

УДК 681.513

И.П. Хавина<sup>1</sup>, Н.А. Круговой<sup>2</sup>, М.В. Липчанский<sup>1</sup>, А.В. Легуенко<sup>1</sup><sup>1</sup> Национальный технический университет «ХПИ», Харьков<sup>2</sup> ГП Харьковский машиностроительный завод «ФЭД», Харьков

## ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПИСАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

*Предложено решение задачи формирования оптимального расписания производственного технологического процесса изготовления изделий методами лезвийной обработки, основанное на применении методов искусственного интеллекта – генетических алгоритмов. Для осуществления имитационного моделирования производственного процесса разработана специализированная система.*

**Ключевые слова:** оптимальное управление, автоматизация технологических процессов, искусственный интеллект, генетические алгоритмы, имитационное моделирование.

### Введение

**Постановка проблемы.** Автоматизация технологических процессов (ТП) является неотъемлемой частью современной производственной индустрии. Вследствие этого разработка новых и внедрение существующих научных подходов и технологий во все отрасли промышленности является важной задачей автоматизации производства.

**Анализ литературы.** Условия сегодняшнего рынка требует от машиностроительных предприятий повышения конкурентоспособности и снижения себестоимости производимой продукции. В современном производстве 80 % изделий изготовлены с помощью процессов лезвийной обработки (резанием). Эти процессы требуют выполнения целенаправленного ряда мер. Это, во-первых, правильный выбор инструмента и определение эффективных режимов резания. Во-вторых, это сокращение временных затрат на наладку оборудования и транспортировку заготовки [1-5]. Разработка и внедрение в производство автоматизированной системы определения оптимальных транспортных маршрутов позволяет уменьшить накладные расходы, связанные с транспортировкой продукции. Создание гибкой и эффективной системы транспортировки возможно благодаря внедрению в технологическую цепочку роботизированных систем, которые в автоматическом режиме могут выполнять как основные, так и вспомогательные транспортные работы. Задача формирования оптимальных маршрутов движения для транспортных роботов требует тщательной проработки комплекса взаимосвязанных факторов, что позволит создать эффективную транспортную систему с адаптацией к изменению условий производства.

**Цель статьи** – постановка и решение задачи определения оптимального расписания транспортных роботов в процессе производства изделий с помощью лезвийной обработки, основанное на применении генетических алгоритмов (ГА) в условиях гибкого автоматизированного производства (ГАП).

### Решение задачи

Даны  $n$  работ  $J_i$  и  $m$  станков  $M_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ . Каждая работа  $J_i$  состоит из нескольких операций. Операция  $O_{ij}$  соответствует  $j$ -й операции работы  $J_i$ . Время и стоимость выполнения операции  $O_{ij}$  известны. Перемещение заготовок осуществляет  $k$  роботов с параметрами  $R_k$

Учитываются технологические и организационные ограничения, например, операция должна выполняться на станке за один проход и операция на станке не может быть начата, если предшествующая операция еще не закончена; каждая работа должна выполняться последовательно, начиная с первой операции и заканчивая последней.

Рассматриваемая задача требует выработки таких расписаний движения транспортных роботов, при котором изделие пройдет все стадии технологических операций с наименьшими затратами времени и минимальной себестоимостью операций, с учетом технологических ограничений для каждой операции и эксплуатационных ограничений на изделие. Решение задачи состоит в поиске оптимального расписания и осуществляется с помощью генетического алгоритма [6-8]. Оптимальное решение представляется в виде диаграммы Ганта.

Качество расписания характеризуется следующими величинами:

$$F_1 = \sum_j W_{jiu} \cdot G_{jiu} + t_{\text{пр}} \cdot \tilde{N}_{\text{пр}}; \quad F_2 = \sum_j E_{ij} \cdot T_{ij},$$

где  $F_1$  – суммарные затраты на переналадку оборудования и стоимость простоя  $j$ -го станка;  $W_{jiu}$  – затраты на единицу времени переналадки  $j$ -го станка с  $i$ -й операции на  $u$ -ю операцию;  $G_{jiu}$  – длительность переналадки  $j$ -го станка с выполнения  $i$ -й операции на выполнение операции  $u$ -й;  $t_{\text{пр}}$  – время простоя  $j$ -го станка;  $C_{\text{пр}}$  – затраты на единицу времени простоя  $j$ -го станка;  $F_2$  – суммарные затраты на выполнение работ на станках;  $E_{ij}$  – затраты за единицу

времени выполнения i-й работы на j-ом станке;  $T_{ij}$  – длительность выполнения i-й операции на j-м станке.

На качество расписания влияют коэффициент загрузки производственного оборудования, требования к качеству технологической i-ой операции ТП (точность, шероховатость поверхности и т.п.) -  $qval_i$  и множество параметров к транспортным роботам  $R_k$ .

Техническими ограничениями, определяющими возможные варианты технологического маршрута, являются: ТО – последовательность операций ТП; набор имеющегося на предприятии оборудования  $\hat{I} \hat{A}$  и его технические и экономические характеристики  $Z_1^{\hat{I} \hat{A}}$

$$\hat{I} \hat{A} \in \{\hat{I} \hat{A}_1, \hat{I} \hat{A}_2, \dots, \hat{I} \hat{A}_L\},$$

$$Z_1^{\hat{I} \hat{A}} = \{Z_{11}^{\hat{I} \hat{A}}, Z_{12}^{\hat{I} \hat{A}}, \dots, Z_{1q_1}^{\hat{I} \hat{A}}\}, (l = \overline{1, L}),$$

где  $q_1$  – количество технических характеристик для l-ой единицы оборудования.

Решение задачи состоит в поиске такого расписания, при котором

$$F_1 \Rightarrow \min, F_2 \Rightarrow \min, qval_i \in Q.$$

Среди множества методов решения задачи методы ГА подходят для решения задачи оптимизации, так как они не требуют строгой формализации целевой функции и исследуют пространство решений в нескольких направлениях. Они способны находить глобальный оптимум и работают с комплексом разрывных функций. ГА – это стохастические, эвристические оптимизационные методы, которые основываются на идее эволюции посредством естественного отбора [7, 8].

Основные отличия ГА от традиционных методов оптимизации: обработка не значений параметров самой задачи, а их закодированной формы; поиск решения исходя не из единственной точки экстремума, а из некоторого пространства поиска; использование только целевой функции, а не ее производных либо иной дополнительной информации; применение вероятностных, а не детерминированных правил выбора [6]. В случае таких задач ГА может гарантировать получение успешного варианта решения исходной задачи (точность найденного решения достигает в среднем 80-90% от теоретически возможного) [9].

Первый этап постановки задачи для решения с помощью ГА предусматривает порождение начальной популяции особей, в которой каждая особь отображается в виде хромосомы. Хромосома представ-

ляет собой упорядоченную последовательность генов. Важным фактором является способ выбора кодирования хромосомы. Хромосома содержит данные о возможном (удачном или не удачном) решении задачи. Каждая технологическая операция однозначно кодируется уникальным номером станка, на котором она может быть выполнена. Маршрут производства изделия, согласно заданного ТП, представляется в виде набора технологических операций и представляет собой хромосому. В случае, если операции в ТП дублируются (например, операция выполняется 2 раза подряд, но с различной точностью обработки поверхности изделия) нет необходимости уменьшать длину хромосомы, поскольку в таком случае нужно задавать дополнительное соответствие места дублирования генов, что излишне усложнит модель кодирования. Схема преобразования операций ТП в результирующую хромосому представлена на рис. 1.

На следующем этапе происходит оценка приспособленности хромосом популяции к заданным критериям отбора с помощью функции приспособленности. На основании критериев целевой функции составляется функция приспособленности, которая позволяет оценить степень приспособленности каждой конкретной особи в популяции к заданным условиям отбора. Затем осуществляется отбор наиболее приспособленных особей популяции, которые будут участвовать в формировании следующей популяции потомков [5].

Полученное множество отобранных особей подвергается воздействию генетических операторов скрещивания и мутации. В разработанной модели применяется однородный кроссинговер, что позволяет эффективно комбинировать свойства (гены) предков для формирования особей-потомков. Однако, если постоянно применять к популяции кроссинговер и селекцию, существует вероятность преждевременного вырождения популяции [10].

В таком случае большинство операторов кроссинговера будут гомологичными (поскольку будет происходить скрещивание особи с самой собой) и не будут производить новой информации [10]. Подобный подход может привести к генерированию приемлемых решений, сходящихся вблизи локальных оптимумов пространства поиска [7], однако, оптимальное решение так и не будет выработано (рис. 2).

Скорость схождения решения задачи при этом будет высока (что можно заметить по количеству

| Операция       | Номер станка | ТП в виде набора операций<br>[Фрезеровальная, токарная, сверлильная, шлифовальная] |
|----------------|--------------|--|
| Сверлильная    | 1            |  |
| Токарная       | 2, 4, 5      | Результирующие хромосомы<br>4213, 4513, 6213, 6513, 4413, 4413, 6413, 6413         |
| Шлифовальная   | 3            |  |
| Фрезеровальная | 4, 6         |  |

Рис. 1. Схема преобразования операций ТП в результирующую хромосому

итераций). Разработанная модель использует битовую мутацию (bit-flip mutation), которая случайным образом изменяет один ген произвольно выбранной хромосомы. На поздних этапах работы ГА эти изменения в основном приводят к отсеву мутировавших особей из популяции в результате селекции, поэтому изменять более одного гена не представляется целесообразным (рис. 3).

| Характеристики маршрутов: |                    |                               |            |
|---------------------------|--------------------|-------------------------------|------------|
| Маршрут                   | Стоимость маршрута | Суммарное время выполнения ТО | Длина пути |
| 2422243                   | 8,58               | 15                            | 154        |
| 2422203                   | 8,58               | 17                            | 162        |
| 2422241                   | 8,58               | 17                            | 224        |
| 2422201                   | 8,58               | 18                            | 188        |
| 2422233                   | 8,59               | 15                            | 228        |
| 2322243                   | 8,59               | 16                            | 221        |
| 2322203                   | 8,59               | 16                            | 223        |
| 2322241                   | 8,59               | 16                            | 226        |
| 2422213                   | 8,59               | 16                            | 157        |
| 2122243                   | 8,59               | 16                            | 156        |
| 2422231                   | 8,59               | 16                            | 218        |

| Финальная выведенная популяция при отключении мутаций:  |  | Количество итераций работы - 18 |
|---|--|---------------------------------|
| 2422203   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422203   2422241           |  |                                 |
| 2422231   2422203   2422233   2422203   2422233   2422241   2422203   2422241   2422233   2422241   2422233   2422203   2422233   2422241   2422233   2422241 |  |                                 |
| Отобраный маршрут: 2422203  |  |                                 |

| Финальная популяция (мутации включены):   |  | Количество итераций работы - 31 |
|---|--|---------------------------------|
| 2422243   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241 |  |                                 |
| 2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203   2422241   2422203 |  |                                 |
| 2322243   2422233   2322243   2422233   2322243   2422233   2322243   2422233   2322243   2422233   2322243   2422233   2322243   2422233   2322243 |  |                                 |
| 2322241   2122243   2322203   2422213   2122243   2322203   2422213   2122243   2322203   2422213   2122243   2322203   2422213   2122243   2322203 |  |                                 |
| Отобраный маршрут: 2422243  |  |                                 |

Рис. 2. Влияние мутаций на конечный результат

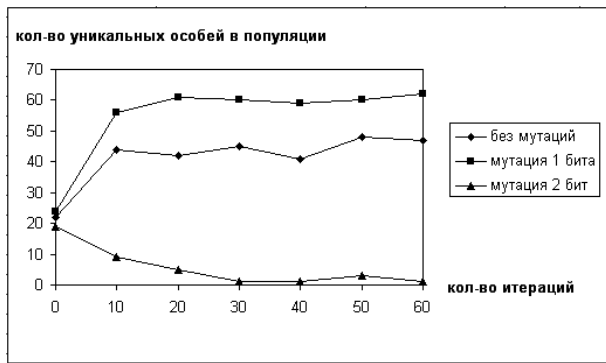


Рис. 3. Динамика роста хромосом

Но отказываться от операции мутации не следует – вносимые ими искажения неоднозначны и могут приводить к тому, что в популяцию может быть включено решение, расширяющее диапазон вариантов формирования хромосом, при этом скорость схождения решения задачи уменьшается, но вероятность получения оптимального решения будет значительно увеличена. Особенно полезно влияние мутаций может проявиться в случае, когда оптимумы целевой функции разбросаны по пространству поиска неравномерно [11]. Таким образом, применение операции мутации позволяет минимизировать проблему локального экстремума [12].

Последовательность операций скрещивания и мутации особей формирует новую популяцию, и повторяется пока не будет выполнено условие останова работы ГА, после чего из результирующей популяции выбирается одна или несколько наиболее приспособленных к заданным условиям отбора особей. Условие останова выбрано таким образом, чтобы обеспечить завершение работы ГА, как в случае

возникновения ситуации преждевременной сходимости, так и в случае, когда на конечной стадии выполнения в популяции сохраняется неоднородность, однако среднее значение приспособленности ненамного отличается от максимального значения. Достижение подобного эффекта возможно благодаря использованию  $\sigma$ -отсечения, которое основано на преобразовании функции приспособленности  $F$  к форме  $F'$  согласно выражению [5]:

$$F' = F + (F^* - c\sigma),$$

где  $F^*$  обозначает среднее значение функции приспособленности по всей популяции,  $c$  – малое натуральное число от 1 до 5,  $\sigma$  – стандартное отклонение для популяции. Если полученные значения  $F'$  отрицательны, то они приравниваются нулю.

В работе также применяется элитарная стратегия, которая заключается в сохранении наиболее приспособленных особей и перенесении их в новую популяцию, что позволяет сохранить наилучшие результаты от случайных искажений, вносимых операциями скрещивания и мутации.

Полученное оптимальное решение представлено на рис. 4 в виде диаграммы Ганта.

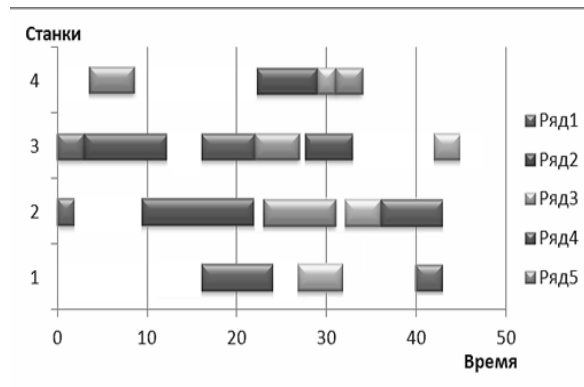


Рис. 4. Диаграмма Ганта

Интерфейс автоматизированной транспортной системы представлен на рис. 5, где 1 – оборудование; 2 – зоны загрузки-разгрузки роботов; 3 – транспортные роботы.

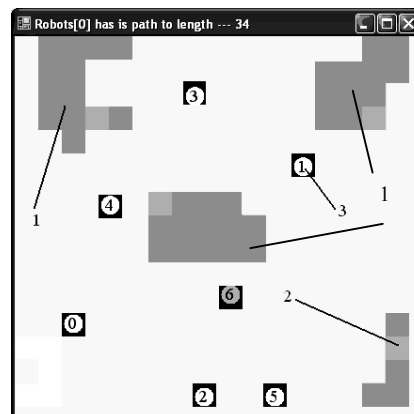


Рис. 5. Интерфейс системы

Разработанная система определения оптимального маршрута движения роботов на тестовых данных показала эффективные результаты для различных пространствах поиска, что позволяет сделать вывод об оправданности применения ГА для решения поставленной задачи.

### Выводы

Для определения оптимального расписания транспортных роботов в процессе производства изделий с помощью лезвийной обработки предложена и реализована система, основанная на генетических алгоритмах.

С помощью системы осуществляется имитационное моделирование производства с учетом заданных не конфликтных ограничений.

Решение задач имеет большую вычислительную емкость из-за того, что на каждом этапе необходимо перебирать возможные значения состояний системы. Количество возможных значений состояний системы зависит от количества параметров и может достигать миллионов.

Таким образом, при увеличении размерности векторов контролируемых факторов в критерии эффективности резко возрастают требования к вычислительным мощностям. Вследствие этого дальнейшее направление исследований это разработка методов распараллеливания алгоритмов многокритериальной многошаговой оптимизации и совершенствование имитационной системы.

### Список литературы

1. Erdélyi F. *Advanced simulation of NC turning operations* / F. Erdélyi, O. Hornyák // *Production Systems and Information Engineering, Miskolc*. – 2003. – V. 1. – P. 41-53.
2. Никоноров А. *Несколько шагов к увеличению производительности в металлообработке* / А. Никоноров // *МТТ*. – 2010. – № 4. – С. 24-25.

3. Шишмарев В.Ю. *Автоматизация технологических процессов* / В.Ю. Шишмарев. – М.: АСАДЕМА, 2005. – 25 с.

4. Коган Б.И. *Автоматизированные транспортно-складские системы на участках механической обработки деталей* / Б.Коганю – Кемерово: КузГТУ, 2002. – 222 с.

5. Капустин Н.М. *Автоматизация производственных процессов в машиностроении* / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе, Н.П. Дьяконова, М.С. Уколов. – М.: Высшая школа, 2004. – С. 11-15.

6. Metta H. *Adaptive, multi-objective job shop scheduling using genetic*. Abstract of Thesis / H. Metta. – The Graduate School University of Kentucky, 2008. – 111 p.

7. Гладков Л.А. *Генетические алгоритмы* / Л.А. Гладков, В.В. Курейчук, В.М. Курейчук. – М.: Физматлит, 2006. – С. 12-122.

8. Giffler B. *Algorithms for solving production-scheduling problems* / B. Giffler, G.T. Thompson // *Operat. Res.* – 1960. – 12, № 8. – P.487-503.

9. Бобровский С. *Эволюция и искусственная жизнь* [Электронный ресурс] / С. Бобровский // *PC Week/RE*. – № 3-5, – 2005. – Режим доступа к статье: <http://alt-future.narod.ru/Ai/bobrov1.html>.

10. Luke S. *Essentials of Metaheuristics. A Set of Undergraduate Lecture Notes* / S. Luke // *A Set of Undergraduate Lecture Notes – Zeroth Edition* – 2009. – P. 29-53.

11. Джонс М.Т. *Программирование искусственного интеллекта в приложениях* / М.Т. Джонс – Москва – ДМК Пресс – 2004. – С. 112-139.

12. Ротштейн А.П. *Интеллектуальные технологии идентификации* [Электронный ресурс] / А.П. Ротштейн // *Генетические алгоритмы*. – Режим доступа к статье: [http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book5/1\\_2.php](http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book5/1_2.php).

Поступила в редколлегию 20.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет “ХПИ”, Харьков.

### ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗКЛАДУ ВИРОБНИЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

І.П. Хавіна, М.О. Круговий, М.В. Липчанський, А.В. Легуєнко

Для вирішення завдання формування оптимального маршруту руху транспортного робота в процесі виробництва виробу розроблена модель автоматизованого виробничого середовища і обґрунтований підхід оптимізації маршруту руху за допомогою методів штучного інтелекту – генетичних алгоритмів.

**Ключові слова:** оптимальне управління, автоматизація технологічних процесів, штучний інтелект, генетичні алгоритми, імітаційне моделювання.

### FORMING OF OPTIMUM CURRICULUM OF PRODUCTION TECHNOLOGICAL PROCESS

I.P. Khavina, N.A. Krugovoy, M.V. Lipchanskiy, A.V. Leguenko

To solve the problem of creating the optimal route of the transport robot in the process of manufacture of the product developed a model of an automated production environment and grounded approach of optimization of the route based on application of artificial intelligence methods - genetic algorithms.

**Keywords:** optimal management, automation of technological processes, artificial intelligence, genetic algorithms, imitation design.