

DOI:
**СИСТЕМА АНАЛИЗА АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И
ВРЕМЕН ПОСАДОК ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ¹**

Кулида Е.Л.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва ул.
Профсоюзная д.65
lenak@ipu.ru*

Аннотация: В докладе рассматривается разработанное программное средство имитационного моделирования для анализа эффективности и быстродействия алгоритмов оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих воздушных судов.

Ключевые слова: организация воздушного движения, планирование посадки воздушных судов, глобальная целевая функция.

Введение

Для оптимизации, обеспечения безопасности, повышения эффективности организации воздушного движения (ОрВД) используется большое число математических моделей, решается множество оптимизационных задач, проводится большое количество актуальных и перспективных научно-технических исследований и разработок.

Современная система ОрВД строится на регулировании воздушного трафика вблизи крупных аэропортов из единого центра, что накладывает существенные ограничения на повышение эффективности ОрВД. Перспективная технология ОрВД – концепция «свободный полет» – предполагает передачу ответственности за безопасность и выбор маршрута полета экипажам воздушных судов (ВС). Такая ОрВД позволит снизить нагрузку на диспетчеров, повысить безопасность и эффективность полетов при условии, что экипажи ВС будут поддержаны системными средствами автоматизации для решения возникающих задач. Эти средства должны обеспечивать ОрВД, при которой будет реализовано экономичное потребление топлива, сокращение времени полета, комфорт пассажиров, снижение вредного воздействия на окружающую среду, эффективное разрешение конфликтов между ВС во время полетов. Основой такой ОрВД должна стать глубокая или даже полная автоматизация процесса управления полетом от взлета до посадки. Современные системы управления полетом уже сейчас обеспечивают автоматический полет в нормальных условиях, при этом роль экипажа становится чисто контролирующей. В сложных аномальных ситуациях, когда экипаж вынужден брать на себя управление ВС в ручном режиме, ему на помощь должна прийти бортовая система поддержки [1].

Если при большой загрузке воздушного пространства, каждое ВС начнет выполнять маневры, оптимизирующие его частные критерии качества, то в группе окружающих ВС может возникнуть хаос и неразбериха. Чтобы этого избежать при децентрализованном управлении в группе ВС должна оптимизироваться глобальная целевая функция. Системы управления ВС должны взаимодействовать для оптимизации глобальной целевой функции, насколько это возможно, преследуя при этом собственные цели и динамически учитывая изменения в окружающей обстановке. Распределение вычислений между системами управления отдельных ВС существенно увеличит отказоустойчивость системы по сравнению с централизованной организацией, когда отказ в едином центре управления приводит к отказу всей системы в целом.

Хорошо известно, что одним из узких мест системы ОрВД является пропускная способность взлетно-посадочных полос (ВПП) крупных аэропортов. В этой связи проблема увеличения пропускной способности ВПП крупных аэропортов является одной из важнейших, а при внедрении концепции «свободный полет» ограниченные возможности централизованного управления станут препятствием для решения этой проблемы.

С целью минимизации времени пребывания ВС в воздухе при планировании трафика воздушного движения используется принцип приоритета в обслуживании прибывающих ВС над всеми остальными. Задача оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих ВС на ВПП является ключевой для увеличения пропускной способности ВПП. Это яркий пример задачи, для решения которой при перспективной ОрВД будет целесообразно использовать децентрализованное управление, при котором системы управления каждого ВС будут участвовать в принятии решения, имея при этом собственные критерии качества, но с другой стороны в результате взаимодействия при

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00822).

принятии общего решения будет оптимизироваться глобальная целевая функция. Организация такого взаимодействия основывается на подходе, называемом CollectiveIntelligence (COIN) [2].

1 Задача оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих воздушных судов

Задача оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих ВС заключается в оптимизации глобальной целевой функции для группы ВС, которые находятся в зоне аэропорта с целью совершить посадку, P – число ВС, ожидающих посадку. Между ВС, согласно нормам ИКАО, необходимо обеспечить некоторый минимальный интервал, чтобы исключить попадание в струйно-вихревой след, образующийся от идущего впереди ВС. Этот интервал зависит от типов следующих друг за другом ВС. Известна матрица S , размера $P \times P$, где $S_{c_i c_j}$ – минимальный интервал между посадкой ВС типа c_j после ВС типа c_i , $i, j = \overline{1, P}$, $i \neq j$, C_i – тип i -го ВС. Кроме того, для каждого ВС определено временное окно $E_i \leq x_i \leq L_i$, $i = \overline{1, P}$, в течение которого ВС с номером i может совершить посадку в соответствии с его летно-техническими характеристиками, наличием топлива, длительностью полета и т.д. E_i – самое раннее возможное время приземления i -го ВС; x_i – назначенное время приземления i -го ВС, L_i – самое позднее возможное время приземления i -го ВС. Для каждого ВС известно также время T_i – оптимальное время прибытия i -го ВС при условии свободной ВПП, $i = \overline{1, P}$.

В зависимости от условий воздушного движения оптимизируемая глобальная целевая функция может зависеть от многих факторов, но как правило определяющими являются величины отклонения реальных времен посадок x_i от оптимальных времен посадок T_i .

Задаче оптимизации последовательности и времен посадок ВС, прибывающих на ВПП, посвящена обширная библиография. Математическая постановка задачи и методы ее решения рассмотрены в обзоре [3-4]. Задача NP -полная, т.е. с ростом P время счета для получения точного решения растет экспоненциально. Следовательно, для практического применения в режиме реального времени на получение оптимального решения рассчитывать не приходится. В такой ситуации нужно искать хорошее решение за приемлемое время. С этой целью было разработано большое количество различных метаэвристических и эвристических алгоритмов, которые могут стать основой создания библиотеки методов для решения задачи. Но возникает вопрос, как сравнить эффективность и быстродействие программ, созданных на основе разных алгоритмов при различных целевых функциях и разной интенсивности потока ВС.

Важным инструментом исследования для этой цели может служить имитационное моделирование и проведение вычислительных экспериментов. Методы имитационного моделирования широко используются в мире для анализа математических моделей и алгоритмов, применяемых для оптимизации в области ОрВД, в США (FAA и NASA), в Европе (EUROCONTROL), в России (ГосНИИАС, ГосНИИ «Аэронавигация»).

Далее в докладе рассматривается разработанное программное средство имитационного моделирования для анализа эффективности и быстродействия алгоритмов оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих ВС [5].

2 Программное средство имитационного моделирования для анализа эффективности и быстродействия алгоритмов планирования посадки ВС

Моделирование ситуации воздушного движения и ее разрешение состоит из следующих этапов:

- формирование теста;
- выбор целевой функции;
- начальное упорядочение последовательности ВС;
- получение оптимального решения;
- получение решения с помощью исследуемого алгоритма;
- визуализация и оценка результатов.

2.1 Формирование тестов

Для формирования теста выбирается параметр P – число ВС и параметр K – количество типов ВС. Таких типов обычно рассматривается три или четыре, например – очень легкое ВС, легкое ВС, среднее ВС, тяжелое ВС. задается матрица S .

Пример матрицы S для ВС четырёх типов представлен в таблице 1.

Таблица 1. Минимальное время между приземлениями, сек

| Ведомый | Ведущий | | | |
|--------------|--------------|--------|---------|---------|
| | Очень легкое | Легкое | Среднее | Тяжелое |
| Очень легкое | 60 | 60 | 120 | 180 |
| Легкое | 60 | 60 | 120 | 180 |
| Среднее | 60 | 60 | 120 | 120 |
| Тяжелое | 60 | 60 | 120 | 120 |

На основе усредненного значения времен минимальных интервалов между посадками ВС из матрицы S для рассматриваемых типов ВС выбирается длительность интервала времени $Time$, в течение которого все ВС должны совершить посадку. Например, $Time = (P - 1)120$, где 120 сек – среднее время задержки между посадками ВС из таблицы 1.

Варьируя параметр $Time$ можно изменять интенсивностью потока ВС.

Тип ВС определяется при помощи функции генерации случайного целого числа из заданного диапазона $1 \div K$: $C_i = rnd.Next(K), i = \overline{1, P}$.

Времена $0 \leq E_i \leq T_i \leq L_i \leq Time, i = \overline{1, P}$ для всех ВС формируются при помощи датчика случайных вещественных чисел.

$E_i = rnd.Next(t)$ – самое раннее возможное время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$, $rnd.Next(t)$ – функция генерации следующего случайного числа в диапазоне $\overline{0, t}$.

$L_i = E_i + \frac{Time}{2} + rnd.Next(t)$ – самое позднее возможное время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$.

$T_i = rnd.Next(E_i + \Delta t, L_i - \Delta t)$ – оптимальное время прибытия i -го ВС – случайное число в диапазоне $(E_i + \Delta t, L_i - \Delta t), i = \overline{1, P}$.

Могут учитываться различные дополнительные ограничения. Например, если желательно ограничить смещение позиции ВС в формируемой последовательности посадок не далее определенной величины от его позиции в исходной последовательности, это можно сделать, ограничивая величины $T_i - E_i$ и $L_i - T_i, i = \overline{1, P}$.

Кроме этого могут быть заданы один или несколько интервалов в течение времени от 0 до $Time$, когда ВПП закрыта для посадок.

На рис. 1 представлен пример визуализации сформированного теста из 20 ВС. Слева проставлены номера ВС. Отрезками обозначены временные интервалы посадки соответствующего ВС. У левого конца отрезка обозначен тип ВС: О – очень легкое, Л – легкое, С – среднее, Т – тяжелое. Кружком на отрезке обозначено оптимальное время посадки для каждого ВС. Между посадками ВС должны соблюдаться минимальные временные интервалы, представленные в таблице 1.

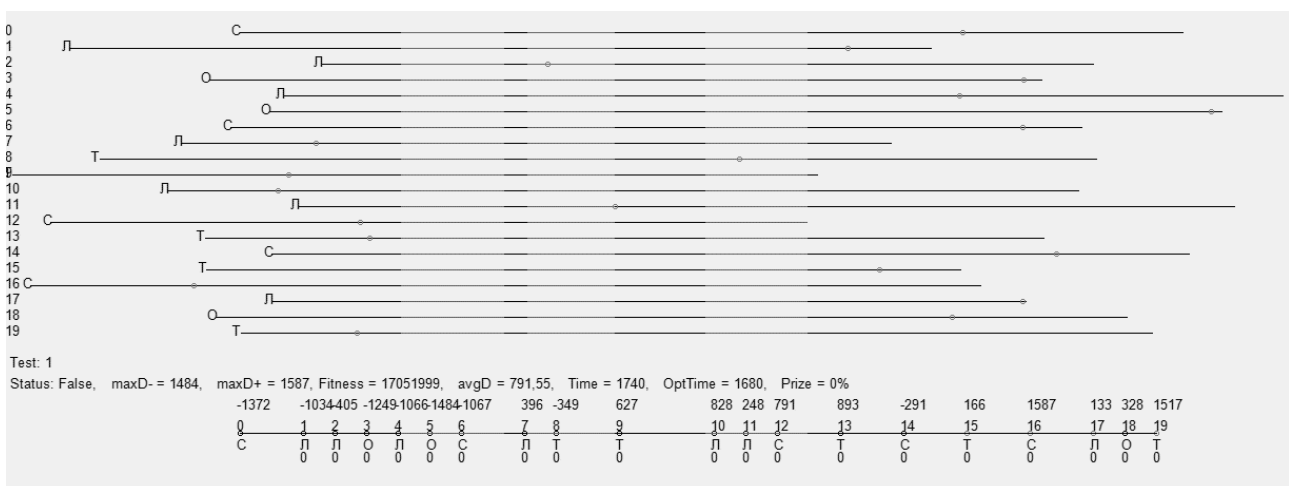


Рис.1. Визуализация сформированного теста

Внизу рис. 1 представлен временной отрезок, над которым расположены номера ВС и кружками на отрезке обозначены назначенные этим ВС времена посадок $X = \{x_i, i = \overline{1, P}\}$, рассчитанные по формулам:

$$(1) \quad x_1 = \max(0, E_1) \dots, x_i = \min(\max(x_{i-1} + S_{c_{i-1}, c_i}, E_i), L_i), i = \overline{2, P}.$$

При таком назначении времен посадок будет выполнено условие $E_i \leq T_i \leq L_i, i = \overline{1, P}$, но интервал между назначенными временами посадок ВС может оказаться меньше минимального допустимого. Над временным отрезком указаны параметры, первый из этих параметров *Status: False* свидетельствует о том, что разместить времена посадок ВС без нарушения ограничений не удалось, поскольку время посадки ВС с номером 0 помещено в точку E_0 , т.е. уменьшено быть не может, время посадки ВС с номером 19 помещено в точку L_{19} , т.е. увеличено быть не может, и интервал между этими временами недостаточен, чтобы соблюдать необходимые минимальные интервалы между всеми ВС, указанными в таблице 1. Величина нарушения рассчитывается по формуле:

$$(2) \quad W(X) = \sum_{i=1}^P \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i, x_j > x_i}}^P \max(0, S_{C_i C_j} - (x_j - x_i)).$$

Если $W(X) = 0$, то ограничения по соблюдению необходимых интервалов между ВС выполнены.

2.2 Выбор целевой функции

Целевые функции обычно строятся на основе величин $T_i - x_i, i = \overline{1, P}$. Наиболее актуальные целевые функции имеют следующий вид:

– кусочно-линейная целевая функция – минимизация суммы модулей отклонений от оптимальных времен посадок:

$$(3) \quad F(X) = \min_X \sum_{i=1}^P \text{abs}(T_i - x_i), \text{ где } X = \{x_i, i = \overline{1, P}\}$$

– нелинейная целевая функция – минимизация суммы квадратов отклонений от оптимальных времен посадок:

$$(4) \quad F(X) = \min_X \sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2, \text{ где } X = \{x_i, i = \overline{1, P}\}.$$

2.3 Начальное упорядочение последовательности воздушных судов

При решении задачи рассматривается некоторая исходная последовательность ВС, в результате оптимизации которой улучшаются заданные критерии качества. При решении задачи оптимизации в качестве исходной может быть выбрана последовательность ВС, возникшая при формировании теста. Однако из рис. 1 видно, что такая последовательность посадки нерациональна, хотя бы потому, что многие ВС могли бы приземлиться раньше, чем ВС с номером 0. Для более быстрого получения решения можно улучшить эту последовательность, упорядочив ее в порядке возрастания одной из трех имеющихся временных последовательностей $\{E_i, i = \overline{1, P}\}, \{T_i, i = \overline{1, P}\}, \{L_i, i = \overline{1, P}\}$.

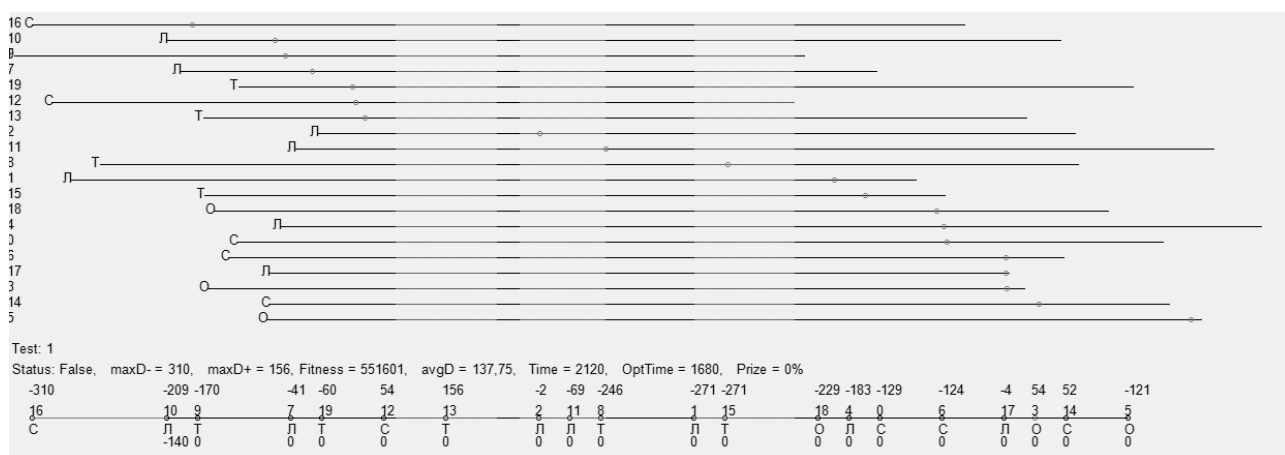


Рис.2. Визуализация упорядоченной последовательности ВС

На рис. 2 представлен пример последовательности ВС, упорядоченной в соответствии с последовательностью оптимальных времен посадок $\{T_i, i = \overline{1, P}\}$, что видно по расположению кружков на временных отрезках. Левый столбик номеров представляет новую последовательность номеров ВС на посадку. Эта последовательность по прежнему не является допустимой, о чем свидетельствует параметр *Status: False*, однако она существенно лучше по сравнению с последовательностью, представленной на рис. 1, поскольку уменьшились максимальные отклонения назначенного времени и в сторону опережения ($maxD-$ уменьшилось с 1484 до 310) и в сторону запаздывания ($maxD+$ уменьшилось с 1587 до 156) от оптимальных времен посадок и более чем в 3 раза уменьшилось значение минимизируемой нелинейной целевой функции (*Fitness* уменьшилось с 17051999 до 551601),

поэтому для более быстрой сходимости алгоритмов предпочтительно выбрать такую последовательность ВС в качестве исходной.

2.4 Получение оптимального решения

Рассматриваемая задача сводится к задаче линейной или квадратичной (в зависимости от выбранной целевой функции) задачи оптимизации с целочисленными 0-1 переменными при помощи введения дополнительных переменных:

$$(5) \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ВС } i \text{ приземляется раньше ВС } j, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad i, j = \overline{1, P}, i \neq j.$$

Для оптимального решения задачи используется стандартный пакет CPLEX [6]. Такой подход неприменим для использования в режиме реального времени из-за большого времени счета. Однако возможность получения точного решения, его визуализация, анализ и сравнение с приближенными решениями задачи чрезвычайно полезна в процессе разработки и анализа различных алгоритмов.

2.5 Получение решения с помощью исследуемого алгоритма

Для исследования алгоритм должен быть запрограммирован и включен в систему в виде исполняемого файла. В настоящее время помимо описанной выше программы получения оптимального решения в систему включены две программы для приближенного решения задачи: на основе генетического и эвристического алгоритмов [7-8].

2.6 Визуализация и оценка результатов

Пример визуализации допустимых решений без нарушений ограничений для 17 ВС представлен на рис. 3.

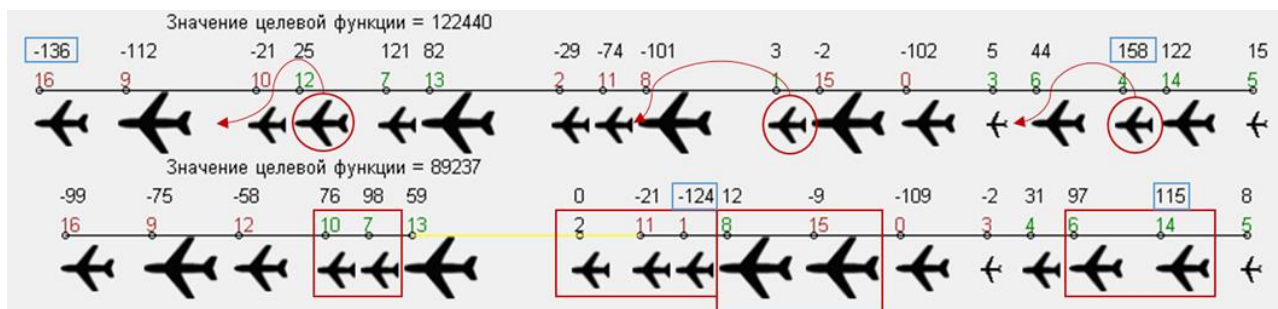


Рис. 3. Визуализация результатов эксперимента

ВС представляются при помощи иконок четырёх разных размеров в зависимости от типов ВС (очень легкие, легкие, средние, тяжелые). Иконки располагаются под временной осью.

На временной оси кружками обозначены времена посадки для каждого ВС. На представленном рисунке все ограничения для всех ВС выполнены.

Над кружком указан номер соответствующего ВС. Цифра над номером ВС представляет собой величину отклонения в секундах от оптимального времени посадки $x_i - T_i$:

$$(6) \quad \begin{cases} x_i - T_i > 0 & - \text{назначенное время позже оптимального;} \\ x_i - T_i < 0 & - \text{назначенное время раньше оптимального;} \\ x_i = T_i & - \text{назначенное время совпадает с оптимальным.} \end{cases}$$

Наибольшие значения отклонений в сторону опережения и в сторону опоздания обведены рамками.

Над величинами отклонений представлено значение минимизируемой целевой функции.

На рисунке представлены две различные последовательности одного набора из 17 ВС. Первая последовательность – исходная, вторая – получена в результате применения алгоритма. Вторая последовательность ВС получена в результате трех перестановок: среднего ВС с номером 12 перед лёгким ВС с номером 10, легкого ВС с номером 1 перед тяжелым ВС с номером 8, легкого ВС с номером 4 перед средним ВС с номером 6.

В результате максимальное отклонение влево от оптимального времени посадки уменьшилось со 136 сек до 124 сек, отклонение вправо от оптимального времени посадки уменьшилось со 154 сек до 115 сек, значение минимизируемой целевой функции уменьшилось с 122440 до 89237.

3 Организация вычислительных экспериментов

Вычислительные эксперименты для исследования быстродействия и эффективности алгоритмов оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих ВС заключаются в циклическом повторении генерации тестов, получении для них решения и вычислении средних значений параметров в автоматическом режиме. После завершения заданного числа повторений циклов полученные усредненные значения параметров выводятся в файл для анализа.

Интенсивность потока ВС исходной последовательности регулируется при помощи параметра $Time$ и определяется на основе рассчитанных согласно формуле (1) времен посадок X для исходной последовательности, упорядоченной в порядке возрастания оптимальных времен посадок T , и величины нарушений $W(X)$, рассчитанной по формуле (2).

Если $W(X) > 0$, то посадка ВС в рассматриваемой последовательности не может быть реализована в течение заданного интервала времени без нарушения ограничений, поскольку пропускная способность ВПП недостаточна. В этом случае применение алгоритма не может гарантировать получение решения, поскольку неизвестно существует ли решение, т.е. в этом случае необходимы дополнительные меры для разрешения ситуации.

Возможна и противоположная ситуация, если $W(X) = 0$ и сумма времен, когда ВПП свободна от приземляющихся ВС:

$$(7) \quad \sum_{i=2}^P (x_i - x_{i-1} - S_{c_{i-1}, c_i}) + Time - x_P \gg 0$$

существенно больше 0, это свидетельствует о небольшой загрузке ВПП и в этом случае выигрыш от применения алгоритмов оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих ВС снижается по сравнению с интенсивным потоком прибывающих ВС.

Для проведения экспериментов из сформированных на основе случайных величин тестов выбираются тесты с интенсивным потоком ВС, когда сумма (7) близка или равна 0.

При небольшом числе P возможно получение точного решения X^{OPT} , хотя время его расчета может занимать много часов. В этом случае решение, получаемое при помощи приближенного алгоритма \bar{X} можно оценить, сравнивая его с точным решением X^{OPT} .

Параметрами, вычисляемыми в ходе эксперимента, являются:

- среднее и максимальное время расчета приближенного решения;
- величина отношения разницы значений минимизируемой целевой функции для исходной последовательности и при приближенном решении к максимально возможному уменьшению значения целевой функции при оптимальном решении: $(F(X) - F(\bar{X})) / (F(X) - F(X^{OPT}))$. Эта величина может принимать значение от 0 до 1. Значение 0 соответствует случаю, когда применение приближенного алгоритма не улучшило исходного решения. Значение 1 соответствует случаю, когда применение приближенного алгоритма привело к получению оптимального решения;
- процент тестов от общего их числа, для которых в результате применения исследуемого алгоритма получено оптимальное решение/

Вычислительный эксперимент по анализу эвристического алгоритма оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих ВС при помощи описываемого программного средства и его результаты описаны в работе [8]. При проведении эксперимента эвристический алгоритм позволял получить решение быстрее, чем за 1 секунду, а на получение оптимального решения требовалось для некоторых тестов более 7 часов. Результаты, представляющие средние значения параметров, полученных для 500 тестов, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты вычислительного эксперимента для 17 ВС

| Целевая функция | $(F(X) - F(\bar{X})) / (F(X) - F(X^{OPT})) 100\%$ | Доля оптимальных решений, % |
|---|---|-----------------------------|
| $F(X) = \min_X \sum_{i=1}^P abs(T_i - x_i)$ | ~ 78,7 | ~ 30,2 |
| $F(X) = \min_X \sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2$ | ~ 82,7 | ~ 51,8 |

Из таблицы 2 видно, что результаты зависят от выбранной целевой функции; процент тестов, для которых исследуемый алгоритм позволяет получить оптимальное решение, достаточно высокий; в

среднем улучшение значения целевой функции составляет около 80% от максимально возможного при оптимальном решении.

Для тестов при $P > 20$ получение оптимальных решений может оказаться невозможным, поскольку требуются слишком большие вычислительные ресурсы и чрезмерно большое время счета. В этом случае возможно проводить оценку алгоритма, анализируя значение $(F(X) - F(\bar{X}))/F(X)$, которое показывает, насколько применение исследуемого алгоритма позволяет уменьшить значение минимизируемой целевой функции. В таблице 3 приведены средние значения параметров, полученных для 500 тестов из 40 ВС, которые показывают, что применение исследуемого алгоритма позволяет за приемлемое время существенно уменьшить значение минимизируемой целевой функции.

Таблица 3. Результаты вычислительного эксперимента для 40 ВС

| Целевая функция | $(F(X) - F(\bar{X}))/F(X)$ 100% |
|---|---------------------------------|
| $F(X) = \min_x \sum_{i=1}^P abs(T_i - x_i)$ | ~ 28,33 |
| $F(X) = \min_x \sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2$ | ~ 37,77 |

Заключение

Задача оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих ВС с одной стороны, актуальна для оптимизации ОрВД и повышения пропускной способности ВПП, а с другой стороны, представляет собой интересную математическую задачу, над решением которой трудились и продолжают трудиться многие исследователи с 70-х годов прошлого века и до настоящего времени. За это время было предложено большое количество разных подходов и приближенных алгоритмов решения задачи, для которых трудно или невозможно привести точные математические оценки вычислительной сложности и эффективности результатов [3-4].

Предложенное программное средство позволяет провести математическое моделирование и собрать статистический материал, в ходе вычислительных экспериментов продемонстрировать достаточное быстродействие и эффективность подобных алгоритмов, тем самым подтвердить их большую практическую значимость.

Литература

1. Золотухин В.В., Исаев В.К., Давидсон Б.Х. Некоторые актуальные задачи управления воздушным движением // Труды МФТИ. 2009, Т. 1, № 3. – С. 94-114.
2. Wolpert D.H., Tumer K. An Introduction to Collective Intelligence // NASA Technical Report. 2006, NASA-ARC-IC-99-63.
3. Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 1. Методы точного решения // Проблемы управления. 2018, № 4. – С. 2-13.
4. Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 2. Методы приближенного решения // Проблемы управления. 2018, № 5. – С. 2-13.
5. Кулида Е.Л. Инструментальное средство для исследования алгоритмов построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615221 РФ; Зарег. 03.05.2018.
6. Егоров Н. А. Библиотека точных методов построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку для 4-х критериев оптимальности, реализованная в виде .Net сборки: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616970 РФ; Зарег. 03.06.2019.
7. Кулида Е. Л. Программа формирования очередей воздушных судов на посадку: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616924 РФ; Зарег. 30.05.2019.
8. Кулида Е.Л., Лебедев В.Г., Егоров Н.А. Исследование эффективности алгоритма оптимизации потока воздушных судов на посадку // Проблемы управления. 2019. № 6. – С. 63-69.