



УДК 519.876.2

DOI 10.17073/0368-0797-2025-2-188-194



Оригинальная статья

Original article

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

А. В. Зимин¹, М. Е. Корнет², И. В. Буркова³, В. В. Зимин¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

³ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65)

✉ marya.kornet@gmail.com

Аннотация. На примере формализованного описания работы конвертерного производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» в составе двух конвертерных цехов с двумя и тремя агрегатами показано, что вопросы планирования объемов производства и ремонтов металлургических агрегатов, построения сквозных графиков работы агрегатов являются сложными и многофакторными задачами, которые характеризуются дискретностью и нелинейностью описывающих их функционалов. Формализация задач оптимизации производственных процессов с заданными ограничениями и критериями показала, что особенности исследуемого процесса функционирования конвертерного производства делают практически невозможными построение и использование аналитических решений. Выбранный авторами подход к решению (с учетом указанных обстоятельств) базируется на использовании цифровой дискретно-событийной имитационной модели. Такая имитационная модель представляет собой цифровую копию исследуемого процесса функционирования конвертерного производства, отражает его структуру, производительность, техническое состояние и такие параметры, как длительность кампании конвертеров, длительность ремонтных периодов и др. Модель использует различные механизмы управления для решения задач распределения входного потока чугуна между конвертерными цехами, формирования календарных графиков работы отдельных конвертеров и их ремонтов; накапливает информацию в ходе производственного процесса для целей оптимизации и прогнозирования результатов процесса функционирования; позволяет собирать данные о процессе функционирования конвертерного производства и использовать инструменты предиктивной аналитики для планирования ремонтов; предоставляет данные, которые невозможно получить непосредственно на физическом объекте и которые могут быть использованы для оптимизации параметров системы; формирует наборы данных для визуализации отдельных результатов процесса функционирования.

Ключевые слова: конвертерное производство, нормативная и текущая длительность кампании, график работы и ремонтов конвертеров, проектная схема работы цеха, дискретная и нелинейная задача, цифровая имитационная модель, компьютерное моделирование, численное решение

Для цитирования: Зимин А.В., Корнет М.Е., Буркова И.В., Зимин В.В. Использование цифровых имитационных моделей для оптимизации работы сложных производственных объектов. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(2):188–194.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-188-194>

USING DIGITAL SIMULATION MODELS TO OPTIMIZE THE OPERATION OF COMPLEX PRODUCTION FACILITIES

A. V. Zimin¹, M. E. Kornet², I. V. Burkova³, V. V. Zimin¹

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

³ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences (65 Profsoyuznaya Str., Moscow 117997, Russian Federation)

✉ marya.kornet@gmail.com

Abstract. Using the example of formalized description of the converter production at JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Plant consisting of two converter shops with two and three units, it is shown that the issues of planning production volumes and repairs of metallurgical units, building

end-to-end schedules of units are complex and multifactorial tasks characterized by the discreteness and non-linearity of the functions describing them. The formalization of the tasks of optimizing production processes with specified constraints and criteria showed that features of the studied process of converter production make it almost impossible to build and use analytical solutions. The approach chosen by the authors to the solution (taking into account these circumstances) is based on the use of a digital discrete event simulation model. Such a model is a digital copy of the investigated process of converter production, reflects its structure, performance, technical condition and parameters: duration of converter campaign, duration of repair periods, etc. The model uses various control mechanisms to solve the problems of distributing the input flow of cast iron between converter shops, forming schedules for the operation of individual converters and their repairs, accumulates information as it functions for the purpose of optimizing and predicting the results of the operation process. It allows one to collect data on the operation of converter production and use predictive analytics tools to plan repairs, provides data that cannot be obtained directly on a physical object and which can be used to optimize system parameters, and generates datasets for visualizing individual results of the operation process.

Keywords: converter production, regulatory and current duration of campaign, schedule of operation and repairs of converters, design scheme of shop operation, discrete and nonlinear task, digital simulation model, computer modeling, numerical solution

For citation: Zimin A.V., Kornet M.E., Burkova I.V., Zimin V.V. Using digital simulation models to optimize the operation of complex production facilities. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(2):188–194. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-188-194>

ВВЕДЕНИЕ

Задачи планирования ремонтов и календарных графиков работы конвертеров сталеплавильного производства металлургического комбината имеют существенные особенности, что обусловлено дискретностью, нелинейностью и сильной взаимозависимостью задач. Решение таких задач целесообразно получать как комплексный результат решения некоторой общей задачи, не подвергнутой декомпозиции, так как операция декомпозиции при сильных связях не позволяет получать устойчивые и эффективные решения частных задач в силу ограничений, которые накладываются процедурой декомпозиции [1; 2]. Однако получение комплексного решения аналитическими средствами для рассматриваемого объекта планирования представляет большую сложность (если вообще является возможным). В связи с этим авторы исследования приняли решение о построении дискретно-событийной цифровой имитационной модели процесса функционирования конвертерного производства металлургического комбината с двумя сталеплавильными цехами, включающими, соответственно, два и три конвертера [3 – 5]. Наличие такой модели позволит найти комплексное решение исследуемых задач.

ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ И СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Базовое представление имитационной модели создано для промышленных изделий, где имела место четкая связь имитационной модели с изделием на всех стадиях его жизненного цикла от создания до утилизации. По мере развития этот подход был распространен на производственные процессы [6 – 8]. Развитие представлений об имитационной модели, согласно приведенной в работе [3] схеме, проходит четыре стадии:

- 1 – физические объекты (изделия) создаются без имитационной модели (без цифрового прототипа);
- 2 – имитационная модель (цифровой прототип) используется только на стадии создания изделия;

3 – присутствует информационный обмен между физическим объектом и цифровой моделью;

4 – физический объект и цифровая модель взаимодействуют в реальном времени, обеспечивая информацией процессы совершенствования как физического объекта, так и цифровой модели.

Концепция взаимодействия физического изделия (процесса) реального мира и его цифровой модели виртуального пространства, а также наличие информационной связи между ними, объединяющей виртуальный и материальный миры, отображает идею цифрового двойника [9 – 11].

В соответствии с приведенным описанием стадий эволюции цифровых моделей перед исследователями стоит задача построения цифровой модели процесса функционирования конвертерного производства металлургического комбината, соответствующей третьей стадии. На современном этапе общепринятые требования к функционалу цифровой модели исследуемого процесса функционирования конвертерного производства включают:

– отражение структуры производства, производительности и технического состояния агрегатов, длительности кампаний конвертеров, длительности ремонтных периодов и др.;

– применение различных механизмов управления для решения задач распределения входного потока чугуна между конвертерными цехами для формирования календарных графиков работы отдельных конвертеров и их ремонтов;

– накопление информации по мере использования модели для целей оптимизации и прогнозирования результатов процесса функционирования;

– сбор данных о процессе функционирования конвертерного производства и применение инструментов предиктивной аналитики для планирования работы и ремонтов конвертеров;

– формирование данных, которые невозможно получить непосредственно на физическом объекте и которые могут быть использованы для оптимизации параметров процесса функционирования конвертерного производства;

– визуализацию результатов процесса функционирования цифровой модели [12 – 14].

Виртуальную часть цифрового двойника представляют в виде двух составляющих: цифрового мастера и цифровой тени. Цифровой мастер содержит информацию, достаточную для построения моделируемого процесса. Цифровая тень – это набор данных, которые функционирующий физический объект (процесс) «отбрасывает» в виртуальное пространство, и модели, позволяющие прогнозировать свойства процесса в определенных пределах [15 – 17].

ЭЛЕМЕНТЫ ФОРМАЛИЗОВАННОГО ОПИСАНИЯ

ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Основные понятия и обозначения. Обозначим через $O = \{O_I, O_{II}\}$ сталеплавильное производство, включающее два цеха. Причем $O_I = \{o_1, o_2, o_3\}$ и $O_{II} = \{o_4, o_5\}$, то есть в первом цехе функционирует три конвертера одного типоразмера, а во втором – два однотипных агрегата. В качестве интервала исследуемых задач планирования выберем последовательность $(T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_p)$ из p месяцев, $T_j = (\Delta t_l | l = \overline{1, L_j})$ (где L_j – количество суток в j -ом месяце). Причем каждый конвертер представляет собой дискретный агрегат циклического действия. При описании конвертера кортеж $o_i = (f_i, \rho_i, g_i, K_i, k_{ij}^b, r_i)$, (где f_i – производство стали, выплавленной агрегатом за один цикл, т; ρ_i – расходный коэффициент, описывающий потребность в чугуне g_i для выплавки одной тонны стали ($g_i = f_i \rho_i$, $\rho < 1$); K_i – нормативная длительность кампании конвертера (количество плавов, которые должен провести агрегат на одной футеровке от одного холодного ремонта до последующего); k_{ij}^b – количество плавов, выплавленных i -ым конвертером на начало j -го периода планирования; r_{iv} , $v = 1, 2, \dots$ – длительности (в сутках) остановок (ремонт/ожидание) i -го конвертера. Тогда в силу однотипности конвертеров в каждом цехе можно представить равенства:

$$\begin{aligned} f_i &= f_I, i = \overline{1, 3}; \quad \rho_i = \rho_I, i = \overline{1, 3}; \\ g_i &= g_I; \quad K_i = K_I, i = \overline{1, 3}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} f_i &= f_{II}, i = \overline{4, 5}; \quad \rho_i = \rho_{II}, i = \overline{4, 5}; \\ g_i &= g_{II}; \quad K_i = K_{II}, i = \overline{4, 5}. \end{aligned} \quad (2)$$

Обозначим через $m_{ij}(\Delta t_l)$, $m_{ij}(\Delta t_l)$, $m_{ij}(\Delta t_l)$ количество плавов, выпускаемых конвертером i , цехами O_I и O_{II} соответственно в l -ые сутки j -го периода. Очевидно, что

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 m_{ij}(\Delta t_l) &= m_{ij}(\Delta t_l); \\ \sum_{i=4}^5 m_{ij}(\Delta t_l) &= m_{ij}(\Delta t_l). \end{aligned} \quad (3)$$

Под календарным планом работы i -го конвертера в j -ом месяце будем понимать последовательность

$$(m_{ij}(\Delta t_l) | l = \overline{1, L_j}). \quad (4)$$

Если l является днем ремонта конвертера или нахождения его в резерве, то $m_{ij}(\Delta t_l) = 0$.

Введем функцию $k_{ij}(l)$, описывающую количество плавов, выпущенных i -ым конвертером от начала кампании до l -ых суток j -го периода включительно. Значения данной функции будут ограничены величинами нормативной длительности кампаний конвертеров

$$k_{ij}(l) \leq \begin{cases} K_I, & i = \overline{1, 3}, \\ K_{II}, & i = \overline{4, 5}. \end{cases} \quad (5)$$

Обозначим через k_{ij}^b количество плавов, проведенных i -ым конвертером на начало j -го периода планирования. Тогда, с учетом условия (4), количество плавов k_{ij}^e , выпущенных i -ым конвертером на конец j -го планового периода, можно представить как

$$k_{ij}^e = k_{ij}^b + \sum_{l=1}^{s_j} m_i(\Delta t_{s_j}), \quad (6)$$

при этом $k_{ij}^e = k_{ij+1}^n$.

Структурные ограничения на функционирование конвертеров в цехах. При реализации конвертером календарного плана работы (4), значение функции будет возрастать на величину $m_{ij}(\Delta t_l)$ каждые последующие сутки $[k_{ij}(l) = k_{ij}(l-1) + m_{ij}(\Delta t_l)]$, пока ее значение не достигнет величины нормативной длительности кампании конвертера. Функция $k_{ij}(l)$ имеет «пилообразный» вид, размер основания «зуба пилы» зависит от календарного плана работы конвертера и может охватывать несколько периодов планирования. При достижении максимума функция сохраняет это значение до окончания ремонта конвертера. При выходе из ремонта (нахождении конвертера в резерве) функция равна нулю. Колебания функции $k_{ij}(l)$ являются регулярными, но не имеют фиксированного периода.

Проектные решения для первого цеха предписывают схему работы конвертеров, представленную на рис. 1. Эта схема не допускает одновременной работы трех конвертеров, а предполагает постоянную работу двух агрегатов при условии, что третий находится на ремонте или в резерве. Определим состояние $s_{ij}(l)$ i -го конвертера первого цеха в l -ые сутки j -го периода следующим образом:

$$s_{ij}(l) = \begin{cases} wr, & 0 \leq k_{ij}(l) \leq K; \\ rm, & k_{ij}(l) = K; \\ rz, & k_{ij}(l) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

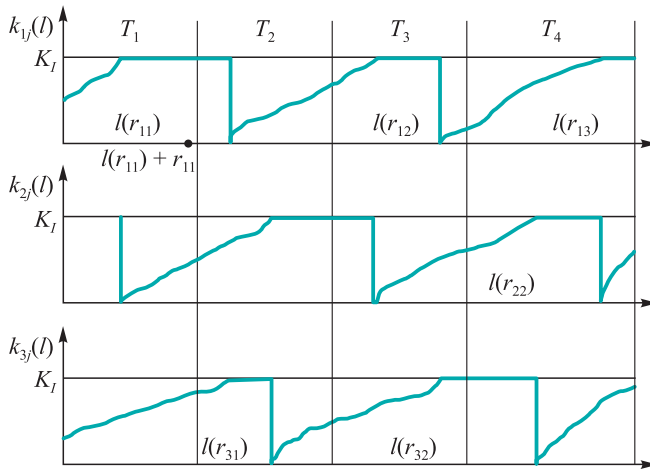


Рис. 1. Проектная схема работы конвертеров первого цеха

Fig. 1. Design operation scheme of converters of Shop 1

Описание смены состояний конвертеров при работе на интервале времени от $l(r_{11})$ до $l(r_{31})$ (рис. 1) показано в таблице.

Проектные решения и система организации ремонтов во втором цехе не допускают выполнения в одном плановом периоде более одного холодного ремонта. На рис. 2 представлены допустимая и недопустимая схемы работы конвертеров второго цеха.

Заметим, что для максимальной удаленности ремонтов конвертеров 4 и 5, выраженной в количестве выпускаемых плавов, абсолютная разность значений функций $k_4(l)$ и $k_5(l)$ должна быть максимально возможной. Максимум абсолютной разности функций $k_4(l)$ и $k_5(l)$ составляет величину $K/2$ (рис. 3). Это условие максимальной удаленности имеет место и для первого цеха, так как согласно проектной схеме работы конвертеров в каждые сутки работают два агрегата из трех.

Количественные ограничения на работу конвертеров. На совместную работу агрегатов в цехах накладываются технологические ограничения, определяющие диапазон изменения количества плавов в сутки в каждом цехе при одном или двух одновременно работающих конвертерах:

$$\underline{m}_I^1 \leq m_{ij}(\Delta t_I) \leq \overline{m}_I^1, \quad i = \overline{1,3}, j = \overline{1,P}; \quad (8)$$

$$\underline{m}_{II}^1 \leq m_{ij}(\Delta t_I) \leq \overline{m}_{II}^1, \quad i = \overline{4,5}, j = \overline{1,P}; \quad (9)$$

Порядок работы конвертеров цеха 1

Operating procedure of converters of Shop 1

$i \backslash l$	$(l(r_{11}), l(r_{11}) + r_{11})$	$(l(r_{11}) + r_{11}, l(r_{31}))$
$s_{ij}(l)$	rm	rz
$s_{ij}(l)$	wr	wr
$s_{ij}(l)$	wr	wr

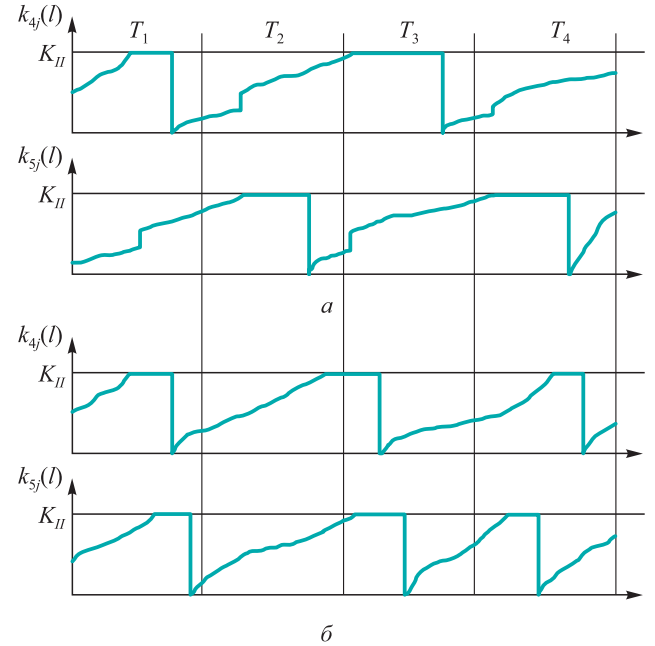


Рис. 2. Допустимая (а) и недопустимая (б) схемы работы конвертеров 4 и 5 (на поз. а в интервалах планирования T_1, T_3 и T_4 выполняются по два ремонта)

Fig. 2. Permissible (a) and unacceptable (b) operating schemes of converters 4 and 5 (in pos. a in the planning intervals T_1, T_3 and T_4 , two repairs are performed)

$$2\underline{m}_I^1 \leq [m_{ij}(\Delta t_I) + m_{i'j}(\Delta t_I)] \leq 2\overline{m}_I^1; \quad (10)$$

$$i \neq i', \quad i, i' = \overline{1,3}, j = \overline{1,P};$$

$$2\underline{m}_{II}^1 \leq [m_{4j}(\Delta t_I) + m_{5j}(\Delta t_I)] \leq 2\overline{m}_{II}^1, \quad j = \overline{1,P}, \quad (11)$$

здесь $\underline{m}_I^1, \overline{m}_I^1, \underline{m}_{II}^1, \overline{m}_{II}^1, 2\underline{m}_I^1, 2\overline{m}_I^1, 2\underline{m}_{II}^1, 2\overline{m}_{II}^1$ – минимальное и максимальное количество плавов, выпускаемых

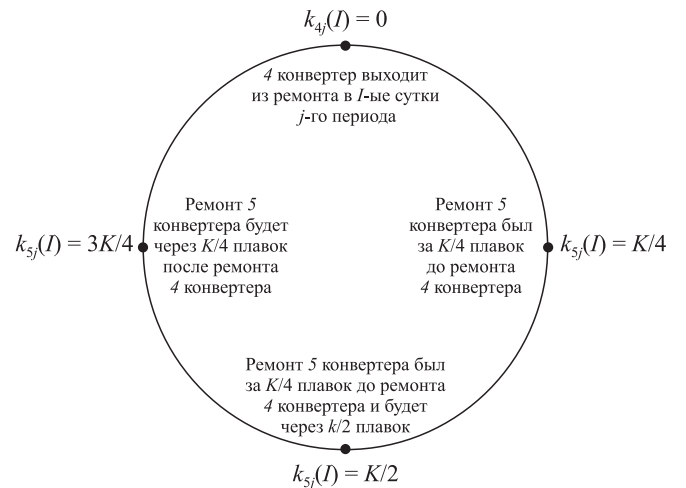


Рис. 3. Зависимость абсолютной разности $|k_4(l) - k_5(l)|$ от значений функций $k_4(l)$ и $k_5(l)$

Fig. 3. Dependence of the absolute difference $|k_4(l) - k_5(l)|$ on values of the functions $k_4(l)$ and $k_5(l)$

в первом и втором цехах при работе одним конвертером, а также минимальное и максимальное количество плавов, выпускаемых в цехах при работе двумя конвертерами соответственно. Заметим, что $2\overline{m}_{II}^1 < \overline{m}_I^1$ и $2\overline{m}_{II}^1 < \overline{m}_{II}^1$, так как в противном случае количества плавов в диапазонах от $\overline{m}_I^1$ до $2\overline{m}_I^1$ и от $\overline{m}_{II}^1$ до $2\overline{m}_{II}^1$ цех не может произвести, что не соответствует действительности. Работа тремя конвертерами в первом цехе технологически не реализуема.

Таким образом, первый цех, который, согласно проектным решениям, должен постоянно работать двумя конвертерами, может производить от $2\overline{m}_I^1$ до $2\overline{m}_{II}^1$ плавов, причем каждый из агрегатов может выпускать от $\overline{m}_I^1$ до $\overline{m}_I^1$ плавов. Второй цех в диапазоне от $\overline{m}_{II}^1$ до $2\overline{m}_{II}^1$ плавов может работать только одним конвертером (режим работы 1), в диапазоне от $2\overline{m}_{II}^1$ до $\overline{m}_{II}^1$ – как одним, так и двумя конвертерами (режим работы 2), а в диапазоне от $\overline{m}_{II}^1$ до $2\overline{m}_{II}^1$ – только двумя конвертерами (режим работы 3) (рис. 4).

Определение объемов суточного необходимого производства чугуна доменным цехом. Чугун, являющийся основной составляющей металлозавалки конвертеров, производится тремя доменными печами (агрегатами непрерывного действия). Будем описывать каждую доменную печь объемами среднего суточного производства чугуна $g_q(\Delta t)$ на полном ходу (зависит от объема доменной печи), объемом $g_q(\Delta t)/2$ производства на тихом ходу (при возможном выполнении планово-предупредительных ремонтов), графиком $[r_q = \Delta t | l = (\overline{l}_{qj}^b, \overline{l}_{qj}^e)]$ ее капитального ремонта (выполняется раз в 4–5 лет), а также графиком $r_{qj}^{nnp} = (l_{qj}^1, \dots, l_{qj}^v)$ планово-предупредительных ремонтов в j -ом периоде, длительность которых, как правило, не превышает 12 ч (здесь $q = 1, 3$ – номер доменной печи; $\overline{l}_{qj}^b, \overline{l}_{qj}^e$ – сутки начала и окончания капитального ремонта соответственно; v – количество планово-предупредительных ремонтов в j -ом периоде).

Обозначим через $g_{qj}(\Delta t_l)$ планируемое производство чугуна для q -ой доменной печи в l -ые сутки j -ого периода

$$g_{qj}(\Delta t_l) = \begin{cases} g_q(\Delta t), l \in (\overline{l}_{qj}^b, \overline{l}_{qj}^e); \\ 0, l \in (\overline{l}_{qj}^b, \overline{l}_{qj}^e); \\ \frac{g_q(\Delta t)}{2}, l \in (l_{qj}^1, \dots, l_{qj}^v). \end{cases} \quad (12)$$

Очевидно, общий объем производства чугуна в l -ые сутки составит

$$g_j(\Delta t_l) = \sum_{q=1}^3 g_{qj}(\Delta t_l), l = \overline{1}, \overline{L}_j. \quad (13)$$

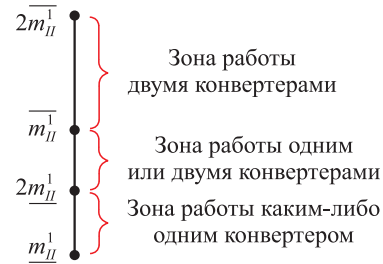


Рис. 4. Диапазоны режимов работы конвертеров второго цеха

Fig. 4. Ranges of operating modes of converters of Shop 2

Последовательность $(g_j(\Delta t_l) | l = \overline{1}, \overline{L}_j)$ описывает планируемое посуточное производство чугуна доменным цехом в j -ом периоде. При календарном плане работы конвертеров, задаваемым соотношением (4), должны иметь место равенства

$$g_I \sum_{i=1}^3 m_{ij}(\Delta t_l) + g_{II} \sum_{i=4}^5 m_{ij}(\Delta t_l) = g_j(\Delta t_l), l = \overline{1}, \overline{L}_j. \quad (14)$$

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОДХОД

К ИХ РЕШЕНИЮ

В состав основных прикладных задач, требующих решения с учетом изложенных выше модельных представлений об объекте исследования, входят:

1. формирование графиков $(m_{ij}(\Delta t_l) | l = \overline{1}, \overline{L}_j)$, $(m_{IIj}(\Delta t_l) | l = \overline{1}, \overline{L}_j)$ выпуска плавов конвертерными цехами на основе графика $(g_j(\Delta t_l) | l = \overline{1}, \overline{L}_j)$ производства чугуна для каждого периода j с целью определения месячных плановых заданий цехам;
2. формирование графиков ремонта конвертеров в цехах производства

$$(l_{ij}^n, l_{ij'}^e) \subset \bigcup_{j=1}^P T_j, i = \overline{1}, \overline{5}, v = \overline{1}, \overline{2}, \dots, \quad (15)$$

$$r_v = \begin{cases} l_{ij'}^e - l_{ij}^n, j = j'; \\ L_j - l_{ij}^n + l_{ij'}^e, j \neq j' \end{cases}$$

с целью планирования работы ремонтных служб металлургического комбината;

3. формирование графиков $[(m_{ij}(\Delta t_l) | l = \overline{1}, \overline{L}_j) | i = \overline{1}, \overline{3}]$ и $[(m_{IIj}(\Delta t_l) | l = \overline{1}, \overline{L}_j) | i = \overline{4}, \overline{5}]$ работы конвертерных цехов с целью переработки цехами поступающего из доменного цеха жидкого чугуна.

Таким образом, к основным особенностям исследуемых задач можно отнести дискретность и нелинейность функций, функционалов, операторов, параметров и критериев, описывающих задачи. В частности, в соответствии с рис. 3, одним из предпочтительных при календарном планировании может быть критерий

$$Q = \sum_{j=1}^P \left[\left(|k_{ij}^e - k_{ij'}^e| - 0,5K_I \right) + \left(|k_{4j}^e - k_{5j}^e| - 0,5K_{II} \right) \right] \rightarrow \min, \quad (16)$$

направленный на обеспечение максимальной удаленности ремонтов двух работающих конвертеров (выраженной в количестве выпускаемых плавок). Функционал Q относится к классу дискретных и нелинейных. Дискретность и нелинейность задач затрудняют и делают невозможным построение соответствующих аналитических моделей, позволяющих определять и ранжировать множество допустимых решений.

Таким образом, формализация исследуемых задач показывает, что особенности процесса функционирования конвертерного производства делают затруднительным (или практически невозможным) построение и использование аналитических решений. С учетом этих обстоятельств авторами выбран подход к решению поставленных задач, базирующийся на создании и использовании цифровой дискретно-событийной имитационной модели, которая:

- представляет собой цифровую копию исследуемого процесса функционирования конвертерного производства, отражает его структуру, производительность, техническое состояние и такие параметры, как длительность кампании конвертеров, длительность ремонтных периодов и др.;

- использует различные механизмы управления для решения задач распределения входного потока чугуна между конвертерными цехами, формирования календарных графиков работы отдельных конвертеров и их ремонтов;

- накапливает информацию по мере ее функционирования для целей оптимизации и прогнозирования результатов процесса функционирования;

- позволяет собирать данные о процессе функционирования конвертерного производства и использовать инструменты предиктивной аналитики для планирования ремонтов;

- предоставляет данные, которые невозможно получить непосредственно на физическом объекте и которые могут быть использованы для оптимизации параметров системы;

- формирует наборы данных для визуализации отдельных результатов процесса функционирования [18 – 20].

Выводы

Показаны существенная взаимозависимость, дискретность и нелинейность задач планирования объемов производства, ремонтов и графиков работы конвертеров и обоснована необходимость создания цифровой дискретно-событийной имитационной модели процесса функционирования конвертерного производства металлургического комбината для численного реше-

ния исследуемых задач путем компьютерного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лэсдон Л. Оптимизация больших систем. Москва: Наука; 1975:432.
2. Hamann-Lohmer J., Lasch R. Production planning and scheduling in multi-factory production networks: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*. 2021;59(7):2028–2054. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1797207>
3. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / Научн. ред. проф. А.И. Боровков. Издание первое, исправленное и дополненное. Москва: ООО «АльянсПринт»; 2020:401.
4. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. In: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf. 20th AI. 23–26 April 2012, Honolulu, Hawaii*. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
5. The new age of manufacturing: Digital twin technology & IoT [Electronic resource]. URL: <http://www.innovation4.cn/library/r46394/>. (Accessed: 20.01.2025).
6. Modern manufacturing's triple play: Digital twins, analytics and the internet of things [Electronic resource]. URL: <https://www.nextspace.com/recommended-reading/modern-manufacturings-triple-play-digital-twins-analytics-and-iot>. (Accessed: 20.01.2025).
7. Цифровые двойники в ритейле – кто это такие и почему с ними срочно нужно знакомиться? [Электронный ресурс]. URL: https://new-retail.ru/tehnologii/tsifrovye_dvoyniki_v_riteyle_kto_eto_takie_i_pochemu_s_nimi_srochno_nuzhno_znakomitsya5533/?ysclid=m8ajyzvqlj502045804. (Дата обращения: 20.01.2025).
8. «15 ключевых компонентов современного производства» (Сайт Nanonews.net) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nanonewsnet.ru/articles/2017/15-klyuchevykh-komponentov-sovremennogo-proizvodstva>. (Дата обращения: 20.01.2025).
9. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности [Электронный ресурс]. URL: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti>. (Дата обращения: 20.01.2025).
10. Ключевые инструменты и форматы развития цифровой экономики: «умные» цифровые двойники и Центр НТИ СПбПУ [Электронный ресурс]. URL: <https://nticenter.spbstu.ru/news/6722>. (Дата обращения: 20.01.2025).
11. UK team to develop rapid virtual testing technique for manufactured components [Electronic resource]. URL: <https://www.theengineer.co.uk/content/news/uk-team-to-develop-rapid-virtual-testing-technique-for-manufactured-components/>. (Accessed: 20.01.2025).
12. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии». *Цифровая подстанция*. 2019;(12):20–25.
Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. Definition, development and application of digital twins: Approach of the NTI SPbPU

- Competence Center “New Production Technologies”. *Digital substation*. 2019;(12):20–25. (In Russ.).
13. Design with Confidence (Commentary). CIMdata [Electronic resource]. URL: <https://www.cimdata.com/de/resources/complimentary-reports-research/commentaries/item/3345-design-with-confidence-commentary>. (Accessed: 20.01.2025).
 14. Rodič B. Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*. 2017;50(3):193–207. <https://doi.org/10.1515/orga-2017-0017>
 15. Mukherjee T., DebRoy T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Applied Materials Today*. 2019;14:59–65. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.003>
 16. Lind M. Digital thread. *Aras* [Electronic resource]. URL: <https://community.aras.com/b/english/posts/promise-of-the-digital-thread>. (Accessed: 28.05.2020)
 17. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения [Электронный ресурс]. URL: <http://fea.ru/news/6721>. (Дата обращения: 20.01.2025).
 18. Прохоров И.М., Зимин А.В., Буркова И.В., Зимин В.В. Постановка и декомпозиция задачи календарного планирования ремонтов и работы конвертеров сталеплавильного производства. *Системы управления и информационные технологии*. 2024;(2(96)):38–40.
 - Prokhorov I.M., Zimin A.V., Burkova I.V., Zimin V.V. Formulation and decomposition of the task of scheduling repairs and operation of steelmaking converters. *Management systems and information technologies*. 2024;(2(96)):38–40. (In Russ.).
 19. Корнет М.Е., Зимин А.В., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование системы ремонтов конвертеров в условиях квазипериодического функционирования агрегатов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(6):738–743. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-738-743>
 - Kornet M.E., Zimin A.V., Burkova I.V., Zimin V.V. Planning BOF repair system in conditions of quasi-periodic operation of units. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):738–743. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-738-743>
 20. Прохоров И.М., Зимин А.В., Буркова И.В., Зимин В.В. О процедуре решения задачи построения расписания ремонтов конвертеров сталеплавильного цеха с двумя агрегатами. *Системы управления и информационные технологии*. 2024;(2(96)):64–67.
 - Prokhorov I.M., Zimin A.V., Burkova I.V., Zimin V.V. The procedure for solving the problem of scheduling repairs of converters in a steelmaking plant with two units. *Management systems and information technologies*. 2024;(2(96)):64–67. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Алексей Валерьевич Зимин, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-0485-9846

E-mail: zimin.0169@yandex.ru

Мария Евгеньевна Корнет, старший преподаватель кафедры инженерной кибернетики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0003-4100-5644

E-mail: marya.kornet@gmail.com

Ирина Владимировна Буркова, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

ORCID: 0000-0002-4671-0847

E-mail: irbur27@mail.ru

Валерий Викторович Зимин, д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4152-3572

E-mail: zimin1945@sibsiu.ru

Aleksei V. Zimin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-0485-9846

E-mail: zimin.0169@yandex.ru

Maria E. Kornet, Senior Lecturer of the Chair of Engineering Cybernetics, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0003-4100-5644

E-mail: marya.kornet@gmail.com

Irina V. Burkova, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-4671-0847

E-mail: irbur27@mail.ru

Valerii V. Zimin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4152-3572

E-mail: zimin1945@sibsiu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. В. Зимин – постановка проблемы, формирование выводов.

М. Е. Корнет – постановка задачи исследования, разработка и реализация алгоритма, анализ полученных результатов.

И. В. Буркова – постановка задач исследования, анализ данных.

В. В. Зимин – технологическое описание поставленной задачи, обоснование направления исследований, анализ полученных результатов.

A. V. Zimin – formulation of the problem, formation of conclusions.

M. E. Kornet – formulation of research tasks, development and implementation of the algorithm, analysis of results.

I. V. Burkova – formulation of research tasks, data analysis.

V. V. Zimin – technological description of the task, justification of the research direction, analysis of results.

Поступила в редакцию 20.12.2024

После доработки 20.01.2025

Принята к публикации 27.01.2025

Received 20.12.2024

Revised 20.01.2025

Accepted 27.01.2025