

УДК 65.012.122

В.Г. Тронин, В.С. Аввакумова, И.Н. Шеянова

ОДНОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПИСАНИЯ РАБОТЫ ЭКИПАЖА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

Тронин Вадим Георгиевич, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела Ульяновского государственного технического университета, доцент кафедры «Информационные системы» УлГТУ. Сфера научных интересов – наукометрия, моделирование вычислительных сетей на прикладном уровне, технологии эффективного управления. [e-mail: v.tronin@ulstu.ru].

Аввакумова Валерия Сергеевна, магистрант, окончила факультет информационных систем и технологий УлГТУ по направлению «Прикладная информатика в экономике» и гуманитарный факультет УлГТУ по направлению «Перевод в сфере профессиональной коммуникации»; специалист службы по военно-технической политике ФНПЦ АО «НПО «Марс». Область научных интересов – компьютерная лингвистика, CRM-системы, локализация контента. [e-mail: valeria.avvakumova73@gmail.com].

Шеянова Ирина Николаевна, магистрант, окончила факультет информационных систем и технологий УлГТУ по направлению «Прикладная информатика в экономике»; инженер технической поддержки ООО «Эквид». Область научных интересов – интеллектуальный анализ данных, классификация и прогнозирование, исследование и построение систем поддержки принятия решений. [e-mail: irene.sheyanova@gmail.com].

Аннотация

В настоящей статье рассмотрены основные математические модели и алгоритмы, применяемые для планирования работы экипажа научно-исследовательской подводной лодки (НИПЛ), и представлен обзор существующих методов решения задачи оптимального планирования и составления расписаний. На примере планирования исследовательских рейдов НИПЛ был проведен системный анализ и формализация исходных данных. Авторы описывают математическую постановку задачи составления расписания работы членов экипажа (ЧЭ) НИПЛ в контексте однокритериальной оптимизации с использованием методов целочисленной оптимизации, системного анализа, теории принятия решений, теории расписаний, имитационного моделирования, а также экспертной оценки. В качестве эксперимента авторами представлен модифицированный генетический алгоритм, предлагаемый для дальнейшего использования в качестве одного из основных математических аппаратов системы планирования работы ЧЭ. Кроме того, авторами проведено исследование эффективности предложенного генетического алгоритма. Данная статья может представлять научный и практический интерес для специалистов крупных военных и научно-исследовательских предприятий, занимающихся планированием работы членов экипажа таких сложных объектов, как, например, самолет, космический корабль, подводная лодка или глубоководный водолазный комплекс.

Ключевые слова: научно-исследовательская подводная лодка, генетические алгоритмы, теория расписаний, кроссингвер, «жадная» стратегия.

ONE-CRITERION OPTIMIZATION OF A RESEARCH SUBMARINE CREW SCHEDULING

Vadim Georgievich Tronin, Candidate of Engineering; Head of the R&D Department at Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Information Systems of Ulyanovsk State Technical University; interested in the field of scientometrics, modeling networks at the application layer, and effective management techniques. e-mail: v.tronin@ulstu.ru.

Valeria Sergeevna Avvakumova, Candidate for the Master's Degree; graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies of Ulyanovsk State Technical University and got the Bachelor's Degree in Applied Informatics; graduated from the Humanitarian Faculty of Ulyanovsk State Technical University in the specialty of translation; Specialist of the Military-and-Technical Policy Department of Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'Research and Production Association 'Mars'; interested in the field of computational linguistics, CRM-systems, and content localization. e-mail: valeria.avvakumova73@gmail.com.

Irina Nikolaevna Sheyanova, Candidate for the Master's Degree; graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies of Ulyanovsk State Technical University and got the Bachelor's Degree in Applied Informatics; Technical Support Engineer at Ecwid; interested in the field of Data Mining, classification and forecasting, researching and developing decision support systems. e-mail: irene.sheyanova@gmail.com.

Abstract

The article considers the main mathematical models and algorithms using in scheduling a research submarine crew (RSC) work. The authors review present decision methods for the task of optimal planning and scheduling. By the example of research submarine roads, system analysis and initial data formation were hold. The mathematical formulation of the RSC scheduling problem in case of one-criterion optimization is described. The authors use the methods of integer optimization, system analysis, decision principle, scheduling theory, simulation modeling, expert analysis. As an experiment, the authors propose to use the modified genetic algorithm in order to use it as the main mathematical tool of the RSC work planning system. Also the authors conduct researches on the given genetic algorithm effectiveness. The article derives attention of specialists working at large military and research enterprises involved in planing activities of crews of such complex objects as an aircraft, a spaceship, a submarine, or a deep-water diving suite.

Key words: research submarine, genetic algorithms, scheduling theory, crossover, Greedy algorithm.

ВВЕДЕНИЕ

Планирование работы членов экипажа (ЧЭ) сложных объектов зачастую имеет ряд важных особенностей, которые оказывают значительное влияние на процесс составления расписаний, а также их своевременное корректирование. Взаимодействие ЧЭ между собой и разный уровень их профессиональной и образовательной подготовки, а также высокая вероятность возникновения сложнопрогнозируемых факторов, которые напрямую воздействуют на способ реализации плана, являются одними из основных отличий группового планирования действий экипажа. Стоит отметить, что в настоящее время не существует решений, которые позволяют формировать эффективные расписания действий команды или экипажа либо в автоматическом режиме, либо с привлечением специалиста-планировщика, выполняющего роль эксперта. В данной работе авторы рассмотрят решение задачи однокритериальной оптимизации процесса планирования действий экипажа научно-исследовательской подводной лодки (НИПЛ) [1].

Учитывая уровень развития современных технологий, стоит отметить, что решение комплекса задач, связанных с условиями замкнутого пространства, подготовка расписаний деятельности экипажа подводников становятся комбинационной и ответственной задачей для специалистов в области планирования [2, 3].

Это происходит по следующим причинам:

- с каждым годом структура НИПЛ серьезно изменяется и усложняется;
- во время работ в условиях замкнутого пространства на глубине увеличивается трудоемкость этапов достижения промежуточных целей ввиду большого количества требований и ограничений, которые необходимо учитывать в процессе выполнения работ;
- для выполнения операций, определяющих основную цель экспедиции, используются дорогостоящие ресурсы;
- в случае нештатных ситуаций возникает необходимость полного перепланирования;
- необходим анализ значительного объема данных и учет ряда ограничений при добавлении новых операций в сформированное расписание [4].

В практике работы НИПЛ часто возникают ситуации, при которых наличие множества тесных взаимосвязей между бортовыми операциями (БО) может привести к принятию некорректного решения специалистом-планировщиком,

что сильно влияет как на оперативность и эффективность, так и на уровень безопасности выполнения БО. Подобные проблемы являются особенно нежелательными на стадии оперативного планирования, когда осуществляется составление наиболее подробных расписаний на сутки. Чтобы создать максимально эффективный план, требуется разработать специализированные алгоритмы и методы, направленные на оптимизацию расписаний ЧЭ. Это позволит выполнить поставленные задачи в срок, повысить качество планов за счет увеличения числа возможных вариантов; сократить время на формирование расписаний, что также позволит использовать дополнительное время для оперативного проведения процедуры перепланирования в случае возникновения непредвиденных ситуаций [5].

На основании вышеизложенного можно утверждать, что в настоящее время тема исследования авторов является крайне актуальной, а разработка математических моделей и алгоритмов для планирования работы ЧЭ НИПЛ имеет высокую ценность. Целью работы является разработка формальных математических моделей и реализация алгоритмов формирования оптимальных планов работы экипажа НИПЛ.

В своей работе авторы используют методы целочисленной оптимизации, системного анализа, теории принятия решений, теории расписаний, имитационного моделирования, экспертной оценки и генетические алгоритмы (ГА).

Объектом исследования авторов является процесс составления оптимальных планов работы экипажа НИПЛ. Предметом исследования являются теоретические аспекты и особенности процесса планирования работ на основе системного анализа; математические модели, пригодные для формирования оптимальных расписаний; алгоритмы и методы решения задач системного анализа в области оптимального планирования [6].

Авторы статьи оперируют таким понятием, как бортовая операция (БО). Любое действие, совершаемое как экипажем, так и автоматизированной системой управления, находящейся на борту НИПЛ, представляется в виде БО, которая, в свою очередь, представляет собой технологически и логически законченные работы. Существует несколько классификаций БО по признакам. Первой является классификация по функциональному назначению. БО делятся на системные (служебные и бытовые) и научно-исследовательские. Системные БО нацелены на выполнение плана рейда, поддержание работоспособности НИПЛ,

обеспечение функционирования систем, а также сон, прием пищи, физические упражнения и гигиенические процедуры. Научно-исследовательские БО направлены на выполнение главной цели рейда, а именно – проведение исследований. Второй классификацией является деление БО по признаку отсутствия или наличия связи между операциями. Таким образом, БО могут быть связанными и одиночными. Связанные БО представляют собой набор одиночных операций, следующих в определенном порядке друг за другом. Третий признак, по которому можно классифицировать БО, – это периодичность выполнения БО. Бортовая операция может быть периодической и непериодической. Отношения между БО должны устанавливаться с помощью таблицы приоритетов. Наличие приоритета позволяет специалисту по планированию определить необходимые БО на временной оси в случае превышенного лимита запланированных ресурсов, использованных в ходе реализации ранее выполненных операций.

Экипаж НИПЛ исполняет те БО, которые не может выполнить автоматизированная система управления. ЧЭ в качестве исполнителей характеризуют следующие качества: умение грамотно оценить обстановку и принимать решения в условиях дефицита времени и информации, уровень подготовленности. Участие людей в управлении НИПЛ предполагает учет определенных физиологических особенностей: утомляемости, сниженной быстроты реакции на изменение контролируемых параметров.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЙ

В начале второй половины XX века проводился ряд исследований по разработке математических моделей, применимых для составления оптимальных календарных расписаний (СОКР). Современная история математического моделирования задач СОКР началась с задачи Р.Э. Беллмана об оптимальной последовательности обработки ряда деталей на некотором множестве станков, которая известна современной науке как задача упорядочивания [7]. С.М. Джонсон описал первое решение задачи упорядочивания для двух станков. Именно задача упорядочивания легла в основу теории расписаний (ТР), и в настоящее время насчитывается большое число работ, посвященных этой теме [8]. Проблемами ТР занимались многие известные зарубежные ученые, и одной из самых значимых фигур в этом направлении был М. Гэри, который в своих работах о трудоемкости и классах задач дискретной оптимизации ввел фундаментальные понятия NP-полных и NP-трудных задач, а также исследовал вопросы сводимости задач друг к другу. Отечественные ученые также внесли заметный вклад в развитие ТР. Например, Л.И. Смоляр активно занимался изучением и поиском оптимальных моделей календарного планирования в крупном серийном производстве, а В.С. Танаев уделял значительное внимание вопросам устойчивости оптимальных расписаний [9, 10].

Для решения задач составления расписания используется достаточно широкий набор методов. Рассмотрим некоторые из них подробнее, а также оценим их преимуще-

ства и недостатки относительно их использования для решения задачи планирования действий экипажа НИПЛ.

Теория систем массового обслуживания (СМО). В теории СМО под обслуживающими центрами понимаются ЧЭ, а под заявками – задачи, которые нужно решить. В случае же рассматриваемой проблемы выполнения БО исполнителями возникают простои и необходимость в постоянной коррекции распределения работ между ЧЭ.

Основное отличие от классической СМО состоит в том, что между отдельными заявками, которые стоят в очереди к разным обслуживающим центрам, существуют четко заданные отношения предшествования, которые могут нарушить сформированные последовательности.

Графовая модель расписания. В данном случае вершины графов – это ЧЭ, а ребра – заявленные на выполнение БО. Используя такую модель, необходимо сопоставить ребрам графа моменты времени с учетом требования отсутствия накладок, которое означает, что никаким двум ребрам, инцидентным одной вершине, не должна соответствовать одна и та же операция.

Применение этих методов для решения задачи формирования расписания ЧЭ НИПЛ следует признать неэффективным исходя из следующих факторов:

- 1) затраты времени на поиск лучшего решения экспоненциально увеличиваются с ростом размерности решаемой задачи;
- 2) отсутствует какая-либо гарантия получения решения задачи составления расписания;
- 3) сложно оценить влияние этих методов на решение задачи.

Точные методы часто неприменимы для решения задачи составления расписаний ввиду высокой трудоемкости (в том числе, из-за размерности). Такие методы могут справиться лишь с задачами малой размерности или без принятия во внимание многих необходимых требований.

К группе точных методов относятся: метод множителей Лагранжа, метод ветвей и границ, полный перебор вариантов, метод динамического программирования, комбинаторные алгоритмы и др. С помощью них возможно найти оптимальное решение, но лишь при небольшом количестве входных данных и, как правило, при однокритериальной постановке задачи. Рассмотрим подробнее один из упомянутых точных методов – метод ветвей и границ.

Метод ветвей и границ

В применении к задаче составления оптимальных расписаний метод ветвей и границ позволяет получать точное решение или достаточно качественные приближенные решения задачи в тех случаях, когда время работы алгоритма сильно ограничено. Говоря о недостатках этого метода, стоит упомянуть, что самый оптимальный план расписания для конкретной задачи может содержать простои даже в том случае, если в наличии имеются готовые к выполнению задания. С увеличением числа заданий метод ветвей и границ требует все больше времени на то, чтобы получить оптимальное решение. Поэтому единственный оправданный и перспективный способ его использования для получения приближенного решения состоит в ограничении числа итераций на построение расписания.

В силу этого при решении задачи формирования расписаний зачастую применяются эвристические методы, например, алгоритм поведения колонии муравьев.

Алгоритм поведения колонии муравьев. Один из наиболее популярных алгоритмов, представляющих собой вероятностную жадную эвристику (вероятности в данном случае устанавливаются исходя из информации о качестве решения, полученной из предыдущих решений). Основная идея муравьиного алгоритма заключается в моделировании поведения муравьев, основанного на их способности быстро находить самый короткий путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к меняющимся условиям, находя новый путь при возникновении препятствий.

В качестве эксперимента авторами предлагается при составлении расписания работы ЧЭ НИПЛ использовать ГА.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ РАБОТЫ ЧЭ НИПЛ В КОНТЕКСТЕ ОДНОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Набор БО, которые необходимо включить в план работы ЧЭ НИПЛ, может быть представлен в виде множества $A = \{a_i, i = \overline{1, m}\}$, где i – номер БО, m – количество БО. Элемент множества a_i содержит длительность BO_i . Все операции выполняются находящиеся на борту ЧЭ НИПЛ, они в свою очередь представляют множество $B = \{b_j, j = \overline{1, n}\}$, где j – номер ЧЭ, n – количество ЧЭ. Элемент множества b_j содержит идентификатор члена экипажа j .

На реализацию каждой БО затрачивается заданное количество ресурсов. Эти данные хранятся в матрице $C = \{c_{ri}, r = \overline{1, R}; i = \overline{1, m}\}$, где r – вид ресурса, R – количество видов ресурса. Элемент матрицы c_{ri} – требуемое количество ресурса r для выполнения BO_i . Матрица C поступает из программы научно-исследовательской экспедиции (НИЭ). Доступное количество всех видов ресурсов на заданный интервал планирования хранится во множестве $Res = \{res_r, r = \overline{1, R}\}$. Элемент множества res_r отображает оставшийся на борту НИПЛ объем ресурса r . Множество Res поступает из программы НИЭ.

Чтобы корректно сформировать план работы ЧЭ НИПЛ специалисту по планированию необходимы следующие данные: список несовместимых БО; условия проведения всех БО (берутся из программы НИЭ); совокупность правил проведения НИЭ.

Результат планирования действий экипажа предлагается представить в виде матрицы $P = \{p_{ji}, j = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}\}$, которая задает распределение выполнения БО между ЧЭ. Элемент матрицы представляет собой кортеж $p_{ji} = (pp_{ji}, pn_{ji}, pk_{ji})$,

где

$$pp_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если ЧЭ}_j \text{ выполняет БО}_i; \\ 0, & \text{если ЧЭ}_j \text{ не выполняет БО}_i. \end{cases}$$

pn_{ji} – время начала выполнения БО,

pk_{ji} – время окончания выполнения БО.

Множество $F = \{f_i, i = \overline{1, m}\}$ содержит признак о том, включена ли БО в план или нет. Элемент множества

$$f_i = \begin{cases} 1, & \text{если БО}_i \text{ включена в план,} \\ 0, & \text{если БО}_i \text{ не включена в план.} \end{cases}$$

Чтобы сократить трудозатраты специалиста по планированию, авторами предлагается решение задачи формирования плана работы ЧЭ НИПЛ при помощи специально разработанных алгоритмов. Для этого необходимо выделить критерий, на основании которого в дальнейшем будет проводиться выбор наилучшего варианта плана из некоторого получившегося набора, и уточнить ограничения, которым в свою очередь должен отвечать составленный план.

Максимальная загрузка каждого ЧЭ НИПЛ является одним из наиболее важных требований при распределении БО между ЧЭ. Таким образом, крайне важно осуществить минимизацию простоев ЧЭ НИПЛ:

$$W = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^m pp_{ji} \times a_i}{I_j} \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$W \in [0; 1]$$

где I_j – интервал функционирования каждого ЧЭ_{*j*} в минутах (берется из программы НИЭ), $\sum_{i=1}^m pp_{ji} \times a_i$ – длительность выполнения всех БО каждым ЧЭ_{*j*}.

Сформированный план должен удовлетворять ряду ограничений и правил. К ним относится следующее:

1. Суммарное количество каждого ресурса, используемого всеми запланированными БО, не должно превышать суммарного значения, имеющегося на борту НИПЛ:

$$res_r - \sum_{i=1}^m c_{ri} \times \sum_{j=1}^n pp_{ji} \geq 0, \quad r = \overline{1, R}; \quad (2)$$

2. Если какая-либо БО запланирована, то она должна выполняться как минимум одним ЧЭ:

$$\begin{cases} f_i = 0, & \sum_{j=1}^n pp_{ji} = f_i, \\ f_i = 1, & \sum_{j=1}^n pp_{ji} \geq f_i, \end{cases} \quad (3)$$

3. Отсутствие одновременной реализации нескольких БО одним ЧЭ. Для формирования ограничения следует модифицировать матрицу P в P' следующим образом: для каждого $pp_{ji} = 0$ значения pn_{ji} и pk_{ji} приравниваются к ближайшему слева $pk_{j_{i-1} \dots n-1}$, у которого $pp_{j_{i-1} \dots n-1} = 1$. Получается, что теперь $pn'_{ji} = pk'_{ji} \neq 0$, а общая продолжительность работы $pk'_{ji} - pn'_{ji} = 0$.

$$\forall j = \overline{1, n}, \text{ где } pp_{ji} = 1 \rightarrow \begin{cases} pn_{ji} - pk_{jl} \geq 0 \\ pk_{ji} - pn_{jl} \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

$$i = \overline{1, m}; \quad l = \overline{1, m}, \quad l \neq i.$$

Также необходимо учитывать выполнение следующих ограничений и правил: отсутствие одновременного выполнения несовместимых работ в плане; соответствие норм режима труда и отдыха в плане (в соответствии с уставными документами ВМФ России); выполнение всех необходимых условий для проведения каждой включенной в план БО.

Если сформированный план удовлетворяет всем вышперечисленным ограничениям, то он считается допустимым.

Подходящим методом нахождения допустимого расписания работы ЧЭ НИПЛ может являться ГА, представляющий метод поиска оптимального (субоптимального) решения, отвечающего требованиям составления планов (2)–(4) и заданному минимальному значению целевой функции (1).

Стандартная схема ГА представлена ниже [11]:

1. Создание начальной популяции;
2. Оценивание особей популяции;
3. Селекция;
4. Скрещивание;
5. Мутация;
6. Создание новой популяции;
7. Если популяция не сошлась, то переход на шаг 2.

Иначе – остановка работы алгоритма.

Классический ГА был предложен Дж. Холландом в 1975 г. Он имеет следующие особенности: начальная популяция создается случайно; популяция состоит из N числа хромосом с фиксированной разрядностью генов; родители выбираются случайно из промежуточного массива особей популяции; одноточечный кроссинговер; одноточечная мутация с заданной вероятностью; потомки полностью занимают место родителей в популяции [12].

Предлагаемый авторами модифицированный ГА решения задачи однокритериальной оптимизации процесса планирования действий ЧЭ НИПЛ на основе исследований Н.М. Орловского [13] по сути представляет собой два отдельных ГА, работающих последовательно (блок-схема представлена на рисунке 1).

Отличие модифицированного метода, предложенного авторами, от оригинального метода Н.М. Орловского состоит в выборе ряда ограничений и правил, которым должен удовлетворять сформированный план действий ЧЭ НИПЛ. Авторами выбраны ограничения на суммарное количество каждого ресурса, минимальное количество ЧЭ, выполняющих БО, ограничение на одновременную реализацию операции несколькими ЧЭ или группой ЧЭ, а также на общее соответствие продолжительности работ величине интервала функционирования.

Первый алгоритм (алгоритм №1) отвечает за выбор наилучшего набора БО из множества A , которые затем будут включены в план работ. Его ключевые особенности от стандартного представления ГА заключаются в том, что размер популяции рассчитывается в зависимости от размера кодовых строк; начальная популяция формируется на основе «жадной» стратегии; мутация носит направленный характер; создание обновленной популяции про-

исходит по схеме репродукции устойчивого состояния. Список выбранных БО для распределения между ЧЭ НИПЛ передается алгоритму № 2 для последующей обработки.

Второй алгоритм (алгоритм №2) отвечает за распределение БО относительно друг друга наилучшим образом. От стандартного представления он отличается лишь способом скрещивания хромосом и использует схему кроссинговера порядка (кроссинговер ОХ).

Рассмотрим подробнее, в чем состоит новизна модифицированного ГА.

В первую очередь необходимо определить, каково исходное число хромосом в популяции. Для этого определяется критерий, по которому будет вестись расчет данного параметра. Постановка задачи позволяет применить бинарное кодирование хромосом для более точного определения вхождения конкретной БО в план. Поэтому хромосома будет состоять из m генов, у которых аллелями каждого из генов являются значения 0 либо 1. Поскольку одна хромосома представляет только один вариант решения из множества, то вероятность нахождения наилучшего результата зависит от возможности получения любого значения из множества решений в процессе процедуры рекомбинации внутри популяции. Следующий шаг – определить вероятность того, что случайный набор хромосом будет содержать все элементы. Вероятность P_m , определяющая, что каждый из m локусов будет иметь полный набор аллелей, равна:

$$P_m = \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{N-1} \right]^m.$$

Выразив отсюда число хромосом N в популяции, получаем:

$$N = 1 + \log_2 \left(\frac{1}{1 - P^{1/m}} \right),$$

где P – необходимая вероятность того, что популяция будет содержать все нужные для рекомбинации элементы;

m – число локусов в хромосоме (равняется количеству БО).

После определения размера популяции необходимо сформировать ее исходный состав, из которого в дальнейшем будет произведено первое поколение потомков. Для того чтобы решить данную подзадачу, рассматриваются следующие 4 стратегии создания исходной популяции:

1. случайным образом;
2. на основе «жадной» стратегии;
3. на основе последовательных эвристик;
4. направленно-случайное формирование, где половина элементов выбирается случайно, а вторая – используя знания о решаемой задаче.

В некоторых работах современных авторов отмечается, что выбор «хорошей» исходной популяции, которая состоит в основном из локальных оптимумов, ведет к значительному сокращению времени для достижения глобального оптимума. Поэтому было принято решение использовать «жадный» алгоритм для построения началь-

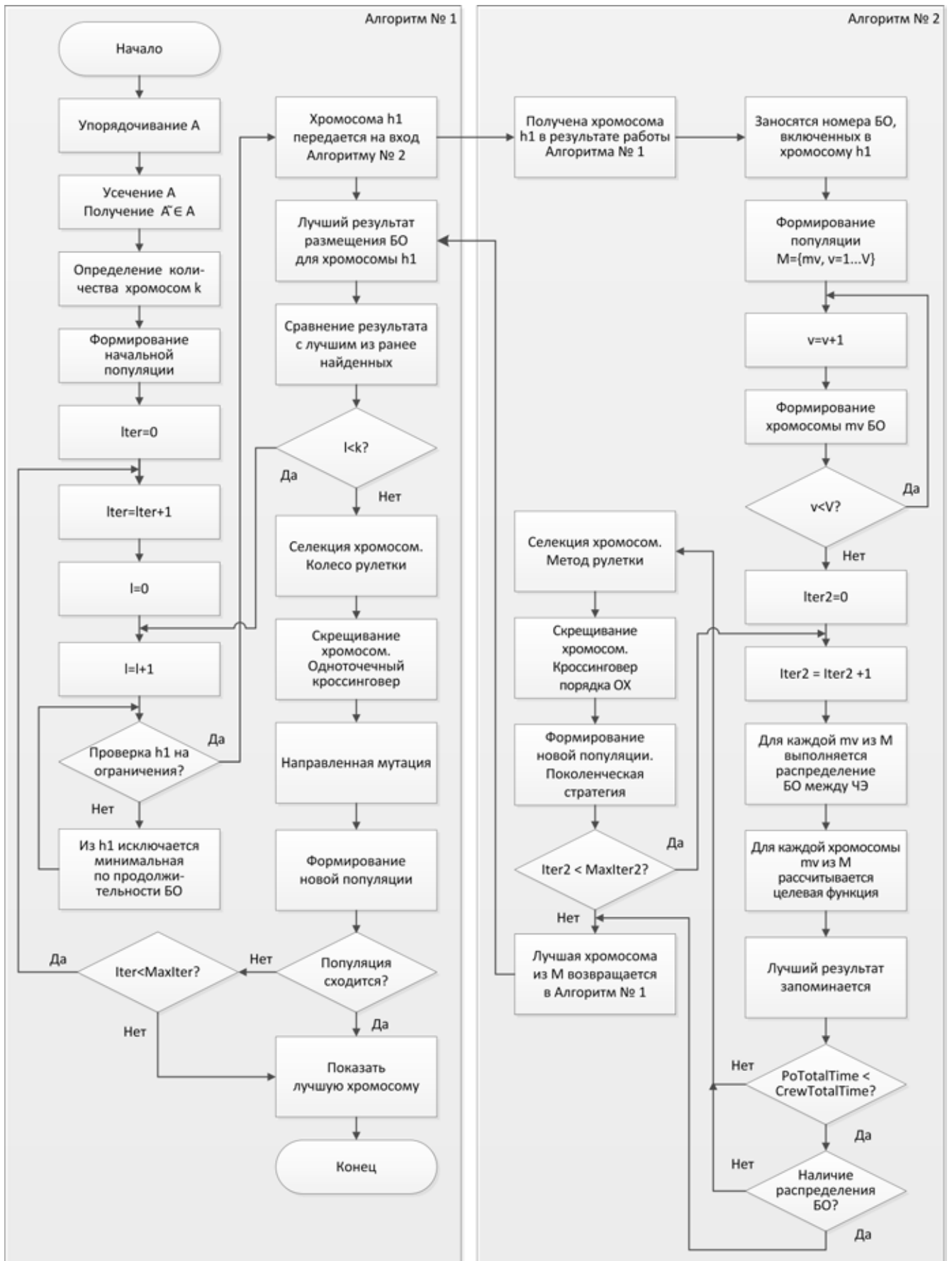


Рис. 1. Блок-схема ГА однокритериальной оптимизации формирования расписания действий ЧЭ НИПЛ

ных хромосом, поскольку он действует по принципу «максимальный выигрыш на каждом шаге» и позволяет сразу же найти локально-оптимальные решения. При разработке алгоритма путем экспериментов было подтверждено, что при подобном подходе глобальный оптимум достигается в разы быстрее [13, 14].

В алгоритме № 2 для скрещивания используется кроссинговер ОХ.

Поскольку хромосома на данном этапе имеет порядковое представление, то схемы кроссинговера для бинарных кодировок в таком случае не применимы. Причина этого – недопустимость повторений в последовательности БО. В ходе исследования выбор делался между следующими операторами кроссинговера для порядкового представления: частично-отображающий кроссинговер, циклический кроссинговер и кроссинговер ОХ. Последний был выбран потому, что его главная идея состоит в приоритете порядка полетных операций, а не их позиций.

В алгоритме № 1 после получения потомства используется оператор мутации. В данном случае оператор мутации применяется к особям для их качественного улучшения. Смысл заключается не в рандомной смене гена на обратный или инверсии нескольких генов, отобранных случайным образом, а в направленном поиске таких позиций в хромосоме, изменение которых сделает ее более жизнеспособной. Замена подлежит от 1 до 2 генов в каждой особи среди всех возможных потомков.

Заключительным этапом выполнения ГА является создание новой популяции. Самое главное на этом этапе – не потерять такие локальные минимумы, среди которых может быть глобальный, либо те, которые могут привести к его определению. Учитывая, что начальная популяция формируется на основе «жадного» алгоритма, то среди рассматриваемых репродукций была выбрана репродукция устойчивого состояния.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО ГА

Для того чтобы определить уровень соответствия результатов работы модифицированного ГА заявленным требованиям, был проведен эксперимент, в ходе которого результаты работы ГА сравнили с результатами работы метода ветвей и границ, являющегося в свою очередь точным методом [15, 16]. Метод ветвей и границ является вариацией метода полного перебора с отсечением тех подмножеств допустимых решений, которые заведомо не содержат оптимальных решений. Для реализации метода ветвей и границ использовался математический пакет MATLAB R2013b.

Для определения эффективности решения поставленной задачи были проведены испытания на одних и тех же детерминированных наборах исходных данных (табл. 1) для обоих методов.

Эксперимент проводился для трех ЧЭ НИПЛ, количество планируемых операций менялось от 5 до 30 единиц с

Таблица 1

Исходные данные

Параметр	Значение					
	A	B	C	D	E	F
Горизонт планирования IP, минут	60		90		120	
Множество моментов времени, K	12		18		24	
Множество моментов времени, $tk, k = \overline{1, K}$	[0:5:60)		[0:5:90)		[0:120:5)	
Количество БО, m	5	10	15	20	25	30
Длительность БО a_i в минутах, $i = \overline{1, m}$	[5;40]					
Количество ЧЭ, n	3					
Количество различных видов ресурсов, r	3					
Размер популяции на первом шаге	Адаптивный расчет на основе m					
Размер популяции на втором шаге	8					

Таблица 2

Результаты измерений

Параметр		Количество БО, m					
		5	10	15	20	25	30
Значение целевой функции	Метод ветвей и границ	5	10	14,75	19	24	27
	ГА	5	9,5	14,75	18,75	23,75	26,75
Время работы алгоритма, с	Метод ветвей и границ	0,22	0,25	0,7	1,6	6,67	9,33
	ГА	0,1	0,2	0,3	0,7	1,36	2,19

дискретностью в 5 операций. В качестве результатов фиксировались две характеристики: время работы каждого метода и значение целевой функции. После проведения каждой серии измерений на одном и том же множестве входных параметров были вычислены их средние значения и занесены в таблицу 2.

На основании полученных данных построены две зависимости, которые демонстрируют устойчиво сохраняющийся рост разницы времени нахождения решения с помощью метода ветвей и границ по сравнению с модифицированным ГА при распределении линейно растущего количества операций. С другой стороны, значения целевых функций, найденные ГА, либо совпадают с результатом решения по методу ветвей и границ, либо имеют отклонение от глобального экстремума не более 5%.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- 1) Модифицированный ГА позволяет находить оптимальные решения для планирования действий ЧЭ за меньшее время, чем точный метод ветвей и границ;
- 2) На основе сравнения полученных значений подтверждается отсутствие преждевременной сходимости у модифицированного ГА и корректность его функционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы, описанной в данной статье, авторы получили следующие результаты:

1. На примере планирования исследовательских рейдов НИПЛ был проведен системный анализ и формализация исходных данных.
2. Сформулирована математическая постановка наиболее актуальных критериев оценки формируемых планов действий ЧЭ НИПЛ.
3. Выполнена математическая формулировка однокритериальной оптимизации формирования расписания ЧЭ НИПЛ и построена система ограничений, учитывающая специфические особенности группового планирования для такого объекта, как НИПЛ.
4. Предложен модифицированный ГА решения задачи формирования расписания действий ЧЭ НИПЛ в рамках однокритериальной оптимизации.

Результатом работы модифицированного ГА является такое распределение некоторого подмножества БО из множества А между ЧЭ НИПЛ, которое удовлетворяет всем накладываемым ограничениям и как можно больше загружает экипаж.

В дальнейшем авторами планируется модификация применяемого ГА для решения задачи формирования расписаний ЧЭ НИПЛ в контексте многокритериальной оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневская Н., Гимпельсон В., Мосунова Г. Динамика рабочего времени: сравнительный анализ // Мировая экономика и международные отношения. – М., 2001. – № 2. – С. 61–72.

2. Соловьев В.С. Стратегический менеджмент : учебник. – Ростов н/Д : Феникс, Новосибирск : Сибирское соглашение, 2002. – 448 с.

3. Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2009. – 608 с.

4. Ахутин В.М., Нафтальев А.И. Математическое моделирование деятельности человека-оператора при разработке эргатических систем // Человек и общество. – Л., 1973. – № XI. – С. 245–254.

5. Козюков Л.В., Капустин Б.В. Глубоководные водолазные комплексы спасательных судов ВМФ // Тайфун. – № 1. – 2001. – С. 23–26.

6. Танаев В.С., Шкурба В.В. Введение в теорию расписаний – М. : Наука, 1975. – 256 с.

7. Bellman K. Some mathematical aspects of scheduling theory // Journal-of the Society of Industrial and Applied Mathematics. – 1956. – V. 4. – pp. 168–205.

8. Johnson, S.M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included // Naval Res. Log. Quart. – 1954. – V. 1. – pp. 61–68.

9. Танаев В.С. Теория расписаний. Многостадийные системы – М. : Наука, 1989. – 328 с.

10. Boudoukh T., Penn M., Weiss G. Scheduling jobshops with some identical or similar jobs // Journal of Scheduling. – 2001. – V. 4. – pp. 177–199.

11. Reeves C., Rowe J. Genetic algorithms – principles and perspectives. A guide to GA theory. Kluwer Academic Publishers, 2003. – 327 p.

12. Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. – Нижний Новгород, 2007. – 88 с.

13. Орловский Н.М. Оптимальное распределение работ между исполнителями с применением метода ветвей и границ и генетического алгоритма // Перспективы развития информационных технологий : сб. матер. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : Из-во ЦРНС, 2014. – С. 63–67.

14. GOLDBERG D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. – Addison-Wesley : Reading, MA, 1989.

15. Наместников А.М., Тронин В.Г. Примеры реализации систем имитационного моделирования вычислительных сетей // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – Т. 6, № 1. – С. 84–88.

16. Воробьев С.П., Орловский Н.М. Применение метода ветвей и границ и генетических алгоритмов к задаче планирования действий экипажа // Известия ВУЗов. Северокавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 6. – С. 19–27.

REFERENCES

1. Vishnevskaja N., Gimpelson V., Mosunova G. Dinamika rabocheho vremeni. Sravnitelnyi analiz [Dynamics of Working Hours. Comparative Analysis]. *Mirovaia ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniia* [World Economy and International Relations]. Moscow, 2001, no. 2, pp. 61–72.

2. Soloviev V.S. *Strategicheskii menedzhment. Uchebnik* [Strategic Management. Textbook]. Rostov-na-Donu, Novosibirsk, Feniks, Sibirskoe soglasenie Publ., 2002. 448 p.
3. Rykov A.S. *Sistemnyi analiz. Modeli i metody priniatiia reshenii i poiskovoi optimizatsii* [System Analysis. Models and Methods of Decision-Making and Search Optimization Techniques]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2009. 608 p.
4. Akhutin V.M., Naftuliev A.I. *Matematicheskoe modelirovanie deiatelnosti cheloveka-operatora pri razrabotke ergaticheskikh sistem* [Mathematical Modeling of the Operator Activity in the process of Developing Ergatic Systems]. *Chelovek i obshchestvo* [Human and Society], 1973, no. 11, pp. 245–254.
5. Koziukov L.V., Kapustin B.V. *Glubokovodnye vodolaznye komplekсы spasatelnykh sudov VMF* [Deep-Water Diving Suites of the Naval Salvage Ships]. *Taifun* [Typhoon], 2001, no.1, pp. 23–26.
6. Tanaev V.S., Shkurba V.V. *Vvedenie v teoriyu raspisaniia* [Introduction to the Scheduling Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 256 p.
7. Bellman K. Some Mathematical Aspects of Scheduling Theory. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, 1956, vol. 4, pp. 168–205.
8. Johnson, S.M. Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included. *Naval Res. Log. Quart.*, 1954, vol. 1, pp. 61–68.
9. Tanaev V.S. *Teoriya raspisaniia. Mnogostadiinnye sistemy* [The Scheduling Theory. Multi-Stage Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 328 p.
10. Boudoukh T., Penn M., Weiss G. Scheduling Jobshops with Some Identical or Similar Jobs. *Journal of Scheduling*, 2001, vol. 4, pp. 177–199.
11. Reeves C., Rowe J. *Genetic Algorithms – Principles and Perspectives. A guide to GA Theory*. Kluwer Academic Publishers, 2003. 327 p.
12. Batishchev D. I., Neimark E. A., Starostin N. V. *Primenenie geneticheskikh algoritmov k resheniiu zadach diskretnoi optimizatsii* [Using Genetic Algorithms in Discrete Optimization Tasks]. Nizhniy Novgorod, 2007. 88 p.
13. Orlovskii N. M. Optimalnoe raspredelenie rabot mezhdu ispolniteliami s primeneniem metoda vetvei i granits i geneticheskogo algoritma [The Optimal Work Distribution Among Specialists with the Use of the Branch-and-Bound Principle and Genetic Algorithms]. *Sb. mater. XVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Perspektivy razvitiia informatsionnykh tekhnologii* [Proc. 18th Int. Sci. Conf. Information Technology Outlook]. Novosibirsk, Iz-vo TsRNS Publ., 2014, pp. 63–67.
14. Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
15. Namestnikov A.M., Tronin V.G. Primery realizatsii sistem imitatsionnogo modelirovaniia vychislitelnykh setei [The Examples of Network Simulation Systems Realization]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii* [ICT Infokommunikatsionnye Tehnologii], 2008, vol. 6, no. 1, pp. 84–88.
16. Vorobev S.P., Orlovskii N.M. *Primenenie metoda vetvei i granits i geneticheskikh algoritmov k zadache planirovaniia deistvii ekipazha* [The Use of the Branch-and-Bound Principle and Genetic Algorithms in the Task of the Crew Activities Planning]. *Izvestiya VUZov. Severo-kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series]. 2013, no. 6, pp. 19–27.