



www.volsu.ru



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.4.6>

УДК 519.854

ББК 22.18

Дата поступления статьи: 26.10.2022

Дата принятия статьи: 23.11.2022

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОНТАЖЕЙ ГОРЯЧЕКАТАНОГО ПРОКАТА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Александр Васильевич Галкин**

Кандидат технических наук, доцент,  
декан факультета автоматизации и информатики,  
Липецкий государственный технический университет  
[avgalkin82@mail.ru](mailto:avgalkin82@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-4876-4865>  
ул. Московская, 30, 398055 г. Липецк, Российская Федерация

**Владимир Александрович Истомин**

Аспирант кафедры высшей математики,  
Липецкий государственный технический университет  
[istomin96@mail.ru](mailto:istomin96@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-3010-1470>  
ул. Московская, 30, 398055 г. Липецк, Российская Федерация

**Владимир Александрович Алексеев**

Кандидат технических наук,  
доцент кафедры автоматизированных систем управления,  
Липецкий государственный технический университет  
[alexeev48@gmail.com](mailto:alexeev48@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-6725-967X>  
ул. Московская, 30, 398055 г. Липецк, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе рассмотрена задача автоматизации процесса формирования монтажных партий на стане горячей прокатки. Для решения этой задачи предложен разработанный алгоритм формирования оптимальных монтажных партий на стане горячей прокатки, учитывающий технологические ограничения, накладываемые на производственный процесс. Оптимизация набора монтажных партий заключается в составлении монтажей с максимальной

производительностью, которая достигается за счет уменьшения времени на перестройку оборудования при переходе на разные ширины и толщину проката. Реализована программа для автоматического формирования монтажных партий на стане горячекатаного проката. Проведена проверка работоспособности алгоритма при формировании монтажных партий из набора слябов, имеющихся на складе. Проведены расчеты по формированию оптимальных монтажных партий. Представленные результаты проведенного исследования показывают повышение производительности сформированных монтажных партий и соответствие их всем технологическим ограничениям.

**Ключевые слова:** планирование производства, горячекатаный прокат, формирование монтажей, рациональный выбор, оптимизация, генетические алгоритмы.

## Введение

Горячекатаный прокат [5; 8; 12] является одним из востребованных материалов во многих отраслях промышленности. Сортамент горячекатаного проката не подвержен коррозии, очень выгоден в соотношении цены и качества, получается пластичным при сохранении высоких показателей прочности, почти не требует обработки, устойчив к высоким температурам и механическим повреждениям [19].

Прокатка металла на непрерывном широкополосном стане реализуется монтажными партиями [15], для обеспечения требуемого качества которых накладывается целый ряд технологических ограничений [2; 3; 9]. Кроме характеристик качества важнейшим показателем производства, в том числе горячего проката, является производительность [6]. В этом случае оптимизация производства заключается в таком планировании монтажных партий, которое минимизирует общее время их прокатки, то есть увеличивает производительность, при соблюдении всех задаваемых ограничений, влияющих на качество проката. Таким образом, разработка методов оптимизации, а также внедрение новых методов формирования монтажных партий на станах горячего проката является одной из актуальных тем исследования.

## 1. Формализация задачи и методология исследования

Разработанный алгоритм формирования монтажей учитывает накладываемые ограничения и максимизирует установленный критерий качества. В качестве входных данных используется информация о наличии и характеристиках слябов на складе. Для реализации алгоритма был использован блок программирования математического пакета Mathcad [7]. Оптимизация реализована за счет применения генетических алгоритмов [1; 10; 11; 13; 14; 16; 18; 20].

Далее представлена формализованная постановка задачи. Имеется набор векторов  $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ , состоящий из слябов  $X_i$ . Необходимо составить такую последовательность выполнения заказов  $Y_u(X)$  на прокатку на стане, чтобы достичь максимальной производительности прокатки  $V$  сформированных монтажных партий. Под производительностью подразумевается отношение длины прокатываемой полосы к продолжительности процесса.

Введем следующие обозначения для описания слябов и монтажей:

$$X_i = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{13} \end{bmatrix}, Y_u = \begin{bmatrix} X_r \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix},$$

где  $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  — количество слябов;  $u$  — номер монтажной партии;  $r$  и  $m$  — соответственно первый и последний элементы монтажной партии;  $x_l$  — параметр, несущий в себе информацию о слябе,  $l = 1 \dots 13$ .

Из полученного со склада массива данных о имеющихся слябах производится отбор необходимых параметров, убираются строки с отсутствующими данными, а также заведомо неверные. В конечной выборке используются следующие параметры слябов:

- $x_1$  — время прокатки сляба (с);
- $x_2$  — марка стали;
- $x_3$  — группа отделки поверхности;
- $x_4$  — маршрут;
- $x_5$  — толщина сляба (мм);
- $x_6$  — ширина сляба (мм);
- $x_7$  — длина сляба (мм);
- $x_8$  — вес сляба (т);
- $x_9$  — целевая толщина рулона (мм);
- $x_{10}$  — целевая ширина рулона (мм);
- $x_{11}$  — длина полосы (м);
- $x_{12}$  — цех назначения;
- $x_{13}$  — примечание.

Целевая функция:

$$V(Y_1, \dots, Y_z) = \frac{1}{z} \sum_{u=1}^z v(Y_u) = \frac{1}{z} \sum_{u=1}^z \frac{d(Y_u)}{t(Y_u)} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $z$  — количество монтажей;  $v$  — производительность  $u$ -й монтажной партии;  $d$  — общая длина проката  $u$ -й монтажной партии;  $t$  — общее время на прокатку всех слябов  $u$ -й монтажной партии.

Время на прокатку считается по формуле:

$$t = x_1 + tp,$$

$$tp = \begin{cases} 120, & \text{if } (x_{10,w} \neq x_{10,w+1}), \\ 60, & \text{if } (x_{9,w} \neq x_{9,w+1}) \wedge (x_{10,w} = x_{10,w+1}), \\ 0, & \end{cases}$$

где  $tp$  — время на перенастройку стана;  $w$  — порядковый номер сляба в  $u$ -й монтажной партии.

С учетом описанных в [9] ограничений для монтажных партий должны выполняться условия  $G(Y(X))$ :

$$G(Y(X)) = \begin{cases} \sum_{w=1}^q x_{8,w} \leq 4000, \\ x_{10,w+1} - x_{10,w} \leq 250, \\ x_{9,w+1} - x_{9,w} \leq 1.5, \\ \sum_{w=1}^q x_{11,w} \leq 40000, (x_{10,w} = x_{10,w+1}) \forall w = 1, \dots, q, \end{cases}$$

где  $q$  — количество слябов в  $u$ -й монтажной партии.

Весь массив считанных данных разбивается на следующие подвыборки, которые обладают установленными для них условиями:

- 1)  $Rabv$  — настроечный металл после перевалки рабочих валков;
- 2)  $km7\_60$  — по длине монтажа от 7 до 60 км;
- 3)  $km97$  — по длине монтажа до 97 км;
- 4)  $km120$  — по длине монтажа до 120 км;
- 5)  $km121\_$  — по длине монтажа после 120 км.

Из полученных подвыборок составляются монтажные партии в соответствии с технологическими ограничениями для данных групп. Также в каждом монтаже учитывается ряд ограничений, накладываемых на весь монтаж.

Схема разработанного алгоритма изображена на рисунке 1.

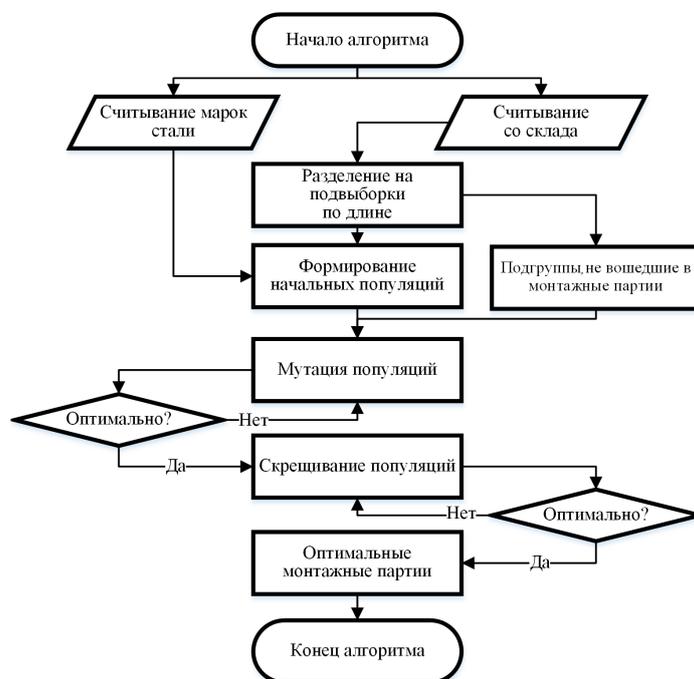


Рис. 1. Блок-схема программы

Реализация алгоритма оптимизации происходит следующим образом. Считывание из файла Excel подготовленной выборки. Полученные данные сортируются по ширине

полосы — от широкого к узкому. Также выполняется считывание марок стали, относящихся к определенным группам: *uglPDS* — подкат углеродистой стали для ПДС; *xolkS* — марки холоднокатаной стали; *tovarS* — марки товарной стали; *electrS* — марки электротехнической стали [4]. Данные группы марок требуются при формировании монтажей для соответствия накладываемых технологических ограничений.

На первом шаге генетического алгоритма производится составление начальных популяций с целью комплектации слябов со склада в монтажные партии. Формирование монтажей прекращается при отсутствии слябов в любой из подвыборок. Так, монтажи составляются последовательно один за другим и имеют следующий вид:

$$mont_u = \begin{pmatrix} J_1 & \cdots & J_g \\ D_1 & \cdots & D_g \\ M_1 & \cdots & M_g \\ T_1 & \cdots & T_g \\ k_1 & \cdots & k_g \\ y_1 & \cdots & y_g \\ ogshDL_1 & \cdots & ogshDL_g \end{pmatrix}, \quad J = \begin{pmatrix} j_1 \\ \vdots \\ j_k \end{pmatrix},$$

где  $mont_u$  — сформированный монтаж;  $g = 1, \dots, 5$  — номер подвыборки;  $J_g$  — вектор-столбец с порядковыми номерами выбранных в данный монтаж слябов со склада;  $k$  — это количество слябов в подвыборке  $g$  монтажа  $u$ ;  $D_g$  — общая длина монтажа в подвыборке  $g$  с учетом предшествующих подгрупп (мм);  $M_g$  — общая масса монтажа в подвыборке  $g$  с учетом предшествующих подгрупп (т);  $T_g$  — общее время проката всех слябов монтажа в подвыборке  $g$  с учетом предшествующих подгрупп (с);  $y_g$  — строки выбранных слябов в подвыборке  $g$ ;  $ogshDL_g$  — суммарная длина следующих друг за другом слябов одинаковой ширины.

Составленные в соответствии с технологическими ограничениями монтажные партии объединяются в набор монтажей. Слябы, не попавшие в монтажные партии, распределяются в подвыборки той же структуры, что использовались при формировании начальных популяций генетического алгоритма. Они будут называться свободными подвыборками.

Схема формирования начальных популяций показана на рисунке 2.

Фрагмент полученных начальных популяций (монтажей) представлен на рисунке 3.

Следующим шагом будет мутация полученного набора монтажей. Оператор мутаций меняет произвольное число элементов в особи на другие произвольные. Фактически он является неким диссипативным элементом, с одной стороны вытягивающим из локальных экстремумов, с другой — приносящим новую информацию в популяцию. Схема мутации популяций изображена на рисунке 4.

В условиях решаемой задачи оператор мутаций будет менять произвольно выбранное количество подвыборок из монтажей со случайными свободными подвыборками. Мутировавшие монтажи объединяются в набор и так получают несколько особей. Среди имеющихся особей потомков выбирается наиболее приспособленная, то есть набор монтажей с наибольшей производительностью (1), который станет родителем для следующего поколения мутантов. Цикл повторяется до тех пор, пока производительность новых поколений не будет меньше или равна производительности их предка. При этом проводится проверка монтажей внутри набора на соответствие введенных ограничений. Лучший набор монтажей, полученный с помощью мутаций, проходит через скрещивание среди монтажей, вошедших в этот набор. Свободные подвыборки отбрасываются.

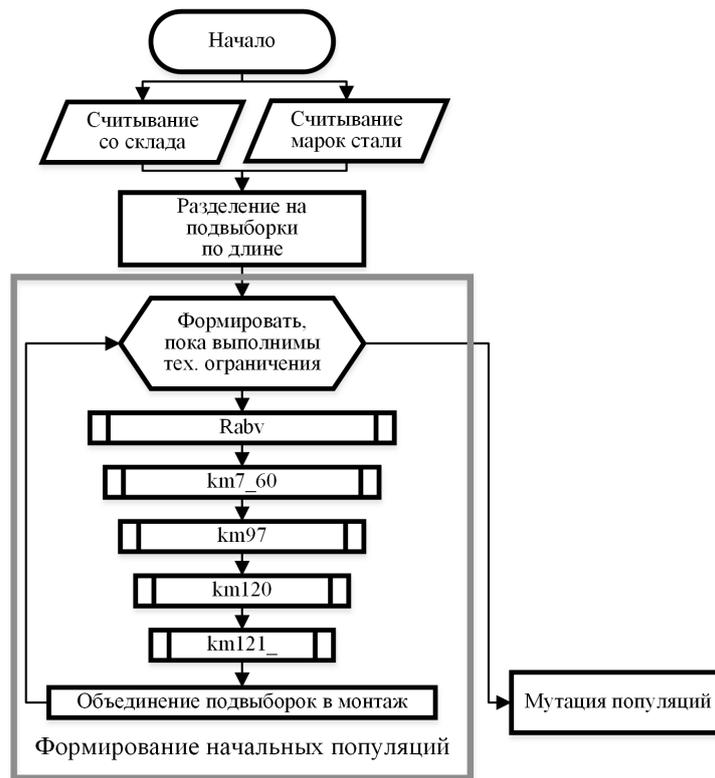


Рис. 2. Схема формирования начальных популяций

$$\text{mont}_{10} = \begin{pmatrix} \{9,1\} & \{50,1\} & \{33,1\} & \{35,1\} & \{28,1\} \\ 6.403 \times 10^3 & 5.996 \times 10^4 & 9.658 \times 10^4 & 1.195 \times 10^5 & 1.36 \times 10^5 \\ 276.73 & 1.61 \times 10^3 & 2.49 \times 10^3 & 3.316 \times 10^3 & 3.951 \times 10^3 \\ 1.01 \times 10^3 & 5.561 \times 10^3 & 8.743 \times 10^3 & 1.091 \times 10^4 & 1.305 \times 10^4 \\ 9 & 50 & 33 & 35 & 28 \\ \{9,1\} & \{50,1\} & \{33,1\} & \{35,1\} & \{28,1\} \\ 6.403 \times 10^3 & 1.276 \times 10^4 & 8.953 \times 10^3 & 3.185 \times 10^4 & 8.209 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Фрагмент полученных начальных популяций

В данном генетическом алгоритме применяется равномерное скрещивание, иначе называемое монолитным или одностадийным, выполняется в соответствии с заранее выбранным эталоном, который указывает, какие гены должны наследоваться от первого родителя (остальные гены берутся от второго родителя).

Схема скрещивания популяций представлена на рисунке 5.

Случайным образом из набора мутировавших монтажей выбираются попарно особи для выполнения оператора скрещивания:

$$\begin{aligned}
 \text{mont}_a &= \left( [Rabv]_a \quad [km7\_60]_a \quad [km97]_a \quad [km120]_a \quad [km121\_]_a \right), \\
 \text{mont}_b &= \left( [Rabv]_b \quad [km7\_60]_b \quad [km97]_b \quad [km120]_b \quad [km121\_]_b \right),
 \end{aligned}$$

в которых происходит следующая замена:

$$mont_c = \begin{pmatrix} [Rabv]_a & [km7\_60]_b & [km97]_a & [km120]_b & [km121\_]_a \end{pmatrix},$$

$$mont_d = \begin{pmatrix} [Rabv]_b & [km7\_60]_a & [km97]_b & [km120]_a & [km121\_]_b \end{pmatrix}.$$

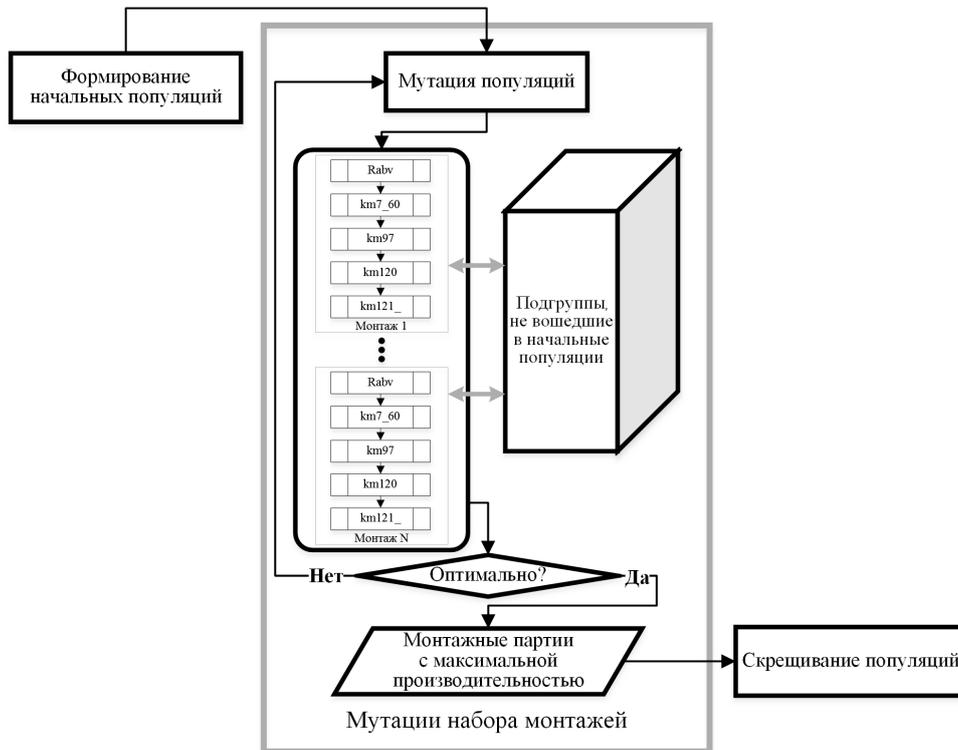


Рис. 4. Схема мутаций популяций

Полученные монтажи являются новым поколением особей. Они снова объединяются в набор. Таким образом формируется несколько случайно скрещенных наборов. Критерий останова скрещивания совпадает с критерием останова при мутации (1). По окончании работы оператора скрещивания будет найден оптимальный набор монтажных партий, который является результатом работы генетического алгоритма.

## 2. Интерпретация и анализ результатов исследований

Проведено исследование по работе реализованного алгоритма. Проверка проводилась на данных о слябах со склада цеха горячей прокатки. Из полученных сведений была отобрана необходимая для работы алгоритма информация.

С помощью программы формирования монтажных партий горячекатаного проката обработана информация о 276 000 слябах, располагавшихся на складе в течение года, в результате чего получено 14 уникальных наборов монтажных партий. Каждый набор сформирован на непересекающихся диапазонах входных данных по 20 тысяч выборок в первых 13 наборах и 16 тысяч в последнем. Общая информация по наборам представлена в таблице.

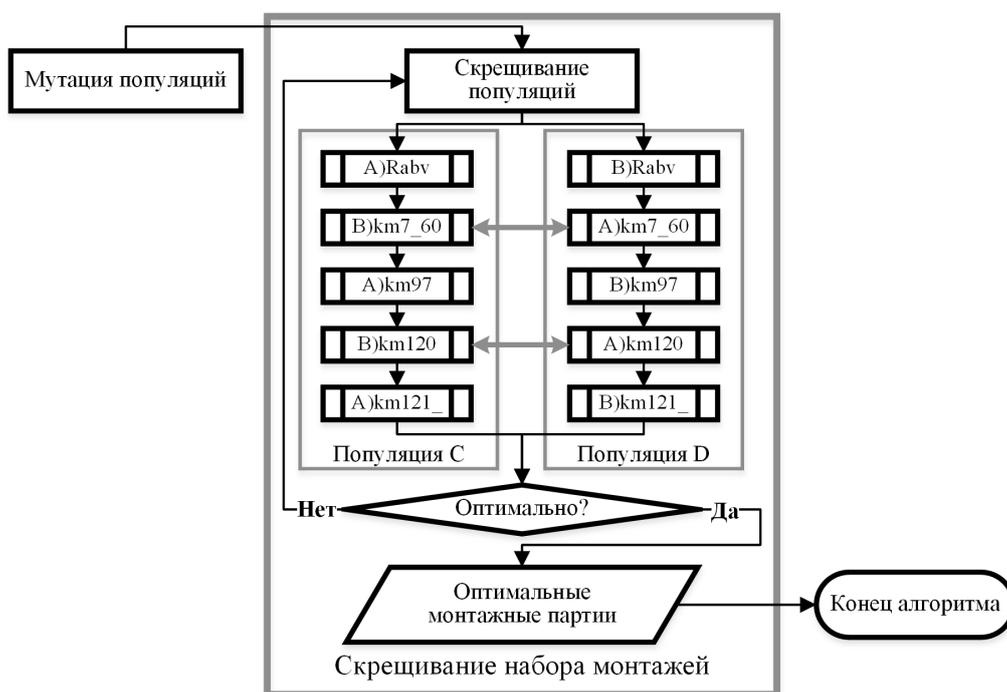


Рис. 5. Схема скрещивания популяций

В таблице № — это номер набора,  $Km$  — количество монтажей в наборе (шт),  $Kp$  — количество проката в наборе (шт),  $Ln$  — общая длина проката в наборе (км),  $Mn$  — общая масса проката в наборе (т),  $Tr$  — требуемое на прокатку время (ч),  $Vn$  — производительность набора после применения генетических алгоритмов (км/ч),  $\Delta Vn$  — прирост производительности проката после применения генетических алгоритмов (км/ч).

Средний прирост производительности составил 0,56 (км/ч), что говорит о релевантности используемого метода формирования и оптимизации составления монтажных партий на станах горячего проката. Большой эффект на изменение производительности оказал оператор мутации. Сравнение производительности наборов монтажей до и после работы генетического алгоритма показано на рисунке 6. Всего алгоритмом было получено 507 монтажей средней производительностью 30,34 (км/ч), что соответствует повышению эффективности прокатки на 1,9 %.

### Заключение

Таким образом, в работе была представлена формализованная постановка оптимального формирования монтажных партий на стане горячей прокатки. Предложен генетический алгоритм решения задачи. Приведено описание операций формирования начальных популяций (наборов монтажей), мутаций и скрещивания. Алгоритм учитывает технологические ограничения, накладываемые на производственный процесс. Критерием оптимальности является получение максимальной производительности набора монтажей, которая достигается за счет уменьшения времени на перестройку оборудования при переходе на разные ширину и толщину проката. Была проведена проверка адекватности результатов автоматического формирования монтажных партий на реальных данных со склада слябов. На основании полученных результатов работы алгоритма видно, что раз-

работанный автоматизированный подход оптимального формирования монтажных партий на стане горячей прокатки металлургического производства позволяет увеличить производительность стана и снизить расход энергоресурсов.

**Сведения по наборам монтажей**

<i>N<sub>2</sub></i>	<i>K<sub>m</sub></i>	<i>K<sub>p</sub></i>	<i>L<sub>n</sub></i>	<i>M<sub>n</sub></i>	<i>T<sub>p</sub></i>	<i>V<sub>n</sub></i>	$\Delta V_n$
1	40	5952	5626,81	143772,51	183,50	30,66	0,68
2	42	6360	5830,02	155523,89	198,06	29,44	0,34
3	41	6118	5726,41	147124,89	186,37	30,73	0,31
4	35	5367	5014,91	129461,26	166,36	30,14	1,21
5	32	4702	4446,35	113782,32	147,38	30,17	0,36
6	37	6012	5678,48	146602,34	187,64	30,26	0,00
7	40	6547	6141,22	158462,54	201,55	30,47	0,00
8	37	5640	5358,69	135655,05	171,73	31,20	0,39
9	43	6399	6016,90	158217,29	199,88	30,10	0,62
10	38	5677	5348,68	140675,45	174,30	30,69	0,74
11	34	5040	4742,33	124922,34	155,59	30,48	0,60
12	28	4092	3929,63	102252,99	130,77	30,05	1,18
13	35	5260	4910,13	127793,26	165,73	29,63	0,53
14	25	3701	3558,23	91074,60	114,88	30,97	0,89

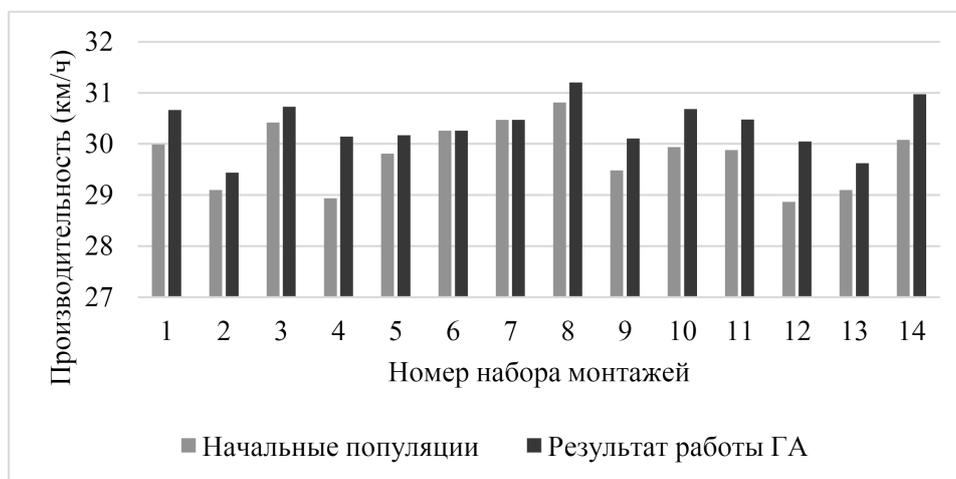


Рис. 6. Производительность (км/ч)

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 320 с.
2. Инструкция по эксплуатации нагревательных печей с шагающими балками цеха горячей прокатки. — Липецк : Типография ПАО «НЛМК», 2017. — 100 с.
3. Инструкция по эксплуатации нагревательных печей толкательного типа цеха горячей прокатки. — Липецк : Типография ПАО «НЛМК», 2017. — 100 с.

4. Истомин, В. А. Формирование начальных популяций монтажных партий на станах горячего проката / В. А. Истомин, А. В. Галкин // XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». — Тамбов : Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2019. — Т. 1. — С. 52–57.
5. Линчевский, Б. В. Металлургия черных металлов / Б. В. Линчевский, А. Л. Соболевский, А. А. Кальменев. — М. : Metallurgia, 1986. — 360 с.
6. Луговской, В. М. Алгоритмы систем автоматизации листовых станов / В. М. Луговской. — М. : Metallurgia, 1974. — 320 с.
7. Макаров, Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15 / Е. Г. Макаров. — СПб. : Питер, 2011. — 400 с.
8. Нагревательщик металла : учеб. пособие для подготовки рабочего персонала производства горячего проката. — Липецк : Типография ПАО «НЛМК», 2011. — 46 с.
9. Производство проката на стане 2000 в ПГП. — Липецк : Типография ПАО «НЛМК», 2016. — 141 с.
10. Сытник, К. И. Разработка и исследование оптимизационных алгоритмов эволюционных вычислений на основе унификации методов гибридизации : дис. ... канд. техн. наук / Сытник Кирилл Игоревич. — Воронеж, 2015. — 188 с.
11. Costa, C. B. Factorial design technique applied to genetic algorithm parameters in a batch cooling crystallization optimization / C. B. Costa, M. R. Wolf Maciel, R. Maciel Filho // Computers and Chemical Engineering. — 2005. — Vol. 29 (10). — P. 2229–2241.
12. Metamodel-based optimization of hot rolling processes in the metal industry / C. Jung, M. Zaeferrer, T. Bartz-Beielstein, G. Rudolph // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 2017. — Vol. 90. — P. 421–435. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9386-6>
13. Kucukkoc, I. Integrating ant colony and genetic algorithms in the balancing and scheduling of complex assembly lines / I. Kucukkoc // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2016. — Vol. 82. — P. 265–285. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7320-y>
14. Man, K. F. Genetic Algorithms in Production Planning and Scheduling Problems. / K. F. Man, K. S. Tang, S. Kwong // Genetic Algorithms Advanced. Textbooks in Control and Signal Processing. — London : Springer, 1999. — P. 259–280. — DOI: [10.1007/978-1-4471-0577-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0577-0_9)
15. Mazur, I. P. Mathematical and physical modeling of soft cobbing process of hot rolling steels / I. P. Mazur, T. I. Cherkashina // Materials Science Forum. — 2012. — Vol. 704–705. — P. 160–164. — DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.160>
16. Mitra, K. Genetic algorithms in polymeric material production, design, processing and other applications: A review / K. Mitra // International Materials Reviews. — 2008. — Iss. 53. — P. 275–297.
17. Comparative Study of Multi/Many-Objective Evolutionary Algorithms on Hot Rolling Application. / P. Mittal, A. Malik, I. Mohanty, K. Mitra // Optimization in Industry. — Cham : Springer, 2019. — P. 331–349. — DOI: [10.1007/978-3-030-01641-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01641-8_12)
18. Samigulina, G. A. Immune Network Modeling Technology for Complex Objects Intellectual Control and Forecasting System / G. A. Samigulina. — WA : Science Book Publishing House, 2015. — 172 p.
19. Tse, F. S. Mechanical Vibrations / F. S. Tse, I. E. Morse, R. T. Hinkle. — Boston : Allyn and Bacon, 1963. — 580 p.
20. Yu-guang, Zh. A Modified ant Colony Optimization Algorithm for Multi-Objective Assembly Line Balancing / Zh. Yu-guang, Ai. Bo // Soft Computing. — 2017. — Vol. 21, iss. 22. — P. 6881–6894.

## REFERENCES

1. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic Algorithms]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. 320 p.

2. *Instruktsiya po ekspluatatsii nagrevatelnykh pechey s shagayushchimi balkami tsekha goryachego prokata* [Operating Instructions for Heating Furnaces with Walking Beams of the Hot Rolled Shop]. Lipetsk, Tipografiya PAO "NLMK", 2017. 100 p.
3. *Instruktsiya po ekspluatatsii nagrevatelnykh pechey tolkatelnogo tipa tsekha goryachego prokata* [Operating Instructions for Push-Type Heating Furnaces of the Hot Rolled Shop]. Lipetsk, Tipografiya PAO "NLMK", 2017. 100 p.
4. Istomin V.A., Galkin A.V. Formirovanie nachalnykh populyatsiy montazhnykh partiy na stanakh goryachego prokata [Formation of Initial Populations of Assembly Batches at Hot Rolling Mills]. *XVI Vserossiyskaya shkola-konferentsiya molodykh uchenykh «Upravlenie bolshimi sistemami»*. Tambov, Izd-vo Tambov. gos. tekhn. un-ta, 2019, vol. 1, pp. 52-57.
5. Linchevskiy B.V., Sobolevskiy A.L., Kalmenev A.A. *Metallurgiya chernykh metallov* [Metallurgy of Ferrous Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 360 p.
6. Lugovskoy V.M. *Algoritmy sistem avtomatizatsii listovykh stanov* [Algorithms of Automation Systems for Sheet Mills]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 320 p.
7. Makarov E.G. *Inzhenernye raschety v Mathcad 15* [Engineering Calculations in Mathcad 15]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2011. 400 p.
8. *Nagrevvalshchik metalla : ucheb. posobie dlya podgotovki rabocheho personala proizvodstva goryachego prokata* [Metal Heater. Training Manual for the Training of Workers in the Production of Hot Rolled Products]. Lipetsk, Tipografiya PAO "NLMK", 2011. 46 p.
9. *Proizvodstvo prokata na stane 2000 v PGP* [Production of Rolled Products at the Mill 2000 in the HRP]. Lipetsk, Tipografiya PAO "NLMK", 2016. 141 p.
10. Sytnik K.I. *Razrabotka i issledovanie optimizatsionnykh algoritmov evolyutsionnykh vychisleniy na osnove unifikatsii metodov gibridizatsii: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development and Research of Optimization Algorithms for Evolutionary Computations Based on the Unification of Hybridization Methods. Dis. ... Cand. Tech. Sciences]. Voronezh, 2015. 188 p.
11. Costa C.B.B., Wolf Maciel M.R., Maciel Filho R. Factorial Design Technique Applied to Genetic Algorithm Parameters in a Batch Cooling Crystallization Optimization. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, vol. 29 (10), pp. 2229-2241.
12. Jung C., Zaefferer M., Bartz-Beielstein T., Rudolph G. Metamodel-Based Optimization of Hot Rolling Processes in the Metal Industry. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 90, pp. 421-435. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9386-6>
13. Kucukkoc I. Integrating Ant Colony and Genetic Algorithms in the Balancing and Scheduling of Complex Assembly Lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 265-285. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7320-y>
14. Man K.F., Tang K.S., Kwong S. Genetic Algorithms in Production Planning and Scheduling Problems. *Genetic Algorithms Advanced. Textbooks in Control and Signal Processing*. London, Springer, 1999, pp. 259-280. DOI: 10.1007/978-1-4471-0577-0\_9
15. Mazur I.P., Cherkashina T.I. Mathematical and Physical Modeling of Soft Cobbing Process of Hot Rolling Steels. *Materials Science Forum*, 2012, vol. 704-705, pp. 160-164. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.160>
16. Mitra K. Genetic Algorithms in Polymeric Material Production, Design, Processing and Other Applications: A Review. *International Materials Reviews*, 2008, iss. 53, pp. 275-297.
17. Mittal P., Malik A., Mohanty I., Mitra K. Comparative Study of Multi/Many-Objective Evolutionary Algorithms on Hot Rolling Application. *Optimization in Industry*. Cham, Springer, 2019, pp. 331-349. DOI: 10.1007/978-3-030-01641-8\_12
18. Samigulina G.A. *Immune Network Modeling Technology for Complex Objects Intellectual Control and Forecasting System*. WA, Science Book Publishing House, 2015. 172 p.
19. Tse F.S., Morse I.E., Hinkle R.T. *Mechanical Vibrations*. Boston, Allyn and Bacon, 1963. 580 p.
20. Yu-guang Zh., Bo Ai. A Modified Ant Colony Optimization Algorithm for Multi-Objective Assembly Line Balancing. *Soft Computing*, 2017, vol. 21, iss. 22, pp. 6881-6894.

## AUTOMATION OF ASSEMBLY BATCHES HOT ROLLED OF METALLURGICAL PRODUCTION

**Alexander V. Galkin**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Dean of the Faculty of Automation and Informatics,  
Lipetsk State Technical University  
avgalkin82@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4876-4865>  
Moskovskaya St, 30, 398055 Lipetsk, Russian Federation

**Vladimir A. Istomin**

Postgraduate Student of the Department of Higher Mathematics,  
Lipetsk State Technical University  
istomin96@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3010-1470>  
Moskovskaya St, 30, 398055 Lipetsk, Russian Federation

**Vladimir A. Alekseev**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Department of Automated Control Systems,  
Lipetsk State Technical University  
alexeev48@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-6725-967X>  
Moskovskaya St, 30, 398055 Lipetsk, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers the task of automating the process of forming assembly batches installation in a hot rolling mill. To solve this problem, a developed algorithm for the formation of optimal assembly batches at a hot rolling mill is proposed, taking into account the technological limitations imposed on the production process. The optimization of the set of assembly batches consists in the construction of a set with maximum productivity, which is achieved by reducing the time for the reconstruction of the equipment when switching to different width and thickness of rolling stock. A program for automatic formation of assembly batches at a hot-rolled steel mill has been implemented. It is now possible to save each batch included in the generated set to a separate file, as well as write general information about the entire set to a file. The algorithm was tested when forming assembly batches from a set of slabs available at the warehouse. Calculations on the formation of optimal assembly batches have been carried out. The presented results of the study show the increase of the formed assembly batches productivity and their compliance with all technological restrictions.

**Key words:** production planning, hot rolled products, formation of installation batches, rational picking, optimization, genetic algorithms.