

Научная статья

УДК 004.4 +338.984

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-3-102-2>

© Оксана Сергеевна Логунова^{1✉}, Михаил Борисович Аркулис², 2021

^{1, 2} Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова,
Магнитогорск, Россия,

¹logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

²arkulis78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1140-7159>

© Oxana S. Logunova^{1✉}, Mikhail B. Arkulis², 2021

^{1, 2} Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia,

¹logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

²arkulis78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1140-7159>

**Автоматизированная система оперативного календарного планирования
многостадийного производства:
математическая модель и программная реализация**

Аннотация. Целью исследования является повышение эффективности производственных участков многостадийного производства с возможностью рационального использования мощностей оборудования и запасов незавершенной продукции в условиях функционирования системы автоматизированного оперативного календарного планирования. Особенности рассмотренной задачи оперативного календарного планирования являются: необходимость обработки сырья на нескольких этапах согласно технологической карте; наличие массива оборудования, которое требует разделения работы на три периода для каждой партии; наличие графиков плановых и внеплановых простоев оборудования; необходимость комплектации заказов из нескольких подзаказов; наличие незавершенной продукции на складе; наличие ограничений в порядке и сроках реализации заказов. В работе создана математическая модель с использованием многомерных матроидов со структурированными элементами при построении шкалы свободного времени для загрузки оборудования. Исследования выполнялись для металлургического предприятия на участке по производству ленты холодного проката. В результате разработано математическое и программное обеспечение системы оперативного календарного планирования. В ходе опытной эксплуатации созданной системы временные затраты на выполнение планирования работ по производству ленты холодного проката сокращены на 50 %; объем хранения незавершенной продукции на складах производственных участков – на 30 %, простои производственного оборудования – на 7 %. Затраты на проектирование, разработку и интеграцию системы в действующую корпоративную информационную систему окупаются за 856 дней.

Ключевые слова: многостадийное производство, оперативное календарное планирование, матричная модель планирования, программная реализация, временная линейка.

Automated operational scheduling system for multi-stage production: mathematical model and software implementation

Abstract. The purpose of the study is to improve the efficiency of production areas of multi-stage production with the possibility of rational use of equipment capacity and stocks of WIP inventory in the operation conditions of the automated operational scheduling system. Features of the considered problem regarding operative calendar planning are: necessity of processing raw materials at several stages according to the flow chart; an array of the equipment which demands division of work into three periods for each party; availability of planned and unscheduled equipment downtime; necessity to complete set of orders from several suborders; availability of incomplete production in a warehouse; restrictions in order and timing of orders. In the work, the authors construct a mathematical model with the use of multidimensional matroids with structured elements in the construction of free time scale for equipment loading. The research was carried out for a metallurgical plant at the cold strip production site. As a result, mathematical and software support for the operative calendar planning system was developed. During a trial operation of the system built, the following was achieved: reduction of time costs for planning of cold strip production by 50 %; reduction of WIP inventory storage in the warehouses of production areas by 30 %, reduction of production equipment downtime by 7 %. The costs of design, development and integration of the system into an existing corporate information system pay off in 856 days.

Keywords: multistage production, operational calendar planning, matrix planning model, software implementation, time line.

Введение

Большинство современных технологических процессов проектируется при условии многостадийности, включающей несколько этапов от обработки заготовки до выпуска готовой продукции. Сложная технологическая линия допускает повторение операций до тех пор, пока не будут получены заданные свойства продукции. Можно привести несколько примеров технологических процессов в металлургической промышленности, которые созданы с условием многостадийности и итерационности технологических операций. Например, производство непрерывнолитой заготовки, включающей выплавку стали в кислородном конвертере или дуговой сталеплавильной печи, обработку стали в установке «печь-ковш» и разливку на машинах непрерывного литья заготовок¹. Каждый из указанных процессов также имеет многостадийную структуру, однако при этом цепочка производства является линейной. Кроме того, в качестве примера можно привести производство ленты холодного проката, для которого характерен многоразовый нагрев рулонов.

Планирование многостадийных процессов и управление ими – сложная и трудоемкая задача. До настоящего времени процесс планирования производства для отдельных видов продукции выполнялся традиционными способами, но наиболее эффективным является использование средств автоматизации, которые, в свою очередь, требуют предварительного построения концептуальной и математической моделей

¹ Logunova O. S., Matsko I. I., Posohov I. A., Luk'ynov S. I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74. – № 9–12. – P. 1407–1418.

производства. Наличие развитого математического аппарата и средств разработки программного обеспечения служит платформой для автоматизации процесса планирования. В области построения математических моделей и автоматизации построения оперативных планов производства накоплен значительный положительный опыт.

В трудах М. И. Быстрова и других ученых представлена обобщенная схема функционирования производственного контура ERP-системы, которая применима к большинству корпоративных систем¹. В схеме функционирования есть модули, обеспечивающие учет запасов, наличие заказов, спецификацию продукции, технологию производства, заявки на снабжение и производственные заказы. Предлагаемой авторами методике свойственны ограничения по мощностям оборудования и оптимизация по контрольным срокам. В работе Д. Л. Евланикова представлен инженерный подход к календарному планированию отдельного этапа комплексной отладки программного обеспечения². Особенностью данного подхода является большое число параметров, требующих экспертной оценки, но в то же время исключающих субъективизм в оценивании времени выполнения одной стадии. В труде В. Я. Мищенко, Д. И. Емельянова и А. А. Тихоненко обосновывается использование генетических алгоритмов при оптимизации распределения ресурсов в календарном планировании строительства. Авторами предлагается вариация генетического алгоритма в сочетании с сетевым графиком работ и оптимизацией участников, занятых в процессе строительства³.

В работах ряда ученых⁴ представлены предложения по совершенствованию интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении и планиро-

¹ Быстров М. И. Планирование производства в корпоративной информационной системе и задача объемно-календарного планирования // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2005. – № 14. – С. 135–141.

² Евлаников Д. Л. Инженерный подход к календарному планированию этапа комплексной отладки программного обеспечения информационно-управляющих систем // Системы управления и обработки информации. – 2016. – Вып. 1 (32). – С. 66–73.

³ Мищенко В. Я., Емельянов Д. И., Тихоненко А. А. Разработка методики оптимизации распределения ресурсов в календарном планировании строительства на основе генетических алгоритмов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 11. – С. 76–78.

⁴ Logunova O. S., Matsko I. I., Posohov I. A., Luk'ynov S. I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74. – № 9–12. – P. 1407–1418. Ishmetyev E. N., Logunova O. S., Volshchukov Y. N., Makashov P. L., Barankov V. V., Filippov E. G. On the aspect of implementing solutions for information support of industrial plant control systems // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – № 5–8. – P. 1779–1791; Logunova O. S., Matsko I. I., Posochov I. A. Integrated system structure of intelligent management support of multistage metallurgical processes // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2013. – № 5 (45). – P. 50–55; Jeon S. M., Kim G. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC) // Production Planning & Control. The Management of Operations. – 2016. – Vol. 27. – Iss. 5. – P. 360–377. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1128010>.

вании многостадийного производства с использованием программного обеспечения, в том числе имитационного моделирования в среде AnyLogic. Результаты, полученные в ходе реализации проектов, позволили сократить затраты на проектирование систем управления (в частности, модулей управления производством). В отмеченных работах доказана эффективность применения имитационного моделирования при планировании производства.

Использование методов, методик и способов календарного оперативного планирования не ограничивается промышленными предприятиями, а задействуется в здравоохранении¹, при материально-техническом обеспечении², при управлении умными городами и банками³ и в транспортной системе⁴.

Несмотря на множество существующих исследований и значительное количество научных публикаций в области оперативного календарного планирования (более 65000 метаданных о публикациях на платформе CrossRef), остаются актуальными следующие проблемы:

- учет специфических особенностей производства и технологических процессов, требующих описания дополнительных ограничений и условий, которые должны быть включены в математическое описание и алгоритмы для нахождения оптимального оперативного календарного плана;

- наличие дополнительных ограничений и условий, не позволяющих использовать известные решения без их модификации или адаптации.

Указанные проблемы требуют совершенствования математических моделей и алгоритмов для осуществления оптимизации календарного плана для каждого технологического процесса в условиях действующего производства.

В рамках представляемой работы рассматривается задача оперативного календарного планирования производства, концептуальная модель которой представлена на рис.1; особенностями данной задачи являются: необходимость обработки исходных материалов на нескольких этапах согласно технологической карте; наличие массива оборудования, требующего разбиения работы на три периода; составление графиков плановых и внеплановых простоев оборудования; необходимость комплектации заказов из нескольких подзаказов; наличие незавершенной продукции на складе; имеющиеся ограничения в порядке и сроках реализации заказов.

Указанные особенности многостадийного производства усложняют процесс оперативного календарного планирования и выполнения поступивших заказов.

¹ Operational Research for Emergency Planning in Healthcare / edited by M. Navonil. – London: Palgrave Macmillan, 2016. – Vol. 1. – 378 p. <http://dx.doi.org/10.1057/9781137535696>.

² Beemsterboer B., Land M., Teunter R. Hybrid MTO-MTS production planning: An explorative study // European Journal of Operational Research. – 2016. – Vol. 248 (2). – P. 453–461.

³ Graham G. Smart Cities and Operations Management // Production Planning & Control. – 2016. – Vol. 27 (6). – P. 431–432; Vijaya Sunder M. Rejects reduction in a retail bank using Lean Six Sigma // Production Planning & Control. – 2016. – Vol. 27 (14). – P. 1–12.

⁴ Holzapfel A., Hübner A., Kuhn H., Sternbeck M. G. Delivery pattern and transportation planning in grocery retailing // European Journal of Operational Research. – 2016. – Vol. 252 (1). – P. 54–68.

В рамках работы введены следующие термины: *подзаказ* – часть заказа, представляющая собой какую-либо позицию из общего объема материалов; *незавершенная продукция* (далее – НЗП) – часть исходного материала, прошедшая неполную обработку в соответствии с технологической картой производимой продукции и находящаяся на складе производственного подразделения в непосредственной близости от технологической линии; *матроидная матрица* (*матроид*) – матрица, элементы которой образуют структуру, содержащую атомарные поля разных типов.

Целью проводимых исследований является повышение эффективности производственных участков многостадийного производства с возможностью рационального использования мощностей оборудования и запасов незавершенной продукции.

Наиболее перспективное направление при решении указанной проблемы – автоматизация построения производственных планов с заранее заданными целями. Для этого активно создаются и внедряются в работу модули корпоративных информационных систем. На рис. 1 представлена концептуальная модель корпоративной информационной системы одного из подразделений металлургического предприятия, которая активно разрабатывается и совершенствуется до настоящего времени. При создании концептуальной модели для модуля планирования учитывалась структура предприятия, существующий порядок движения информационных потоков и выше-указанные особенности.

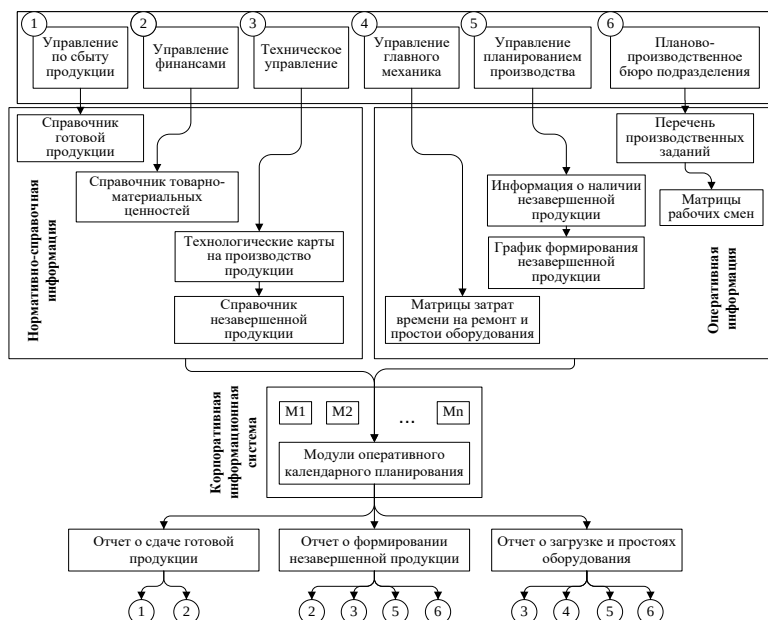


Рис. 1. Концептуальная модель задачи оперативного календарного планирования производства

Основная часть

1. Методы исследования

Для достижения поставленной цели согласно концептуальной модели авторы работы предложили реализовать матричную модель для хранения и трансформации информации на основе структурированных матроидов, создали алгоритмическое обеспечение, которое представляет собой пилотный проект программного продукта, предназначенного для подразделения металлургического предприятия по производству ленты холодного проката.

Матроидная модель процесса оперативного календарного планирования многостадийного производства

В модуле оперативного календарного планирования реализуется модель работы цеха в течение месяца. Для построения модели работы цеха определены матроидные матрицы исходных и рабочих данных согласно особенностям производства и концептуальной модели.

В качестве нормативно-справочных данных для модуля оперативного календарного планирования выступают:

– матроидная матрица технологических операций с указанием позиций по каждой номенклатуре:

$$A = \left\| \{S_i, n_i\} \right\|, \quad (1)$$

где $i = \overline{1, N}$, N – максимальное количество стадий обработки на технологической линии; n_i – количество позиций в i -ой стадии; S_i – наименование стадии обработки;

– матрица внутрисменного простоя по каждой позиции в стадиях обработки продукции:

$$R_1 = \left\| \{S_{il}, \|t_{ij}^1\|, \|k_{ij}^1\|\} \right\|,$$

где i – номер стадии; l – номер позиции в i -ой стадии, $l = \overline{1, n_i}$; j – номер временного промежутка (j принимает значения от 0 и до динамически изменяющейся верхней границы, достигающей в своем максимуме 720 – количества минут в рабочей смене); $\|t_{ij}^1\|$ – временной интервал для j -ой позиции в i -ой стадии; $\|k_{ij}^1\|$ – вид временного интервала для j -ой позиции в i -ой стадии с возможными значениями 0 – простой и 1 – работа; S_{il} – наименование стадии обработки для позиции l .

– матроидная матрица регламентированных простоев по каждой позиции в стадиях обработки продукции:

$$R_2 = \left\| \{S_{il}, \|t_{ij}^2\|, \|k_{ij}^2\|\} \right\|,$$

где i – номер стадии; l – номер позиции в i -ой стадии, $l = \overline{1, n_i}$; j – номер временного промежутка, j принимает значения от 0 и до динамически изменяющейся верхней

границы, достигающей в своем максимуме 720 – количество минут в рабочей смене;
 $\|t_{ij}^2\|$ – временной интервал для j -ой позиции в i -ой стадии; $\|k_{ij}^2\|$ – вид временного
интервала для j -ой позиции в i -ой стадии с возможными значениями 0 – простой и
1 – работа;

– матроидная матрица технологических режимов для обработки заказов:

$$R_3 = \left\| \{S_i, \tau_i^1, \tau_i^2, \tau_i^3\} \right\|, \quad (2)$$

где τ_i^1 – время подготовки единицы объема полуфабриката для обработки в i -ой ста-
дии производства; τ_i^2 – время обработки единицы объема полуфабриката в i -ой ста-
дии производства; τ_i^3 – время перемещения единицы объема полуфабриката после
обработки в i -ой стадии производства.

Матрицы R_1 и R_2 преобразуются следующим образом:

$$R_1^0 = \left\| \{S_{il}, \|\sigma_{ij}^1\|\} \right\| \text{ и } R_2^0 = \left\| \{S_{il}, \|\sigma_{ij}^2\|\} \right\|,$$

где $\|\sigma_{ij}^1\|, \|\sigma_{ij}^2\|$ – векторы фиксированной размерности $j = \overline{1, 720}$ со значениями 0 –
простой оборудования на изготовление соответствующего вида и 1 – возможное
функционирование. Для матриц R_1 и R_2 формируется временная линейка, которую
можно представить графически (см. рис. 2).



Рис. 2. Графическое изображение матроидных матриц для внутрисменных простоев,
регламентированных простоев и свободного времени оборудования

В качестве исходных данных для производственной модели цеха рассматривают-
ся:

– матроидная матрица свободного времени:

$$R_0 = \left\| \{S_{il}, \|\sigma_{ij}\|\} \right\|, \quad (3)$$

где $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^1 \cdot \sigma_{ij}^2$ – произведение элементов матриц внутрисменных и регламентиро-
ванных простоев (см. рис. 2);

– матроидная матрица распределения незавершенной продукции:

$$V_z = \left\| \{S_{ik}, V_{ik}\} \right\|, \quad (4)$$

где V_{ik} – объем незавершенной продукции на i -ой стадии по выбранной технологической карте; S_{ik} – наименование стадии обработки для k -ой технологической карты незавершенной продукции;

- матроидная матрица наличия сырья:

$$V_p = \|V_k^p\|, \quad (5)$$

где V_k^p – объемы сырья заданной марки и толщины стали на складах цеха;

- матроидная матрица заказов, поступающих на обработку в заданный календарный период:

$$Z = \|\{V_m, R_{3m}\}\|, \quad (6)$$

где m – номер заказа, $m = \overline{1, 200}$, V_m – объем заказа, т; R_{3m} – элемент матрицы R_3 , определяющий режимы обработки по стадиям.

Таким образом, математическая модель многостадийного производства ленты холодного проката в условиях ОАО «ММК-Метиз» имеет следующий вид:

- производственные мощности цеха описываются матроидными матрицами (1)–(3);
- условия выполнения заказа устанавливаются согласно ограничениям (4)–(6).

Требуется определить план выполнения заказов по агрегатам технологической линии:

$$P = \|\{S_{il}, \tau_{ilj}\}\|, \quad (7)$$

где τ_{ilj} – номер заказа, поступившего в j -ую минуту на l -ую позицию i -ой операции, или 0, если позиция свободна для заполнения, или -1, если позиция занята на любой из видов ремонта. Должны выполняться следующие условия:

- 1) $S_{il} \in A$;
- 2) τ_{ilj} заполняется по свободным позициям матроида (3);
- 3) шкала временной занятости агрегата без учета простоев соответствует значениям технологической карты (2);
- 4) элементы Z должны пройти всю длину технологической линии по (2) с учетом объемов (4) и (5);
- 5) в ходе выполнения заказов формируется и используется массив (4) для будущих периодов.

Для искомого плана возможно существование нескольких решений в связи с наличием множественного набора позиций на каждой стадии обработки. В зависимости от требований к производству могут быть выбраны один или несколько критериев оптимальности плана, например:

- требование скорейшего выполнения заказа (срочность), которое можно записать в технологические цепочки обработки материала по всем стадиям как мини-

мальную длительность суммарных простоев;

- требование максимальной загрузки оборудования по времени или объему производства продукции;
- требование равномерной загрузки всего парка агрегатов производственных участков, цеха, предприятия.

В рамках представленной работы авторы предлагают новый алгоритм поиска матроидной матрицы (7) при соблюдении требования максимальной загрузки оборудования по первой найденной свободной минуте в последовательности обработки исходного материала или объема незавершенного производства в группе заданного оборудования.

Проектные решения для программной реализации оперативного календарного планирования многостадийного производства

Наличие матричной математической модели процесса оперативного календарного планирования многостадийного производства позволило сформировать структуру данных в виде взаимосвязанных массивов (см. рис. 3). Каждый элемент указанного массива имеет идентификатор и структурированные поля, которые необходимы для того, чтобы задать временные шкалы (см. рис. 2). Рис. 3 не следует понимать как схему базы данных.

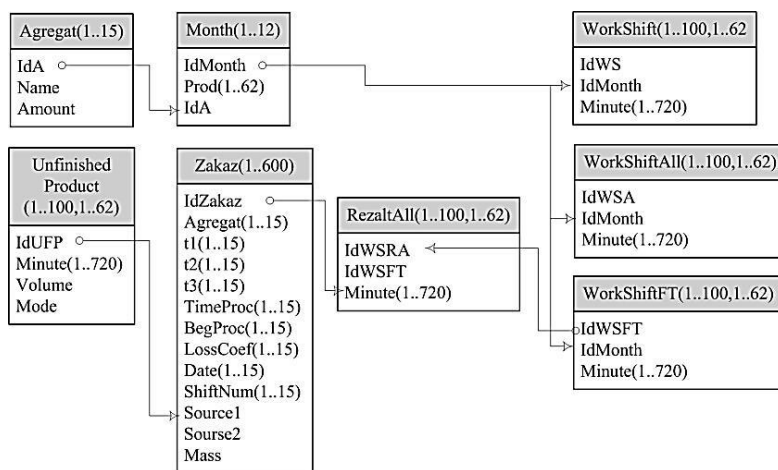


Рис. 3. Схема взаимосвязанных информационных массивов

Созданное программное обеспечение для решения поставленной задачи построено по модульной структуре. В системе выделены три группы модулей: ввод и преобразование нормативно-справочной информации, распределение загрузки оборудования, отображение (визуализация) результатов планирования. В каждой из указанных групп проведена декомпозиция основных функций, которые реализованы в виде отдельных модулей. На рис. 4 представлена группировка программных модулей в соответствии с их основными функциями.

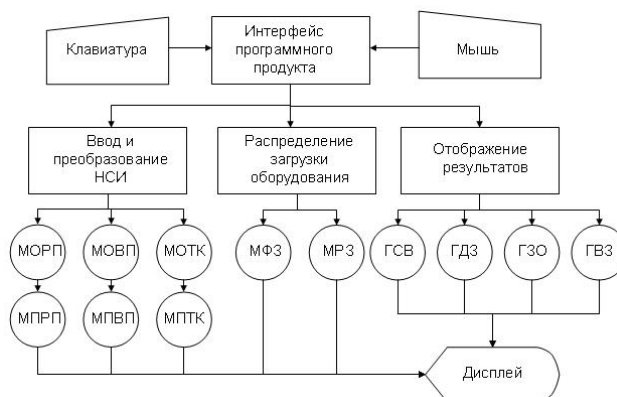


Рис. 4. Схема группировки программных модулей системы по основным функциям

На рис. 4 введены следующие обозначения: МОРП – модуль открытия файла регламентированных простоев; МПРП – модуль преобразования файла регламентированных простоев; МОВП – модуль открытия файла внутрисменных простоев; МПВП – модуль преобразования файла внутрисменных простоев; МОТК – модуль открытия файла технологической карты; МПТК – модуль преобразования файла технологической карты; МФЗ – модуль формирования сведений о заказе; МРЗ – модуль распределения заказов; ГСВ – модуль графического отображения свободного времени для оборудования; ГДЗ – модуль графического отображения движения заказов по агрегатам; ГЗО – модуль графического отображения загрузки оборудования по периодам времени; ГВЗ – модуль графического отображения заказов по периодам времени.

На рис. 5 представлена схема функционирования программного обеспечения системы автоматизации оперативного календарного планирования многостадийного производства.

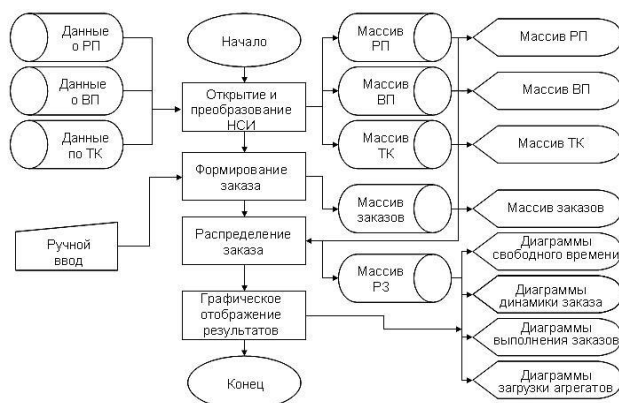


Рис. 5. Схема функционирования программного обеспечения системы автоматизированного оперативного календарного планирования

На рис. 5 введены следующие обозначения: ТК – технологическая карта; НСИ – нормативно-справочная информация; РП – регламентированные простои; ВП – внутрисменные простои; РЗ – распределенные заказы.

В работе программного продукта можно выделить четыре основные задачи:

- модуль открытия и преобразования НСИ подразумевает поиск и загрузку файлов формата электронных таблиц, содержащих данные согласно документации бюро планирования производства. Результаты преобразования выводятся на экран и создают массивы в оперативной памяти ЭВМ;
- модуль формирования списка заказов формирует массив планируемых заказов (начиная с установленной даты) с учетом всех необходимых характеристик готовой продукции, поступающих полуфабрикатов, а также цикла производства;
- модуль распределения заказов позволяет в автоматическом режиме выполнить динамическое размещение заказов на технологической линии, принимая во внимание количество существующих агрегатов, их мощности и режимы работы;
- модуль графического отображения диаграмм и таблиц на экране монитора производит диаграммы и таблицы согласно требованиям заказчика.

Наиболее интересным и сложным с точки зрения программной реализации можно считать новый алгоритм распределения заказов по агрегатам технологической линии по принципу «заполнение первой свободной минуты». Для реализации алгоритма выполняется разбиение каждой рабочей смены для всех агрегатов на временные интервалы по 1 минуте. Первоначально все агрегаты считаются свободными, массив их занятости является нулевым. На основе графиков регламентированных и внутрисменных простоев значения массива загрузки оборудования изменяются как скалярное произведение массивов двух видов простоев: 0 – если выбранная минута занята простоем или ремонтом, 1 – если агрегат свободен и может быть использован.

Для формирования массива занятости выполнено преобразование исходных данных по правилам, которые определены условиями (1)–(3):

- 1) регламентированный простой осуществляется в начале смены;
- 2) внутрисменные простои, разделенные по времени, объединяются в непрерывные интервалы по виду занятости в течение смены.

Далее приводится листинг процедуры, с помощью которой заказы распределяются по работающим агрегатам. В этой процедуре можно выделить две основные части: построение начального результирующего массива по возможным минутам для загрузки и изменение элементов данного массива на номера заказов, обладающих возможностью для размещения в эту минуту в агрегате.

'Процедура распределения заказов

Private Sub Команда4_Click()

'Процедура инициализации таблицы времени из 720 секунд

PrimeTime

'Процедура формирования технологической карты заказа

RezaltA

'Распределение

'Цикл по текущему заказу

```

For tz = 1 To kz
    'Инициализация свободной минуты заказа
    SvMinZak = 1
    'Инициализация индекса в заказе для типа агрегата или операции
    tagreg = 1
    'Перебор типа агрегатов
    Do While tagreg <= 13
        If Zakaz(tz).TimeObr(tagreg) > 0 Then
            'Свободный агрегат
            SvAgregat = False
            'Перебор свободных минут
            Do While SvMinZak <= (720 * KolSmen) And SvAgregat =
False
                Agreg = 1
                Do While Agreg <= Agregat
(Zakaz(tz).AgeratInd(tagreg)).kol And SvAgregat = False
                    'Вычисление сквозного индекса
                    si = 0
                    For i = 1 To Zakaz(tz).AgeratInd(tagreg) - 1
                        si = si + Agregat(i).kol
                    Next i
                    si = si + Agreg
                    'Проверка свободности агрегата в минуту
                    '-1 - агрегат свободен
                    If RezaltA(si, 1 + (SvMinZak \
720)).Minuta(SvMinZak Mod 720) = -1 Then
                        SvAgregat = True
                    Else
                        Agreg = Agreg + 1
                    End If
                Loop
                'Переход к следующему агрегату
                If Agreg > Agregat(Zakaz(tz).AgeratInd(tagreg)).kol Then
SvMinZak = SvMinZak + 1
                Loop
            'Заполнение массива заказами
            If SvAgregat = True Then vproper = 0
            'Цикл по времени обработки
            Do While vproper < Zakaz(tz).TimeObr(tagreg) And SvMin-
Zak <= (720 * KolSmen)
                If RezaltA(si, 1 + (SvMinZak \ 720)).Minuta(SvMinZak
Mod 720) = -1 Then
                    'Указание номера заказа
                    RezaltA(si, 1 + (SvMinZak \ 720)).Minuta(SvMinZak
Mod 720) = tz
                    vproper = vproper + 1
                End If
            Loop
        End If
        tagreg = tagreg + 1
    Loop
End For

```

'Переход к следующей минуте $SvMinZak = SvMinZak + 1$ *Loop**End If**End If**'Переход к следующему типу или операции* $tagreg = tagreg + 1$ *Loop**Next tz 'Конец цикла по заказам**End Sub*

В соответствии с результатом исполнения процедуры формируется массив (7), элементы которого содержат: 0 – если агрегат свободен; -1 – если агрегат занят на простой или ремонт; номер заказа – если в данную минуту смены на этом агрегате выполняется заказ.

На основе результирующего массива производятся выборки по требованию заказчика и формируются диаграммы динамики заказов и отчетные формы.

Учет наличия незавершенной продукции выполняется в автоматизированном режиме по результатам сравнения технологических карт. Включение незавершенной продукции в шкалу текущего заказа производится на стадии остановки производства НЗП. Визуализация массивов по требованиям предприятия осуществляется программными модулями последнего раздела.

2. Описание условий опытной эксплуатации программного обеспечения оперативного календарного планирования

Опытная эксплуатация программного обеспечения для автоматизации процесса оперативного календарного планирования выполнялась в условиях металлургического предприятия на примере функционирования цеха по производству ленты холодного проката. Существующая многостадийная структура производства ленты усложняет процесс планирования с учетом многостадийности и формирования массива НЗП. Для получения готовой продукции полуфабрикат проходит несколько стадий обработки. Технологическая карта обработки изделия, в соответствии с указанными требованиями, имеет различное количество этапов, которые могут повторяться. Например:

- при производстве ленты толщиной 2,0–3,5 мм из подката стали марки 2ПС толщиной 3,5 мм по технологической карте 76 используется только продольная резка в размер и упаковка – 2 этапа без повторения;

- при производстве ленты толщиной 0,2–0,22 мм из подката стали марки 08Ю толщиной 2,5 мм по технологической карте 18А полуфабрикат проходит двукратный нагрев и прокат, исключая операции оцинкования, и процедуру упаковки – $2 \times 2 + 1 = 5$ этапов с итерациями.

Принципиальная схема технологической линии производства ленты холодного проката без привязки к плану цеха представлена на рис. 6.

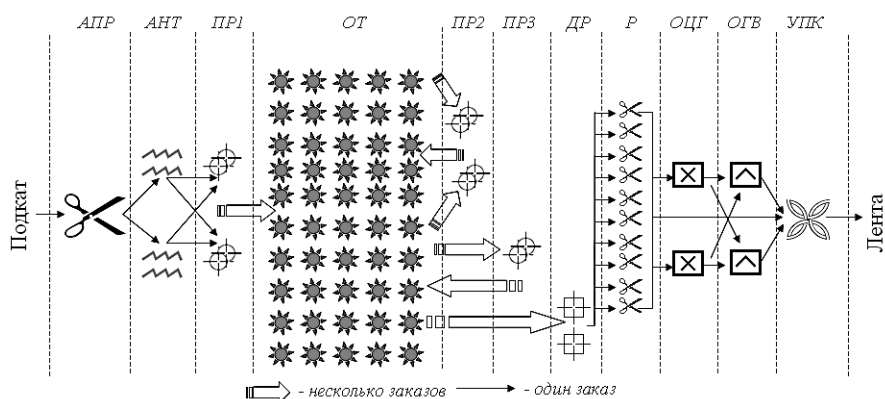


Рис. 6. Схема производства ленты холодного проката

Обозначения, использованные на рис. 6, приведены в таблице.

Таблица

Обозначения на схеме производства ленты холодного проката

Обозначение	Полное название оборудования	Количество агрегатов, шт
АПР	Агрегат продольной резки	1
АНТ	Агрегат непрерывного травления	2
ПР1	Непрерывный четырехклетевой стан	2
ОТ	Электропечь СКБ-6001	50
ПР2	Реверсивный двенадцативалковый стан	2
ПР3	Реверсивный двенадцативалковый стан	1
ДР	Одноклетевой стан № 9 «Кварто»	2
Р	Ножницы НА-401	10
ОЦГ	Линия горячего оцинкования	2
ОГВ	Линия гальванического оцинкования	2
УПК	Упаковка	1

Вид готовой продукции (ленты холодного проката после упаковки) представлен на рис. 7.

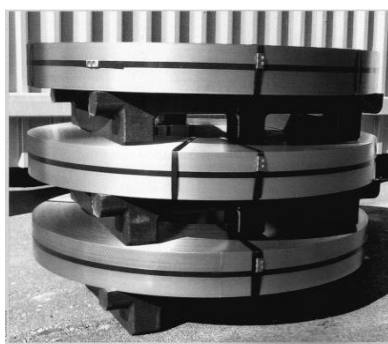


Рис. 7. Вид готовой продукции – ленты холодного проката после упаковки

3. Результаты опытной эксплуатации программного продукта в системе автоматизации оперативного календарного планирования

Для условий производства ленты холодного проката получены следующие результаты:

- структурирование нормативно-справочной информации (см. рис. 8).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
Ресурсные простои и ремонты основного технологического оборудования																					
		Календарный период (сутки)																			
		Дата		1		2		3		4		5		6		7		8		9	
№ п/п	Наименование оборудования	Короткое название	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I
5	1 АПР (агрегат производной резки)	АПР			420										240						
6	2 АИТ-1 (серия интегрального управления)	АИТ																			
7	3 АИТ-2	АИТ																			
8	4 Испарительный 4-х клетевой ст.	ПР1			420																
9	5 Испарительный 4-х клетевой ст.	ПР1																420			
10	6 Газовый 12-ти выкатной ст.	ПР3															420				
11	7 Реверсивный 20-ти выкатной ст.	ПР2																	420		
12	8 НА - 401 (1)	Р																			
13	9 НА - 401 (2)	Р																			
14	10 НА - 401 (3)	Р															300				
15	11 НА - 401 (4)	Р																	300		

a

A	B	C	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GG	GH	GI	GJ	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO	IP	IQ	IR	IS	IT	IU	IV	IW	IX	IY	IZ	JA	JB	JC	JD	JE	JF	JG	JH	JI	IJ	JK	KL	KM	KN	KO	KP	KQ	KR	KS	KT	KU	KV	KW	KX	KY	KZ	LA	LB	LC	LD	LE	LF	LG	LH	LI	LJ	LK	LM	LN	LO	LP	LQ	LR	LS	LT	LU	LV	LW	LX	LY	LZ	MA	MB	MC	MD	ME	MF	MG	MH	MI	MJ	MK	ML	MM	MN	MO	MP	MQ	MR	MS	MT	MU	MV	MW	MX	MY	MZ	NA	NB	NC	ND	NE	NF	NG	NH	NI	NJ	NK	NL	NO	NP	NQ	NR	NS	NT	NU	NV	NW	NX	NY	NZ	OA	OB	OC	OD	OE	OF	OG	OH	OI	OJ	OK	OL	OM	ON	OO	OP	OQ	OR	OS	OT	OU	OV	OW	OX	OY	OZ	PA	PB	PC	PD	PE	PF	PG	PH	PI	PJ	PK	PL	PM	PN	PO	PP	PQ	PR	PS	PT	PU	PV	PW	PX	PY	PZ	QA	QB	QC	QD	QE	QF	QG	QH	QI	QJ	QK	QL	QM	QN	QO	QP	QQ	QR	QS	QT	QU	QV	QW	QX	QY	QZ	RA	RB	RC	RD	RE	RF	RG	RH	RI	RJ	RK	RL	RM	RN	RO	RP	RQ	RR	RS	RT	RU	RV	RW	RX	RY	RZ	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG	SH	SI	SJ	SK	SL	SM	SN	SO	SP	SQ	SR	SS	ST	SU	SV	SW	SX	SY	SZ	TA	TB	TC	TD	TE	TF	TG	TH	TI	TJ	TK	TL	TM	TN	TO	TP	TQ	TR	TS	TT	TU	TV	TW	TX	TY	TZ	UA	UB	UC	UD	UE	UF	UG	UH	UI	UJ	UK	UL	UM	UN	UO	UP	UQ	UR	US	UT	UU	UV	UW	UX	UY	UZ	VA	VB	VC	VD	VE	VF	VG	VH	VI	VJ	VK	VL	VM	VN	VO	VP	VQ	VR	VS	VT	VU	VV	VW	VX	VY	VZ	WA	WB	WC	WD	WE	WF	WG	WH	WI	WJ	WK	WL	WM	WN	WO	WP	WQ	WR	WS	WT	WU	WV	WW	WX	WY	WZ	XA	XB	XC	XD	XE	XF	XG	XH	XI	XJ	XK	XL	XM	XN	XO	XP	XQ	XR	XS	XT	XU	XV	XW	XX	XY	XZ	YA	YB	YC	YD	YE	YF	YG	YH	YI	YJ	YK	YL	YM	YN	YO	YP	YQ	YR	YS	YT	YU	YV	YW	YX	YY	YZ	ZA	ZB	ZC	ZD	ZE	ZF	ZG	ZH	ZI	ZJ	ZK	ZL	ZM	ZN	ZO	ZP	ZQ	ZR	ZS	ZT	ZU	ZV	ZW	ZX	ZY	ZZ																																													
Внутрисменная структура рабочего времени и регламентированных простоев основного технологического																																																					Час работы смены																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
№	Участок цеха/оборудование	Виды работ	Доля от общего числа работ по данной структуре	Единицы измерения	1		2		3		4		5		6		7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
4	АТР	I	I	мех.	60	15	45			15	10	35		25	10	25		35	10	15		21	39		51	9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	</

6

[illegible]

B

Рис. 8. Представление нормативно-справочной структурированной информации:

- а – информация о регламентированных простоях;
- б – информация о внутрисменной структуре работы оборудования;
- в – информация о длительности технологических процессов на каждой стадии

На рис. 8 введены следующие обозначения: 1 – перечень агрегатов производственного цеха; 2 – перечень рабочих смен в календаре; 3 – область для определения плановых простоев оборудования; 4 – сокращенное название оборудования; 5 – поминутный режим работы или простоя оборудования по часам в смене; 6 – параметры изделия по заказу; 7 – продолжительность обработки на типовом агрегате; 8 – периоды обработки полуфабриката на типовом агрегате;

- модуль автоматизации оперативного календарного планирования производства ленты холодного проката по поступившим заказам с учетом наличия незавершенной продукции (см. рис. 9).

Рис. 9. Вид рабочей формы для определения заказов на заданный период

На рис. 9 использованы такие обозначения, как: 1 – область задания календарной даты; 2 – область задания параметров по заказу; 3 – перечень распределяемых заказов на выполнение; 4 – перечень необходимых агрегатов с параметрами работы; 5 – область распределения заказов по агрегатам согласно новому алгоритму; – визуализация диаграммы временных шкал агрегатов по минутам рабочей смены (см. рис. 10).

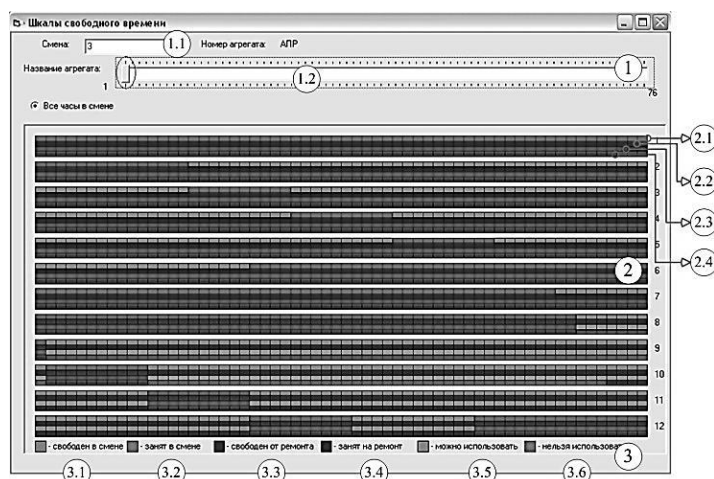


Рис. 10. Четырехлинейная диаграмма шкалы свободного времени агрегатов по минутам рабочей смены

На рис. 10 введены следующие обозначения: 1 – область выбора агрегата и временного периода шкалы (1.1 – блок выбора рабочей смены; 1.2 – блок выбора агрегата); 2 – шкалы свободного времени по модели (1)–(3) (2.1 – занятость на регламенти-

рованный простой; 2.2 – занятость на внутрисменные простои; 2.3 – шкала свободного времени; 2.4 – шкала свободного времени от всех видов простоя); 3 – блок легенды для объяснения шкалы свободного времени (3.1 – агрегат свободен по времени; 3.2 – агрегат занят в смене; 3.3 – агрегат свободен от ремонта в смене; 3.4 – агрегат занят на ремонт; 3.5 – агрегат можно использовать; 3.6 – агрегат нельзя использовать);

– итоги планирования позиций заказа и заказа в целом (см. рис. 11).

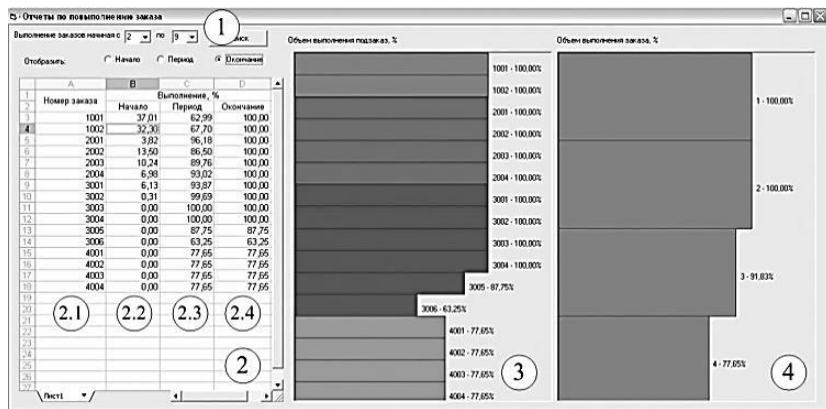


Рис. 11. Вид диаграммы для оценки выполнения заказов на конец заданного периода

На рис. 11 использованы такие обозначения, как: 1 – поля выбора начала и окончания периода; 2 – цифровой блок по объему выполнения подзаказов (2.1 – номер подзаказа; 2.2 – доля выполнения подзаказа на начало периода, %; 2.3 – доля задания на выполнение за период, %; 2.4 – доля выполнения подзаказа на конец выбранного периода, %); 3 – диаграмма визуализации выполнения подзаказа на конец периода, %; 4 – доля выполнения заказа на конец периода, %.

Кроме того, представленный модуль позволяет выполнять визуализацию загрузки оборудования в виде столбчатых диаграмм по часам, ранние и поздние сроки исполнения заказов, движение незавершенной продукции. Расширение функционала по визуализации результатов планирования осуществлялось по требованию заказчика.

Квантификация пользовательского интерфейса для пилотной версии по модели GOMS показала следующие временные затраты: на подготовку нормативно-справочной информации – 6 мин; на формирование одного заказа в перечне для заданного периода с учетом ментальной подготовки пользователя – 2 мин; на автоматизированное распределение 20 заказов на период рабочей недели – 5 мин.

Выводы

Результаты опытной эксплуатации разработанной системы автоматизированного оперативно-календарного планирования в условиях действующего производства ленты холодного проката продемонстрировали следующее:

– наличие возможности формализации, структурирования и упорядоченности нормативно-справочной информации для ее интегрирования в корпоративную ин-

формационную систему предприятия, совершающего переход к использованию технологий умного производства;

- наличие возможности сокращения времени оперативного календарного планирования производства с учетом накопленного опыта технологов в виде интеллектуальных технологических карт производства продукции, при изготовлении которой используется массив незавершенного продукта;

- сокращение объемов незавершенного продукта на складах производственного участка на 30 %;

- сокращение простоев оборудования на 7 % за счет полной и точной информации о загрузке оборудования на каждой стадии производства продукции.

Затраты на проектирование, разработку и интеграцию системы автоматизированного оперативного календарного планирования в действующую корпоративную информационную систему окупаются за 856 дней.

Перспективным направлением работы является расширение математической модели в направлении снятия количества ограничений на многоэтапность обработки, перехода к многокритериальной задаче планирования, возможности встраивания срочных заказов в действующий оперативный план, визуализации траектории движения продукции при переходе между агрегатами.

Список литературы

Быстров М. И. Планирование производства в корпоративной информационной системе и задача объемно-календарного планирования // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2005. – № 14. – С. 135–141.

Евланников Д. Л. Инженерный подход к календарному планированию этапа комплексной отладки программного обеспечения информационно-управляющих систем // Системы управления и обработки информации. – 2016. – Вып. 1 (32). – С. 66–73.

Мищенко В. Я., Емельянов Д. И., Тихоненко А. А. Разработка методики оптимизации распределения ресурсов в календарном планировании строительства на основе генетических алгоритмов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 11. – С. 76–78.

Beemsterboer B., Land M., Teunter R. Hybrid MTO-MTS production planning: An explorative study // European Journal of Operational Research. – 2016. – Vol. 248 (2). – P. 453–461.

Graham G. Smart Cities and Operations Management // Production Planning & Control. – 2016. – Vol. 27 (6). – P. 431–432.

Holzapfel A., Hübner A., Kuhn H., Sternbeck M. G. Delivery pattern and transportation planning in grocery retailing // European Journal of Operational Research. – 2016. – Vol. 252 (1). – P. 54–68.

Ishmetyev E. N., Logunova O. S., Volshchukov Y. N., Makashov P. L., Barankov V. V., Filipov E. G. On the aspect of implementing solutions for information support of industrial plant control systems // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – № 5–8. – P. 1779–1791.

Jeon S. M., Kim G. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC) // Production Planning & Control. The Management of Operations. – 2016. – Vol. 27. – Iss. 5. – P. 360–377. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1128010>.

Logunova O. S., Matsko I. I., Posochov I. A. Integrated system structure of intelligent management support of multistage metallurgical processes // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical

University. – 2013. – № 5 (45). – P. 50–55.

Logunova O. S., Matsko I. I., Posohov I. A., Luk'ynov S. I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 74. – № 9–12. – P. 1407–1418.

Operational Research for Emergency Planning in Healthcare / edited by M. Navonil. – London: Palgrave Macmillan, 2016. – Vol. 1. – 378 p. <http://dx.doi.org/10.1057/9781137535696>.

Vijaya Sunder M. Rejects reduction in a retail bank using Lean Six Sigma // *Production Planning & Control*. – 2016. – Vol. 27 (14). – P. 1–12.

References

Bystrov M. I. Planirovanie proizvodstva v korporativnoi informatsionnoi sisteme i zadacha ob"emno-kalendarного планирования [Production planning within the corporate information system and scheduling problem]. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* [Vestnik of the Volga State Academy of Water Transport], 2005, no. 14, pp. 135–141.

Evlannikov D. L. Inzhenernyi podkhod k kalendarному планированию etapa kompleksnoi otdadki programmного obесpecheniia informatsionno-upravliaiushchikh sistem [Engineering approach to scheduling of the stage of complex software debugging for information and control systems]. *Sistemy upravleniia i obrabotki informatsii* [Information management and processing systems], 2016, iss. 1 (32), pp. 66–73.

Mishchenko V. Ia., Emel'ianov D. I., Tikhonenko A. A. Razrabotka metodiki optimizatsii raspredeleniia resursov v kalendarном планировании stroitel'stva na osnove geneticheskikh algoritmov [Development of methods for optimization of resource allocation in scheduling of construction on the basis of genetic algorithms]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2013, no. 11, pp. 76–78.

Beemsterboer B., Land M., Teunter R. Hybrid MTO-MTS production planning: An explorative study. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 248 (2), pp. 453–461.

Graham G. Smart Cities and Operations Management. *Production Planning & Control*, 2016, vol. 27 (6), pp. 431–432.

Holzapfel A., Hübner A., Kuhn H., Sternbeck M. G. Delivery pattern and transportation planning in grocery retailing. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 252 (1), pp. 54–68.

Ishmetyev E. N., Logunova O. S., Volshchukov Y. N., Makashov P. L., Barankov V. V., Filipov E. G. On the aspect of implementing solutions for information support of industrial plant control systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 85, no. 5–8, pp. 1779–1791.

Jeon S. M., Kim G. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). *Production Planning & Control. The Management of Operations*, 2016, vol. 27, iss. 5, pp. 360–377. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1128010>.

Logunova O. S., Matsko I. I., Posohov I. A. Integrated system structure of intelligent management support of multistage metallurgical processes. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2013, no. 5 (45), pp. 50–55.

Logunova O. S., Matsko I. I., Posohov I. A., Luk'ynov S. I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, no. 9–12, pp. 1407–1418.

Operational Research for Emergency Planning in Healthcare; ed. by M. Navonil. London: Palgrave Macmillan, 2016, vol. 1. 378 p. <http://dx.doi.org/10.1057/9781137535696>.

Vijaya Sunder M. Rejects reduction in a retail bank using Lean Six Sigma. *Production Planning & Control*, 2016, vol. 27 (14), pp. 1–12.

Для цитирования: Логунова О. С., Аркулис М. Б. Автоматизированная система оперативного календарного планирования многостадийного производства: математическая модель и программная реализация // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 3 (102). – С. 18–37. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-3-102-2>

For citation: Logunova O. S., Arkulis M. B. Automated operational scheduling system for multi-stage production: mathematical model and software implementation. *Cherepovets State University Bulletin*, 2021, no. 3 (102), pp. 18–37. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-3-102-2>

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Сведения об авторах

Оксана Сергеевна Логунова /
Oxana S. Logunova

Доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, logunova66@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Россия) / Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, logunova66@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russia).

Михаил Борисович Аркулис /
Mikhail B. Arkulis

Кандидат педагогических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-1140-7159>, arkulis78@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Россия) / Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1140-7159>, arkulis78@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russia).

Статья поступила в редакцию 25.02.2021; Одобрена после рецензирования 24.03.2021; Принята к публикации 30.03.2021.

The article was submitted 25.02.2021; Approved after reviewing 24.03.2021; Accepted for publication 30.03.2021.