

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Лаздынь С.В., Секирин А.И., Сухоруков Д.В. ✓

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра автоматизированных систем управления
E-mail: slazd@ukr.net, alx@kita.dgtu.donetsk.ua, suhoruckov@mail.ru

Abstract

Lazdyn S.V., Sekirin A.I., Suhoruckov D.V. Optimization of the flexible manufacturing systems in machine-building by using the genetic algorithm. The task of multicriterion optimization of the Flexible Manufacturing Systems (FMS) scheduling is formulated. The generalized genetic algorithm with different types of algorithms and genetic statements, arbitrary structure of chromosomes is suggested to solve this task. The program complex for the optimization, including the modeling subsystem and subsystem of optimization, which co-operate through the IPC Windows mechanism is developed. The conducted experimental researches showed efficiency of genetic algorithms application to FMS scheduling optimization.

Общая постановка проблемы оптимизации работы гибких производственных систем. Одним из основных направлений развития машиностроения является автоматизация обрабатывающего оборудования с помощью современных компьютерных технологий и создание на их базе гибких производственных систем (ГПС). Высокая степень гибкости обеспечивает более полное удовлетворение требований заказчика, оперативный переход к выпуску новой продукции, автоматизацию технологической подготовки производства на базе вычислительной техники, снижение затрат на незавершенное производство. Эффективность ГПС во многом зависит от качества расписаний (календарных графиков) работы оборудования, формируемых подсистемой оперативного управления. Несмотря на проведенные исследования проблема построения оптимальных расписаний работы ГПС не получила окончательного решения и требует проведения дальнейших исследований [1].

Постановка задачи оптимизации расписания работы ГПС. Пусть рассматриваемая ГПС состоит из L единиц технологического оборудования Q_l ($l = 1, 2, \dots, L$). Процесс изготовления деталей D_i ($i=1, \dots, n$) разбивают на технологические операции $O_{ij} = \langle H_{ij}, T_{ij} \rangle$, ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$), где H_{ij} – номер группы технологического оборудования; T_{ij} – продолжительность выполнения операции.

Операция O_{ij} должна выполняться без перерыва с самого начала. Если обозначить через t_{ij} – время начала выполнения операции O_{ij} , а через \bar{t}_{ij} – момент окончания обработки, то должно выполняться равенство: $\bar{t}_{ij} = t_{ij} + T_{ij}$. Время начала операции зависит от времен выполнения предыдущих и всегда выполняется неравенство: $t_{ij} \leq t_{ij+1}$. Тогда совокупность $\{t_{ij}\}$ ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$), удовлетворяющих всем технологическим и временным ограничениям, является расписанием (G) работы автоматизированного технологического комплекса.

Задача оптимизации расписания заключается в том, чтобы для ГПС с заданными технологическими маршрутами обработки деталей, определить такую последовательность запуска деталей в производство и размеры партий запуска, при которых целевая функция - критерий оценки качества расписания $F(G)$ стремится к экстремуму $F(\bar{G}) = \text{extr } F(G)$ при выполнении следующих ограничений:

- по объемам изготовления: $N_{\phi i} = P_i$,

где $N_{\phi i}$ – фактически изготовленное количество деталей i -го типа ($i=1, \dots, n$); P_i - заданное в производственной программе количество деталей i -го типа.

- по срокам изготовления: $T_{изг\ i} \leq T_{дир\ i}$,

где $T_{изг\ i}$, $T_{дир\ i}$ – фактический и директивный сроки изготовления детали i -ого типа.

- по фонду времени работы технологического оборудования:

$$\sum_{i=1}^n P_i \sum_{j=1}^m T_{ij} \leq R_l,$$

где T_{ij} – длительность выполнения технологической операции; R_l – ресурс l -ой группы оборудования ($l = 1, 2, \dots, L$).

При этом совокупность времени $\{t_{ij}\}_{опт}$, соответствующая экстремуму критерия $F(G)$ является оптимальным расписанием (\bar{G}) работы ГПС.

Для оценки качества составляемого расписания могут быть использованы следующие критерии эффективности работы ГПС [2]:

1. Минимизация длительности цикла выполнения заказа. Это время (F_1) состоит из общего машинного времени (f_1) и времени транспортировки (f_2):

$$f_1 = \sum_i^n \sum_j^{p_i} \sum_k^m p v_i \cdot p t_{ijk} \cdot x_{ijk} \tag{1}$$

$$f_2 = \sum_i^n \sum_j^{p_i-1} \sum_k^m \sum_l^m t_{ikl} \cdot x_{ijk} \cdot x_{i(j+1)l} \tag{2}$$

$$F_1 = \min\{f_1 + f_2\} \tag{3}$$

где $p v_i$ - размерность партии деталей типа i ; $p t_{ijk}$ - время обработки единицы типа детали i операцией j на машине типа k ; $x_{ijk} = 1$, если машина типа k выбрана для выполнения операции j , иначе 0; $t_{ikl} = n_{ikl} \cdot t m_{kl}$ - общее время транспортировки между машинами k и l для типа детали i ; $t m_{kl}$ - время транспортировки между машинами k и l ; n_{ikl} - число ходок между машиной k и l для детали типа i ;

2. Минимизация отклонений загрузки машин:

$$F_2 = \min\left\{\sum_k^m (t w_k - e w)^2\right\} \tag{4}$$

где $t w_k = p t_{ijk} \cdot p v_i$ - загрузка k -й машины; $e w$ - средняя загрузка машин;

3. Минимизация максимальной загрузки оборудования:

$$F_3 = \min\{\max(t w_k)\} \tag{5}$$

4. Изготовление партий деталей точно в срок:

$$F_4 = \min\left\{T_{Di} - \sum_i^n \sum_j^{p_i} \sum_k^m p v_i \cdot p t_{ijk} \cdot x_{ijk} - \sum_i^n \sum_j^{p_i-1} \sum_k^m \sum_l^m t_{ikl} \cdot x_{ijk} \cdot x_{i(j+1)l}\right\} \tag{6}$$

где T_{Di} - директивный срок выполнения партии деталей i .

Оптимизация расписания работы гибких производственных систем с использованием генетических алгоритмов. Для решения поставленной выше задачи предлагается использовать генетические алгоритмы (ГА) [3]. Для сокращения времени поиска оптимального решения, обеспечения высокой сходимости и точности результатов был разработан универсальный (обобщенный) генетический алгоритм. Особенностью его является то, что он включает в себя возможности различных типов ГА (стандартный, адаптивный), генетических операторов, эволюционных стратегий, произвольную структуру хромосом. В процессе решения задачи пользователь может выбрать (или подобрать) наиболее подходящую конфигурацию ГА.

Обобщенный алгоритм генетического поиска представлен на рис. 1.

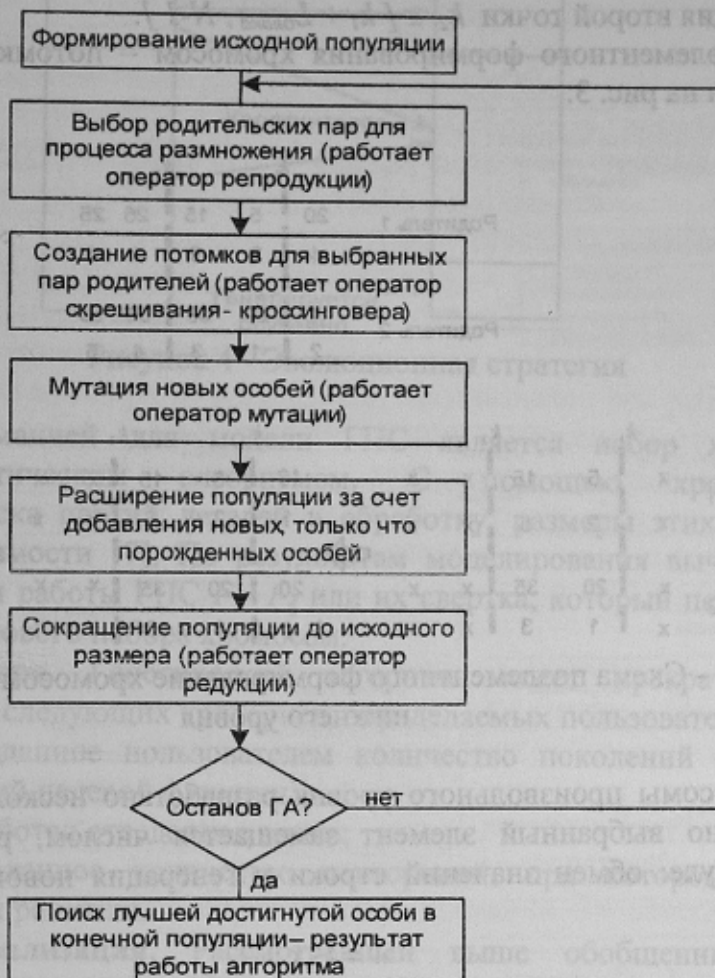


Рисунок 1 - Обобщенный алгоритм генетического поиска

Предложено использовать матричное представление хромосом, позволяющее реализовывать произвольное кодирование решения в виде матрицы размерности $N \times M$ (рис.2).

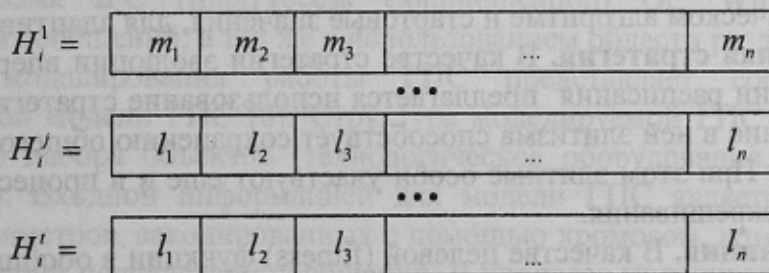


Рисунок 2 - Схема кодирования решения

Здесь, H_i^j, H_i^k - соответственно хромосомы i -го и нижнего уровня; m_i, l_i - натуральные числа, кодирующие заданные параметры решения; n - размерность строки, характеризующее число возможных типов решения.

Генетические операторы. В обобщенном генетическом алгоритме реализованы одноточечный и двухточечный операторы кроссинговера, с возможностью коррекции. Так, двухточечный оператор скрещивания на первом шаге из всей популяции выбирает две хромосомы родителя. Далее случайным образом определяются две точки кроссинговера:

1. Первая точка расположена в интервале ОК $k_1 \in [1, N-1-L_{\text{блока}}]$ ($L_{\text{блока}}$ – минимальное расстояние между точками кроссинговера, N –длина хромосомы);
2. Позиция второй точки $k_2 \in [k_1 + L_{\text{блока}}, N-1]$.

Схема поэлементного формирования хромосом – потомков с коррекцией нижнего уровня приведена на рис. 3.

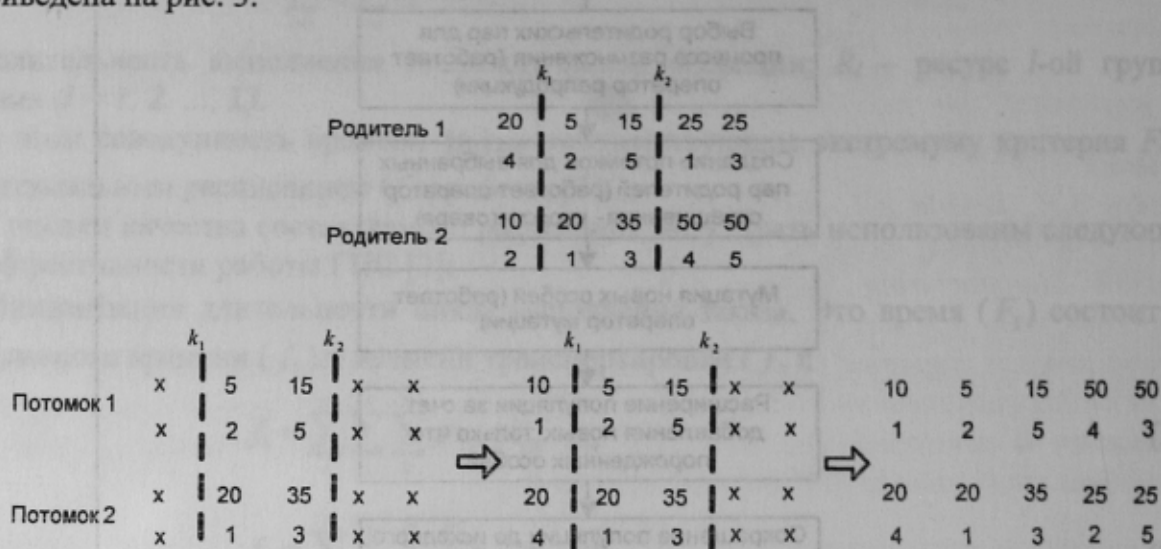


Рисунок 3 - Схема поэлементного формирования хромосом – потомков с коррекцией нижнего уровня

Для хромосомы произвольного уровня разработано несколько вариантов оператора мутации: случайно выбранный элемент замещается числом, рассчитываемым согласно следующей формуле: обмен значений строки и генерация нового значения из заданного интервала.

$$w = i \cdot x,$$

где w - новое значение; i - натуральное число, случайный множитель в интервале $[1; \delta]$, задающий кратность значения (например, для случая размерности партии запуска); x - возможный размер величины (например, размер транспортной партии $x \in \{5; 10; 15\}$).

Имеется возможность выбора либо комбинации операторов, либо определенного типа операторов мутации и кроссинговера. В алгоритме предусмотрена возможность задания вероятностей мутации и кроссинговера несколькими способами: постоянные значения, при стандартном генетическом алгоритме и стартовые значения, для адаптивного алгоритма.

Эволюционная стратегия. В качестве стратегии эволюции впервые, применительно к задаче оптимизации расписания предлагается использование стратегии [4], изображенной на рис. 4. Применение в ней элитизма способствует сохранению общего качества популяции на высоком уровне. При этом элитные особи участвуют еще и в процессе отбора родителей для последующего скрещивания.

Целевая функция. В качестве целевой (fitness) функции в обобщенном генетическом алгоритме может выступать один из критериев эффективности работы ГПС $F_1 - F_4$ (см. формулы 3, 4, 5, 6) или их свертка, полученная одним из известных способов [5].

Для вычисления значений критериев $F_1 - F_4$ использована разработанная авторами объектная модель гибкой производственной системы [6]. Объектно-ориентированный подход для построения модели выбран в связи с тем, что он позволяет создавать динамические модели для производственных систем с различным составом оборудования и компоновкой.



Рисунок 4 - Эволюционная стратегия

Исходной информацией для модели ГПС является набор хромосом (рис.2), сгенерированный генетическим алгоритмом. С помощью хромосом задается последовательность запуска партий деталей в обработку, размеры этих партий и другие параметры при необходимости [7]. По результатам моделирования вычисляется один из критериев эффективности работы ГПС F_1 - F_4 или их свертка, который передается в ГА для оценки и формирования нового набора хромосом.

Критерии останова. Генетический алгоритм может прекратить дальнейшие вычисления по одному из следующих критериев, определяемых пользователем:

1. Отработано заданное пользователем количество поколений (или произведено заданное число вычислений целевой функции);
2. Алгоритм отработал отведенное время;
3. Достигнуто заданное количество повторений, при котором не происходит существенного улучшения решения.

Программная реализация. Рассмотренный выше обобщенный генетический алгоритм реализован в виде программного комплекса в среде программирования Borland C++ Builder 6.0. Структура программного комплекса оптимизации работы ГПС показана на рис. 5. Он состоит из двух частей: подсистемы оптимизации ГПС и подсистемы моделирования ГПС. Каждая из подсистем представляет собой отдельный Windows-процесс (программу).

Взаимодействие подсистемы оптимизации с подсистемой моделирования происходит с помощью механизма IPC (InterProcess Communication) ОС Windows NT/2000/XP посредством посылки сообщений, а так же с использованием области разделяемой памяти.

Подсистема моделирования работы ГПС представляет собой программную реализацию объектной модели ГПС [6]. Структура моделируемой ГПС в этой подсистеме задается с помощью набора объектов (технологическое оборудование, транспорт, склад, система управления). Входной информацией для модели ГПС является набор значений оптимизируемых параметров, закодированных с помощью хромосом, который передается из подсистемы оптимизации посредством сообщений. В процессе моделирования производится имитация работы ГПС для заданного набора входных параметров. В результате формируется расписание работы оборудования и вычисляются значения критериев эффективности ГПС F_1 - F_4 для оценки качества этого расписания. Полученные значения критериев передаются в подсистему оптимизации через область разделяемой памяти.

Подсистема оптимизации работы ГПС состоит из четырех основных модулей: модуля пересылки данных, модуля оптимизации, модуля управления процессом оптимизации и интерфейсного модуля настройки и представления решения. Каждый из модулей представляет собой набор соответствующих процедур.

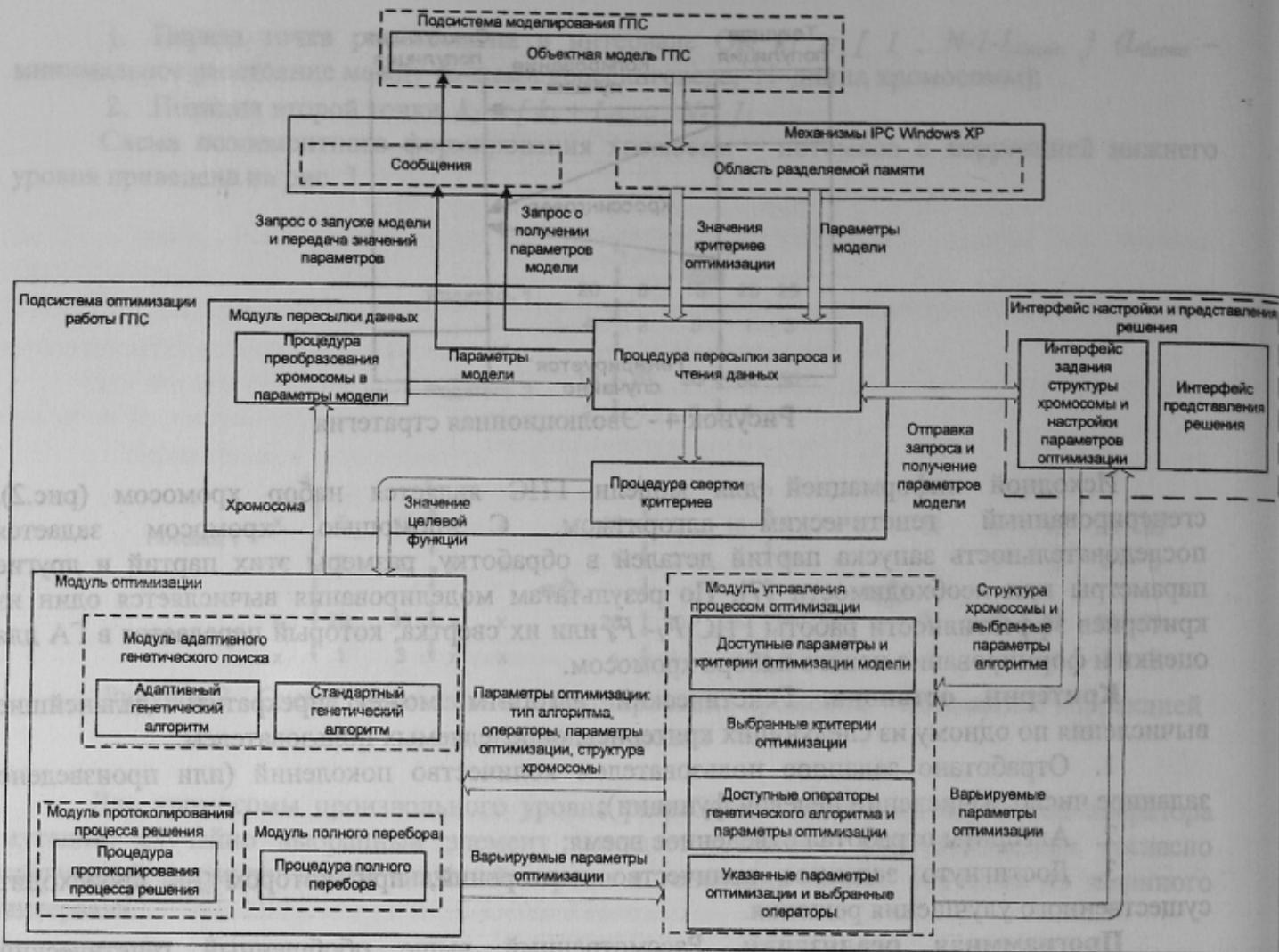


Рисунок 5 - Структура программного комплекса оптимизации ГПС на основе обобщенного генетического алгоритма и объектной модели ГПС

Модуль пересылки данных выполняет две основные функции: посылка модели запросов в форме сообщений и чтение получаемых от модели данных из области разделяемой памяти. Вначале модели посылается запрос о получении оптимизируемых параметров и критериев эффективности. После этого производится чтение информации об этих параметрах и критериях с последующей передачей ее в интерфейсный модуль настройки и представления решения. Затем, на каждом шаге работы генетического алгоритма производится обмен данными между подсистемами. Из подсистемы оптимизации в подсистему моделирования с помощью сообщения передается набор значений оптимизируемых параметров, полученных путем декодирования хромосомы, а в обратном направлении поступают значения критериев эффективности работы ГПС $F_1 - F_4$, вычисленные в результате моделирования. Если оптимизация производится по одному из критериев, то в качестве целевой функции принимается значение одного из этих критериев. В случае многокритериальной оптимизации процедура свертки критериев вычисляет одно значение целевой функции по нескольким критериям и передает его в модуль оптимизации.

Модуль оптимизации включает три части: модуль генетического поиска, модуль полного перебора и модуль протоколирования процесса решения. Модуль генетического поиска состоит из двух процедур: стандартный генетический алгоритм и адаптивный генетический алгоритм. Выбор типа генетического алгоритма, который будет выполнять оптимизацию, производится пользователем в режиме настройки. Модуль полного перебора позволяет получить оптимальное решение путем просмотра всех возможных комбинаций

значений оптимизируемых параметров и сравнить его с квазиоптимальным решением, полученным с помощью ГА. Модуль протоколирования процесса решения производит пошаговое фиксирование наборов хромосом, формируемых генетическим алгоритмом и значений целевой функции, вычисленных моделью ГПС.

Интерфейсный модуль настройки и представления решения предоставляет пользователю удобный интерфейс для задания необходимых исходных параметров и просмотра полученных результатов. Этот модуль позволяет устанавливать следующие параметры: способ кодирования хромосомы, назначаются операторы мутации (для каждого уровня хромосомы) и кроссинговера, критерий останова, выбираются критерии эффективности (из перечня критериев, вычисляемых в подсистеме моделирования работы ГПС), выбирается тип применяемого алгоритма поиска (стандартный или адаптивный), а так же задаются начальные параметры алгоритма.

Модуль управления процессом оптимизации предназначен для работы с настройками подсистемы оптимизации работы ГПС. Он содержит информацию о доступных и избранных параметрах оптимизации: типе генетического алгоритма, операторах кроссинговера и мутации, их вероятностях, способах генерации генов и другое. Так же в модуле хранится информация о параметрах модели, и их соответствии каждому уровню хромосомы. Эта информация используется модулем пересылки данных для стыковки с подсистемой моделирования ГПС.

Предложенный в данной работе подход обеспечивает универсальность модуля оптимизации, который не зависит от типа модели, перечня оптимизируемых параметров и критериев эффективности. Он позволяет изменять структуру кодирования, варьировать операторами мутации и кроссинговера, выбирать один или несколько критериев эффективности, в зависимости от того, какая задача оптимизации решается. При данном способе реализации подсистема оптимизации является независимой от модели объекта и может быть применена к различным объектам моделирования без перестройки внутренней структуры.

Экспериментальные исследования. В качестве объекта экспериментальных исследований выбрана ГПС, которая представляет собой автоматизированный технологический комплекс механообработки деталей типа тел вращения. В состав ГПС входит семь гибких производственных модулей (ГПМ) модели 1П756ДФ398, расположенные в один ряд вдоль пролета корпуса. Каждый станок обслуживается подвесным роботом модели СМ80Ц2503. Станок оснащен системой ЧПУ «Синумерик 7Т». Автоматизированная транспортно-накопительная система выполнена пространственно в виде линии, расположенной вдоль ГПМ и включает в себя: автоматизированный транспорт (ТРМ-01) и автоматизированный склад (РСК-1000). Номенклатура обрабатываемых деталей составляет 30 наименований.

Для проведения исследований эффективности разработанного обобщенного генетического алгоритма проведен ряд совместных с объектной моделью ГПС вычислительных экспериментов. Ниже приведены полученные результаты для одного из указанных выше критериев оптимальности - длительности цикла выполнения заказа F_1 ($F_1 \rightarrow \min$).

Зависимости F_1 от мощности популяции и количества поколений для одноуровневого генетического алгоритма (набор хромосом представлен одной строкой, кодирующей последовательность запуска партий деталей в обработку) приведены на рис. 6. В результате проведенных экспериментов установлены рациональные значения параметров (мощность популяции - 8, количество поколений - 10, вероятности кроссинговера и мутации - 0,7 и 0,01), при которых достигается лучшее значение указанного критерия эффективности работы ГПС.

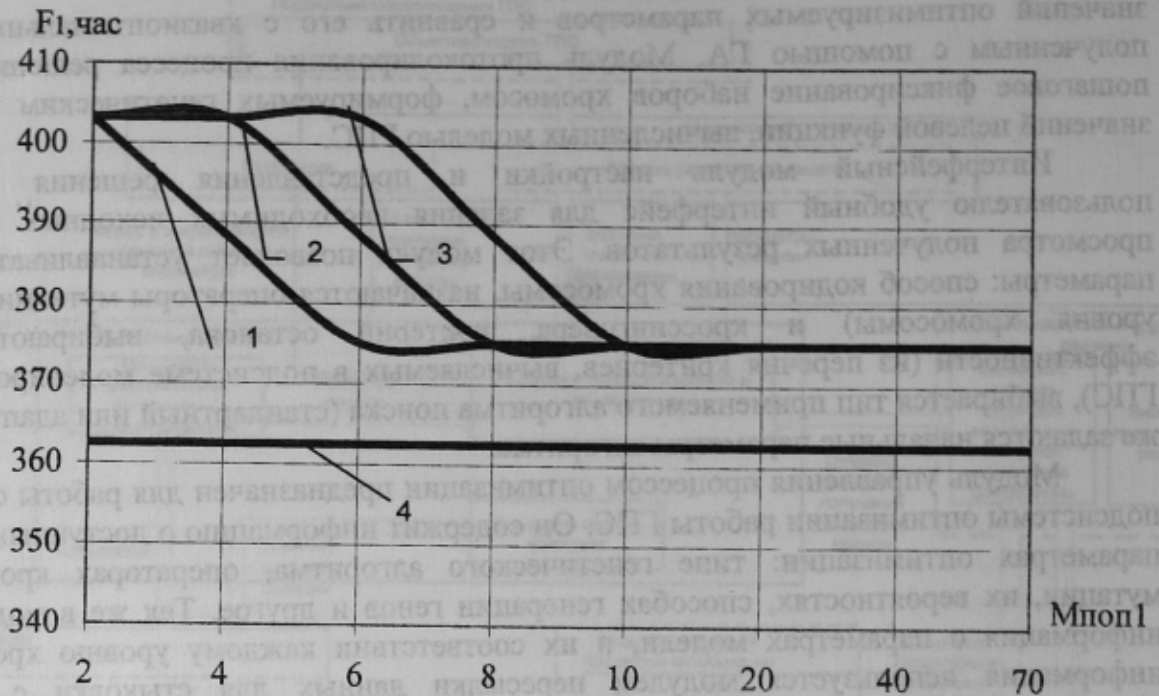


Рисунок 6 - Залежність тривалості циклу виготовлення замовлення (F_1) від потужності популяції ($M_{поп1}$) та кількості поколінь ($N_{п}$) для одноуровневого ГА ($F_1 \rightarrow \min$): 1- для $N_{п}=5$; 2 – для $N_{п}=10$; 3 – для $N_{п}=15$; 4- оптимальне рішення при повному переборі (F_{1opt} .)

Для оцінки якості отриманого рішення проведено його порівняння з оптимальним значенням – F_{1opt} , визначеним методом повного перебору. Порівняння показало, що відхилення від оптимального значення становить 3,6%. Це свідчить про те, що отримане з допомогою ГА рішення є достатньо близьким до оптимального (квазіоптимальним).

Проведені експерименти з двохуровневим ГА, в якому рішення кодується набором хромосом з двох рядків. Перший рядок задає послідовність запуску партій деталей на обробку, а другий рядок – розміри цих партій. При цьому були визначені раціональні параметри для другого рівня, такі як: потужність популяції, ймовірності операторів кроссинговера $OK_2=0,6$ і мутації $OM_2=0,001$. Аналіз залежності тривалості виготовлення замовлення F_1 від потужності популяції $M_{поп2}$ (рис. 7) показав, що при використанні двохуровневого ГА досягається покращення результатів порівняно з одноуровневим ГА. При цьому F_1 зменшується з 375 до 326 годин або на 13%.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження показали, що використання узагальненого генетичного алгоритму разом з об'єктною моделлю ГПС дозволяє виконати оптимізацію роботи ГПС за вибраним критерієм ефективності і сформувати відповідне йому розкладання роботи обладнання.

Висновки. Сформульована задача багатокритеріальної оптимізації розкладання роботи гнучких виробничих систем, для рішення якої запропоновано використовувати генетичні алгоритми. З метою забезпечення універсальності розроблено узагальнений генетичний алгоритм, який включає в себе можливості різних типів ГА (стандартний, адаптивний), генетичних операторів, еволюційних стратегій, довільну структуру хромосом. Розроблено програмний комплекс оптимізації роботи ГПС, що включає підсистему моделювання ГПС і підсистему оптимізації, які взаємодіють через механізм IPC Windows. Проведені експериментальні дослідження показали ефективність застосування генетичних алгоритмів для оптимізації розкладання роботи гнучких виробничих систем.

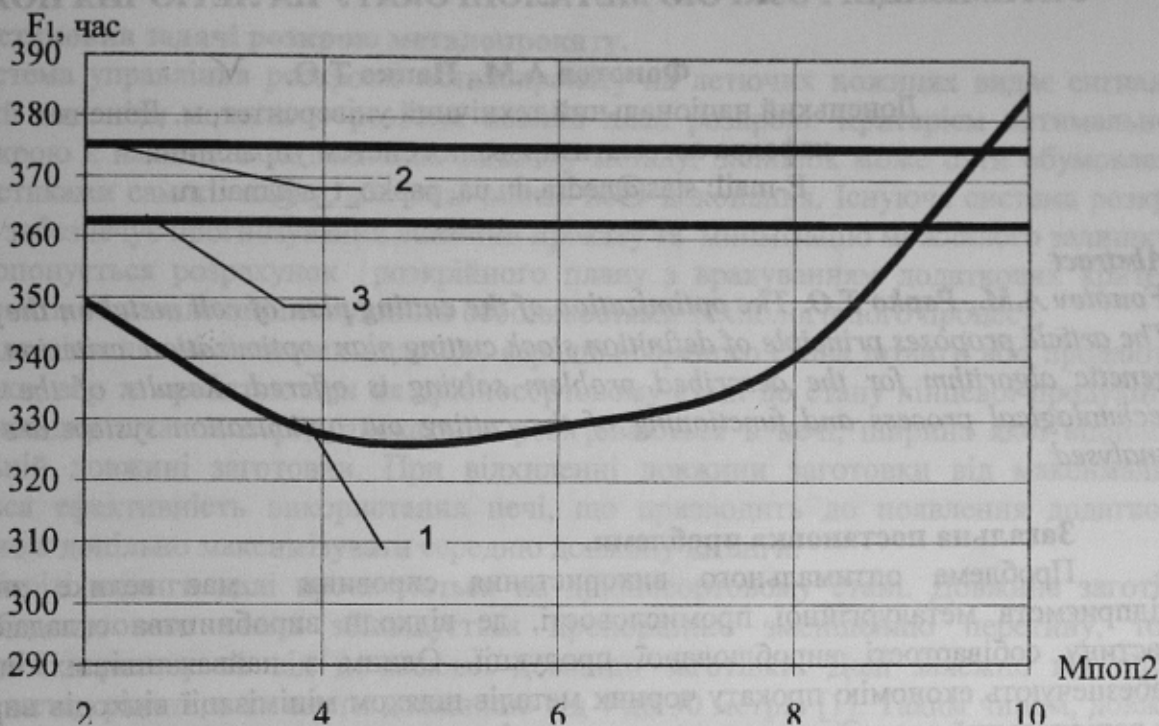


Рис. 7 - Залежність тривалості циклу виготовлення деталей (F_1) від потужності популяції ($M_{поп2}$): 1 - для двохуровневого ГА; 2 - квазіоптимальне значення F_1 і 3 - оптимальне значення F_{1opt} , отримані для одноуровневого ГА.

Література

1. Лаздынь С.В., Секирин А.И. Совершенствование методов управления автоматизированными технологическими комплексами механообработки на основе объектно-ориентированного подхода и генетических алгоритмов. //Научные труды Донецкого государственного технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация, выпуск 38. – Донецк: ДонГТУ, 2002. – с. 169-175.
2. Jian-Hung Chen, Shinn-Ying Ho. Multi-Objective Evolutionary Optimization of Flexible Manufacturing Systems. URL: <http://www.lania.mx/~ccoello/chen01a.pdf.gz>
3. Holland J.H. «Adaptation in Natural and Artificial Systems: 2nd edition», MIT Press, 1992.
4. Jose Fernando Goncalves, Jorge Jose de Magalhaes Mendes, Mauricio G.C. A Hybrid Genetic Algorithm for the Job Shop Scheduling Problem. - AT&T Labs Research Technical Report TD-5EAL6J September, 2002.
5. Методы многокритериальной оптимизации. /Сост. В. И. Ильин. – Тверь: ТвГУ, 1990.
6. Секирин А.И. Построение объектно-ориентированной модели автоматизированного технологического комплекса механообработки. //Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация, выпуск 64. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – с. 223-232.
7. Лаздынь С.В., Секирин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для оптимизации работы автоматизированного технологического комплекса механообработки. //Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация, выпуск 90. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – с. 111-118.