering. – 1999. – pp. 17.
7. Meziane, F. Intelligent systems in manufacturing: current development and future prospects. [Text] / F. Mezanie, S. Vadera, K. Kobbacy, N. Proudlov // Integrated manufacturing systems. – 2000. – Vol. 11, iss. 4. – pp. 218-238.
8. Yusof, Y. Survey on computer-aided process planning [Text] / Y. Yusof, K. Latif // The international journal of advanced manufacturing technology. – 2014. – Vol. 75, iss. 1, pp 77-89.
9. Залыгин, А.Р. MES-системы с точки зрения организации производства. [Текст] / А.Р. Залыгин // Металлообрабатывающее оборудование. – 2008. – №12. – С. 26-31.
10. Брыкин, А. С. Сквозная информационная поддержка позаказного промышленного производства корпусной мебели [Текст] / А. С. Брыкин, А. В. Стариков // Лесотехнический журнал. – 2013. – №3. – С. 76-82.
11. Hopfield, J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities [Text] / J.J. Hopfield // Proceedings of the national academy of science of the USA, 1982. – Vol. 79, no. 8, – pp. 2554-2558.
12. Foo, S.Y. Neural networks for solving job-shop scheduling: Part 1. Problem representation [Text] / S. Y. Foo, Y. Takefuji // Proc. IEEE IJCNN. – 1988. – Vol. 2. – pp. 275-282.
13. Foo, S.Y. Stochastic neural networks for solving job-shop scheduling: Part 2. Architecture and simulations [Text] / S. Y. Foo, Y. Takefuji // Proc. IEEE IJCNN. – 1988. – Vol. 2. – pp. 283-290.

## References

1. Garey M.R., Johnson D.S., Sethi R.. The complexity of flowshop and jobshop scheduling. Mathematics of operations research, 1976, Vol. 1, iss. 2, pp. 117-129.
2. Arisha A., Young P., Baradie M. El. Job shop scheduling problem: an overview. International conference for flexible automation and intelligent manufacturing, 2001, pp. 682-893.
3. Land A.H., Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems. Econometrica, Vol. 23, 1960, pp. 497-520.
4. Zagidullin R.R. *Upravlenie mashinostroitel'nykh proizvodstvom s pomoshch'yu sistem MES, APS, ERP* [Engineering production management systems with the help of MES, APS, ERP]. *Staryy Oskol: TNT* [Stary Oskol: TNT], 2011, 372 p. (In Russian)
5. Ouelhadj D., Petrovic S. Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. Automated Scheduling, Optimisation and Planning Research Group, School of Computer Science and IT, 2009, 27 p.

6. Jones A., Rabelo L. C., Sharawi A. T. Survey of job shop scheduling techniques. Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering, 1999, pp. 17.
7. Mezanie F., Vadera S., Kobbacy K., Proudlove N. Intelligent systems in manufacturing: current development and future prospects. Integrated manufacturing systems, 2000, Vol. 11, iss. 4, pp. 218-238.
8. Yusof Y., Latif K. Survey on computer-aided process planning. The international journal of advanced manufacturing technology, 2014, Vol. 75, iss. 1, pp 77-89.
9. Zalygin A. R. *MES-sistemy s tochki zreniya organizatsii proizvodstva* [Mes-systems from the point of view of the organization of production]. *Metalloobratyvyayushchee oborudovanie* [Metalworking equipment], 2008, no. 12, pp. 26-31. (In Russian)
10. Brykin A.S., Starikov A.V. *Skvoznaya informatsionnaya podderzhka pozakaznogo promyshlennogo proizvodstva korpusnoy mebeli* [Through informational support custom industrial production of furniture], *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2013, no. 3, pp. 76-82. (In Russian)
11. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. Proceedings of the national academy of science of the USA, 1982, Vol. 79, no. 8, pp. 2554-2558.
12. Foo S. Y., Takefuji Y. Neural networks for solving job-shop scheduling: Part 1. Problem representation. Proc. IEEE IJCNN. 1988, Vol. 2, pp. 275–282.
13. Foo S. Y., Takefuji Y. Stochastic neural networks for solving job-shop scheduling: Part 2. Architecture and simulations. Proc. IEEE IJCNN, 1988, Vol. 2, pp. 283–290.

### Сведения об авторах

*Нырко́в Дени́с Евге́ньевич* – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российской Федерации; e-mail: denis.nyrkov@yandex.ru

*Стари́ков Алекса́ндр Вениа́минович* – заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российской Федерации; e-mail: star123@yandex.ru

### Information about authors

*Nyrkov Denis Evgenevich* – postgraduate of department of automation of production process Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: denis.nyrkov@yandex.ru

*Starikov Aleksandr Veniaminovich* – head of department Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", PhD, professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: star123@yandex.ru