

УДК 004.896

А.С. Антонова, К.А. Аксёнов

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО И ЭВОЛЮЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТ

A.S. Antonova, K.A. Aksyonov

APPLICATION OF THE SIMULATION AND EVOLUTIONARY MODELLING IN THE SCHEDULING

Рассмотрена модификация генетического алгоритма имитацией отжига и поиском новизны применительно к задаче планирования работ. Предложен метод мультиагентной генетической оптимизации, реализующий различные стратегии поиска решения, включая модуль имитации. В результате сравнения методов планирования выявлено: во-первых, непригодность метода MS Project для решения рассматриваемой задачи; во-вторых, преимущество метода мультиагентной генетической оптимизации при анализе качества решения и недостаток метода при рассмотрении его производительности. Предложены пути преодоления недостатков метода мультиагентной генетической оптимизации и сформулированы цели дальнейших исследований.

ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ; ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ; АЛГОРИТМ ИМИТАЦИИ ОТЖИГА; ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ОПТИМИЗАЦИЯ СУБПОДРЯДНЫХ РАБОТ.

This paper considers a genetic algorithm modification based on the annealing simulation and novelty search in applying to the scheduling problem. We propose a multiagent genetic optimization method implementing different decision searching strategies, including a simulation module. The comparison of the different scheduling methods has shown: firstly, the unsuitability of the MS Project planning method to solve the formulated problem; and secondly, both the advantage of the multiagent genetic optimization method in terms of economic effect and disadvantage in terms of performance. Some techniques to reduce the impact of the method's disadvantage are proposed in the conclusion, as well as the aims of future work.

SCHEDULING; GENETIC ALGORITHMS; ANNEALING SIMULATION ALGORITHM; SIMULATION; SUBCONTRACT WORK OPTIMIZATION.

Задача планирования работ — одна из ключевых задач управления организационно-техническими системами. Неэффективное планирование может привести к финансовым потерям, потерям качества и сервиса предоставляемых товаров или услуг, снижению конкурентоспособности компании. С задачей планирования сталкиваются предприятия различных сфер деятельности, в т. ч. производственные и проектные организации, торговые центры, больницы, центры обработки запросов.

Существует ряд постановок задачи планирования в зависимости от сферы ее применения: календарное планирование операций [1–4], планирование распределения ограниченного количества ресурсов по работам [5, 6], задача коммивояжера [7]. При-

менение генетической оптимизации при решении задач планирования работ с заданными ограничениями подробно освещено в литературе [1–7]. Одним из недостатков генетических подходов является высокая зависимость качества принимаемого решения от способа реализации генетических операторов и стратегии поиска экстремума [8]. Рассмотрим оптимизацию решения задачи планирования проектных работ с использованием эволюционных вычислений [9], модифицированных алгоритмами имитации отжига и поиска новизны с целью повышения качества решения задачи.

Обзор работ

В общем виде задача планирования работ формулируется как задача опреде-



ления такой последовательности работ, которая удовлетворяла бы установленным ограничениям и оптимизировала значения целевых функций. При решении задачи планирования обычно рассматриваются возобновляемые ресурсы (например, трудовые ресурсы или оборудование). Тем не менее для определенных задач (например, в производственном планировании) необходимо также учитывать невозобновляемые ресурсы.

В различных исследованиях в зависимости от решаемых задач рассматриваются различные объекты оптимизации. Классическая целевая функция задачи планирования по минимизации времени выполнения работ применяется в исследованиях Срай-прасерта и Давуда [2], Осабы и др. [7]. Целевая функция по минимизации штрафов за невыполнение ограничений используется в работах Каровой и др. [4], Янга и Ву [6]. Обе упомянутые целевые функции рассматривают Дхингра и Чандна [5].

Существуют различные способы оценки значения целевой функции: аналитические методы, имитационное моделирование, искусственные нейронные сети, нечеткие системы, компонентное моделирование. Аналитические методы являются наиболее популярными; недостаток их применения заключается в отсутствии учета динамического характера поведения сложной системы. Данный недостаток преодолевается при использовании имитационной модели для оценки целевой функции [7]. Интеграция эволюционного и имитационного моделирования позволяет ограничить пространство поиска и усилить эвристическую оптимизацию за счет учета динамически меняющихся ограничений задачи планирования.

Ни в одном из приведенных выше исследований не рассмотрена оптимизация привлекаемых субподрядных работ, в то время как данная задача встает перед всеми проектными организациями и даже перед предприятиями с серийным производством. Задача оптимизации субподрядных работ связана с планированием привлечения субподряда с целью максимальной загрузки собственных трудовых ресурсов. В литературе исследуется проблема оптимального вы-

бора набора субподрядчиков из множества с применением методов искусственного интеллекта (например, в работе Чена и др. [10]). Методика оптимизации субподрядных работ с применением имитационного моделирования и эвристик предложена нами в [11]. В настоящей статье рассматривается новый метод оптимизации субподрядных работ на основе применения модифицированного генетического алгоритма.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу планирования уникальных проектов, связанную с определением календарного плана работ. Все операции проектов должны быть выполнены с учетом временных ограничений, которые определяются путем переговоров с заказчиками. В случае нехватки собственных трудовых ресурсов необходимо привлекать субподрядные ресурсы для выполнения всех операций в срок.

Рассмотрим две целевые функции задачи: минимизацию стоимости субподрядных работ и минимизацию суммарного времени простоя собственных отделов. Последняя целевая функция актуальна для компаний, применяющих фиксированную оплату труда, поскольку в этом случае простой сотрудников также оплачивается, что не выгодно для компании.

Для рассматриваемой задачи планирования проектных работ сделаны следующие допущения:

- 1) отдельный проект состоит из ряда операций с известным временем обработки, датами раннего и позднего начала, трудозатратами и стоимостью;
- 2) выполнение операций требует наличия возобновляемых трудовых ресурсов (собственных или субподрядных);
- 3) операции не могут быть прерваны;
- 4) субподрядные работы могут использоваться для выполнения части операции;
- 5) в случае освобождения собственных ресурсов субподрядные работы могут быть прерваны и переданы для выполнения собственными ресурсами;
- 6) субподряд доступен каждый день в неограниченном количестве (например, при работе с несколькими субподрядчиками).

Опишем задачу планирования проектных работ с помощью следующих обозначений.

Индексы: i – индекс проекта, $i = 1, 2, \dots, P$; j – индекс операции в проекте, $j = 1, 2, \dots, Op_i$; w – индекс отдела компании, $w = 1, 2, \dots, V$; t – индекс времени, $t = 0, 1, 2, \dots, T$.

Управляемые переменные: $TB(i, j)$ – набор дат начала операций.

Начальные параметры: $ES(i, j)$ – дата раннего начала операции (i, j); $LS(i, j)$ – дата позднего начала операции (i, j); SL_w – количество человек в отделе w ; $SLO(i, j, w)$ – количество человек отдела w , необходимых для выполнения операции (i, j); $SS(i, j)$ – стоимость субподрядных работ для операции (i, j) в день.

Параметры, формируемые в процессе принятия решений:

$Active(i, j, t)$ – признак активности (выполнения) операции (i, j) в момент времени t .

$$Active(i, j, t) = \begin{cases} 1, & \text{если операция } (i, j) \\ & \text{выполняется в момент } t \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$RD(t, w)$ – количество человек отдела w , необходимых для выполнения всех активных операций в момент времени t .

$$RD(t, w) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{Op_i} [Active(i, j, t) \cdot SLO(i, j, w)].$$

$VF(t, w)$ – количество свободных человек отдела w в момент t .

$$VF(t, w) = \begin{cases} SL_w - RD(t, w), \\ \text{если } RD(t, w) \leq SL_w \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$V_{SC}(i, j)$ – суммарный объем субподрядных работ, привлеченных для выполнения операции (i, j).

Постановка задачи:

$$OF_1 = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{Op_i} (SS(i, j) \cdot V_{SC}(i, j)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$OF_2 = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{w=1}^V VF(t, w)}{T \cdot V} \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$TB(i, j) \in [ES(i, j); LS(i, j)] \forall i, \forall j. \quad (3)$$

Целевая функция (1) минимизирует

суммарную стоимость субподрядных работ на портфель проектов. Целевая функция (2) минимизирует суммарный простой собственных отделов. Ограничения (3) накладывают временные рамки на даты начала выполнения операций.

Генетический алгоритм на основе имитации отжига и поиска новизны

Генетические алгоритмы (ГА) – один из эволюционных подходов, которые могут использоваться для решения задач управления сложными системами в короткое время [9]. Методика применения ГА включает в себя выполнение следующих шагов: 1) выбор способа кодирования решения задачи (фенотипа) в особь-хромосому (генотип); 2) определение метода оценки функции пригодности (ФП) решения; 3) описание генетических операторов (ГО); 4) генерация начальной популяции и работа ГА. В статье рассмотрена модификация простого генетического алгоритма на основе применения алгоритмов имитации отжига и поиска новизны с целью повышения качества решения задачи планирования.

Кодирование хромосомы. В литературе представлены различные способы кодирования хромосомы: кодирование последовательности операций [1, 4, 7], кодирование приоритетов операций [2], кодирование дат начала операций [3], кодирование назначения ресурсов на операции [5, 6]. Мы применяем метод кодирования смещения дат начала работ благодаря отсутствию избыточности при кодировании и поддержке учета временных ограничений.

Хромосома ГА кодирует двоичным кодом (0/1) смещение дат начала операций от начального плана работ вправо или влево по оси времени. Диапазон смещения составляет две недели в каждую сторону от начальной даты. С учетом данного факта размер хромосомы составляет $5r$ ген, где r – число анализируемых операций, 5 – число ген, необходимое для кодирования одной операции (четыре гена для двоичного кодирования $2^4 = 16$ дней смещения и один ген для кодирования направления смещения).

Модификация генетического алгоритма. Одним из важнейших понятий ГА является

понятие новизны, связанное с возможностью появления в среде новых элементов и взаимодействий. Два типа новизны выделено в [8]: *комбинаторная новизна*, при которой новые виды появляются благодаря комбинированию уже существующих, и *созидательная новизна*, при которой новые виды не воспроизводимы путем комбинации имеющихся видов. Вопрос о принципиальной реализуемости второго типа новизны остается открытым.

Рассмотрим поиск комбинаторной новизны как способ адаптации в открытых системах. Для реализации данного подхода модифицируем простой ГА путем введения понятия «оригинальность решения» в качестве меры приспособленности решения к условиям среды [8]. Оригинальность особи в популяции будем определять с помощью численных преобразований матрицы расстояний Хемминга между особями.

Определим матрицу хемминговых расстояний между парами хромосом популяции $H = (h_{ij})_{i=1, j=1}^N$, где $h_{ij} = d(Ch_i, Ch_j)$ – хеммингово расстояние между i -й и j -й хромосомами (Ch_i и Ch_j), равное количеству позиций с несовпадающими значениями генов в хромосомах Ch_i и Ch_j ; N – количество хромосом в популяции. Матрица H является симметричной и элементы ее главной диагонали равны нулю $\forall i, j = 1, \bar{N}$ ($h_{ij} = h_{ji}$) \wedge ($h_{ii} = 0$).

Сопоставим матрице H матрицу весов оригинальности $W = (w_{ij})_{i=1, j=1}^N$, каждый элемент которой представляет собой вес соответствующего значения хеммингова расстояния, определяемый согласно правилу:

$$w_{ij} = \frac{R-1}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{h_{ij}} + 1, \quad (4)$$

где w_{ij} – вес соответствующего значения хеммингова расстояния, определяемый как квадратичная функция, возрастающая в диапазоне от единицы до R при изменении h_{ij} в диапазоне от нуля до L ; L – длина хромосомы; R – максимальный вес оригинальности хромосомы в паре, $R > 0$.

С учетом понятия оригинальности хромосомы рассмотрим две стратегии скрещивания хромосом. Первая стратегия – *стратегия поиска оригинальности* (СПО) [8] – ориентирована на поиск новых ком-

бинаторных решений в популяции путем скрещивания различных по кодированию хромосом. Вторая стратегия – *стратегия поиска экстремума* (СПЭ) [9] – ориентирована на целенаправленный поиск лучших хромосом путем скрещивания наиболее приспособленных к среде особей. Приспособленность i -й особи к среде оценивается ее функцией пригодности FF_i , $I = 1..N$.

Определим матрицы вероятностей скрещиваний хромосом на основе предложенных стратегий:

$$P_{\text{СПО}} = (p_{ij}^{\text{СПО}})_{i=1, j=1}^N, \quad p_{ij}^{\text{СПО}} = \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^N w_{ij}}, \quad (5)$$

$$P_{\text{СПЭ}} = (p_i^{\text{СПЭ}})_{i=1}^N, \quad p_i^{\text{СПЭ}} = \frac{FF_i}{\sum_{i=1}^N FF_i}. \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) ячейки матриц заполняются значениями вероятностей согласно закону рулетки [9]. В случае применения стратегии СПО вес оригинальности хромосомы служит мерой оценки качества хромосомы. В случае применения стратегии СПЭ функция пригодности хромосомы служит мерой оценки качества.

Алгоритм имитации отжига (АИО) [8] предназначен для реализации комбинации предложенных стратегий скрещивания хромосом в ходе работы ГА. АИО основан на аналогии с процессом отжига металла, в результате которого появляются его новые свойства. Рассмотрим методику интегрированного применения АИО и ГА.

Шаг 1. Установить параметры АИО: начальное значение управляемого параметра t_z ; значение параметра α , контролирующего скорость изменения температуры отжига, $0 \leq \alpha \leq 1$.

Шаг 2. Задать параметры ГА: количество поколений K ; размер особи L ; вероятности применения генетических операторов. Установить номер текущего поколения Z : $Z = 1$. Сформировать начальную популяцию.

Шаг 3. Применить к текущей популяции Z генетические операторы с вероятностью, зависящей от значения t_z . Увеличить номер текущего поколения $Z = Z + 1$. Изме-

нить значение управляемого параметра t_z [8]:

$$t_{z+1} = t_z + \alpha \cdot t_z. \quad (7)$$

Шаг 4. Проверить условие окончания работы ГА: $Z > K$. Если условие выполняется, то переход на Шаг 5, иначе – на Шаг 3.

Шаг 5. Останов.

Вероятности применения генетических операторов определяются на основе АИО с целью учета динамического характера работы операторов.

Оператор кроссинговера. Вероятности выбора первого и второго родителя из популяции в поколении Z для оператора кроссинговера (ОК) описаны ниже. Вероятность выбора первого родителя должна учитывать как случайный характер выбора, так и целенаправленный выбор на основе стратегии поиска экстремума (6). При этом вероятность случайного выбора должна снижаться при эволюции поколений, а вероятность применения СПЭ – возрастать. С учетом сказанного выше определим вероятность выбора первого родителя i в поколении Z по формуле:

$$P_i^Z(\text{ОК}) = \frac{1}{N} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right) \right) + p_i^{\text{СПЭ}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right). \quad (8)$$

Вероятность выбора второго родителя должна учитывать предложенные стратегии поиска оригинальности и поиска экстремума, при этом вероятность применения СПО (5) должна снижаться при эволюции поколений, а вероятность применения СПЭ (6) – возрастать. С учетом сказанного выше определим вероятность выбора второго родителя j для первого родителя i в поколении Z по формуле:

$$P_j^Z(\text{ОК}) = p_j^{\text{СПО}} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right) \right) + p_j^{\text{СПЭ}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right). \quad (9)$$

Операторы мутации и инверсии. Вероятность применения оператора мутации (ОМ) в поколении Z определена ниже с учетом снижения вероятности при эволюции по-

колений с целью сохранения полученного генетического материала [8]:

$$P_z(\text{ОМ}) = P_0(\text{ОМ}) \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right) \right), \quad (10)$$

где $P_0(\text{МО})$ – начальное значение вероятности применения оператора мутации.

Вероятность применения оператора инверсии в популяции Z описывается по аналогии с вероятностью применения оператора мутации.

Функция пригодности. Рассмотрим функцию пригодности, описанную с использованием линейной свертки нормализованных разнородных критериев (1) и (2):

$$\text{FF} = \omega_1 \left(\frac{\text{OF}_1^{\text{Init}}}{\text{OF}_1} \right) + \omega_2 \left(\frac{\text{OF}_2^{\text{Init}}}{\text{OF}_2} \right) \rightarrow \max, \quad (11)$$

где ω_1, ω_2 – весовые коэффициенты, $\omega_1 + \omega_2 = 1$; $\text{OF}_1^{\text{Init}}, \text{OF}_2^{\text{Init}}$ – начальные значения целевых функций, полученные путем экспертной оценки дат начала операций.

Для оценки функции пригодности применим мультиагентную модель процессов преобразования ресурсов (МППР), описанную в [12]. Модель МППР предназначена для поддержки процесса принятия решений. Управляемые переменные и начальные параметры, описанные при постановке задачи, подаются на вход модели системы. Параметры, формируемые в процессе принятия решений, являются выходами модели. В модели МППР агенты применяются для реализации алгоритма распределения ресурсов, а имитационное моделирование – для описания процесса выполнения операций. Алгоритм распределения ресурсов, предложенный нами в [11], позволяет назначать исполнителей операций в соответствии с допущениями, сделанными при постановке задачи.

Интеграция модели МППР и информационной технологии (ИТ) генетической оптимизации реализована в программе мультиагентной генетической оптимизации (МГО). Программа МГО разработана на основе системы динамического моделирования ситуаций VPsim.MAS и системы технико-экономического проектирования

BPsim.MSN [12]. Алгоритм работы программы приведен в [13].

Результаты экспериментов

Рассмотрим компанию «Телесистемы», включающую отделы проектный, производственный и материально-технического обеспечения. Целью планирования является минимизация времени простоя собственных отделов и стоимости привлекаемого субподряда.

Детальная постановка задачи приведена в [11]. Модель МППР исполнения работ разработана с целью оценки функции пригодности особей по формуле (11). Модель МППР реализует распределение ресурсов согласно допущениям, сделанным при постановке задачи. Адекватность модели показана в [11] с помощью оценки выполнения пяти проектов. В настоящем исследовании

на вход модели подается следующая информация: количество проектов – десять с 35 операциями; интервал времени моделирования $T = 430$ дней (год и три месяца); даты раннего и позднего начала операций определяются путем смещения первоначального календарного плана работ вправо и влево по оси времени на две недели.

Для ГА в ходе работы ИТ генетической оптимизации были заданы следующие параметры: 1) размер популяции – десять особей; 2) размер особи – 175 ген (5 ген на кодирование каждой из 35 рассматриваемых операций портфеля); 3) применяемые ГО – репродукция на основе рулетки, пятиточечный кроссинговер с вероятностью применения, определяемой по формулам (8) и (9), пятиточечная мутация с начальной вероятностью применения 10 % и динамической вероятностью, заданной формулой (10), инверсия

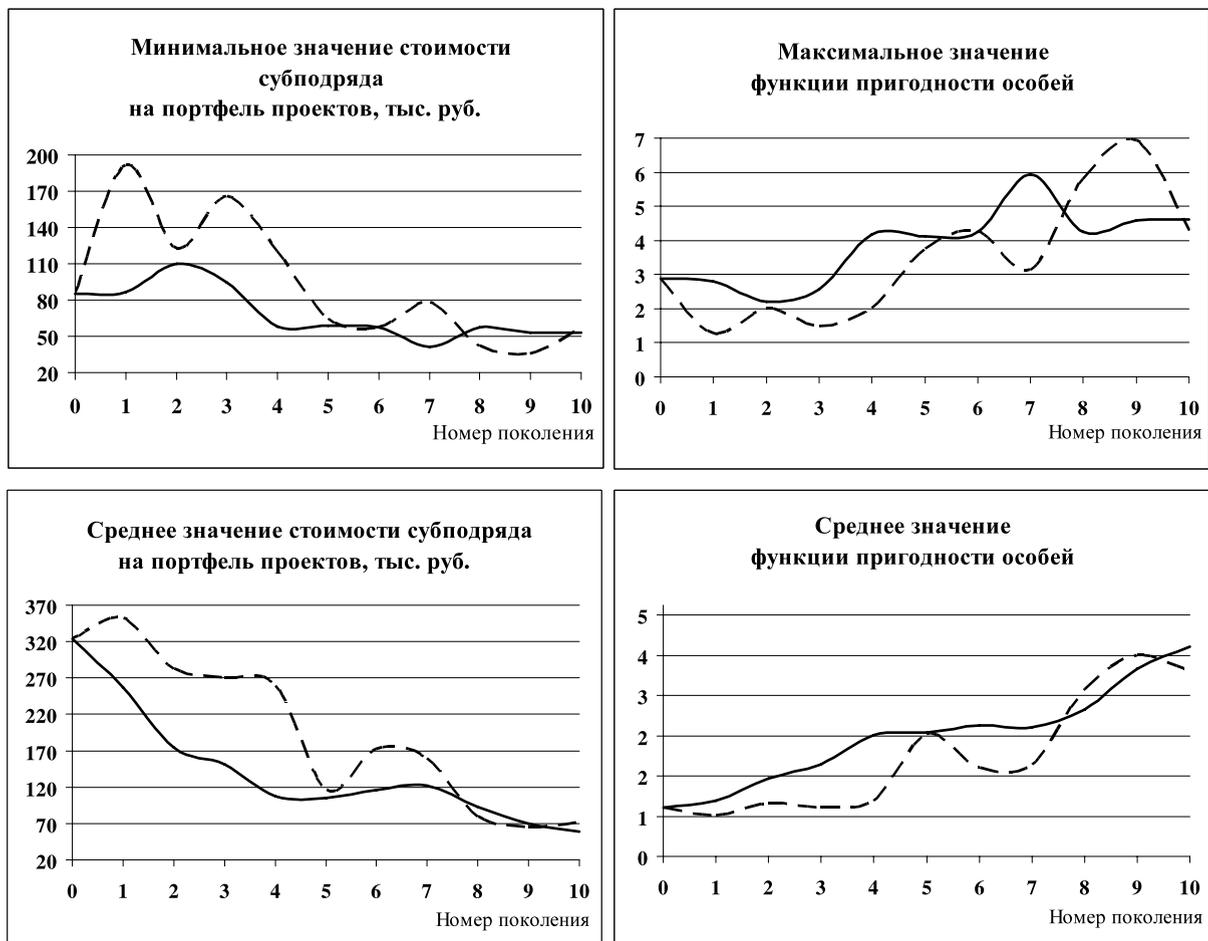


Рис. 1. Сравнение работы простого и модифицированного ГА

с начальной вероятностью 5 %; 4) критерий останова алгоритма – смена десяти поколений; 5) генерация случайной начальной популяции; 6) следующие значения параметров АИО – $t_{20} = 1$; $\alpha = 0,9$; $K = 10$.

Было проведено сравнение результатов работы простого и модифицированного ГА. Для наглядности сравнения оба алгоритма исходили из одной начальной популяции. В результате работы программы МГО получена зависимость значений ФП особей популяции и значений целевых функций задачи от смены поколений. На рис. 1 приведены графики изменения в ходе работы простого ГА (сплошная линия) и модифицированного ГА (пунктирная линия) максимального и среднего значений ФП особей (11), а также графики изменения минимального и среднего значений оптимизируемой при планировании величины – суммарной стоимости субподрядных работ (1). Решение поставленной задачи предполагает максимизацию функции пригодности особей ГА и минимизацию стоимости субподрядных работ.

На начальной стадии работы модифицированного ГА (смена поколений 1–5) в составе ФП преобладает компонент поиска новизны (поиска оригинальных решений), с чем связаны колебания максимального и среднего значения ФП, не всегда обеспечивающие достижение лучших значений ФП и оптимизируемой величины по сравнению с работой простого ГА. Однако найденные

оригинальные решения становятся основой целенаправленного поиска экстремума на поздних стадиях работы ГА (смена поколений 6–10), что приводит к повышению качества найденного решения. Для поставленной задачи найденная в результате применения модифицированного ГА стоимость субподрядных работ (35 189 руб.) на 14 % ниже стоимости субподрядных работ, полученной с использованием простого ГА (41 050 руб.).

Задача планирования проектных работ для компании «Телесистемы» была решена также с использованием метода перераспределения ресурсов MS Project и эвристико-имитационного метода (ЭИ), описанного в [11].

Программное обеспечение MS Project 2007 предоставляет возможность проведения перераспределения ресурсов по работам с целью избежания превышения доступности собственных ресурсов. В рассматриваемой задаче календарного планирования для начального плана работ, составленного экспертами, наблюдается превышение доступности ресурса производственного отдела (рис. 2). На рисунке по оси x представлены временные интервалы длительностью 12 дней, по оси y – процентная загрузка. Превышение доступности собственных ресурсов (временные интервалы, для которых необходимо применение субподряда) показаны на рисунке темными прямоугольниками выше горизонтальной линии стопро-

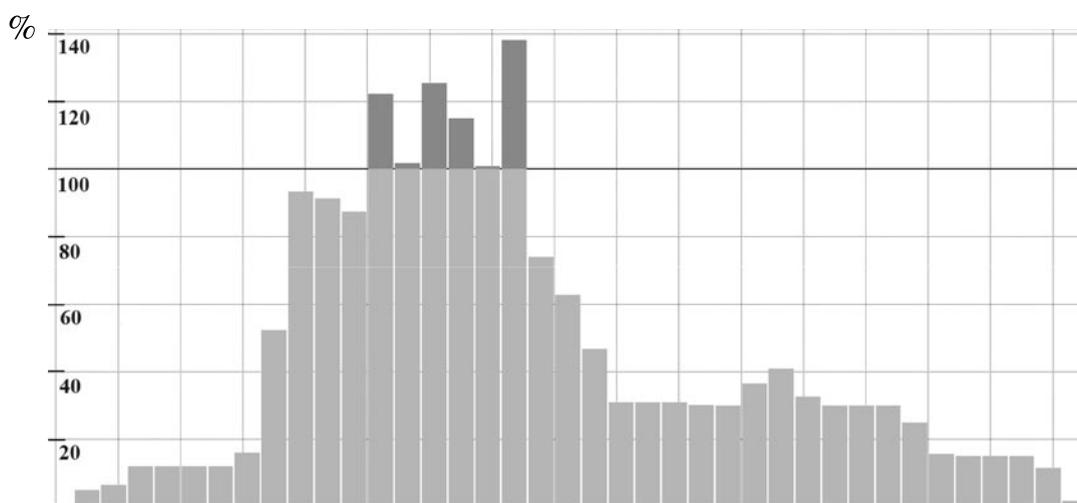


Рис. 2. Процентная загрузка производственного отдела для начального плана работ в MS Project

центной загрузки.

Применение метода перераспределения ресурсов MS Project позволило снизить стоимость субподрядных работ до нуля (т. е. целевые функции (1) и (2) достигли своих оптимальных значений). Но временные ограничения (3) не были удовлетворены при применении данного метода. Следовательно, метод перераспределения ресурсов MS Project не пригоден для решения поставленной задачи планирования проектных работ.

ЭИ метод основан на анализе выходных характеристик модели МППР. Работа ЭИ метода подразумевает выполнение ряда шагов: 1) анализ результатов моделирования – стоимости субподряда и величины простоя отделов; 2) поиск узких мест, связанных с операциями, требующими высоких затрат на субподряд; 3) смещение дат начала выделенных операций на период, определяемый ЭИ информационной технологией; 4) передача скорректированной модели на стадию проведения экспериментов и оценка результатов экспериментов. ЭИ информационная технология была разработана с использованием технологии построения визардов системы BPsim.MSN. Детальный алгоритм работы технологии приведен в [11].

Проведем сравнение процентных загрузок собственных ресурсов для решений, найденных с помощью предложенных методов поиска. На рис. 3 приведена гистограм-

ма процентной загрузки производственного отдела для решений, найденных методами МГО и ЭИМ. Как следует из графика, загрузка отдела меняется незначительно при использовании разных методов. Тем не менее в решении, найденном с помощью метода МГО, достигается снижение суммарной стоимости субподрядных работ на 30 % по сравнению с использованием ЭИ метода. Данный факт связан с нацеленностью эволюционной компоненты метода МГО на поиск решения с распределением ресурсов, оптимальным по значению субподрядной стоимости, в то время как алгоритм работы ЭИМ прекращает поиск в случае перехода за пороговое значение субподрядной стоимости, заданное экспертами.

При применении обоих методов все временные ограничения были удовлетворены. Суммарный простой отдела свидетельствует о наличии резерва собственных трудовых ресурсов для реализации дополнительных проектов. Экономический эффект от использования метода МГО при решении задачи планирования на предприятии «Теле-системы» составил 417 000 руб. в год, что на 12 % выше экономического эффекта от применения ЭИ метода для решения той же задачи.

В результате проведенного сравнения сделан вывод о предпочтительности метода МГО с точки зрения эффективности най-

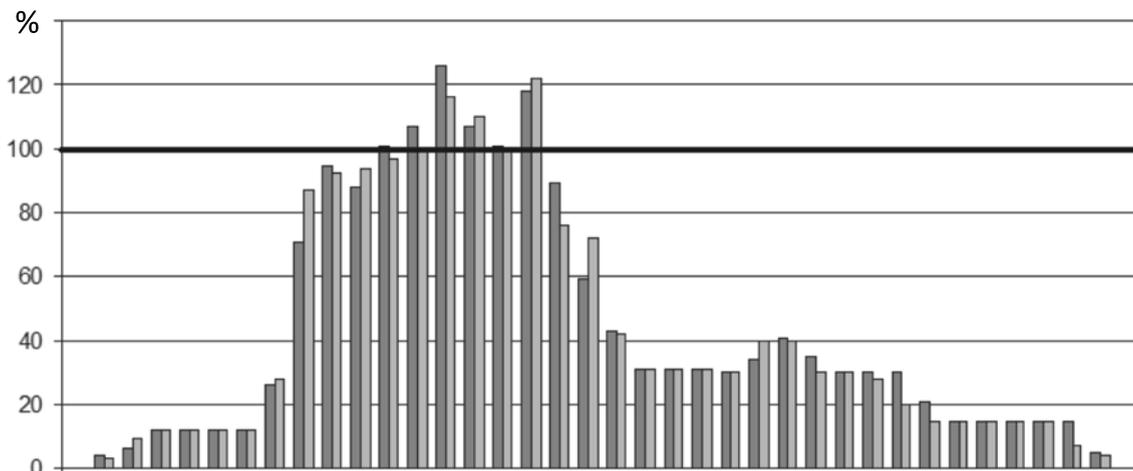


Рис. 3. Процентные загрузки производственного отдела при применении различных методов поиска решения (■) ЭИМ; (□) МГО

денного решения. Применение при решении задачи планирования проектных работ генетической оптимизации на основе интеграции имитационного и эволюционного моделирования позволяет повысить эффективность найденного решения за счет учета в модели динамического характера распределения ресурсов по работам и проведения генетическим алгоритмом направленного поиска в пространстве решений.

Проведем сравнение методов ЭИ и МГО с точки зрения производительности путем сравнения времени работы методов. Время работы ЭИ метода $T_{ЭИМ}$ определяется с помощью суммы времени работы ЭИ информационной технологии $T_{ЭИИТ}$ и времени работы модели МППР $T_{МППР}$. Сумма умножается на количество повторений контура поиска решения ЭИ методом $X_{Повтор}$. Поскольку $T_{ЭИИТ} \ll T_{МППР}$, мы можем пренебречь слагаемым $T_{ЭИИТ}$ и определить время $T_{ЭИМ}$ следующим образом: $T_{ЭИМ} = X_{Повтор} \cdot T_{МППР}$.

Время работы метода МГО $T_{МГО}$ определяется с помощью суммы времени работы ИТ генетической оптимизации $T_{ИТГО}$ и времени работы модели МППР $T_{МППР}$, умноженном на размер популяции N . Сумма умножается на количество поколений K . Поскольку $T_{ИТГО} \ll T_{МППР}$, мы можем пренебречь слагаемым $T_{ИТГО}$ и определить время $T_{МГО}$ следующим образом: $T_{МГО} = K \cdot N \cdot T_{МППР}$.

Для задачи планирования проектных работ использованы следующие значения параметров: $X_{Повтор} = 3$, $K = 10$, $N = 10$. В этом случае ЭИ метод оказывается предпочтительнее метода МГО, поскольку требует в 33 раза меньше времени на поиск решения. Данное обстоятельство связано с применением для оценки функции пригодности в методе МГО имитационной модели, к которой ГА обращается $K \cdot N$ раз. Время работы метода МГО достигает 30 мин при решении задачи планирования проектных работ.

В данной статье представлен метод мультиагентной генетической оптимизации для решения задачи планирования проектных работ на основе алгоритма имитации отжига, алгоритма поиска новизны, ге-

нетического алгоритма и мультиагентного имитационного моделирования. Метод объединяет три стратегии поиска: стратегию случайного поиска, стратегию поиска оригинальности и стратегию поиска экстремума с целью отражения динамической природы применяемых генетических операторов. Интеграция эволюционного и имитационного моделирования позволяет ограничить пространство поиска решений и адекватно оценить динамические функции пригодностей хромосом. Описанный метод реализован в программе МГО с помощью применения систем BPsim.MAS и BPsim.MSN. Программа объединяет имитационное, экспертное, мультиагентное, концептуальное и эволюционное моделирование. Применение метода МГО к решению реальной задачи планирования работ проведено в сравнении с методом MS Project и эвристико-имитационным методом. Метод перераспределения ресурсов MS Project признан непригодным для решения поставленной задачи вследствие отсутствия учета временных ограничений. В результате сравнения ЭИ метода и метода МГО достигнуто улучшение качества решения с учетом заданных ограничений при применении метода МГО.

Недостаток метода МГО – высокие временные затраты, в 33 раза превышающие аналогичные затраты при использовании ЭИ метода. Данное обстоятельство накладывает ограничения на размер популяции ГА (не более десяти хромосом) и число итераций работы ГА (не более десяти поколений).

Цель дальнейших исследований – повышение скорости сходимости предложенного модифицированного генетического алгоритма путем применения элитизма и алгоритмов табу. Предполагается проведение исследований, направленных на установление зависимости производительности работы метода МГО от размерности задачи. Планируется проведение сравнения эффективности работы классических методов решения задачи планирования работ и метода МГО.

Работа выполнена в рамках договора № 02.G25.31.0055, проект 2012-218-03-167.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Klimek M.** A genetic algorithm for the project scheduling with the resource constraints // *Annals UMCS Informatica*. –2010. –Vol. 10. –Iss. 1. –P. 117–130.
2. **Sriprasert E., Dawood N.** Genetic algorithms for multi-constrained scheduling: an application for the construction industry // *Proc. of CIB W78's 20th Internat. Conf. Construction IT, Construction IT Bridging the Distance, CIB Report 284, Waiheke Island, New Zealand, 23–25 Apr. 2003*. –P. 341–353.
3. **Abdel-Khalek H., Sherif M.H., el-Lacany A.M., Abdel-Magd Y.** Financing – scheduling optimization for construction projects by using genetic algorithms // *Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology*. –2011. –P. 289–297.
4. **Karova M., Petkova J., Smarkov V.** A genetic algorithm for project planning problem // *Proc. of Int. Scientific Conf. Computer Science*. –2008. –P. 647–651.
5. **Dhingra A., Chandna P.** A bi-criteria M-machine SDST flow shop scheduling using modified heuristic genetic algorithm // *Internat. J. of Engineering, Science and Technology*. –2010. –Vol. 2. –№ 5. –P. 216–225.
6. **Yang F.-C., Wu W.-T.** A genetic algorithm based method for creating impartial work schedules for nurses // *Internat. J. of Electronic Business Management*. –2012. –Vol. 10. –№ 3. –P. 182–193.
7. **Osaba E., Carballedo R., Diaz F.** Simulation tool based on a memetic algorithm to solve a real instance of a dynamic TSP // *Proc. of IASTED Internat. Conf. Applied Simulation and Modelling, Napoli, Italy, 25–27 June, 2012*. –P. 27–33.
8. **Зинченко, Л.А., Курейчик В.М., Редько В.Г.** (ред.). Бионические информационные системы и их практические применения. – М.: Физматлит, 2011. – 288 с.
9. **Емельянов, В.В., Курейчик В.М., Курейчик В.В.** Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
10. **Chen M.-Y., Tsai H.-C., Sudjono E.** Evaluating subcontractor performance using evolutionary fuzzy hybrid neural network // *Internat. J. of Project Management*. –2001. –P. 349–356.
11. **Aksyonov K.A., Antonova A.S.** Application of simulation and intelligent agents to solve project management problem // *Internat. J. of Computer Science Engineering and Information Technology Research*. –2013. –Vol. 3. –№ 1. –P. 321–330 [электронный ресурс] / URL: http://www.tjprc.org/view_archives.php?year=2013&id=14&jtype=2&page=3 (дата обращения 26.09.2013).
12. **Aksyonov K., Bykov E., Dorosinskiy L., Smoliy E., Aksyonova O., Antonova A., Spitsina I.** Decision Support Systems Application to Business Processes at Enterprises in Russia in Efficient Decision Support Systems – Practice and Challenges in Multidisciplinary Domains. InTech, 2011. –P. 83–108 [электронный ресурс] / URL: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/decision-support-systems-application-to-business-processes-at-enterprises-in-russia> (дата обращения 26.09.2013).
13. **Антонова, А.С., Аксенов К.А.** Генетическая оптимизация при решении задачи планирования проектных работ // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 6 [электронный ресурс] / URL: <http://www.science-education.ru/106-7409> (дата обращения 26.09.2013).

REFERENCES

1. **Klimek M.** A genetic algorithm for the project scheduling with the resource constraints / *Annals UMCS Informatica*. –2010. –Vol. 10. –Iss. 1. –P. 117–130.
2. **Sriprasert E., Dawood N.** Genetic algorithms for multi-constrained scheduling: an application for the construction industry / *Proc. of CIB W78's 20th Internat. Conf. Construction IT, Construction IT Bridging the Distance, CIB Report 284, Waiheke Island, New Zealand, 23–25 Apr. 2003*. –P. 341–353.
3. **Abdel-Khalek H., Sherif M.H., el-Lacany A.M., Abdel-Magd Y.** Financing – scheduling optimization for construction projects by using genetic algorithms / *Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology*. –2011. –P. 289–297.
4. **Karova M., Petkova J., Smarkov V.** A genetic algorithm for project planning problem / *Proc. of Int. Scientific Conf. Computer Science*. –2008. –P. 647–651.
5. **Dhingra A., Chandna P.** A bi-criteria M-machine SDST flow shop scheduling using modified heuristic genetic algorithm / *Internat. J. of Engineering, Science and Technology*. –2010. –Vol. 2. –№ 5. –P. 216–225.
6. **Yang F.-C., Wu W.-T.** A genetic algorithm based method for creating impartial work schedules for nurses / *Internat. J. of Electronic Business Management*. –2012. –Vol. 10. –№ 3. –P. 182–193.
7. **Osaba E., Carballedo R., Diaz F.** Simulation tool based on a memetic algorithm to solve a real instance of a dynamic TSP / *Proc. of IASTED Internat. Conf. Applied Simulation and Modelling, Napoli, Italy, 25–27 June, 2012*. –P. 27–33.

8. **Zinchenko L.A., Kureichik V.M., Redko V.G.** Bionic information systems and their practical applications. –Moscow: Fizmatlit, 2011. –288 s. (rus)
9. **Emelyanov V.V., Kureichik V.M., Kureichik V.V.** Theory and practice of evolutionary modelling. –Moscow: Fizmatlit, 2003. –432 s. (rus)
10. **Chen M.-Y., Tsai H.-C., Sudjono E.** Evaluating subcontractor performance using evolutionary fuzzy hybrid neural network / Internat. J. of Project Management. –2001. –P. 349–356.
11. **Aksyonov K.A., Antonova A.S.** Application of simulation and intelligent agents to solve project management problem / Internat. J. of Computer Science Engineering and Information Technology Research. –2013. –Vol. 3. –№ 1. –P. 321–330. Available http://www.tjprc.org/view_archives.php?year=2013&id=14&jtype=2&page=3 (Accessed 26.09.2013).
12. **Aksyonov K., Bykov E., Dorosinskiy L., Smoliy E., Aksyonova O., Antonova A., Spitsina I.** Decision Support Systems Application to Business Processes at Enterprises in Russia in Efficient Decision Support Systems – Practice and Challenges in Multidisciplinary Domains. InTech, 2011. –P. 83–108 Available <http://www.intechopen.com/articles/show/title/decision-support-systems-application-to-business-processes-at-enterprises-in-russia> (Accessed 26.09.2013).
13. **Antonova A.S., Aksyonov K.A.** Genetic optimization for solving the project scheduling problem / Modern problems of science and education. –2012. –№ 6. Available <http://www.science-education.ru/106-7409> (Accessed 26.09.2013).

АНТОНОВА Анна Сергеевна – аспирант кафедры информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: antonovaannas@gmail.com

ANTONOVA, Anna S. Ural Federal University.

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: antonovaannas@gmail.com

АКСЁНОВ Константин Александрович – доцент кафедры информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, кандидат технических наук.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: wiper99@mail.ru

AKSUONOV, Konstantin A. Ural Federal University.

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: wiper99@mail.ru