

УДК 656.3

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖИДКОГО ЧУГУНА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Виноградов К.О., аспирант кафедры автоматизации и управления (vkowork@mail.ru)
Смылова А.Л., к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления (alsmyslova@chsu.ru)

Череповецкий государственный университет
(162600, Россия, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

Аннотация. Рассматривается задача создания имитационной модели логистической системы транспортировки жидкого чугуна на металлургическом предприятии. Во время исследования технологических данных процесса транспортировки жидкого чугуна было установлено, что количество локомотивов и миксеров, зависящее от длительности операций и, особенно, межоперационных простоев технологического процесса транспортирования чугуна, не всегда обеспечивает нормальный ритм основного производства. Это приводит к значительным производственным потерям. Следовательно, работа производственно-транспортного комплекса недостаточно эффективна. Разработана имитационная модель логистической системы транспортировки жидкого чугуна на металлургическом предприятии. Исследование и построение модели выполнено с использованием инструментального средства AnyLogic. В качестве исходных данных использованы реальные данные с производства, а именно расписание плавок доменных печей за трехнедельный период. Для доказательства адекватности модели полученные результаты сравнили с фактическим тактом движения миксеров, а также с теоретической потребностью конвертерного цеха. Данные о весе жидкого чугуна, доставленного в конвертерный цех, полученные в ходе моделирования, соотносятся с теоретическими. Эффективность работы имитационной модели достигается путем автоматического сбора в режиме реального времени всех статистических значений параметров объектов моделирования. Система за короткий промежуток времени (менее одной секунды) анализирует собранные данные и на их основе осуществляет принятие решений. В режиме работы имитационной модели «по умолчанию» управление движением миксеров осуществляется автоматически, без участия диспетчера, что повышает эффективность, а также скорость принятия решений. В имитационной модели предусмотрена симуляция сбоев в работе конвертерного цеха. Согласно результатам моделирования, можно сделать вывод о том, что система доставляет меньше жидкого чугуна в конвертерный цех, но сохраняет ритмичность. После возобновления работы всех конвертеров такт транспортировки выходит на необходимый уровень.

Ключевые слова: имитационная модель, AnyLogic, жидкий чугун, миксер, логистика.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-71-77

ВВЕДЕНИЕ

Конвертерный цех любого металлургического завода самым тесным образом связан с цехами, которые поставляют ему шихтовые, добавочные и вспомогательные материалы, окислительные, восстановительные и нейтральные (инертные) газы, материалы не прямого назначения. Тесно связан он и с прокатными цехами, которые получают непрерывным потоком стальные полосы (в частности – слэбы). Но особое внимание обращено на доменный цех [1].

Жидкий чугун, выплавляемый в доменных печах (ДП) металлургических заводов, составляет свыше половины всех шихтовых материалов, загружаемых в конвертер на одну плавку стали. Поэтому к его качеству, ритму и надежности доставки от доменного к конвертерному цеху приковано внимание всех соответствующих служб.

Решение данной задачи можно достичь разными методами, например, разработкой новых или усовершенствованных алгоритмов, основанных на нечеткой

логике [2, 3], математическим моделированием [4, 5], имитационным моделированием [6 – 20].

Несмотря на множественные исследования по созданию автоматизированных систем контроля положения миксеров, на практике отслеживание ведется операторами визуально, с последующим ручным управлением движения и вводом данных о количестве перевозок каждого ковша или миксера.

Имитационное моделирование является одним из распространенных способов решения практических задач. Данный метод применяется, когда решение проблемы нельзя или попросту невозможно найти путем проведения реальных экспериментов: строить, разрушать или вносить изменения в уже существующие объекты слишком накладно, опасно и может привести к непредсказуемым последствиям. Чтобы избежать подобного рода проблем, проще всего построить имитационную модель реального объекта и работать с ней. Как правило, имитационная модель всегда проще реальной и в ней опускаются те детали, которые считаются несущественными для конкретного исследования и подчеркиваются

те детали, которые считаются наиболее важными. После создания модели, а иногда и на этапах разработки, исследуется структура и поведение системы, проверяется, как она ведет себя при определенных условиях, сравниваются различные сценарии и способы оптимизации. Когда оптимальное решение найдено, появляется возможность применить его в реально существующей системе [21].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Имеется доменный цех металлургического предприятия, из которого в миксерах – чугуновозах транспортируется жидкий чугун в конвертерный цех. Обеспечение конвертерного цеха чугуном в достаточном количестве и требуемого качества является одним из наиболее ответственных процессов металлургического предприятия. Цикличность плавок конвертерного цеха и выпусков доменных печей не совпадают, это несоответствие сглаживается оперативным запасом чугуна в миксере и чугуном, который находится в процессе транспортирования. Характерной особенностью материального потока жидкого чугуна является отсутствие фазы промежуточного складирования на стадии его зарождения (непосредственный слив чугуна из доменной печи в транспортное средство) и весьма ограниченные возможности «складирования» на стадии его погашения (миксер конвертерного цеха).

Количество локомотивов и миксеров, зависящее от длительности операций и, особенно, межоперационных простоев технологического процесса транспортирования чугуна, не всегда обеспечивает нормальный ритм основного производства. Это приводит к значительным производственным потерям и свидетельствует о необходимости повышения качества принимаемых управленческих решений и использования для этого имитационных моделей рассматриваемого процесса, более точно отражающих существующее положение с учетом интересов всех участников потокового процесса.

Учитывая особенности технологических процессов доставки жидкого чугуна и поставленные задачи, определим в качестве объектов моделирования следующие агрегаты:

- доменные печи (4 шт.);
- подвижные миксеры для транспортировки чугуна до ворот конвертера (17 шт.);
- сталелитейные ковши для транспортировки чугуна от ворот конвертера до цеха (3 шт.);
- конвертер (3 шт.).

Текущая версия имитационной модели разработана с учетом ряда допущений:

- не учитывается изменение температуры и химического состава жидкого чугуна при долгой транспортировке в конвертерный цех;
- не учитывается техническое состояние чугуновозов, а так же наличие свободной тепловозной тяги для их передвижения;

- не предусмотрено взаимодействие системы с внешними транспортными потоками доменного и сталеплавильного цехов, а именно снабжение технологическими материалами (буры для вскрытия леток доменных печей, огнеупорная масса для забивки леток доменных печей, песок для литейного двора и др.);

- в текущей версии модель является вспомогательным инструментом для оператора с возможностью выгрузки статистических данных технологических процессов за определенный период. В последующих версиях будет произведена проработка интеграции в существующую информационную систему металлургического предприятия и железнодорожного снабжения.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

AnyLogic является инструментальным средством имитационного моделирования и был создан российской компанией «The AnyLogic Company». Данная среда моделирования включает в себя весь набор подходов к имитационному моделированию: агентный, системно-динамический и дискретно-событийный. Данное средство обладает современным русскоязычным интерфейсом и позволяет строить даже самые сложные модели. Мощные библиотеки и инструменты позволяют решать широкий спектр задач вплоть до стратегических моделей развития крупных компаний. Ко всему этому имеется возможность программирования на языке Java, что значительно повышает гибкость и функциональность моделирования. Таким образом, с помощью AnyLogic есть возможность полностью имитировать весь технологический процесс [22].

В качестве исходных значений для имитационной модели используем расписание плавок жидкого чугуна, выпущенных доменными печами в период с 01.08.2016 по 21.08.2016 гг. включительно. Данные по суммарной плавке представлены в табл. 1.

Проанализировав расписания плавок жидкого чугуна, можно сделать следующие выводы.

- Доменные печи выпускают чугун нерегулярно, с точки зрения временных параметров. Нет единого расписания, выпуск чугуна происходит в разные временные периоды. Ситуация уникальна для каждого дня.
- Чугун выпускается с разной частотой, временные промежутки составляют от одного до нескольких часов.
- Доменные печи выпускают чугун неравномерно в течение дня. Вес плавок может отличаться друг от друга в несколько раз.

Учитывая особенности технологических процессов доставки жидкого чугуна и поставленные задачи, определим в качестве объектов моделирования следующие агрегаты:

- доменные печи;
- подвижные миксеры для транспортировки чугуна до ворот конвертера;

Таблица 1

Расписание плавков жидкого чугуна

Table 1. Schedule of liquid iron smelting

Дата	Масса выплавленного чугуна			
	ДП № 1	ДП № 2	ДП № 4	ДП № 5
01.08.16	2719	2828	6975	13 079
02.08.16	3250	2730	7206	13 518
03.08.16	3185	2714	7640	13 554
04.08.16	2856	3008	7170	13 698
05.08.16	3214	3255	7052	12 988
06.08.16	3100	3042	7344	13 394
07.08.16	3158	3093	7653	13 497
08.08.16	3247	3056	7162	13 800
09.08.16	3010	3215	7460	13 636
10.08.16	3128	3047	7189	9229
11.08.16	3012	2739	7422	13 626
12.08.16	3102	3132	5663	13 467
13.08.16	3532	2797	7307	13 498
14.08.16	3151	3485	7189	10 906
15.08.16	0	2906	7412	13 658
16.08.16	0	3156	7188	13 193
17.08.16	0	3379	7292	13 511
18.08.16	800	3219	7264	13 291
19.08.16	2620	3172	7060	13 597
20.08.16	2881	3035	7416	13 926
21.08.16	3450	3106	7227	13 036

– сталелитейные ковши для транспортировки чугуна от ворот конвертера до цеха.

В табл. 2 представлены технические характеристики объектов моделирования, представленных выше.

Имитационная модель разработана со следующими допущениями:

- не учитывается изменение химического состава;
- в начальный момент времени все миксеры находятся под летками доменных печей, либо на запасных железнодорожных путях;

– в начальный момент времени доменные печи имеют нулевой объем жидкого чугуна (добавил упрощения/допущения модели).

С помощью встроенного инструментария AnyLogic построен имитационный план транспортной системы металлургического предприятия.

Реализована симуляция работы четырех доменных печей. Схема расположения представлена на рис. 1.

Каждая доменная печь имеет определенное количество леток в соответствии с реальным производственным процессом. Также предусмотрены запасные пути, выполненные в виде пунктирных линий, на которые могут прибывать миксеры для ожидания свободного места под леткой.

Каждая тонна чугуна создается согласно расписанию плавков в модели как отдельный агент. После создания чугуна в количестве, равном вместимости миксера, поступает управляющее воздействие на слив чугуна. После наполнения миксер движется через участок взвешивания в сторону конвертерного цеха в место слива чугуна в ковши. Если все железнодорожные пути заняты, то миксер останавливается и встает в очередь в точке, выделенной на рис. 2 прямоугольником.

После слива чугуна в ковши, миксер разворачивается и движется в обратном направлении к доменным печам до развилки железнодорожных путей, выделенной на рис. 3 прямоугольником.

Сравнительная характеристика результата моделирования и фактического веса доставленного в конвертерный цех чугуна представлена на рис. 4.

График зависимости теоретической массы чугуна ($M_{теор}$), доставленной в конвертерный цех, от времени отражает реальную потребность конвертерного цеха в чугуне, т. е. сколько должно быть доставлено, чтобы обеспечить отсутствие простоев производственного процесса вследствие недостатка или излишка доставленного чугуна.

График зависимости фактической массы чугуна ($M_{факт}$), доставленной в конвертерный цех, от времени получен на основе реальных данных и отражает результат принятия логистических решений человеком (диспетчером). На рис. 4 видно, что $M_{факт}$ отклонилась

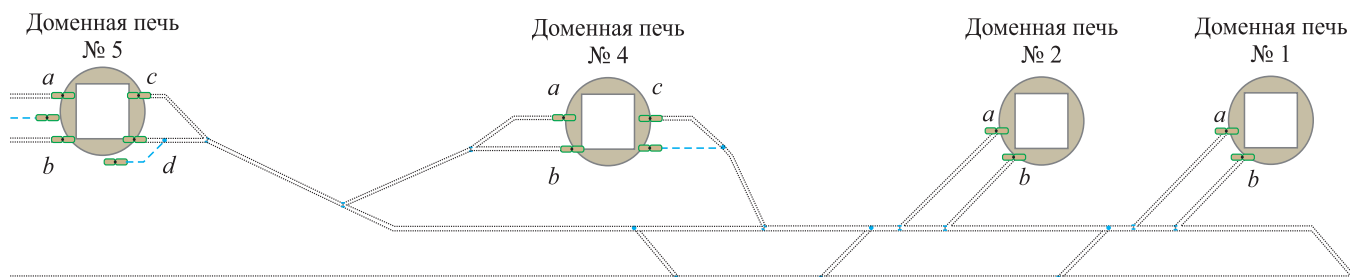


Рис. 1. Схема расположения доменных печей в имитационной модели

Fig. 1. Layout of blast furnaces in a simulation model

Технические характеристики объектов моделирования

Table 2. Technical characteristics of the simulation objects

Объект моделирования	Технические характеристики			
	расстояние, пройденное миксерами до сталеплавильного цеха, м	расчетное время в пути, мин	производительность, т/сут	грузоподъемность, т
ДП № 1 (летка № 1)	1593	26	3300	—
ДП № 1 (летка № 2)	2103	34		
ДП № 2 (летка № 1)	1698	28	3200	
ДП № 2 (летка № 2)	2208	36		
ДП № 4 (летка № 1)	2040	32	7000	
ДП № 4 (летка № 2)	2040	32		
ДП № 4 (летка № 3)	2910	44		
ДП № 5 (летка № 1)	2400	36	13 000	
ДП № 5 (летка № 2)	2400	36		
ДП № 5 (летка № 3)	3527	52		
ДП № 5 (летка № 4)	3527	52		
Миксер № 2	—	—	—	568
Миксер № 3	—	—	—	602
Миксер № 4	—	—	—	568
Миксер № 5	—	—	—	587
Миксер № 6	—	—	—	550
Миксер № 7	—	—	—	517
Миксер № 9	—	—	—	445
Миксер № 10	—	—	—	474
Миксер № 12	—	—	—	489
Миксер № 14	—	—	—	545
Миксер № 15	—	—	—	513
Миксер № 16	—	—	—	513
Миксер № 17	—	—	—	518
Миксер № 19	—	—	—	459
Миксер № 21	—	—	—	564
Миксер № 22	—	—	—	448
Миксер № 24	—	—	—	488
Миксер № 25	—	—	—	517
Ковш	—	—	—	320

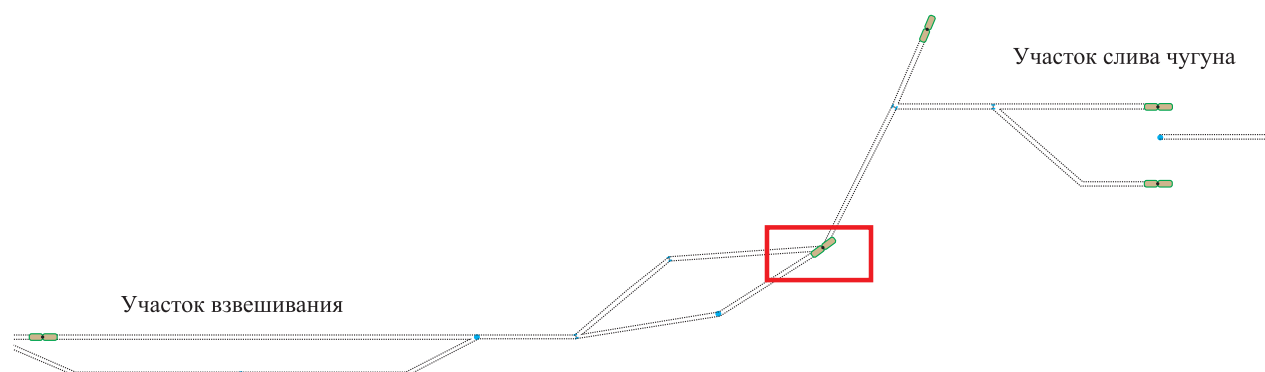


Рис. 2. Схема движения миксера

Fig. 2. Mixer motion pattern

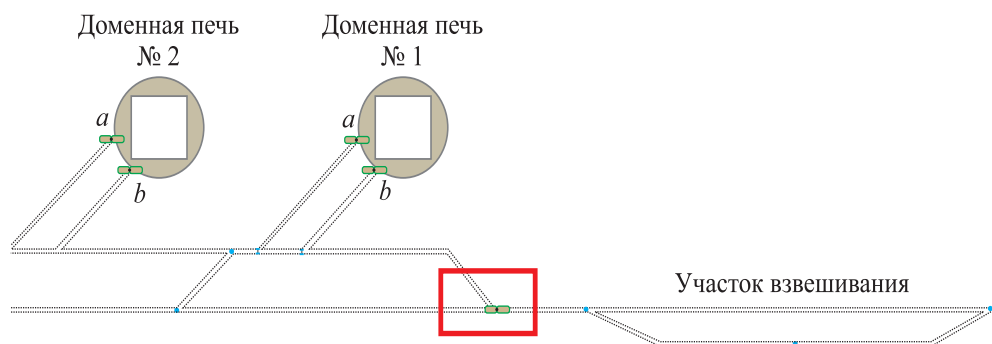


Рис. 3. Схема движения миксера на обратном пути

Fig. 3. Mixer motion pattern on the way back

от $M_{\text{теор}}$, что свидетельствует о недостаточной массе жидкого чугуна, доставленной в конвертерный цех.

График зависимости теоретической массы чугуна, доставленной в конвертерный цех, от времени получен на основе данных моделирования ($M_{\text{модел}}$). Кривые ($M_{\text{теор}}$) и ($M_{\text{модел}}$) практически совпадают, что свидетельствует о том, что решения, принимаемые имитационной моделью, эффективнее, чем решения, принятые диспетчером на указанном промежутке времени.

Проанализировав результаты моделирования, можно сделать вывод о том, что относительная погрешность изменяется в диапазоне от 0,67 до 66 %, среднее значение равно 3,43 %.

В данном случае под относительной погрешностью понимается отклонение данных, полученных в ходе моделирования, от теоретических (эталонных), т. е. реальной потребности конвертерного цеха в жидком чугуне.

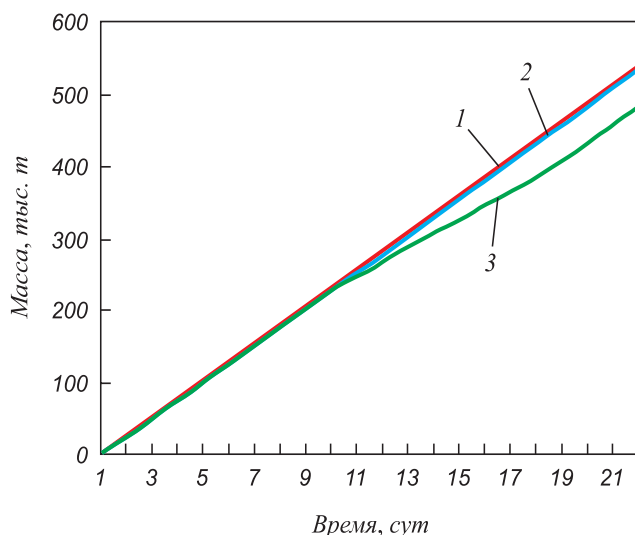


Рис. 4. График зависимости количества чугуна от времени:

1 – $M_{\text{теор}}$; 2 – $M_{\text{модел}}$; 3 – $M_{\text{факт}}$

Fig. 4. Dependence of the amount of cast iron on time:

1 – $M_{\text{теор}}$; 2 – $M_{\text{модел}}$; 3 – $M_{\text{факт}}$

Причиной отклонения является различие начальных фактических и экспериментальных значений параметров технологического процесса, а именно:

- начальное расположение миксеров. В имитационной модели на старте миксеры находятся под летками или на запасных путях;
- текущий вес чугуна в доменных печах. В имитационной модели в начальный момент времени он равен нулю.

Относительная погрешность изменяется в очень большом диапазоне и достигает 67 %. Однако стоит учесть, что при моделировании отрезка времени от нулевых до первых суток, все миксеры были в исходном положении, а количество переходящего веса чугуна с предыдущих суток равно нулю. Имитационной модели требуется время для генерации агентов, отвечающих за симуляцию чугуна, доставку из начального пункта.

Если исключить первый день из расчета относительной погрешности, то получим следующие значения: минимальная относительная погрешность равна 0,68 %; максимальная – 16,74 %; среднее значение равно 2,28 %.

Выделим основные причины эффективности имитационной модели.

- Имитационная модель автоматически в режиме реального времени собирает все статистические значения параметров объектов моделирования.
- Система за короткий промежуток времени (менее одной секунды) анализирует собранные данные и на их основе осуществляет принятие решений.
- Управление движением миксеров происходит автоматически, без участия диспетчера.

Исследуем влияние сбоев в работе конвертерного цеха на процесс транспортировки жидкого чугуна. Промоделируем тот же промежуток времени. Режимы работы конвертера представлены в табл. 3.

Результаты моделирования свидетельствуют о существенном влиянии сбоев в работе конвертерного цеха на процесс транспортировки жидкого чугуна. После восстановления работоспособности конвертерного цеха имитационная модель выходит на необходимый

Таблица 3

Расписание сбоев в работе конвертерного цеха

Table 3. Schedule of operation failures in the converter shop

Дата	Режим работы конвертерного цеха
01.08.2016 – 10.08.2016	Штатный (работают все три конвертера)
11.08.2016 – 13.08.2016	Сбой работы одного конвертера
14.08.2016 – 16.08.2016	Сбой работы двух конвертеров
17.08.2016	Сбой работы трех конвертеров
18.08.2016 – 21.08.2016	Штатный (работают все три конвертера)

ритм транспортировки жидкого чугуна, а также частично компенсирует простой.

Выводы

Исследована проблема оптимизации транспортировки жидкого чугуна из доменного цеха в конвертерный на металлургических предприятиях. Разработана имитационная модель логистической системы транспортировки жидкого чугуна на металлургическом предприятии с помощью программного комплекса AnyLogic. Выполнен ряд экспериментов с созданной моделью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емельянова Н.Ю. Информационная технология процесса контроля перевозки жидкого чугуна // Системы обработки информации. 2010. № 9. С. 32 – 36.
2. Jun-qing Li, Quan-ke Pan, Pei-yong Duan. Improved artificial bee colony algorithm for solving hybrid flexible flowshop with dynamic operation skipping // IEEE Transactions on Cybernetics. 2016. Vol. 46. No. 6. P. 1311 – 1324.
3. Su L., Qi Y., Jin L.-L., Zhang G.-L. Integrated batch planning optimization based on fuzzy genetic and constraint satisfaction for steel production // International Journal of Simulation Modelling. 2016. Vol. 15. No. 1. P. 133 – 143.
4. Xiaoyan Yang, Bingmou Cui, Jie Chen. Intelligentized dispatching control of railway transport of molten iron in metallurgical enterprise // Proc. of 2013 Int. Conf. on Information Science and Computer Applications. Jianguo Hu ed. 2013. P. 287 – 293.
5. Гусев Ю.В. Математическая модель процесса транспортирования чугуна в конвертерный цех. – СПб: Питер, 2007. С. 287 – 293.
6. Bin Ge, Kai Wang, Yue Han. A design for simulation model and algorithm of rail transport of molten iron in steel enterprise // Computer Modelling & New Technologies. 2014. Vol. 18. No. 11. P. 1056 – 1061.
7. Feliks J., Majewska K. Agent-based modeling of steel production processes under uncertainty // METAL 2015: Proc. of Int. Conf. on Metallurgy and Materials, June 3 – 5, 2015, Brno, Czech Republic. P. 1739 – 1744.
8. Liu F. Analysis on organization and capability of hot iron transportation at Baosteel // Baosteel Technology. 2001. No. 5. P. 1 – 6.

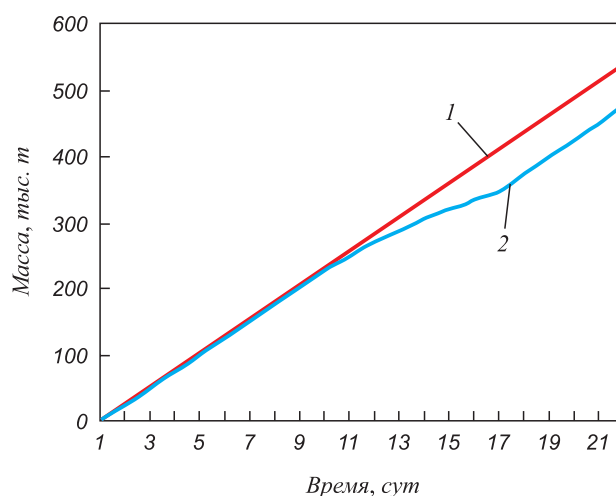


Рис. 5. График зависимости количества чугуна от времени:

1 – $M_{\text{теор}}$; 2 – $M_{\text{модель}}$

Fig. 5. Dependence of the amount of cast iron on time:

1 – $M_{\text{теор}}$; 2 – $M_{\text{модель}}$

9. Hua Yan, Jun Xuan, Nai-yuan Tian. Research of time distribution in hot metal supply process // Iron and Steel. 2005. Vol. 40. No. 3. P. 21 – 24.
10. Sun J., Xue D. A dynamic reactive scheduling mechanism for responding to changes of production orders and manufacturing resources // Computers in Industry. 2001. Vol. 46. No. 2. P. 189 – 207.
11. Lixin Tang, Gongshu Wang, Jiyin Liu. A branch-and-price algorithm to solve the molten iron allocation problem in iron and steel industry // Computers & Operations. 2005. Vol. 2007. No. 34. P. 3001 – 3015.
12. Tang L., Wang X. Simultaneously scheduling multiple turns for steel color-coating production // European Journal of Operational Research. 2009. Vol. 198. No. 3. P. 715 – 725.
13. Tang L., Rong A., Yang Z. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production // European Journal of Operational Research. 2001. Vol. 133. No. 1. P. 1 – 20.
14. Tang L., Luh P.B., Liu J., Fang L. Steel-making process scheduling using Lagrangian relaxation // International Journal of Production. 2002. Vol. 40. No. 1. P. 55 – 70.
15. Engin O., Ceran G., Yilmaz M.K. An efficient genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with multiprocessor task problems // Applied Soft Computing. 2011. Vol. 11. No. 3. P. 3056 – 3065.
16. Ruiz R., Rodríguez J.A.V. The hybrid flow shop scheduling problem // European Journal of Operational Research. 2010. Vol. 205. No. 1. P. 1 – 18.
17. Wang Wenrui. Iron melt control and management system in Baosteel [Part one] // Metallurgical Industry Automation. 2001. No. 4. P. 22 – 24.
18. Liu Y.Y. The mix integer programming model for torpedo car scheduling in iron and steel industry // International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. 2015. P. 731 – 734.
19. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем: Учеб. пособие. – Норильск: НИИ, 2015. – 134 с.
20. Боев В.Д. Компьютерное моделирование: Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic 7. – СПб.: ВАС, 2014. – 432 с.

Поступила в редакцию 1 июня 2019 г.
 После доработки 27 октября 2019 г.
 Принята к публикации 31 января 2020 г.

SIMULATION MODELING OF LOGISTIC SYSTEM FOR LIQUID IRON TRANSPORTATION AT METALLURGICAL PLANT

K.O. Vinogradov, A.L. Smyslova

Cherepovets State University, Cherepovets, Vologda Region, Russia

Abstract. During the study of technological data of the process of liquid iron transportation, it was found that the number of locomotives and mixers depending on the duration of operations and especially on the inter-operational downtime does not always ensure normal rhythm of the main production. It leads to significant production losses, therefore, the work of the producing and transport complex is not effective enough. The authors have developed a simulation model of a logistics system for transporting liquid iron at a metallurgical plant. The study and construction of the model was performed using AnyLogic. Real data from production, namely the schedule of blast furnace smelting for a three-week period, was used as the initial data. To prove adequacy of the model, the results were compared with the actual tact of the mixers movement, as well as with the theoretical need of the converter shop. Values of the liquid iron weight delivered to the converter shop were obtained during the simulation and were related to the theoretical ones. Efficiency of the model is achieved by automatically collecting in real time of statistical values of the parameters of simulation objects. The system analyzes the collected data and makes decisions based on them for a short period of time (less than one second). In default operation mode of the simulation model, motion of the mixers is controlled automatically without participation of the dispatcher, which improves efficiency, as well as decision-making speed. Such model provides simulation of failures in operation of the converter shop. According to the simulation results, it can be concluded that the system delivers less liquid iron to a converter shop, but retains its rhythm. After resuming the operation of all converters, the tact of transportation reaches the required level.

Keywords: simulation model, Anylogic, liquid iron, mixer, logistics.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-71-77

REFERENCES

1. Emel'yanova N.Yu. Information technology for control of liquid iron transportation. *Sistemy obrabotki informatsii*. 2010, no. 9, pp. 32–36. (In Russ.).
2. Jun-qing Li, Quan-ke Pan, Pei-yong Duan. Improved artificial bee colony algorithm for solving hybrid flexible flowshop with dynamic operation skipping. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2016, vol. 46, no. 6, pp. 1311–1324.
3. Su L., Qi Y., Jin L.-L., Zhang G.-L. Integrated batch planning optimization based on fuzzy genetic and constraint satisfaction for steel production. *International Journal of Simulation Modelling*. 2016, vol. 15, no. 1, pp. 133–143.
4. Xiaoyan Yang, Bingmou Cui, Jie Chen. Intelligentized dispatching control of railway transport of molten iron in metallurgical enterprise. *Proc. of 2013 Int. Conf. on Information Science and Computer Applications*. Jianguo Hu ed. 2013, pp. 287–293.
5. Gusev Yu.V. *Matematicheskaya model' protsessa transportirovaniya chuguna v konvertorny tsekh* [Mathematical model of iron transportation to converter shop]. St. Petersburg: Piter, 2007, pp. 287–293. (In Russ.).
6. Bin Ge, Kai Wang, Yue Han. A design for simulation model and algorithm of rail transport of molten iron in steel enterprise. *Computer Modelling & New Technologies*. 2014, vol. 18, no. 11, pp. 1056–1061.
7. Feliks J., Majewska K. Agent-based modeling of steel production processes under uncertainty. *METAL 2015: Proc. of Int. Conf. on Metallurgy and Materials, June 3-5, 2015, Brno, Czech Republic*, pp. 1739–1744.
8. Liu F. Analysis on organization and capability of hot iron transportation at Baosteel. *Baosteel Technology*. 2001, no. 5, pp. 1–6.
9. Hua Yan, Jun Xuan, Nai-yuan Tian. Research of time distribution in hot metal supply process. *Iron and Steel*. 2005, vol. 40, no. 3, pp. 21–24.
10. Sun J., Xue D. A dynamic reactive scheduling mechanism for responding to changes of production orders and manufacturing resources. *Computers in Industry*. 2001, vol. 46, no. 2, pp. 189–207.
11. Lixin Tang, Gongshu Wang, Jiyin Liu. A branch-and-price algorithm to solve the molten iron allocation problem in iron and steel industry. *Computers & Operations*. 2005, vol. 2007, no. 34, pp. 3001–3015.
12. Tang L., Wang X. Simultaneously scheduling multiple turns for steel color-coating production. *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 198, no. 3, pp. 715–725.
13. Tang L., Rong A., Yang Z. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production. *European Journal of Operational Research*. 2001, vol. 133, no. 1, pp. 1–20.
14. Tang L., Luh P. B., Liu J., Fang L. Steel-making process scheduling using Lagrangian relaxation. *Int. Journal of Production*. 2002, vol. 40, no. 1, pp. 55–70.
15. Engin O., Ceran G., Yilmaz M.K. An efficient genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with multiprocessor task problems. *Applied Soft Computing*. 2011, vol. 11, no. 3, pp. 3056–3065.
16. Ruiz R., Rodríguez J.A.V. The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 2010, vol. 205, no. 1, pp. 1–18.
17. Wang Wenrui. Iron melt control and management system in Baosteel [Part one]. *Metallurgical Industry Automation*. 2001, no. 4, pp. 22–24.
18. Liu Y.Y. The mix integer programming model for torpedo car scheduling in iron and steel industry. *Int. Conf. on Computer Information Systems and Industrial Applications*. 2015, pp. 731–734.
19. Kupriyashkin A.G. *Osnovy modelirovaniya sistem: ucheb. posobie* [Basics of system modeling: Manual]. Noril'sk: NII, 2015, 134 p. (In Russ.).
20. Boev V.D. *Komp'yuternoe modelirovanie: posobie dlya prakticheskikh zanyatii, kursovogo i diplomnogo proektirovaniya v AnyLogic 7* [Computer modeling: Manual for practical classes, course and degree design in AnyLogic 7]. St. Petersburg: VAS, 2014, 432 p. (In Russ.).

Information about the authors:

K.O. Vinogradov, Postgraduate of the Chair "Automation and Management" (vkowork@mail.ru)

A.L. Smyslova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Automation and Management" (alsmyslova@chsu.ru)

Received June 1, 2019

Revised October 27, 2019

Accepted January 31, 2019