

Липецкий государственный технический университет

Факультет автоматизации и информатики
Кафедра прикладной математики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

по направлению 01.04.04 Прикладная математика
тип программы Академическая
профиль Математическое моделирование в экономике и технике

Автоматизация формирования монтажных партий на станах горячего
проката металлургического производства

Студент

Группа МПИМ-18-1

Руководитель

к.т.н., доцент

учёная степень, учёное звание

Нормоконтроль

программного обеспечения

оформления работы

Рецензент

к.т.н., главный

специалист ЦГП

ПАО «НЛМК»

уч. ст., уч. зв., должность

подпись, дата

подпись, дата

подпись, дата

подпись, дата

подпись, дата

Истомин В.А.

фамилия, инициалы

Галкин А.В.

фамилия, инициалы

Сысоев А.С.

фамилия, инициалы

Сысоев А.С.

фамилия, инициалы

Мордовкин Д.С.

фамилия, инициалы

Работа рассмотрена кафедрой и допущена к защите в ГЭК

Зав. кафедрой

Орешина М.Н.
26.06.2020 г.

Липецк 2020 г.

Липецкий государственный технический университет

**Факультет ФАИ
Кафедра ПМ**

Зав. кафедрой Орешина М.Н.
«24» декабря 2019 г.

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Студенту Истомину Владимиру Александровичу **группы** МПМ-18-1

1. **Тема** Автоматизация формирования монтажных партий на станах горячего проката металлургического производства
2. **Исходные данные** Техническая, справочная и нормативная литература; научная литература; интернет.
3. **Ожидаемые результаты** Построение модели автоматического формирования оптимальных монтажных партий на станах горячего проката с применением генетических алгоритмов.
4. **Срок сдачи работы руководителю** 19.06.2020 г.
5. **Консультанты** Пименов В.А.
6. **Дата выдачи задания** 24.12.2019 г.
7. **Руководитель работы**

_____ /Галкин А.В./

8. **Задание принял к исполнению студент**

_____ /Истомин В.А./

АННОТАЦИЯ

С. 62. Ил. 36. Табл. 5. Литература 16 назв.

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрена задача оптимального формирования монтажных партий горячекатаного проката. Для ее решения используется разработанный генетический алгоритм. Описывается реализующее данный алгоритм созданное программное обеспечение.

Использование данной программы дает возможность оптимизировать и автоматизировать процесс комплектования монтажей, что позволяет повысить эффективность работы стана горячего проката.

ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Слайд 1. Титульный лист	1
Слайд 2. Актуальность	1
Слайд 3. Цель и задачи	1
Слайд 4-5. Формализация задачи	2
Слайд 6. Схема производственного процесса	1
Слайд 7. Схема алгоритма программы	1
Слайд 8. Схемы посадки слябов в нагревательных печах	1
Слайд 9. Технологические ограничения	1
Слайд 10. Формирование начальных популяций	1
Слайд 11. Мутации	1
Слайд 12. Скрещивание	1
Слайд 13. Результаты работы генетического алгоритма	1
Слайд 14. Результаты работы	1
<hr/> Всего слайдов	<hr/> 14

Оглавление

Введение	5
1 Обзор производства горячекатаной листовой стали и существующих математических методов оптимизации	6
1.1 Горячая прокатка металла	6
1.2 Математическое программирование	13
1.3 Постановка задач исследования	21
2 Математическая модель процесса, оптимизация процесса, управление процессом	23
2.1 Формализация задачи	23
2.2 Формирование начальных популяций генетического алгоритма	26
2.3 Мутации генетического алгоритма	28
2.4 Скрещивание генетического алгоритма	29
3 Программная реализация	31
3.1 Описание программы	31
3.2 Руководство оператора	41
4 Исследование результатов построения оптимальных монтажных партий	50
Заключение	60
Список использованных источников	61

Введение

Горячекатаный прокат 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. Прокатка металла реализуется монтажными партиями, для обеспечения требуемого качества которых накладывается целый ряд технологических ограничений. В этом случае оптимизация производства заключается в таком планировании монтажных партий, которое минимизирует общее время их прокатки, т.е. увеличивает производительность. Таким образом, разработка методов оптимизации, а также внедрение новых методов формирования монтажных партий на станах горячего проката является одной из актуальных тем исследования.

Цель исследования – создание модели оптимального формирования монтажных партий на стане горячей прокатки металлургического производства.

Объект исследования – процесс формирования монтажных партий на станах горячего проката.

Предмет исследования – генетические алгоритмы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить техническую и научную литературу по методам оптимизации и генетическим алгоритмам, а также особенности производства горячекатаной листовой стали;
- разработать алгоритм оптимального формирования монтажных партий на стане горячей прокатки на основе генетических алгоритмов;
- создать программное обеспечение, реализующее алгоритм оптимального формирования монтажных партий;
- провести расчеты по формированию оптимальных монтажных партий. Сделать выводы.

1 Обзор производства горячекатаной листовой стали и существующих математических методов оптимизации

1.1 Горячая прокатка металла

Черная металлургия является огромной отраслью, которая состоит из совокупности различных отраслей по добыче сырья, выплавке стали, чугуна и по производству проката [1]. Основой развития строительства и машиностроения служит именно черная металлургия. Производимые черной металлургией металлы и сплавы показаны на рисунке 1.



Рисунок 1 – Металлы и сплавы черной металлургии

Предприятия данной отрасли подразделяют на три типа:

- 1) Металлургия полного цикла (характеризующаяся наличием буквально всех стадий производства на едином предприятии).
- 2) Передельная металлургия (одна из стадий при данном виде производства связана с переработкой металлолома или же выделена в отдельное производство).
- 3) Малая металлургия (наличие металлургического цеха в составе крупных машиностроительных комплексов).

ПАО «НЛМК» (Новолипецкий металлургический комбинат) — одна из крупнейших в мире металлургических компаний, являющаяся предприятием с полным металлургическим циклом. НЛМК производит чугун, слябы, горячекатаную, холоднокатаную, оцинкованную, динамную, трансформаторную сталь и сталь с полимерным покрытием.

Схема производства Новолипецкого металлургического комбината показана на рисунке 2.

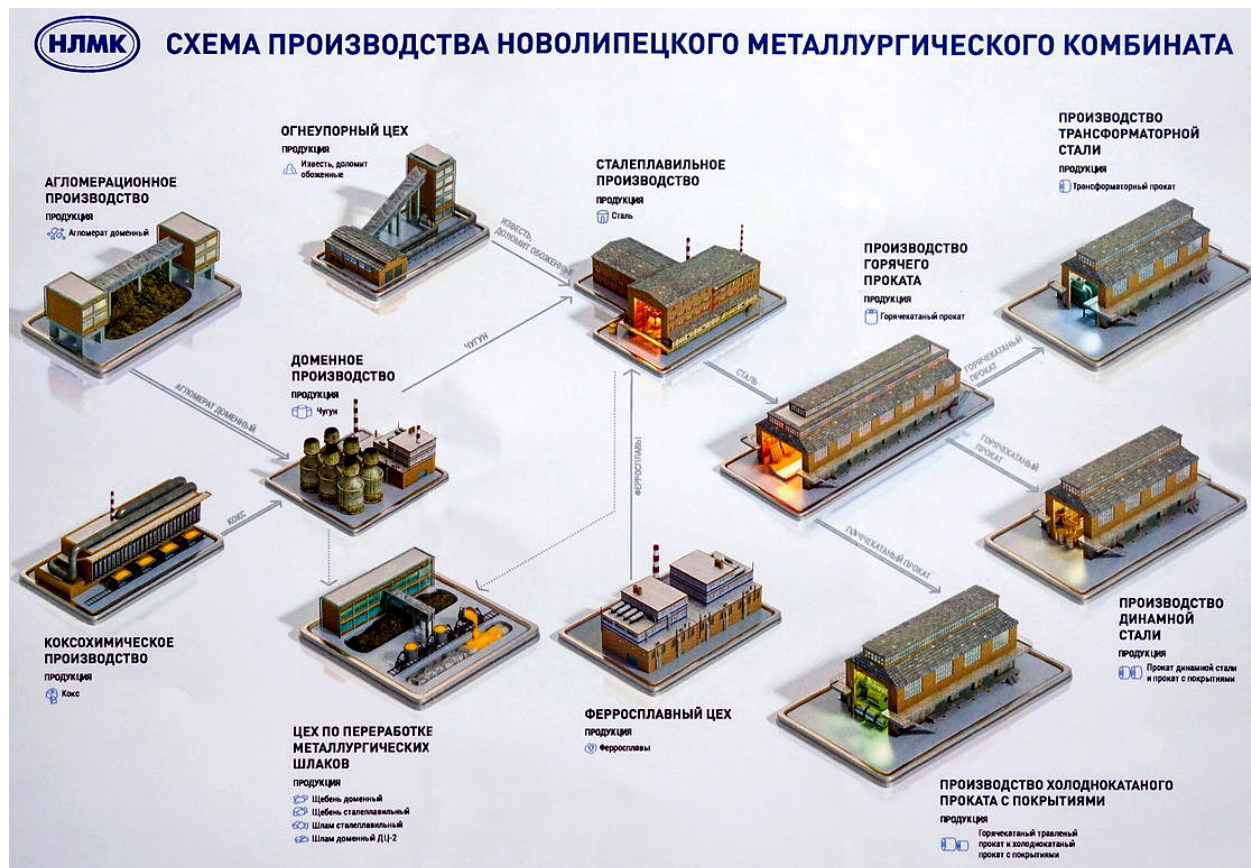


Рисунок 2 – Схема производства ПАО «НЛМК»

Общая технологическая схема производства комбината включает: агломерационное, коксохимическое, доменное, сталеплавильное и прокатное производства. Причем наибольшей добавочной стоимостью продукция обладает на этапе получения проката. Подробнее опишем производство горячекатаного проката.

Прокатка — это обработка металлов давлением, которую в зависимости от температуры, называют холодной, теплой или горячей. Операция прокатки заключается в том, что металл обжимается между вращающимися валками прокатных станов. При горячем деформировании

стали и цветные металлы нагреваются до температурыковки. На сегодня именно этим способом производится основной объем проката. Выполненные с помощью горячей прокатки листы могут служить подкатом для холодной прокатки или полуфабрикатом для производства изделий различного назначения [2; 3].

В настоящее время основной объем листовой стали толщиной 1,2-16 мм производят на непрерывных станах горячей прокатки. На территории Российской Федерации сооружено три таких современных стана 2000: на Новолипецком, Череповецком и Магнитогорском металлургических комбинатах.

Технологический процесс производства горячекатаного листа на непрерывном стане содержит следующие этапы:

- нагрев слябов в печах;
- прокатка в черновой и чистовой группах клетей;
- охлаждение на отводящем рольганге;
- сматывание полосы в рулон.

Общая схема горячекатаной прокатки представлена на рисунке 3.

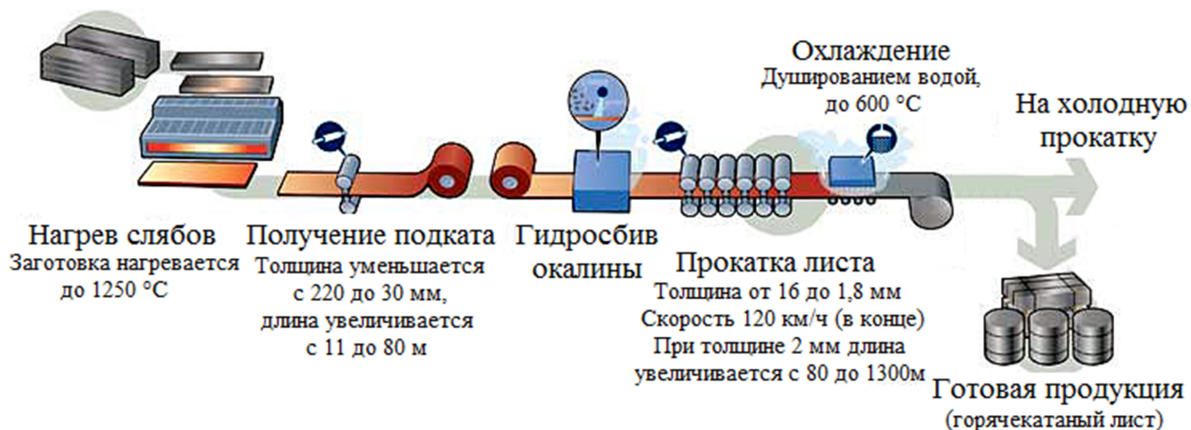


Рисунок 3 – Общая схема горячекатаной прокатки

В июле 1969 года на НЛМК был запущен первый в стране широкополосный стан 2000 непрерывной горячей прокатки производительностью 5,8 млн тонн проката в год. Он предназначен для производства листа толщиной 1,2-16 мм и шириной 900-1350 мм из слябов толщиной 250-300 мм, длиной до 10,5 м и массой до 36 т.

Нагрев слябов до 1180-1280 °С производится пятью методически нагривающими печами производительностью 250-320 т/ч каждая при холодном посаде. Четыре печи с шагающими балками [4] и одна толкательного типа [5].

Черновая группа стана состоит из вертикального окалиноломателя, двухвалковой клетки и четырех универсальных четырехвалковых клетей. Чистовая группа — из двухвалкового окалиноломателя с горизонтальными валками и семи четырехвалковых клетей, объединенных в непрерывную группу.

В процессе нагрева в печи сляб интенсивно окисляется раскаленными газами и покрывается толстым слоем окалины. Для предотвращения при прокатке вдавливания окалины в металл производится ее удаление с помощью вертикального окалиноломателя. Сляб обжимается с боков на 15-80 мм, хрупкая окалина отслаивается с его поверхности и сбивается водой, подаваемой под давлением до 15 МПа.

Прежде чем раскат войдет в последующую клетю он полностью выходит из предыдущей, что обеспечивается расположением клетей черновой группы, которые значительно удалены друг от друга. Естественное уширение металла при прокатке в горизонтальных валках компенсируется соответствующим значением обжатия в вертикальных валках черновых универсальных клетей. За каждой клетью установлен гидросбив для удаления окалины на выходе раската.

После прокатки в черновой группе по промежуточному рольгангу подкат толщиной 25-50 мм с температурой 1000-1120 °С (чем меньше толщина подката, тем меньше соответствующее значение температуры) поступает в чистовую группу клетей.

Перед чистовой группой установлены ножницы для обрезки переднего и заднего концов раската. В чистовом окалиноломателе валки прижимаются к металлу с помощью пружинных стаканов. Слой окалины, который образовался при прохождении промежуточного рольганга, разрушается при обжатии полосы на 0,2-0,4 мм. Раздробленная окалина удаляется гидросбивом. Клетки чистовой группы размещены на близком расстоянии друг от друга, из-за чего полоса при прокатке может одновременно находиться во всех клетях.

Чтобы получить сталь с мелким и равномерным зерном прокатку в последней клетки необходимо проводить при температуре 850-950 °С, а смотку полосы в рулон — 500-650 °С. Ускоренное охлаждение полосы на стане достигается за счет установленных над и под отводящим рольгангом устройств для интенсивной подачи воды (до 12000 м³/ч). При скорости прокатки не выше 10 м/с проводится заправка переднего конца полосы в моталку, а затем скорость повышается до максимальной (20 м/с). При ускорении происходит разогрев металла по длине из-за увеличивающейся скорости деформации. Чтобы обеспечить выравнивание температуры по длине полосы ускорение составляет 0,05-0,1 м/с².

Смотка полос выполняется в одной из двух групп моталок. Группа моталок находящаяся ближе к клетям предназначена для быстро остывающих полос толщиной 1,2-5 мм, а дальняя – для более толстых. После смотки рулоны поступают по подземному конвейеру в цех холодной прокатки или в отделение отделки горячекатаных рулонов [6].

Основным показателем конкурентоспособности продукции является ее качество. При производстве горячекатаной полосы показатели качества определяются в первую очередь механическими свойствами и точностью ее геометрических размеров. Существенно на стоимость производимой продукции может влиять производительность стана горячей прокатки. Без внесения изменений в технологию производства повышение производительности можно добиться только организационными мероприятиями, например, за счет грамотного планирования производства. Разработка и внедрения автоматизированных систем планирования позволяет рассмотреть значительно больше допустимых вариантов в ограниченное время, уменьшить влияние человеческого фактора, при этом оставив за специалистами право выбирать окончательный вариант на основании своего экспертного мнения.

Прокатка металла на непрерывном широкополосном стане [7] осуществляется монтажными партиями (последовательность проката имеющих на складе слябов) при соблюдении целого ряда различных технологических ограничений [8], призванных обеспечить требуемое качество проката. Учитывая ограничения по длине в каждом монтаже можно выделить 5 групп, которые содержат в себе определенные условия:

1) Настроечный металл после перевалки рабочих валков.

После перевалки рабочих валков клетей №№ 6-12 в начале монтажа для настройки стана (разогрева) прокатывают не менее 5 полос проката шириной не более 1550 мм (кроме подката с назначением на 1-ю группу отделки поверхности и металла предназначенного для последующей холодной прокатки на толщину 0,60 мм и менее с отжигом в колпаковых печах). Толщина проката должна быть не менее 3,00 мм при ширине до 1370 мм и не менее 3,50 мм при ширине свыше 1370 мм.

2) По длине монтажа от 7 до 60 км.

В пределах от 7 до 60 км после перевалки рабочих валков чистовой группы прокатывают:

- подкат толщиной 2,50 мм и менее, предназначенный для последующей холодной прокатки на толщину 0,60 мм и менее с отжигом в колпаковых печах;
- подкат толщиной 2,50 мм и менее, предназначенный для последующей холодной прокатки на толщину 0,60 мм и менее с отжигом в АНО с ограниченными требованиями по плоскостности.

При формировании в одной монтажной партии данного проката одной ширины, приоритетом является металл с назначением на меньшую толщину холоднокатаной продукции, затем – металл с отжигом в колпаковых печах.

3) По длине монтажа до 97 км.

В пределах первых 97 км после перевалки рабочих валков чистовой группы прокатывают следующий сортамент:

- подкат для ПХПП (кроме подката на толщину 0,60 мм и менее с назначением на отжиг в колпаковых печах) толщиной 2,50 мм и менее;
- подкат углеродистой стали для ПДС толщиной 2,50 мм и менее;
- прокат на экспорт для холодной прокатки толщиной 2,50 мм и менее.

4) По длине монтажа до 120 км.

В пределах первых 120 км после перевалки рабочих валков чистовой группы прокатывают следующий сортамент:

- подкат для ПХПП, подкат углеродистой стали для ПДС и прокат на экспорт для холодной прокатки толщинами более 2,50 мм;
- прокат на экспорт для холодной прокатки и подкат углеродистой стали для ПДС толщиной 2,00-2,50 мм при условии промежуточной перевалки клетки № 12 в монтаже, в т.ч. после ЭАС;
- прокат по «прямой технологии» с назначением в ПХПП Т4 (технология без холодной прокатки);
- прокат толщиной от 1,45 до 1,79 мм.

5) По длине монтажа после 120 км.

После прокатки 120 км в монтаже допускается прокатывать только товарный прокат толщиной более 1,79 мм, не предназначенный для последующей холодной прокатки и подкат из электротехнических марок стали.

Также для каждого монтажа выдерживаются следующие ограничения:

- 1) Полный объем монтажной партии не должен превышать 4000 т.
- 2) Требования к формированию монтажа по ширине полосы. После настроечных полос должна соблюдаться очередность прокатки от широких полос к узким. Перестройки «от широкого к узкому» осуществлять последовательно, с шагом – не более 250 мм от номинальной ширины полосы.
- 3) Для обеспечения технологичности перестроек рекомендуется производить перестройки по толщине с шагом не более 1,50 мм.
- 4) Прокатка подката одной ширины (полосы, отличающиеся друг от друга по ширине на величину не более 20 мм) производится в количестве не более 40 км (кроме подката толщиной 2,50 мм и менее для последующей прокатки на толщину по заказу 0,6 мм и менее с отжигом в колпаковых печах ПХПП, для которого данное ограничение составляет 33 км). Допускается превышение данного ограничения на два сляба для сохранения комплектности плавов.

При формировании монтажных партий возможно составить несколько различных вариантов наборов монтажей, но все они будут отличаться своей производительностью. Снижение темпа производства напрямую зависит от дополнительного времени на настройку оборудования при пе-

реходе на другие толщины и ширины прокатываемых слябов. Использование на этапе формирования монтажных партий математических методов позволяет оптимизировать данный процесс по различным критериям оптимальности, которые могут быть сформированы. Такой подход позволяет оптимизировать процесс составления монтажных партий за счет возможности его автоматизации, и тем самым повысить производительность стана без дополнительных затрат на перестройку оборудования и снизить расход энергоресурсов. Рассмотренный процесс оптимального формирования монтажных партий относится к задачам математического программирования, так как требуется составить набор монтажей, соответствующих всем установленным технологическим ограничениям, и имеющей наибольшую производительность.

1.2 Математическое программирование

Математическое программирование — это раздел математики, посвященный теории и методам решения задачи нахождения экстремумов функций при различных ограничениях. В отличие от классической математики, математическое программирование имеет дело с математическими методами для решения проблем поиска наилучших возможных вариантов.

В общем случае, решение задачи оптимизации [9] означает поиск наилучшего решения среди возможных решений.

Если оптимизация связана с вычислением оптимальных значений параметров для данной структуры объекта, то она называется параметрической. Задача выбора оптимальной структуры является структурной оптимизацией.

Решение любой задачи оптимизации основано на построении математической модели [10] исследуемого объекта и проведении вычислительного эксперимента. Выполнение вычислительного (компьютерного) эксперимента не с самим объектом, а с его моделью позволяет эффективно исследовать его свойства в любой ситуации.

На первом этапе эксперимента создается некий объектный эквивалент, его модель, которая отражает наиболее важные свойства объекта в математической форме. Вторым этапом является разработка алгоритма

реализации модели на компьютере. Модель представлена в практической форме с использованием численных методов, определяется порядок вычислений и логических операций, которые должны быть определены для поиска требуемых величин с заданной точностью. На третьем этапе создаются программы, которые исполняют алгоритмы на доступном компьютеру языке. Поиск оптимальных значений параметров – это один из этапов вычислительного эксперимента, который позволяет выработать управляющее воздействие на объект исследования.

Теория оптимизации представляет собой сочетание фундаментальных математических результатов и численных методов, которые позволяют избежать полного перечисления всех решений.

Методы оптимизации – это методы построения алгоритмов нахождения оптимального (минимального или максимального) значения некоторой функции.

Методы глобальной оптимизации представлены на рисунке 4.

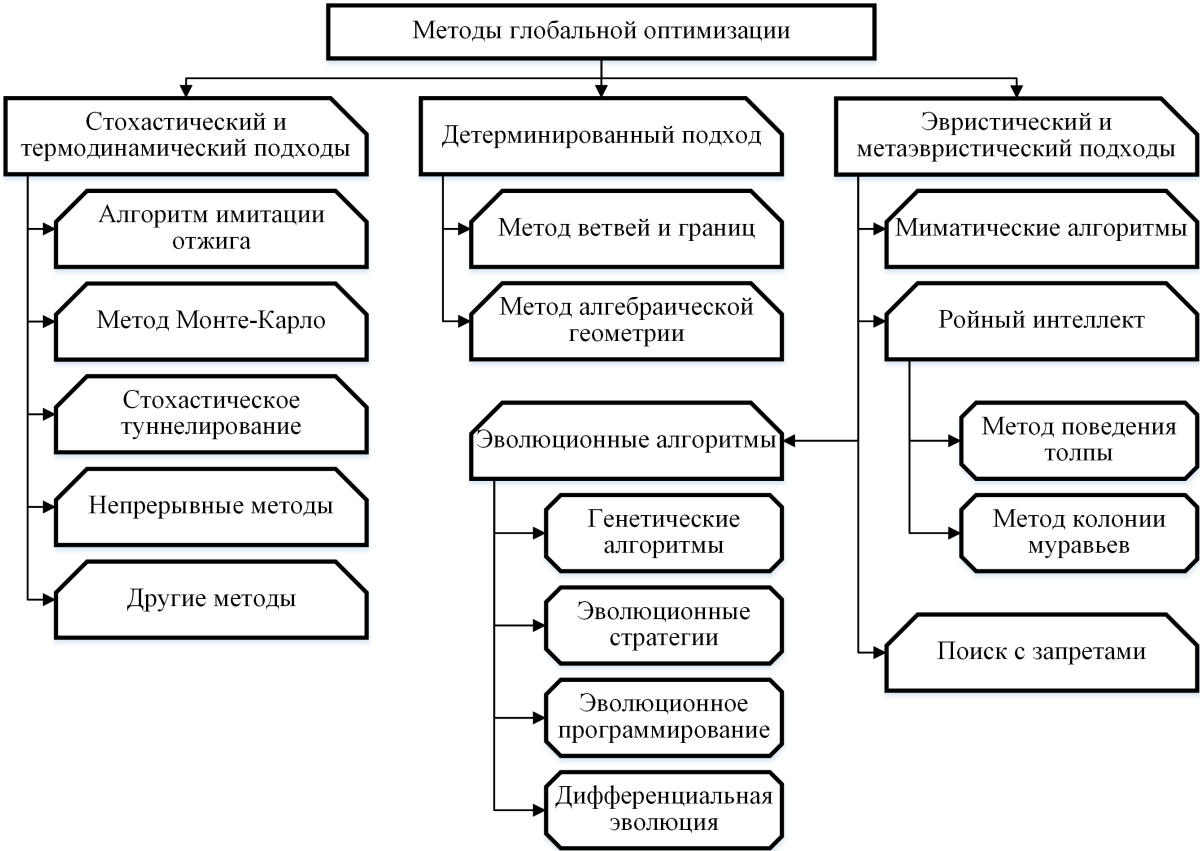


Рисунок 4 – Методы глобальной оптимизации

Проблема оптимизации сложных систем, в которую входят многие социально-экономические, технические, организационно-управленческие, комбинаторные задачи, задачи теории игр, а также задачи защиты информации, становится одной из ведущих в мире искусственного интеллекта. Часто её можно представить в виде целевой функции, которую необходимо оптимизировать (более того, она не всегда определяется аналитически, а иногда определяется как «черный ящик»), а также в виде набора начальных данных и ограничений, накладываемых на решение. Это представление соответствует задаче путешествующего коммивояжера, задаче оптимального размещения, задаче нахождения динамического баланса, а также многим другим задачам из соответствующих областей. Для большинства из этих задач детерминированные методы решения неприемлемы или не обеспечивают необходимой степени точности. Поэтому необходим альтернативный подход – использование эволюционных методов глобальной оптимизации и намеренное введение элемента случайности в алгоритм поиска. Более того, случайность будет использоваться для сбора информации о поведении объекта исследования и целей управления [11]. Основными достоинствами таких методов являются:

- повышенное быстродействие;
- высокая надежность и помехоустойчивость;
- высокая робастность, т.е. малочувствительность к нерегулярностям поведения целевой функции, наличию случайных ошибок при вычислении функции;
- сравнительно простая внутренняя реализация;
- низкая чувствительность к росту размерности множества оптимизации;
- возможность естественного ввода в процесс поиска операции обучения и самообучения;
- в рамках известных схем случайного поиска легко строятся новые алгоритмы, реализующие различные эвристические процедуры адаптации.

1.2.1 Стохастические и термодинамические подходы

Грубый случайный поиск (метод Монте-Карло)

Это самый простой и самый известный алгоритм случайного поиска, состоящий из равномерных случайных «бросаний» точек в пространстве поиска. Его основным преимуществом является простота, и в теории глобальной оптимизации этот алгоритм в основном используется в качестве эталона при теоретическом или численном сравнении алгоритмов и как неотъемлемая часть некоторых алгоритмов глобального случайного поиска.

Алгоритм имитации отжига

Этот алгоритм был разработан Киркпатриком в 1982 году. Имитация отжига основана на теории термодинамического процесса нагрева и медленного охлаждения вещества для получения кристаллической структуры. Начиная со случайно выбранной точки в пространстве поиска, выполняется шаг в случайном направлении. Если этот шаг приводит в точку с более низким уровнем значения функции оптимизации, то он принимается. Если же он приводит в точку с большим значением функции оптимизации, то он принимается с вероятностью $P(I)$, где I — время. Функция $P(I)$ изначально близка к единице, но затем постепенно уменьшается до нуля - аналогично охлаждению твердого тела. Таким образом, в начале процесса моделирования принимаются любые ходы, но, когда «температура» падает, вероятность совершения негативных шагов уменьшается. Негативные шаги иногда необходимы в том случае, когда нужно избежать локального оптимума, но принятие слишком многих негативных шагов может увести в сторону от глобального оптимума. Этот метод в настоящее время активно исследуется (быстрый «переотжиг», параллельный отжиг) и успешно применяется во многих областях.

Детерминированный подход

В методах ветвей и границ множество решений M разбивается на ряд подмножеств M_k (ветвление), и вместо перебора всех элементов этих подмножеств рассчитываются нижние границы $L(M_k)$ минимизируемой целевой функции $F(X)$ в подмножествах M_k . Сокращение перебора возможно в связи с тем, что далее ветвлению подвергается только

то подмножество M_k , у которого нижняя граница оказалась наименьшей. Однако если у новых появившихся подмножеств нижние границы окажутся хуже, чем у какого-либо из ранее образованных подмножеств, то придется вернуться к шагу ветвления, на котором было образовано это более перспективное подмножество. Кроме того, процесс предлагает точное решение задачи, но в худшем случае из-за таких возвратов имеет место полный перебор. Чтобы использовать метод необходимо иметь алгоритм вычисления нижних границ. Если используется то или иное упрощение задачи (приближенное вычисление нижних границ, ограничение возвратов и т.п.), то метод становится приближенным и за счет потери точности гарантирует приемлемые затраты времени решения.

Метод поиска с запретами

Поиск с запретами — еще один стохастический метод глобального поиска. Он основан на аналогии с поведением человека, то есть наличием случайных элементов в поведенческом паттерне человека, что означает, что в одной и той же ситуации человек может вести себя по-разному. Сохранение листа запретов, в котором, например, может храниться набор уже рассмотренных точек пространства поиска, является одной из основных особенностей данного подхода. Алгоритм состоит в выборе случайной точки в пространстве поиска, рассмотрении точек из окрестности заданной точки и, после достижения определенного критерия, выбора новой точки в другой области поиска, которая еще не рассматривалась.

1.2.2 Эвристические и метаэвристические подходы

Эволюционное программирование

Подход, основанный на тех же принципах, что и ГА, но содержащий больше эвристических зависимостей и основанный на ранжировании мутаций, используется во многих комбинаторных и оптимизационных задачах, в задачах машинного обучения.

Эволюционные стратегии

Эволюционный подход использует адаптивный уровень мутаций при построении структуры индивида, что позволяет ему адаптироваться к любой изменяющейся модели. Он также используется в областях комбинаторики, экспертных систем и машинного обучения.

Генетические алгоритмы

Генетические алгоритмы относятся к группе эвристических методов, используемых для решения задач поиска и оптимизации. Они сочетают в себе элементы детерминированного и стохастического подходов. По этой причине ГА не являются исключительными только для случайных методов поиска. Кроме того, они успешно используются в сочетании с аналитическими методами или другими алгоритмами поиска и оптимизации. ГА основан на принципе естественного отбора (выживания сильнейшего или наиболее приспособленного). Во время поиска анализируются несколько ветвей эволюции одновременно. Применяя так называемую «функцию приспособленности», которая определяет и играет роль окружающей среды в моделировании эволюционного процесса, ГА «выращивают» новые популяции объектов, генетическая структура которых более приспособлена к текущей ситуации. Генетическая модель имитирует эволюцию адаптации через механизмы изменчивости объектов [12].

В теории ГА применяется следующая терминология:

- популяция — множество случайных решений;
- особь популяции — одно из решений множества;
- размер популяции — размер (число) множества решений;
- поколение — интервал времени, равный существованию особи от момента рождения до момента оставления потомства;
- число поколений — количество итераций, в течение которых обрабатывается множество (время генетического поиска);
- целевая функция — оценка решения, позволяющая судить о его качестве;
- кроссовер (скрещивание) — генерация двух новых решений (потомков) путем перекомпоновки двух старых решений (родителей);
- мутация — генерация нового решения на основе старого путем перестройки кода его структуры или самой структуры.

ГА работают с совокупностью особей — популяцией, где каждая особь представляет возможное решение этой проблемы. Она оценивается по степени ее «приспособленности» в зависимости от того, насколько «хорошим» является соответствующее ей решение задачи. В природе это

эквивалентно оценке того, насколько эффективно организм борется за ресурсы. Наиболее приспособленные особи получают возможность «воспроизводить» потомство с помощью «перекрестного скрещивания» с другими особями популяции. Это приводит к появлению новых особей, объединяющих некоторые характеристики, которые они наследуют от своих родителей. Менее приспособленные особи имеют меньшую вероятность размножения, поэтому свойства, которыми они обладают, будут постепенно исчезать из популяции в процессе эволюции. Иногда происходят мутации, или спонтанные изменения в генах.

Благодаря этому из поколения в поколение хорошие характеристики распространяются по всей популяции. Скрещивание наиболее адаптированных особей приводит к тому, что самые перспективные участки пространства поиска наследуются. В конечном итоге популяция будет сходиться к оптимальному решению задачи [13].

Схема работы генетического алгоритма приведена на рисунке 5.

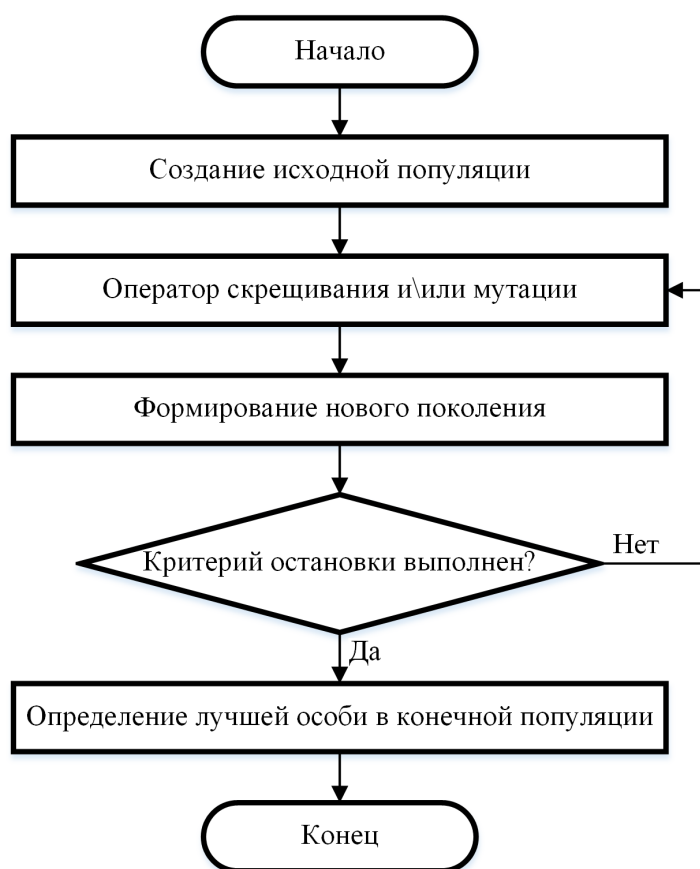


Рисунок 5 – Схема работы генетического алгоритма

Критерием остановки работы генетического алгоритма может быть одно из следующих событий:

- сформировано заданное число поколений;
- исчерпано время, отведенное на эволюцию;
- популяция достигла заданного качества (значение критерия одной (нескольких, всех) особей превысило заданный порог);
- достигнут некоторый уровень сходимости (особи в популяции стали настолько подобными, что дальнейшее их улучшение происходит чрезвычайно медленно);
- и др.

1.2.3 Недостатки и преимущества генетических алгоритмов

К недостаткам использования ГА относятся:

- используя ГА, трудно найти точный глобальный оптимум;
- ГА не легко настроить, чтобы найти все решения задачи;
- не для всех видов деятельности можно найти оптимальное кодирование параметров;
- ГА сложно применять для изолированных функций. Изолированность («поиск иголки в стоге сена») является проблемой для любого метода оптимизации, так как функция не предоставляет никакой информации, указывающей, в какой области искать максимум. Лишь случайное попадание особи в глобальный экстремум может решить задачу;
- ГА с трудом оптимизирует очень зашумленные функции. Дополнительный шум сильно влияет на сходимость многих эволюционных методов и поэтому часто замедляет поиск решения ГА.

Тем не менее, есть ряд преимуществ использования ГА по сравнению с другими методами глобальной оптимизации:

- простота использования;
- слабая зависимость эффективности от настроек оптимизатора для многих задач;
- ГА — это универсальный метод оптимизации сложных многопараметрических функций;

- ГА не зависит от рассматриваемой проблемы, так как работает с закодированными параметрами;
- ГА успешно применяются для широкого спектра задач;
- ГА используются для неформализуемых задач, когда целевая функция нечетко сформулирована или вообще отсутствует.

Сфера применения ГА очень широка [14]: от автоматизированного проектирования, решения комбинаторных задач и проектирования нейронных сетей до применения в экспертных и обучающихся системах. Основные направления применения на практике:

- оптимизация сложных численных функций (наиболее традиционное использование ГА);
- распознавание образов, речи и т.п. (например, снимки из космоса или создание фотороботов);
- комбинаторные задачи (включая задачи коммивояжера, планирование работ и т.д.);
- планирование (от расстановки мебели до сложных экономических и политических проблем);
- самообучающиеся системы (классификационные системы, в которых ГА создают набор правил для решения предложенной проблемы);
- контроль и управление (в больших комплексных системах, таких как завод или фабрика, они способны контролировать множество параметров, чтобы поддерживать идеальный режим работы системы).

1.3 Постановка задач исследования

Создание модели оптимального формирования монтажных партий на стане горячей прокатки металлургического производства является актуальной темой исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить техническую и научную литературу по методам оптимизации и генетическим алгоритмам, а также особенности производства горячекатаной листовой стали;

- разработать алгоритм оптимального формирования монтажных партий на стане горячей прокатки на основе генетических алгоритмов;
- создать программное обеспечение, реализующее алгоритм оптимального формирования монтажных партий;
- провести расчеты по формированию оптимальных монтажных партий. Сделать выводы.

2 Математическая модель процесса, оптимизация процесса, управление процессом

В процессе изучения рассматриваемой темы был написан алгоритм формирования оптимальных монтажных партий горячекатаного проката с учетом задаваемых технологических ограничений. Оптимизация реализована за счет применения генетических алгоритмов. Выполним формализацию задачи.

2.1 Формализация 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 ленты 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 конечную выборку входят следующие столбцы:

- 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 -ой монтажной партии, d — общая длина проката u -ой монтажной партии, t — общее время на прокатку всех слябов u -ой монтажной партии.

Время на прокатку считается по формуле:

$$t = x_1 + tp,$$
$$tp = \begin{cases} 120, & \text{если } (x_{10,w} \neq x_{10,w+1}), \\ 60, & \text{если } (x_{9,w} \neq x_{9,w+1}) \wedge (x_{10,w} = x_{10,w+1}), \\ 0, & \end{cases}$$

где tp — время на перенастройку стана, w — порядковый номер сляба в u -ой монтажной партии.

С учетом описанных в первой главе 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 -ой 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 6.

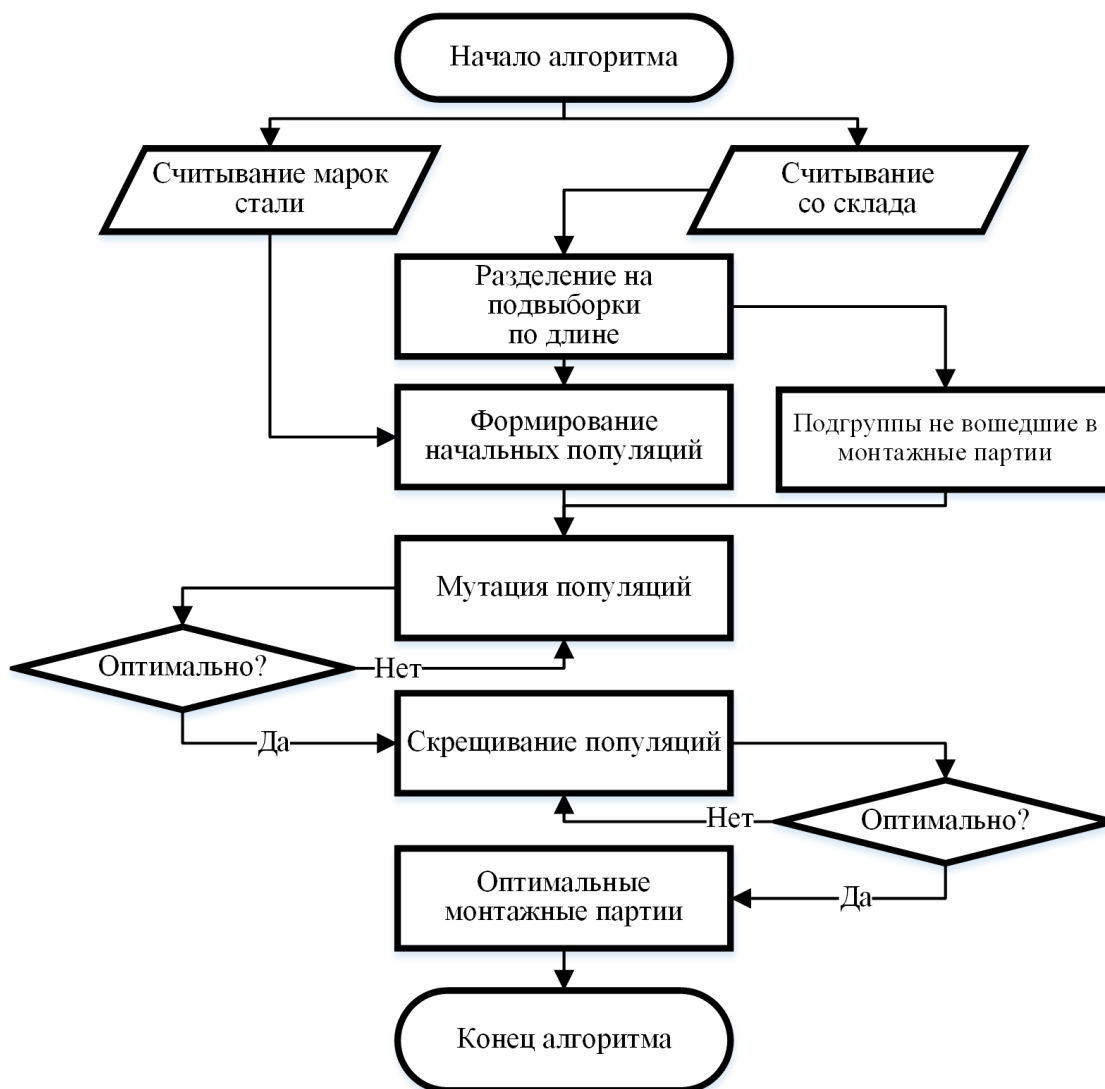


Рисунок 6 – Блок-схема программы

Реализация алгоритма оптимизации происходит следующим образом. Происходит считывание файла Excel с подготовленной выборкой. 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 [15]. Данные группы марок требуются при формировании монтажей для соответствия накладываемых технологических ограничений.

2.2 Формирование начальных популяций генетического алгоритма

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 7.

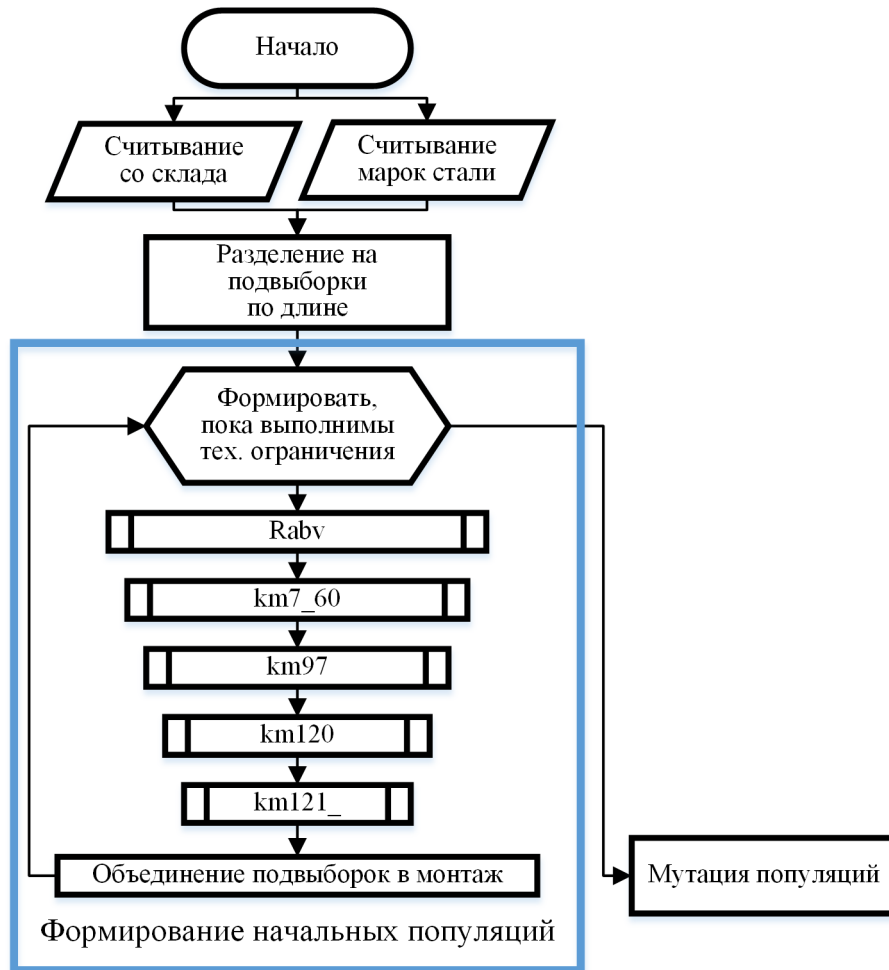


Рисунок 7 – Схема формирования начальных популяций

Фрагмент полученных начальных популяций (монтажей) представлен на рисунке 8.

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

Рисунок 8 – Фрагмент полученных начальных популяций

Следующим шагом будет мутация полученного набора монтажей.

2.3 Мутации генетического алгоритма

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 9.

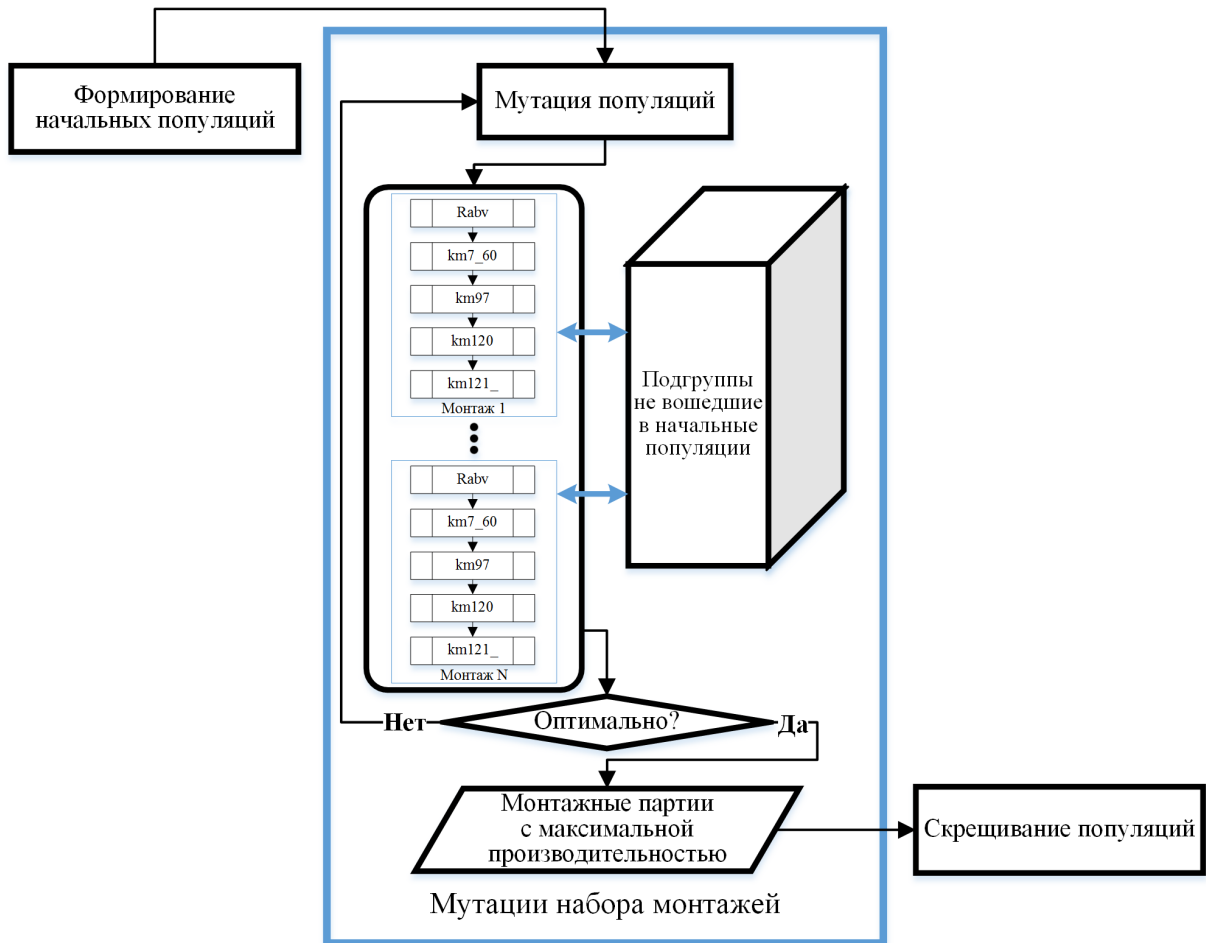


Рисунок 9 – Схема мутаций популяций

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, т.е. 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 про-

изводительности их предка. При этом проводится проверка монтажей внутри набора на соответствие введенных ограничений.

2.4 Скрещивание генетического алгоритма

Лучший набор монтажей, полученный с помощью мутаций проходит через скрещивание среди монтажей, вошедших в этот набор. Свободные подвыборки отбрасываются.

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 на рисунке 10.

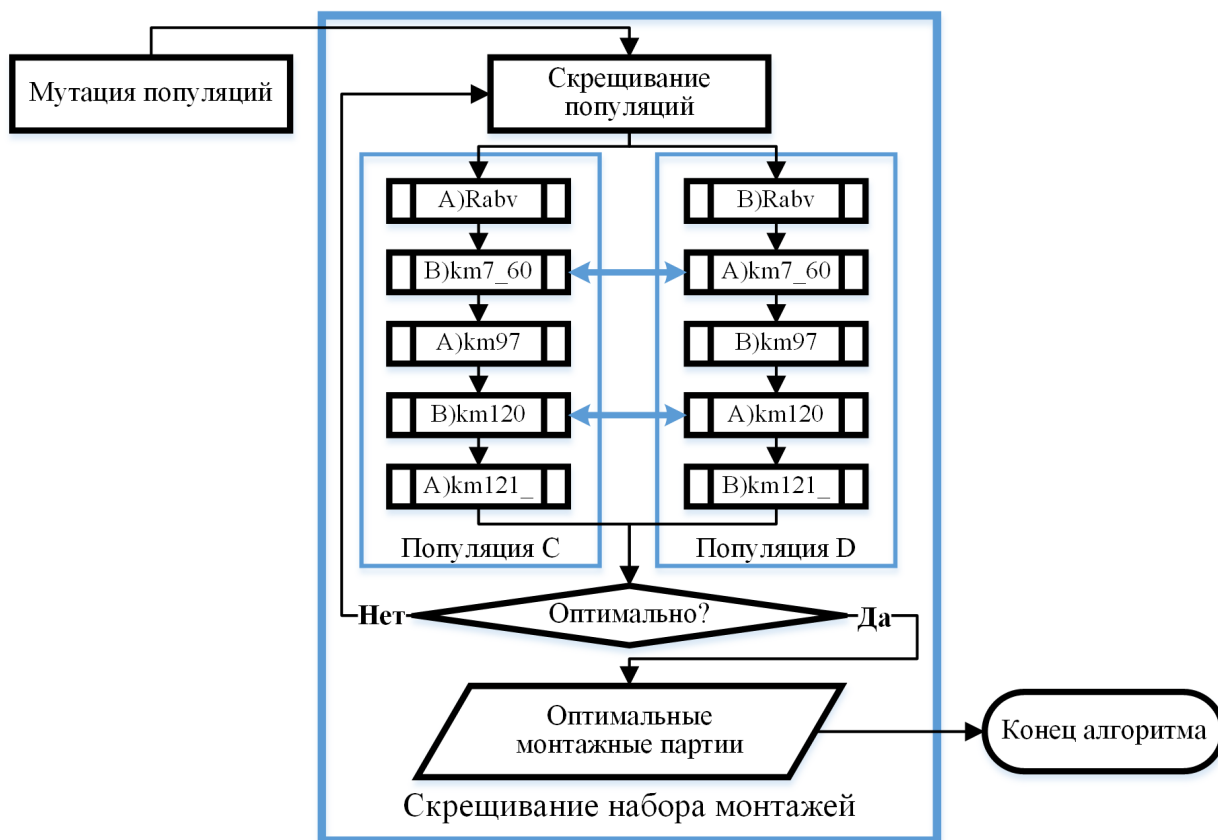


Рисунок 10 – Схема скрещивания популяций

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

$$\begin{aligned}
mont_a &= \left([Rabv]_a \quad [km7_60]_a \quad [km97]_a \quad [km120]_a \quad [km121_]_a \right) \\
mont_b &= \left([Rabv]_b \quad [km7_60]_b \quad [km97]_b \quad [km120]_b \quad [km121_]_b \right)
\end{aligned}$$

в которых происходит следующая замена:

$$\begin{aligned}
mont_c &= \left([Rabv]_a \quad [km7_60]_b \quad [km97]_a \quad [km120]_b \quad [km121_]_a \right) \\
mont_d &= \left([Rabv]_b \quad [km7_60]_a \quad [km97]_b \quad [km120]_a \quad [km121_]_b \right)
\end{aligned}$$

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.

Использование представленного алгоритма дает возможность автоматизировать и оптимизировать процесс комплектования монтажей, что позволяет повысить эффективность работы стана горячего проката на металлургическом производстве.

3 Программная реализация

3.1 Описание программы

3.1.1 Общие сведения

Название «Программа формирования монтажных партий горячекатаного проката на металлургическом производстве».

Назначение данной программы заключается в автоматизации формирования оптимальных монтажных партий горячекатаного проката с помощью генетических алгоритмов, что позволяет получить снижение себестоимости продукции на основе наилучшего использования материальных и энергетических ресурсов.

Реализация алгоритма выполнена в блоке программирования Mathcad 15 [16] с интеграцией файлов Microsoft Excel. Для разработки алгоритма программы применялись предоставленные металлургическим предприятием данные о слябах и технологическая инструкция [8], в которой прописаны действующие технологические ограничения при составлении порядка прокатки металла.

3.1.2 Функциональное назначение

Назначение разработанной программы — это автоматизированное формирование оптимальных монтажных партий горячекатаного проката металлургического производства.

На вход подаются данные о слябах со склада, чтобы на выходе получить сформированные из этих слябов монтажные партии. Критерием оптимальности является получение набора монтажей с максимальной производительностью — общая длина проката за единицу времени.

Основным ограничением программы является количество данных со склада, к которым обращается программа за одно считывание, так как большее количество данных требует большего количества оперативной памяти для расчетов.

3.1.3 Описание логической структуры

Для наглядного представления логической структуры представлена блок-схема программы формирования монтажных партий горячекатаного проката на металлургическом производстве (рисунок 11)



Рисунок 11 – Блок-схема программы

В таблице 1 приведено описание основных функций.

Таблица 1 – Описание основных функций

Метод	Краткое описание	Входные параметры	Выходные параметры
double[,] Rabv(double[,] x)	Составление подвыборки настроечного металла после рабочих валков	x — двумерный массив с данными незадействованных слябов	Многомерный массив с промежуточными данными и последовательностью слябов соответствующих техническим ограничениям данной подвыборки

Продолжение таблицы 1

Метод	Краткое описание	Входные параметры	Выходные параметры
double[,] km7_60 (double[,] x, double[,] gr)	Составление подвыборки по длине монтажа в пределах от 7 до 60 км после перевалки рабочих валков	gr — результаты работы составления предшествующей подвыборки; x — двумерный массив с данными незадействованных слябов	Многомерный массив с промежуточными данными и последовательностью слябов соответствующих техническим ограничениям данной подвыборки
double[,] km97(double[,] x, double[,] gr)	Составление подвыборки по длине монтажа в пределах первых 97 км после перевалки рабочих валков	gr — результаты работы составления предшествующей подвыборки; x — двумерный массив с данными незадействованных слябов	Многомерный массив с промежуточными данными и последовательностью слябов соответствующих техническим ограничениям данной подвыборки
double[,] km120(double[,] x, double[,] gr)	Составление подвыборки по длине монтажа в пределах первых 120 км после перевалки рабочих валков	gr — результаты работы составления предшествующей подвыборки; x — двумерный массив с данными незадействованных слябов	Многомерный массив с промежуточными данными и последовательностью слябов соответствующих техническим ограничениям данной подвыборки

Продолжение таблицы 1

Метод	Краткое описание	Входные параметры	Выходные параметры
double[,] km121_ (double[,] x, double[,] gr)	Составление подвыборки по длине монтажа после прокатки 120 км после пере-валки рабочих валков	gr — резуль-таты работы составления предшеству-ющей подвы-борки; x — двумерный мас-сив с данными незадейство-ванных слябов	Многомерный мас-сив с промежу-точными данными и последовательно-стью слябов соот-ветствующих техни-ческим ограниче-ниям данной под-выборки
double[,] fmont(double[,] data)	Формирование монтажных партий (на-чальных популяций) из подвыборок	data — считы-вание данных со склада	Многомерный мас-сив с набором мон-тажных партий
double[,] blokm(double[,] data)	Составление из слябов не вошедших в монтаж подвыборок	data — двумер-ный массив с данными неза-действованных слябов	Многомерный мас-сив с свободными подвыборками

Продолжение таблицы 1

Метод	Краткое описание	Входные параметры	Выходные параметры
unsigned[] rch(unsigned n, unsigned r)	Создание вектора рандомно распределенных целых положительных чисел, состоящего из n элементов в промежутке [1;r]	n — максимальное количество рандомных чисел; r — верхний предел рандомных чисел	Одномерный массив с целыми положительными рандомными числами из заданного промежутка
double d_t(double[,] dan)	Расчет производительности набора монтажных партий	dan — набор монтажных партий	Рассчитанное число производительности набора монтажных партий
double[,] MutGA_B (double[,] dan, double[,] bloks, int n)	Выполнение оператора мутации	dan — набор монтажных партий; bloks — свободные подвыборки; n — количество вариантов мутаций на каждом этапе	Многомерный массив набора монтажных партий после проведения мутаций

Окончание таблицы 1

Метод	Краткое описание	Входные параметры	Выходные параметры
double[,] SkrGA(double[,] dan, int n)	Выполнение оператора скрещивания	dan — набор монтажных партий; n — количество вариантов скрещиваний на каждом этапе	Многомерный массив набора монтажных партий после проведения скрещиваний
string out(double[,] m)	Сохранение результатов работы в файлы формата XLSX	m — оптимальный набор монтажных партий	Вывод данных в файлы формата XLSX

3.1.4 Используемые технические средства

Для корректного функционирования программы необходимы следующие аппаратные и программные средства:

- Процессор (CPU): 32-битный или 64-битный (x86-64, EM64T) с тактовой частотой 500 МГц или выше (рекомендуется от 1000 МГц).
- Оперативная память (RAM): 256 МБ (рекомендуется 512 МБ).
- Монитор: SVGA с разрешением 800 × 600 или (или выше) с 24-битными (или больше) цветами.
- Свободного места на носителе: 31 МБ (1 МБ для файла «Формирование монтажей.xml», 15 для файлов папки «In», 15 для файлов папки «Out»).
- Видеокарта (GPU): встроенная или дискретная (рекомендуется 3D адаптер).
- Контроллер: Клавиатура, Мышь.
- Операционная система: Windows XP и выше.
- Microsoft .NET Framework 3.5.
- MSXML 4.0 SP2.

- Microsoft Data Access Components 2.8.
- Mathcad 15.
- Microsoft Excel в составе пакета Microsoft Office 2007 или позднее.
- Internet Explorer 6.0 и выше.

Также обязательным условием является наличие в одной директории двух папок «In» и «Out», путь к ним можно указать при запуске программы. Папка «In» должна содержать два файла Microsoft Excel: «DATA.xlsx» и «marks.xlsx» в которых хранится информация о слябах со склада и марки стали соответственно. Папка «Out» изначально пуста, после выполнения программы в нее автоматически будут добавлены файлы с результатами работы программы.

3.1.5 Установка и удаление программы

Установка программы выполняется копированием файлов на нужный носитель. Файл «Формирование монтажей.xmcd» – это рабочий лист, созданный в Mathcad, программе для автоматизации математических вычислений и инженерных расчетов. Он может быть запущен из любой директории без ограничений к доступу данных с помощью программы Mathcad 15.

Удаление программы происходит при удалении папки со всеми файлами программы. Чтобы удалить программу требуется с помощью проводника найти папку со всеми файлами программы и перенести ее в корзину.

3.1.6 Вызов и загрузка

Чтобы открыть рабочий лист Mathcad с программой, необходимо запустить Mathcad 15 и выполнить команду меню «Файл» → «Открыть...» или использовать сочетание клавиш «Ctrl+O». В появившемся окне выбрать файл рабочего листа Mathcad с программой.

3.1.7 Входные параметры

Входными данными для программы являются файлы: «DATA.xlsx» (рисунок 12) и «marks.xlsx» (рисунок 13), а также указанные в начале программы путь к этим файлам и диапазон считываемых данных фай-

ла «DATA.xlsx». Опишем подробнее структуру каждого из указанных файлов.

	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Время сек	Марка ста	Группа от	Маршрут	Толщина	Ширина с	Длина сля	Вес сляба	Целевая т	Целевая л	Длина по	Цех назн	Примечание
2	77	08пс		T2	250	1440	9500	26,58	2,5	1388	949,583	ЦХПП	1
3	131	08пс		T2	250	1440	9500	26,58	2,5	1388	950,863	ЦХПП	1
4	125	08пс		T2	250	1440	9500	26,58	2,5	1388	952,899	ЦХПП	1
5	130	10пс	1	T1	250	1440	9100	25,46	2	1376	1148,28	ЦХПП	1
6	97	10пс	1	T1	250	1440	9100	25,46	2	1376	1138,579	ЦХПП	1
7	100	10пс	1	T1	250	1440	9100	25,46	2	1376	1152,008	ЦХПП	1
8	92	08пс		T1	250	1360	9500	25,1	3,9	1344	594,923	ЦХПП	1
9	76	08пс		T1	250	1360	9500	25,1	3,9	1344	595,947	ЦХПП	1

Рисунок 12 – Фрагмент файла «DATA.xlsx»

	A	B	C	D
1	Углеродистая сталь	Холоднокатаная сталь	Товарный прокат	Электротехническая сталь
2	Ст0	08пс	Ст2пс	104
3	Ст1кп	10пс	Ст3сп	ЭЗА
4	Ст1пс	08Ю	DD11	202
5	Ст1сп	06ФБЮАР	St 22	211
6	Ст2кп	Ст3пс	S235JR	204

Рисунок 13 – Фрагмент файла «marks.xlsx»

Файл «DATA.xlsx» содержит информацию о слябах. Состоит из неопределенного количества строк и 13 столбцов, где строки – это слябы, а столбцы информация о них (таблица 2).

Таблица 2 – Описание файла «DATA.xlsx»

Входные данные	Тип данных	Пропуск значений
Время проката сляба (с)	unsigned int	-
Марка стали	string	-
Группа отделки поверхности	unsigned int	+
Маршрут	string	+
Толщина сляба (мм)	unsigned int	-
Ширина сляба (мм)	unsigned int	-
Длина сляба (мм)	unsigned int	-
Вес сляба (т)	double	-
Целевая толщина рулона (мм)	double	-
Целевая ширина рулона (мм)	unsigned int	-
Длина полосы (м)	double	-
Цех назначения	string	-
Примечание	bool	-

В представленной таблице типы данных означают: unsigned int – беззнаковый целочисленный, string – строковый, double – число с плавающей точкой двойной точности, bool – логический (1 или 0).

Файл «marks.xlsx» включает в себя информацию о прокатываемых марках стали, которые необходимы при соблюдении технологических ограничений. Марки разделены на 4 группы. Столбцы соответствуют группам, а строки в них содержат названия марок стали (таблица 3)

Таблица 3 – Описание файла «marks.xlsx»

Входные данные	Тип данных
Марки углеродистой стали	string
Марки холоднокатаной стали	string
Марки товарной стали	string
Марки электротехнической стали	string

3.1.8 Выходные параметры

Основной целью данной программы является получение оптимально сформированных монтажных партий на основе генетических алгоритмов. Чтобы обеспечить удобство доступа к результатам программы, выполнено сохранение полученных монтажей, а также сопутствующей информации о них в файлы формата XLSX.

Выходными данными являются:

1) Выводимая на экран графическая и текстовая информация о ходе и результате работы программы (рисунок 14).

— Тестирование программы на возможные ошибки. Отсутствие ошибок в процессе выполнения программы сопровождается сообщением «Успех» в каждом из предусмотренных тестов. При отрицательном тесте появится пояснение для решения возникшей проблемы.

Test1 – проверка пути к файлу «DATA.xlsx»;

Test2 – проверка содержимой информации в файле «DATA.xlsx» на соответствие типу данных;

Test3 – проверка пути к файлу «marks.xlsx»;

Test4 – проверка содержимой информации в файле «marks.xlsx» на соответствие типу данных;

Test5 – проверка расположения в указанной директории папки «Out».

- В качестве результата работы программы выводится количество сформированных монтажей (шт.); достигнутая с помощью генетического алгоритма производительность (км/ч), прирост производительности (км/ч) с момента формирования начальной популяции (набора монтажей, удовлетворяющего условиям технологического ограничения) до получения результирующей популяции, являющейся оптимизированным набором монтажных партий; а также показывается время работы программы (с).
- Представлен график изменения производительности на всех этапах работы генетического алгоритма.

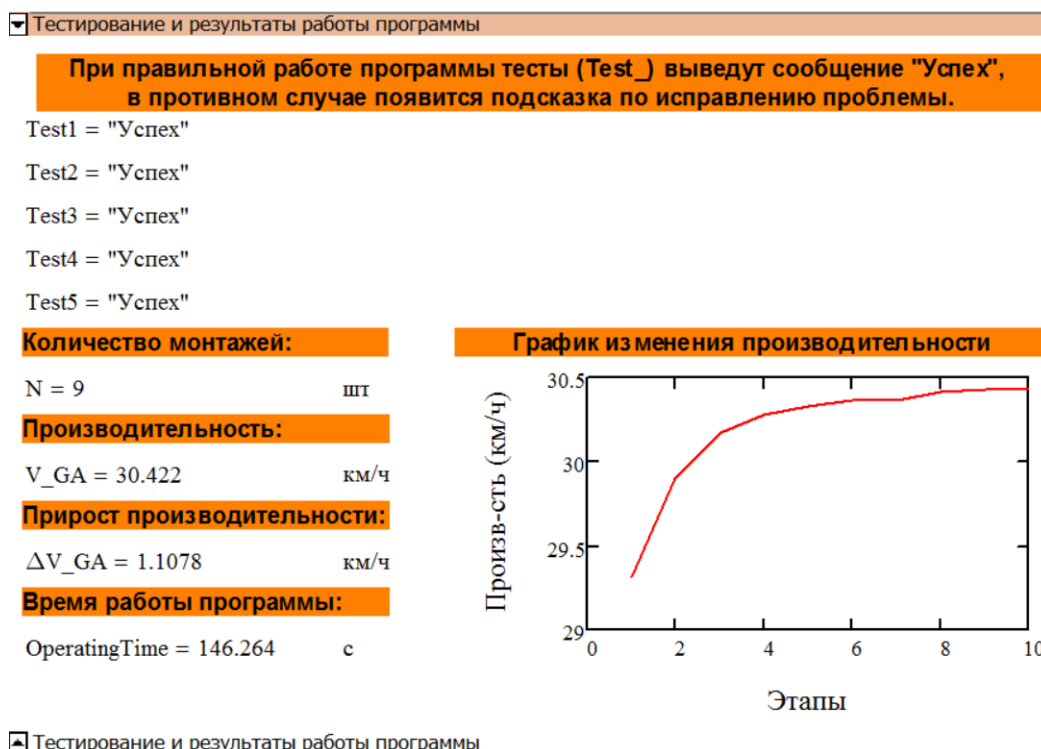


Рисунок 14 – Вывод данных на экран

2) Сохраняемые данные в файлы электронных таблиц Microsoft Excel.

В папке «Out» для каждого монтажа, входящего в набор с максимальной производительностью прокатки, создается файл «Mont*.xlsx», где «*» является номером монтажной партии, а также – файл «INF.xlsx»

в который записывается общая информация о наборе монтажей. Опишем подробнее структуру этих файлов.

- Файл «Mont*.xlsx» (рисунок 15) содержит строгую последовательность слябов, вошедших в данный монтаж и информацию аналогичную файлу «DATA.xlsx».

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Время, с	Марка	Гр.отделк	Маршрут	Толщина	Ширина с.	Длина сл.	Масса сл.	Цел. толщ	Цел. шири	Длина пол	Цех назн.	Прим.
2	128	08Ю		T1	250	1560	10400	31,52	3,9	1545	649,014	ЦХПП	1
3	88	08Ю		T1	250	1560	10400	31,52	3,9	1545	652,491	ЦХПП	1
4	85	08Ю		T1	250	1560	10400	31,52	3,9	1545	645,558	ЦХПП	1
5	85	08Ю		T1	250	1560	10400	31,52	3,9	1545	650,61	ЦХПП	1
6	86	08Ю		T1	250	1560	10400	31,52	3,9	1545	650,393	ЦХПП	1
7	106	08Ю		T1	250	1570	10400	31,72	3,9	1545	673,932	ЦХПП	1
8	86	08Ю		T1	250	1570	10400	31,72	3,9	1545	661,579	ЦХПП	1
9	97	08Ю		T1	250	1610	10400	32,53	3,9	1545	672,975	ЦХПП	1
10	91	08Ю		T1	250	1610	10400	32,53	3,9	1545	670,794	ЦХПП	1

Рисунок 15 – Фрагмент файла «Mont1. xlsx»

- Файл «INF.xlsx» включает следующие данные: порядковый номер монтажа в наборе; количество слябов в монтаже (шт); длина монтажа (км); масса монтажа (т); время проката монтажа (ч); производительность монтажа (км/ч); производительность всего набора монтажных партий сформированного в качестве начальной популяции (км/ч), производительность оптимизированного генетическим алгоритмом набора монтажных партий (км/ч), прирост производительности (км/ч). Пример этого файла приведен на рисунке 16.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	№ монтаж	Кол-во, шт	Длина, км	Масса, т	Время прок	Произв-сть монтажа, км/ч			Произ-ть	Произ-ть	Δ Произ-ти, км/ч	
2	1	147	143,322	3751,11	4,54	31,56873			29,31463	30,4224	1,107771	
3	2	150	144,8131	3629,55	5,121389	28,27614						
4	3	148	143,2485	3688,75	4,498056	31,84677						
5	4	148	140,7201	3689,75	4,845	29,0444						
6	5	166	146,0701	4077,17	5,036944	28,99974						
7	6	148	131,6527	3795,96	4,343333	30,31145						
8	7	137	140,3555	3423	4,613333	30,42389						
9	8	158	145,6582	3988,14	4,524444	32,1936						
10	9	129	141,0472	3098,28	4,449444	31,69995						

Рисунок 16 – Фрагмент файла «INF.xlsx»

3.2 Руководство оператора

3.2.1 Назначение программы

Название «Программа формирования монтажных партий горячекатаного проката на металлургическом производстве».

Назначение данной программы заключается в автоматизации формирования оптимальных монтажных партий горячекатаного проката с помощью генетических алгоритмов, что позволяет получить снижение себестоимости продукции на основе наилучшего использования материальных и энергетических ресурсов.

Реализация алгоритма выполнена в блоке программирования Mathcad 15 с интеграцией файлов Microsoft Excel. Для разработки алгоритма программы применялись предоставленные металлургическим предприятием данные о слябах и технологическая инструкция [№], в которой прописаны действующие технологические ограничения при составлении порядка прокатки металла.

3.2.2 Условия выполнения программы

Для корректного функционирования программы необходимы следующие аппаратные и программные средства:

- Процессор (CPU): 32-битный или 64-битный (x86-64, EM64T) с тактовой частотой 500 МГц или выше (рекомендуется от 1000 МГц).
- Оперативная память (RAM): 256 МБ (рекомендуется 512 МБ).
- Монитор: SVGA с разрешением 800 × 600 или (или выше) с 24-битными (или больше) цветами.
- Свободного места на носителе: 31 МБ (1 МБ для файла «Формирование монтажей.xmcd», 15 для файлов папки «In», 15 для файлов папки «Out»).
- Видеокарта (GPU): встроенная или дискретная (рекомендуется 3D адаптер).
- Контроллер: Клавиатура, Мышь.
- Операционная система: Windows XP и выше.
- Microsoft .NET Framework 3.5.
- MSXML 4.0 SP2.
- Microsoft Data Access Components 2.8.
- Mathcad 15.
- Microsoft Excel в составе пакета Microsoft Office 2007 или позднее.
- Internet Explorer 6.0 и выше.

Также обязательным условием является наличие в одной директории двух папок «In» и «Out», путь к ним можно указать при запуске программы. Папка «In» должна содержать два файла Microsoft Excel: «DATA.xlsx» и «marks.xlsx» в которых хранится информация о слябах со склада и марки стали соответственно. Папка «Out» изначально пуста, после выполнения программы в нее автоматически будут добавлены файлы с результатами работы программы.

3.2.3 Условия выполнения программы

Перед открытием программы нужно проверить, что в директории с программой созданы папки «In» и «Out» (рисунок 17). Если же эти папки находятся в другой директории путь до них нужно будет указать в самой программе. При этом в папке «In» обязательно должны быть файлы «DATA.xlsx» и «marks.xlsx».

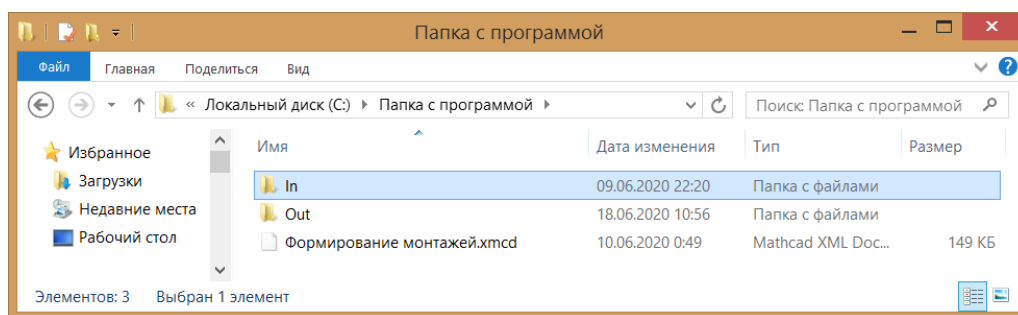


Рисунок 17 – Папка с программой

При запуске программы выводится справка с основной информацией для пользователя (рисунок 18).

Программа включает в себя несколько областей с кодом, из которых для оператора доступны «Ввод пути и диапазона данных» и «Тестирование и результаты работы программы», они выделены цветной заливкой.

Путь к считываемым файлам «DATA.xlsx» и «marks.xlsx», а именно к каталогу с папками «In» и «Out» задается вначале программы (рисунок 19) в поле «Папка».

В скобках указана подсказка по структуре задания пути. По умолчанию указан путь к папке с файлом рабочего листа Mathcad программы «.\». Для настройки диапазона считываемых данных из фай-

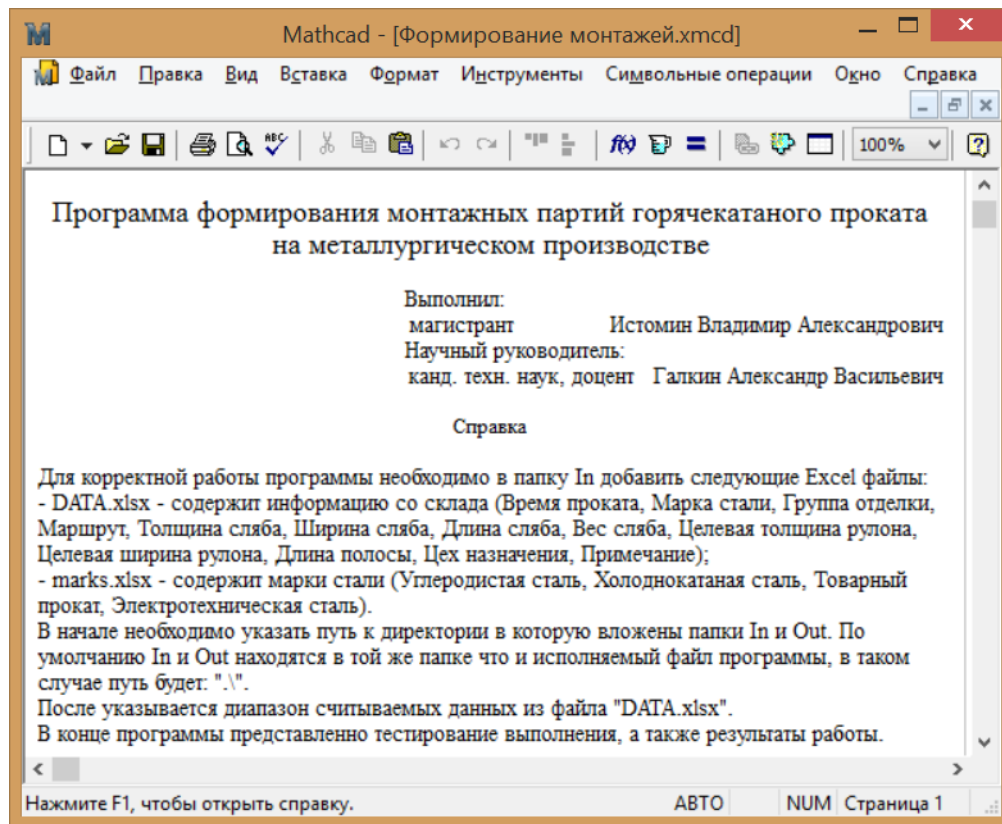


Рисунок 18 – Справка при запуске программы

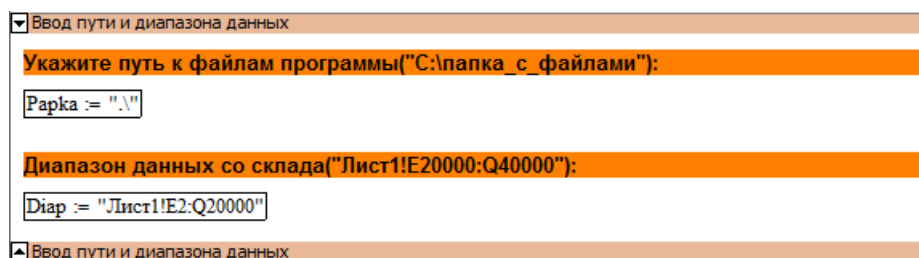


Рисунок 19 – Ввод пути и диапазона

ла «DATA.xlsx» необходимо ввести в поле «Diap» строку, состоящую из названия листа документа, разделителя в виде «!» и непосредственно самого диапазоны выбранных из таблицы Microsoft Excel данных.

В случае ручного режима вычислений следует нажать сочетание клавиш «Ctrl+F9» для пересчета всего документа. Изменить режим вычислений можно с помощью вкладки «Инструменты» главного меню команд и последующим выбором требуемого пункта меню (активный «Автоматический режим», иначе «Ручной»).

В области «Тестирование и результаты работы программы» (рисунок 20) выводится одноименная названию области информация. При успешном выполнении на экран программы выводятся следующие переменные: N – это количество сформированных программой монтажей, PowerGA – показатель производительность (км/ч) всего набора, состоящего из N монтажей, ΔP_GA – прирост производительность после использования генетического алгоритма (км/ч), OperatingTime – время работы программы (с).

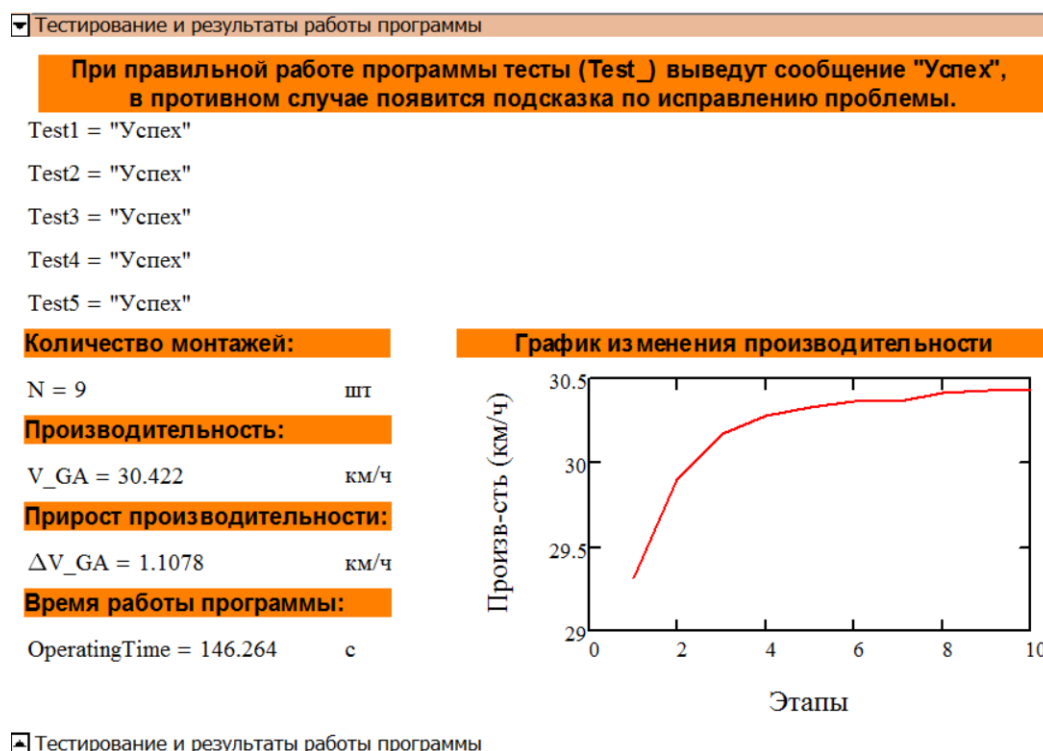


Рисунок 20 – Область «Тестирование и результаты работы программы»

Для визуального представления динамики изменения производительности формируемого набора монтажных партий выводится график изменения производительности. На данном графике этапы генетического алгоритма отображаются по оси абсциссы, а соответствующие этим этапам производительность – по оси ординат.

Также выполняется запись в файл «INF.xlsx» общей информации по всему набору монтажных партий. Каждый монтаж сохраняется в отдельный файл «Mont*.xlsx», где «*» равняется номеру монтажной партии.

3.2.4 Сообщения оператору

Чтобы улучшить взаимодействие оператора с программой, а также упростить поиск причин возникновения ошибок в программу добавлен вывод оповещающих сообщений. Так как основное управление программой сводится к обеспечению доступа к заранее подготовленным в соответствии с требованиями программы входными данными, то все сообщения ориентированы на тестирование наличия нужных файлов в указанной директории и проверку содержимых в этих файлах данных. Далее приведено описание возможных сообщений (Таблица 4).

Таблица 4 – Описание основных функций

Название теста	Ошибка	Расшифровка	Методы решения
Test1	«Успех»	Файл «DATA.xlsx» найден	—
	«Ошибка считывания склада: указан неверный путь к файлу DATA.xlsx»	Файл «DATA.xlsx» в указанной директории не найден	Скопировать файл DATA.xlsx в указанную директорию или проверить, правильно ли указан путь, и повторить попытку
Test2	«Успех»	Содержимое файла «DATA.xlsx» верно	—
	«Ошибка данных: в столбце j не должно быть <<NaN>>. Строка i»	Не допускаются пропуски значений в указанном столбце	Открыть файл «DATA.xlsx» и удалить из указанного столбца пропущенные значения

Продолжение таблицы 4

Название теста	Ошибка	Расшифровка	Методы решения
	«Ошибка данных: в столбце j не должно быть <<String>>. Строка i»	Не допускаются значения типа данных «string» в указанном столбце	Открыть файл «DATA.xlsx» и удалить из указанного столбца значения типа данных «string»
	«Ошибка данных: в столбце j должно быть << date > 0 >>. Строка i»	Допускаются только положительные значения в указанном столбце	Открыть файл «DATA.xlsx» и удалить из указанного столбца неположительные значения
	«Ошибка данных: в столбце 12 должно быть <<String>>. Строка i»	Допускаются только значения типа данных «string» в указанном столбце	Открыть файл «DATA.xlsx» и удалить из указанного столбца значения не соответствующие типу данных «string»
	«Ошибка данных: в столбце 13 должно быть <<Bool>>. Строка i»	Допускаются только значения типа данных «bool» в указанном столбце	Открыть файл «DATA.xlsx» и удалить из указанного столбца значения не соответствующие типу данных «bool»
Test3	«Успех»	Файл «marks.xlsx» найден	—

Продолжение таблицы 4

Название теста	Ошибка	Расшифровка	Методы решения
	«Ошибка считывания склада: указан неверный путь к файлу marks.xlsx»	Файл «marks.xlsx» в указанной директории не найден	Скопировать файл «marks.xlsx» в указанную директорию или проверить, правильно ли указан путь, и повторить попытку
Test4	«Успех»	Содержимое файла «marks.xlsx» верно	—
	«Ошибка считывания марок стали: не указаны марки углеродистой стали»	Необходимо добавить в файл «marks.xlsx» марки углеродистой стали	Открыть файл «marks.xlsx» и добавить в первый столбец марки углеродистой стали
	«Ошибка считывания марок стали: не указаны марки холоднокатаной стали»	Необходимо добавить в файл «marks.xlsx» марки холоднокатаной стали	Открыть файл «marks.xlsx» и добавить во второй столбец марки холоднокатаной стали
	«Ошибка считывания марок стали: не указаны марки товарной стали»	Необходимо добавить в файл «marks.xlsx» марки товарной стали	Открыть файл «marks.xlsx» и добавить в третий столбец марки товарной стали

Окончание таблицы 4

Название теста	Ошибка	Расшифровка	Методы решения
	«Ошибка считывания марок стали: не указаны марки электротехнической стали»	Необходимо добавить в файл «marks.xlsx» марки электротехнической стали	Открыть файл «marks.xlsx» и добавить в четвёртый столбец марки электротехнической стали
Test5	«Успех»	Экспорт данных завершен	—
	«Ошибка вывода данных: отсутствует папка «Out» «	Не найдена папка «Out»	Создать в указанной директории папку «Out» или проверить, правильно ли указан путь, и повторить попытку

В случае возникновения одной из описанных выше ошибок можно продолжить работу программы после исправления проблемы. Для повторного запуска нужно выполнить команду меню «Инструменты» → «Вычислить» → «Пересчитать документ» или использовать сочетание клавиш «Ctrl+F9». Расчет может запуститься автоматически, если активна функция «Автоматический расчет».

При отсутствии ошибок все тесты должны показать «Успех».

4 Исследование результатов построения оптимальных монтажных партий

Проведено исследование по работе реализованного алгоритма. Используется предоставленная «Новолипецким металлургическим комбинатом» информация о слябах со склада за 2017 год. Из полученных сведений была отобрана необходимая для работы алгоритма информация.

С помощью программы формирования монтажных партий горячекатаного проката металлургического производства обработано 276000 строк данных со склада 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 5.

Таблица 5 – Сведения по наборам монтажей

№	Км	Кп	Лн	Мн	Тп	Вн	ΔV_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

В таблице 5 № — это номер набора, Км — количество монтажей в наборе (шт), Кп — количество проката в наборе (шт), Лн — общая длина проката в наборе (км), Мн — общая масса проката в наборе (т),

T_p — требуемое на прокатку время (ч), V_n — производительность набора после применения генетических алгоритмов (км/ч), ΔV_n — прирост производительности проката после применения генетических алгоритмов (км/ч). Зависимость производительности от номера поколения показана на рисунках 21-34. На предоставленных графиках по оси абсцисс откладывается номер поколения генетического алгоритма, а по оси ординат — соответствующая этому поколению производительность.

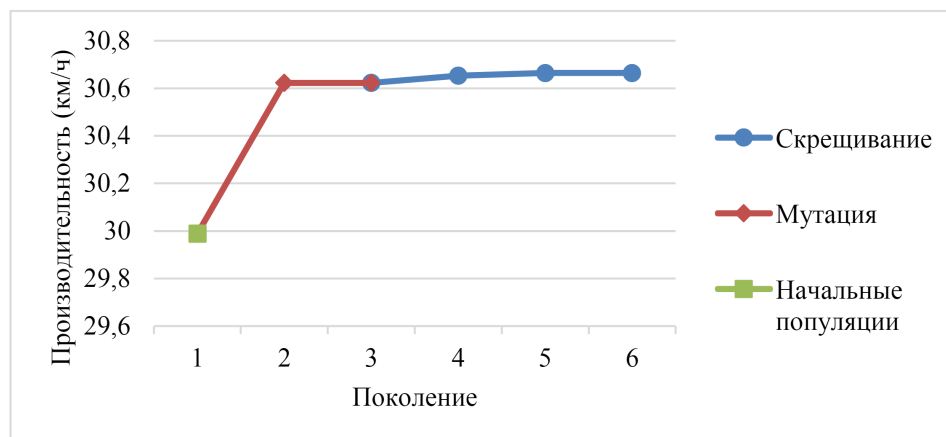


Рисунок 21 – Изменение производительности, 1 набор

Из рисунка 21 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 1 выборки был сформирован спустя 6 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2 и 3 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 4-6 поколениях.

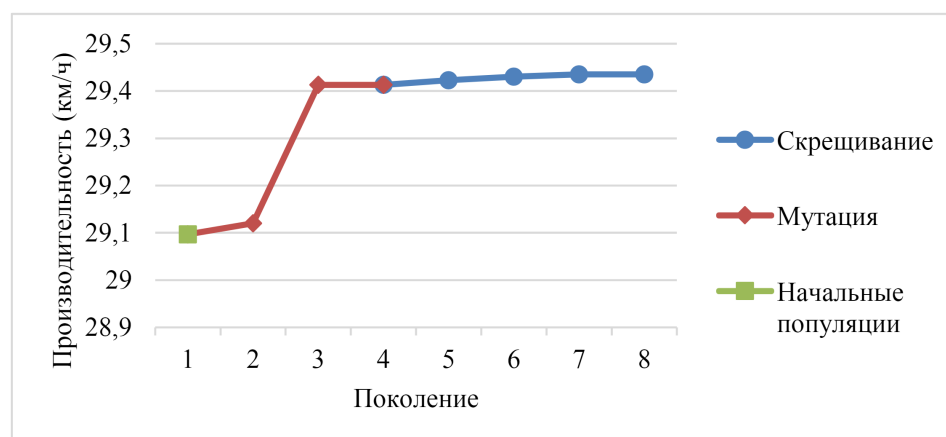


Рисунок 22 – Изменение производительности, 2 набор

Из рисунка 22 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 2 выборки был сформирован спустя 8 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2-4 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 5-8 поколениях.

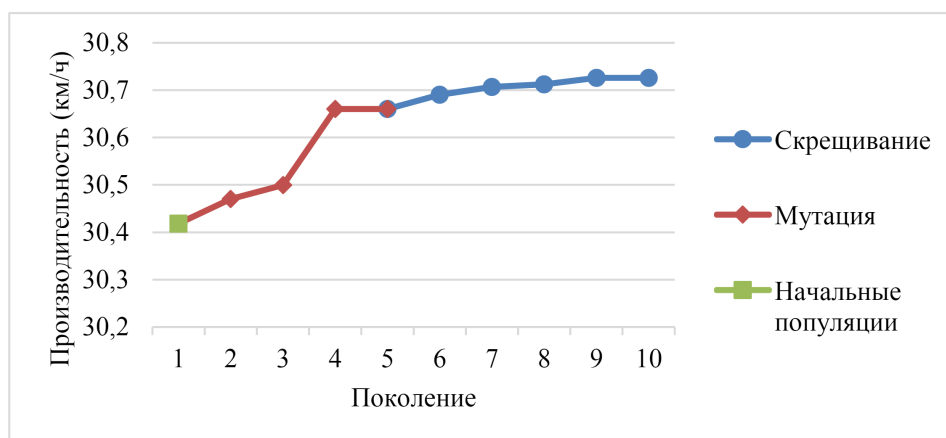


Рисунок 23 – Изменение производительности, 3 набор

Из рисунка 23 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 3 выборки был сформирован спустя 10 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2-5 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 6-10 поколениях.

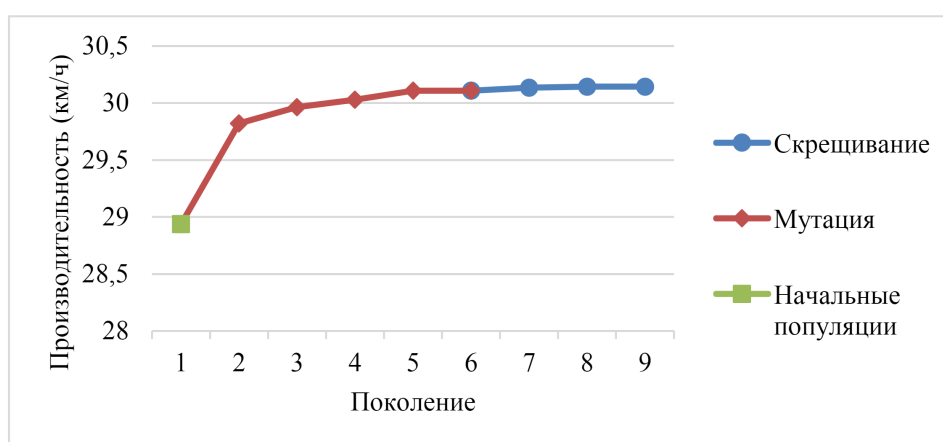


Рисунок 24 – Изменение производительности, 4 набор

Из рисунка 24 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 4 выборки был сформирован спустя 9 поколений работы генетического

алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2-6 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 7-9 поколениях.

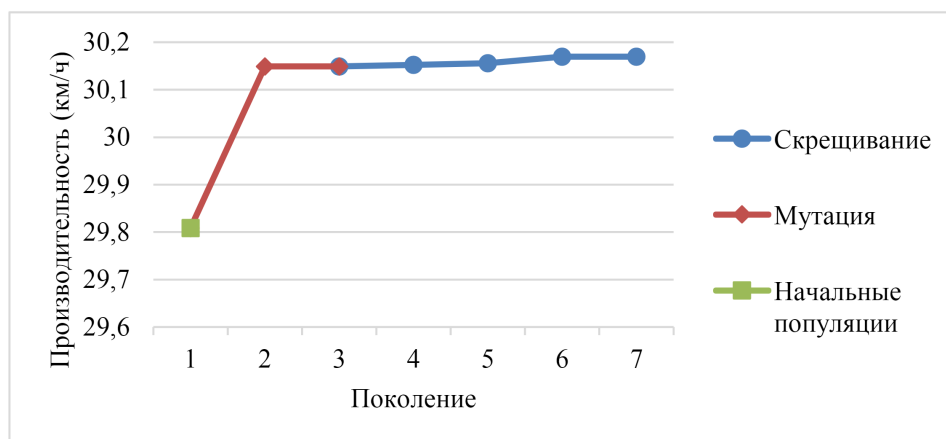


Рисунок 25 – Изменение производительности, 5 набор

Из рисунка 25 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 5 выборки был сформирован спустя 7 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2 и 3 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 4-7 поколениях.

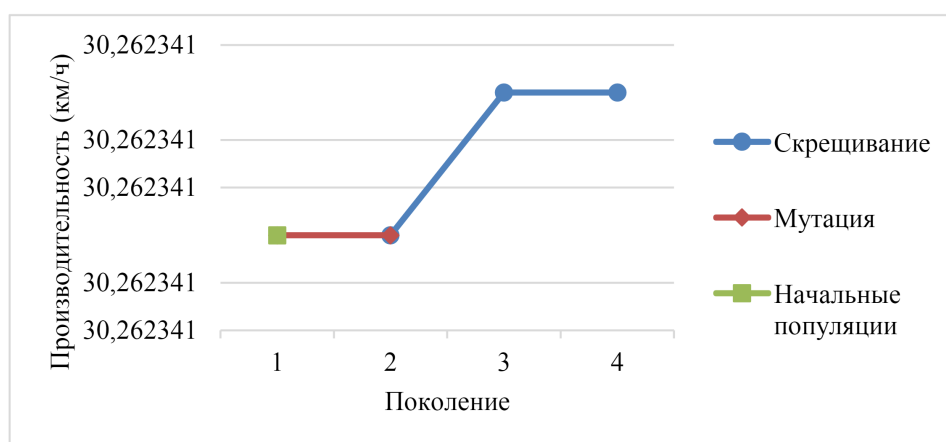


Рисунок 26 – Изменение производительности, 6 набор

Из рисунка 26 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 6 выборки был сформирован спустя 4 поколения работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация попу-

ляции происходила во 2 поколении, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 3 и 4 поколениях.

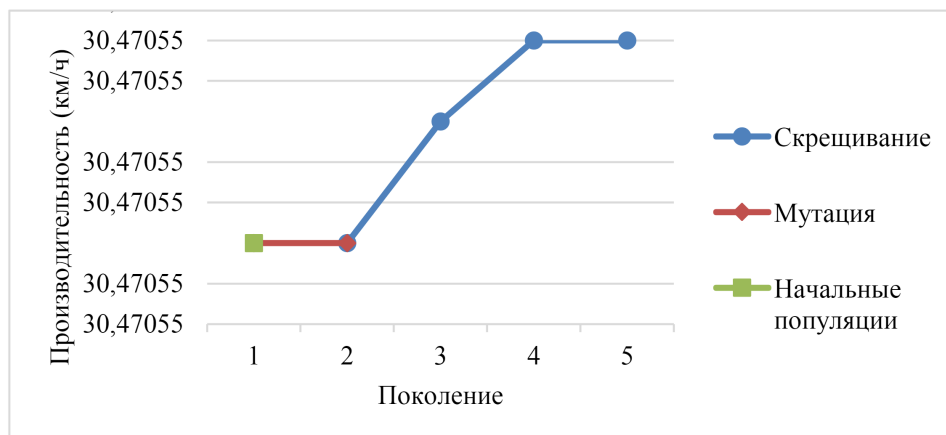


Рисунок 27 – Изменение производительности, 7 набор

Из рисунка 27 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 7 выборки был сформирован спустя 5 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2 поколении, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 3-5 поколениях.

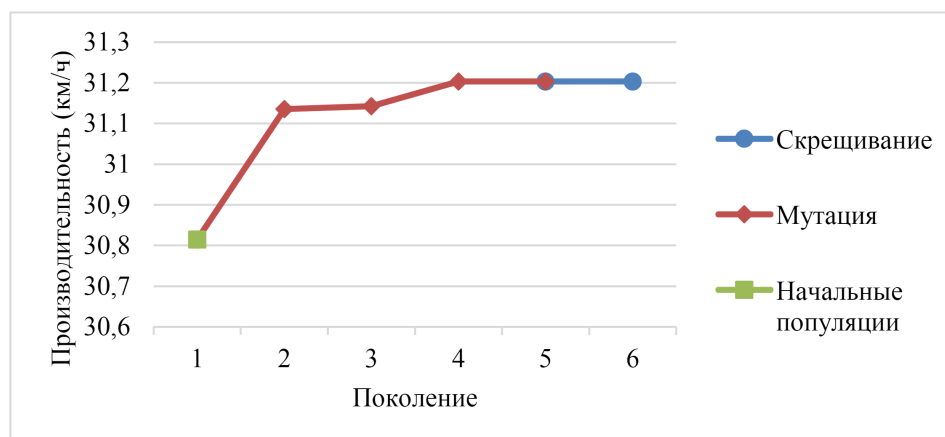


Рисунок 28 – Изменение производительности, 8 набор

Из рисунка 28 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 8 выборки был сформирован спустя 6 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2-5 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 6 поколении.

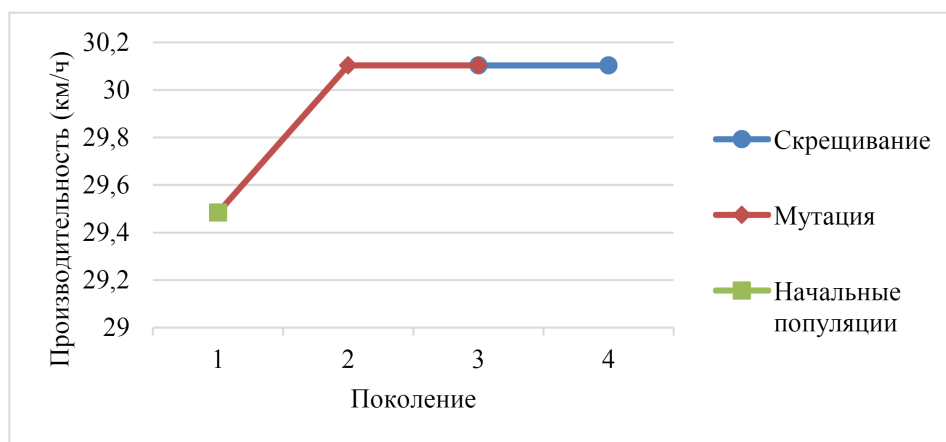


Рисунок 29 – Изменение производительности, 9 набор

Из рисунка 29 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 9 выборки был сформирован спустя 4 поколения работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2 и 3 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 4 поколении.

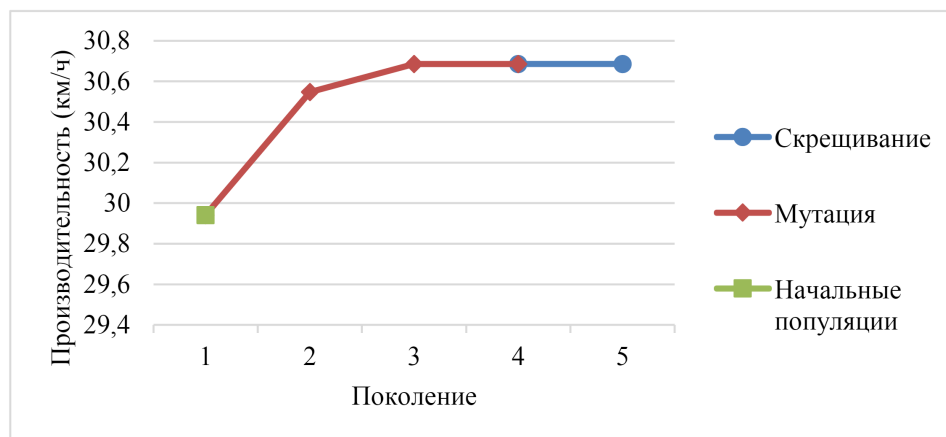


Рисунок 30 – Изменение производительности, 10 набор

Из рисунка 30 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 10 выборки был сформирован спустя 5 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2-4 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 5 поколении.

Из рисунка 31 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 11 выборки был сформирован спустя 4 поколения работы генетического

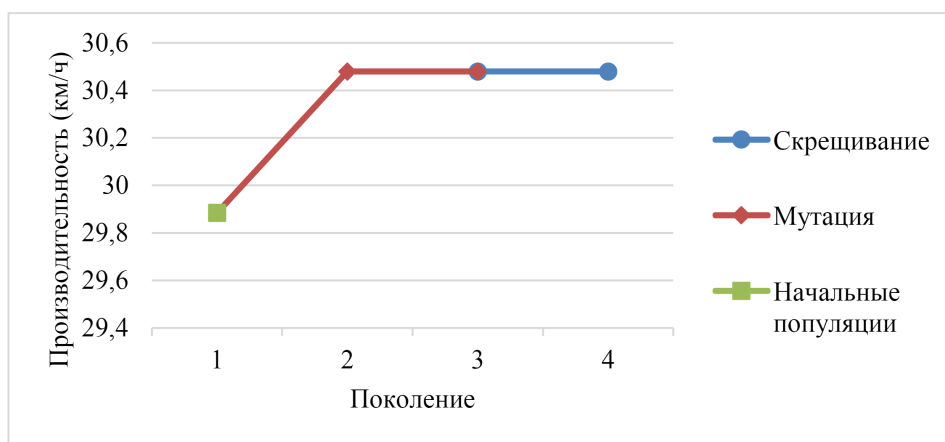


Рисунок 31 – Изменение производительности, 11 набор

алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2 и 3 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 4 поколении.

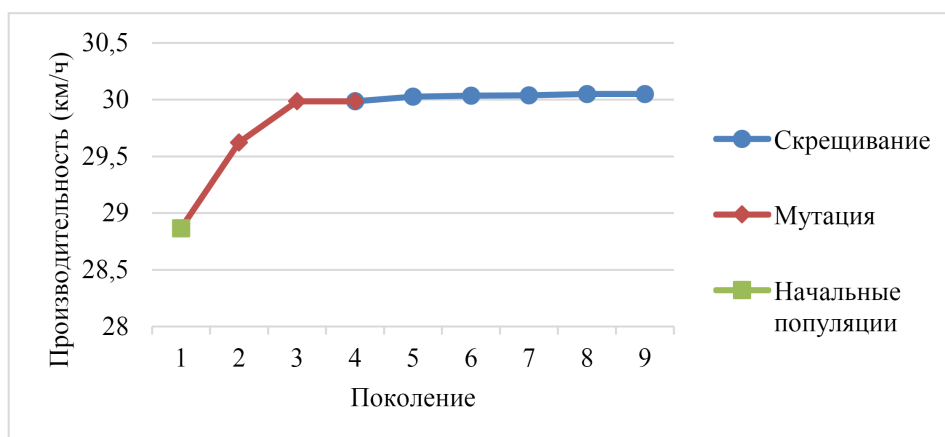


Рисунок 32 – Изменение производительности, 12 набор

Из рисунка 32 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 12 выборки был сформирован спустя 9 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2-4 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 5-9 поколениях.

Из рисунка 33 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 13 выборки был сформирован спустя 5 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация по-

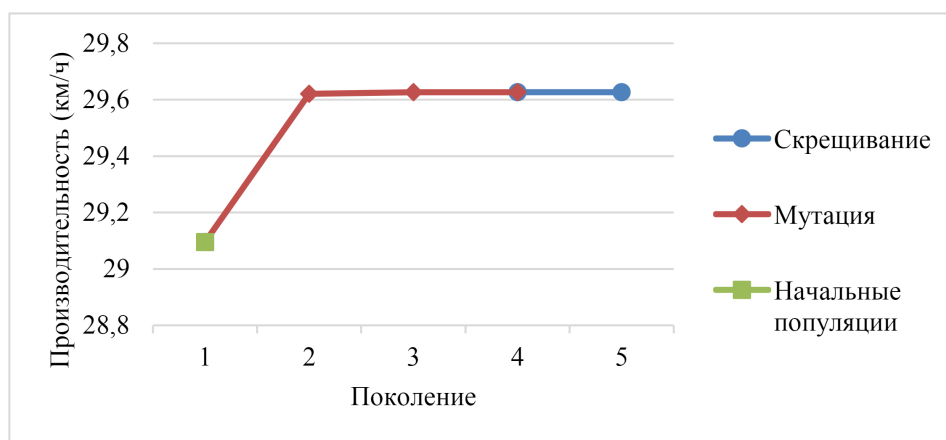


Рисунок 33 – Изменение производительности, 13 набор

пуляции происходила во 2-4 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 5 поколении.

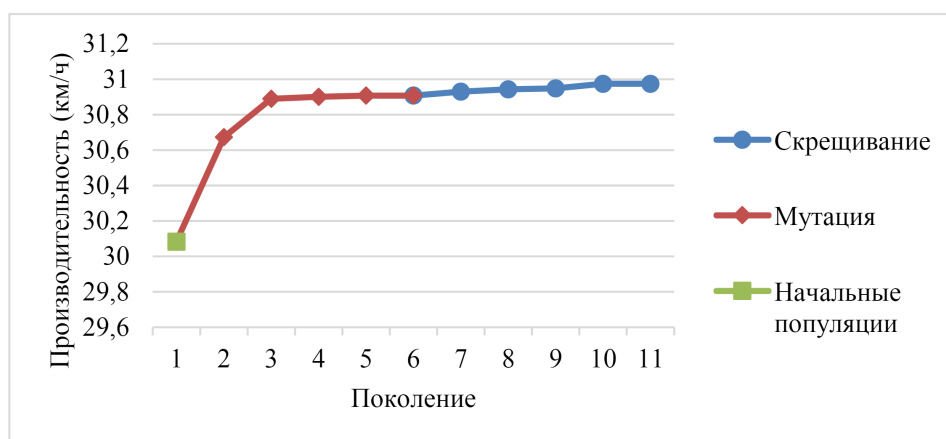


Рисунок 34 – Изменение производительности, 14 набор

Из рисунка 34 видно, что оптимальный набор монтажей на основе 13 выборки был сформирован спустя 5 поколений работы генетического алгоритма. Начальная популяция получена в 1 поколении, мутация популяции происходила во 2-4 поколениях, скрещивание среди монтажей набора полученного на этапе мутаций проводилось в 5 поколении.

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.

Прирост производительности для каждого набора монтажных партий представлен на рисунке 35.

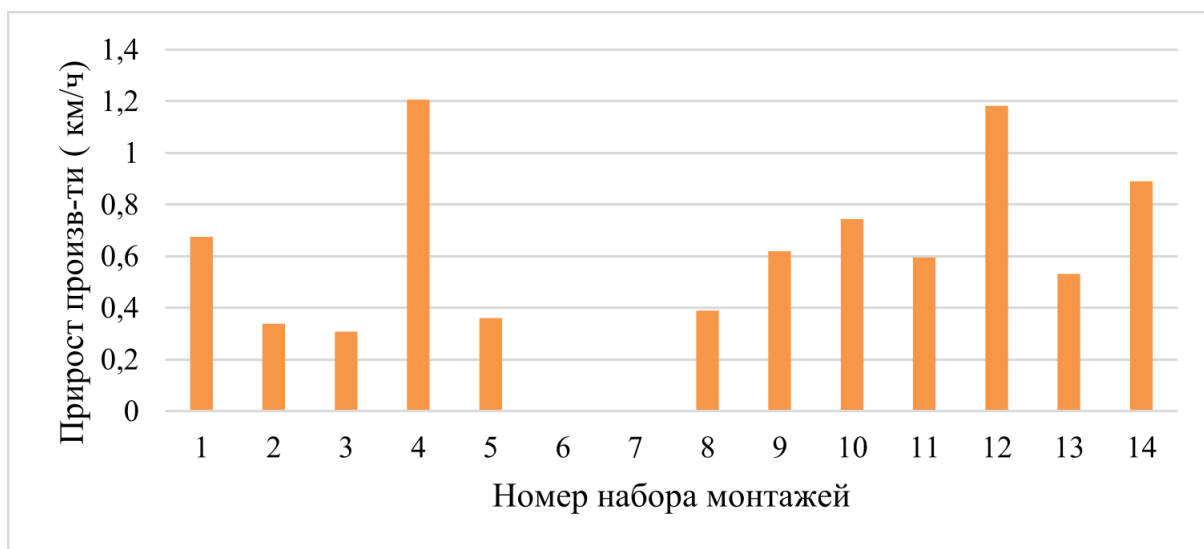


Рисунок 35 – Прирост производительности на всех выборках

Сравнение производительности наборов монтажей до и после работы генетического алгоритма показано на рисунке 36.

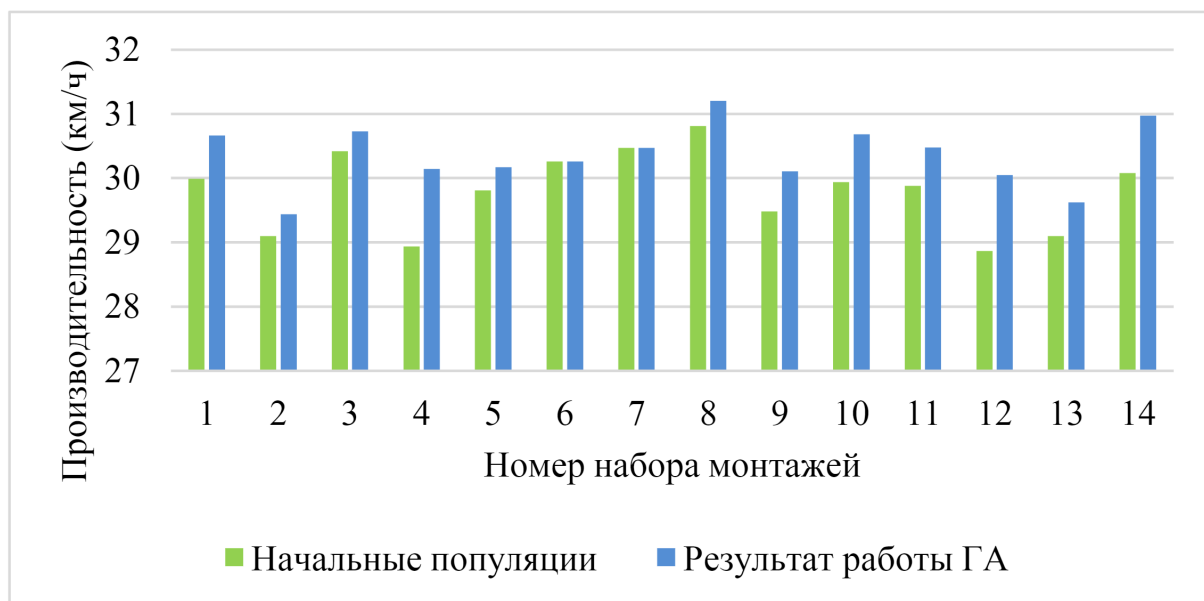


Рисунок 36 – Сравнение производительности после работы ГА

Всего алгоритмом было получено 507 монтажей средней производительностью 30,34 (км/ч), что соответствует повышению эффективности прокатки на 1,9 %.

Таким образом, на основании полученных результатов работы алгоритма видно, что разработанная модель оптимального формирования монтажных партий на стане горячей прокатки металлургического производства позволяет увеличить производительность стана и снизить расход энергоресурсов.

Заключение

В ходе написания выпускной квалификационной работы была изучена техническая и научная литература по методам оптимизации и генетическим алгоритмам. Освоены особенности производства горячекатаной листовой стали, технологические требования рассматриваемого процесса.

Разработан алгоритм оптимального формирования монтажных партий на стане горячей прокатки на основе генетических алгоритмов. Применены операторы скрещивания и мутации. 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.

Реализована программа для автоматического формирования монтажных партий на стане горячекатаного проката на металлургическом производстве. Была введена возможность сохранения каждой монтажной партии, входящей в сформированный набор монтажей, в отдельный файл, а также запись в файл общей информации по всему набору.

На основе реализованной в пакете Mathcad программы по производственным данным металлургического производства сформировано несколько наборов монтажей. Проведены расчеты по формированию оптимальных монтажных партий. Представлены результаты проведенного исследования.

Список использованных источников

1. *Линчевский Б. В., Соболевский А. Л., Кальменев А. А.* *Металлургия черных металлов.* — 2-е, перераб. и доп. — М. : *Металлургия*, 1986. — 360 с.
2. *Луговской В. М.* *Алгоритмы систем автоматизации листовых станов.* — М. : *Изд-во Metallургия*, 1974. — 320 с.
3. *Каплан Д. С., Девятов Д. Х., Белянский А. В. и др.* *Алгоритм оперативного посада металла в печи листопрокатного стана // Сталь.* — 2007. — № 2. — с. 130—132.
4. *Инструкция по эксплуатации нагревательных печей с шагающими балками цеха горячего проката.* — 2-е. — Липецк : *Типография на ПАО «НЛМК»*, 2017. — 152 с.
5. *Инструкция по эксплуатации нагревательных печей толкательного типа цеха горячего проката.* — 2-е. — Липецк : *Типография на ПАО «НЛМК»*, 2017. — 93 с.
6. *Нагревательщик металла. Учебное пособие для подготовки рабочего персонала производства горячего проката.* — 1-е. — Липецк : *Дирекция по персоналу и общим вопросам. Управление профессионального развития персонала ПАО «НЛМК»*, 2011. — 46 с.
7. *Третьяков В. А., Останков А. И., Барышев В. В. и др.* *Математическая модель формирования монтажных партий на прокатку в условиях НШСГП 2000 ОАО НЛМК // Производство проката.* — 2006. — № 8. — с. 16—21.
8. *Производство проката на стане 2000 в ПГП.* — 2-е. — Липецк : *Технологическая инструкция на ПАО «НЛМК»*, 2016. — 141 с.
9. *Кочегурова Е. А.* *Теория и методы оптимизации.* — Томск : *Изд-во Томского политехнического ун-та*, 2012. — 157 с.
10. *Полухин В. П.* *Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов.* — М. : *Изд-во Metallургия*, 1972. — 512 с.

11. *Газизов Т. Т.* Методы глобальной оптимизации. — Томск : Изд-во В-Спектр, 2017. — 24 с. — URL: <https://talgat.org/news/wp-content/uploads/2018/08/112.pdf> (дата обр. 30.04.2020).
12. *Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М.* Генетические алгоритмы. — 2-е, исправл. и доп. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 320 с.
13. *Сытник К. И.* Разработка и исследование оптимизационных алгоритмов эволюционных вычислений на основе унификации методов гибридизации : Дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Сытник Кирилл Игоревич. — Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2015. — 132 с.
14. *Панченко Т. В.* Генетические алгоритмы. — Астрахань : Изд-во «Астраханский университет», 2007. — 87 с. — URL: <http://mathmod.asu.edu.ru/images/File/ebooks/GAfinal.pdf> (дата обр. 05.05.2020).
15. *Истомин В. А., Галкин А. В.* Оптимальное назначение приоритетов при организации доступа в локальных вычислительных сетях АСУТП // Материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых конф. «Управление большими системами». т. 1. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2019. — с. 52—57.
16. *Макаров Е. Г.* Инженерные расчеты в Mathcad 15. — СПб. : Изд-во «Питер», 2011. — 400 с. — URL: <https://b-ok.cc/ireader/2294357> (дата обр. 17.05.2015).