

УДК 519.8

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ВЫБОРА РАБОЧИХ ЧАСТОТ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

А.В. АНДРЕЕВ¹, В.Л. РУМЯНЦЕВ², О.В. ЕСИКОВ², Р.Н. АКИНШИН³

¹ЗАО «Сокол-АТС», г. Белгород, Россия

²АО ЦКБА, г. Тула, Россия

³СПП РАН, г. Москва, Россия

Показано, что сложная электромагнитная обстановка в зоне аэродрома характеризуется значительным увеличением уровня непреднамеренных помех и числа их источников. Совокупность этих факторов приводит к проблеме обеспечения электромагнитной совместимости совместно работающих радиотехнических систем (РТС), т. е. к обеспечению требуемого уровня качества их функционирования в условиях межсистемных помех. Организация управления воздушным движением предполагает непрерывное взаимодействие между экипажами и диспетчерами на протяжении всего полета, т. е. необходимо учитывать взаимовлияние РТС, расположенных в соседних зонах ответственности. Так как зоны перекрываются, то распределение частот должно производиться одновременно с учетом всех РТС, что обуславливает огромную размерность задачи. Предложено для решения задачи выбора рабочих частот РТС системы управления воздушным движением использовать генетический алгоритм. Для повышения качества получаемого решения обосновано и экспериментально проверено применение островного (параллельного) генетического алгоритма (ОГА). Определены параметры генетического алгоритма, обеспечивающие наилучшее качество решения. Показано, что адаптивная схема отбора особей является перспективной для использования и позволяет без проведения дополнительных исследований решать задачу и исходных данных на предмет выбора схемы репродукции для ОГА получать требуемое решение задачи.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, дискретная оптимизация, генетический алгоритм.

Сложная электромагнитная обстановка в зоне аэродрома, характеризующаяся высоким уровнем непреднамеренных помех и большим числом их источников, порождает проблему обеспечения электромагнитной совместимости совместно работающих радиотехнических средств (РТС), т. е. к обеспечению требуемого уровня качества их функционирования в условиях межсистемных помех [1].

Поскольку основными источниками электромагнитных помех являются РТС, входящие в комплекс радиосредств управления воздушным движением (УВД), добиться улучшения электромагнитной обстановки можно путем рационального распределения рабочих частот между отдельными РТС комплекса УВД [1, 2].

Организация УВД предполагает непрерывное взаимодействие между экипажами и диспетчерами на протяжении всего полета, что требует учета взаимовлияния РТС, расположенных в соседних зонах ответственности [3, 4], и порождает огромную размерность задачи.

Одним из способов уменьшения степени взаимного влияния работающих РТС является разнос частот их излучения, конечно, в том случае, если конструкции РТС предусматривают возможность перестройки приемо-передающих трактов [2], что требует разработки методического аппарата для выбора рабочих частот однотипных РТС, при которых степень их взаимного влияния минимальна.

В случае двух РТС мощность сигнала на входе приемника РТС-1 (который для для нее будет восприниматься как помеховый) от работающего РТС-2 может быть описана с помощью соотношения [5, 6]:

$$P_{n1} = P_{T2} + G_2 + G_{R1} - \alpha_{\phi R1} - L(R) - FDR(\Delta f), \quad (1)$$

где P_{T2} – мощность передатчика РТС-2, дБ;

G_2 – коэффициент усиления антенны источника помех в направлении приемника, дБ;

G_{R1} – коэффициент усиления приемной антенны в направлении источника помех (РТС-2), дБ;

$\alpha_{\phi R1}$ – потери в приемном фидерном тракте, дБ;

$L(R) = 20 \lg \frac{4\pi R}{\lambda}$ – потери на расстояние разноса, дБ;

$FDR(\Delta f)$ – коэффициент, показывающий, какая доля мощности помехи, центральная частота которой расстроена на величину Δf относительно настройки приемника РТС-1 проходит на вход. Для ее определения необходимо вычислить свертку спектра помехи и АЧХ приемника (преселектора).

Очевидно, что соотношение (1) будет справедливо и при работе N РТС в составе комплекса однородных средств.

Для дальнейших расчетов сделаны следующие допущения: мощности всех работающих РТС одинаковы; потери в приемном фидерном тракте имеют приблизительно равный характер; полоса пропускания каждого приемника РТС 5 МГц; спектральный состав зондирующего сигнала (кроме центральной частоты) и АЧХ приемников всех РТС одинаковы.

В этом случае влияние i -го РТС на j -е РТС можно оценить по уровню помех на входе приемника, которое после преобразования соотношения (1) вычисляется следующим образом:

$$P_{ij}^n = -10 \lg(5 + |F_i - F_j|) - 20 \lg(4\pi R_{ij}).$$

Здесь F_i, F_j – частоты настройки приемо-передающих трактов i -го и j -го РТС соответственно, $i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j$; R_{ij} – расстояние между i -м и j -м РТС; N – число РТС.

Положение каждого РТС определяется декартовыми координатами (x, y) . Дальнейшие расчеты проведены для случаев работы РТС в S - и K_a -диапазонах. Каждому РТС назначается частота, рассчитываемая из соотношения $F_i = a + bD_i$, где a, b – некоторые постоянные величины (Гц); D_i – значения дискрет для каждого i -го РТС, после чего для каждого частотного

разноса определяется величина $P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N P_{ij}^n$.

Задача состоит в определении для каждого i -го ($i = 1, 2, \dots, K$) РТС значений N_i , которые в совокупности обеспечивают наименьший уровень взаимных помех. Сформулированная задача относится к классу задач комбинаторики, и в общем случае число возможных вариантов решения может достигать значения 10^{20} . Что касается поиска оптимального решения, то он сводится к перебору возможных вариантов решения, а поэтому связан со значительными временными затратами.

Для решения задачи предложено и экспериментально проверено использование генетических алгоритмов как варианта стохастического эволюционного поиска решения [7].

Основу генетического алгоритма (ГА) составляет хромосома (особь).

Применительно к данной задаче хромосома (особь) состоит из набора N генов, каждый из которых содержит номер дискретной частоты функционирования соответствующего комплекса РТС.

В ГА над хромосомами выполняются следующие действия [7–9]: определение значения функции приспособленности; скрещивание (кроссинговер); мутация; отбор особей для скрещивания.

Значение функции приспособленности F , рассчитываемой по формуле $F = \max_i P_i$, используется для оценки качества варианта распределения частот функционирования комплексов РТС, соответствующего значениям генов хромосомы.

Если геном хромосомы соответствует недопустимому значению набора частот, функция приспособленности возвращает значение > 0 , (например 100 000), в противном случае – отрицательное число, значение F .

Для генерации новых вариантов решения (особей) в ГА используют механизмы отбора особей, скрещивания и мутации хромосом.

Для работы ГА обычно используются следующие популяции [8, 9]:

– исходная популяция, которая служит для хранения особей, участвующих в текущем шаге ГА. На начальном шаге ГА исходная популяция обычно генерируется случайным образом;

– родительская популяция (родительский пул), в которую отбираются все особи исходной популяции, значения функции приспособленности которых не меньше среднего значения функции приспособленности для исходной популяции в целом;

– элитная популяция, служащая для сохранения лучших особей родительской (исходной) популяции;

– дочерняя популяция, формируемая путем многократного выполнения операций отбора особей, кроссинговера, мутации. На основе дочерней популяции формируется исходная популяция для следующего шага ГА.

Для упрощения процедур ГА предложено использовать исходную популяцию постоянного размера. В случае если на какой-либо итерации вновь сформированная популяция, которая на следующей итерации будет использоваться как исходная, имеет размер менее заданного, то предлагается дополнять ее до требуемого размера случайно сгенерированными особями.

Введем следующие обозначения: MF – число дискретных частот; P_c – вероятность выполнения скрещивания хромосом; P_m – вероятность мутации хромосомы.

Операция скрещивания выполняется над парой хромосом, являющихся родительскими. Результатом являются две хромосомы-потомка.

Скрещивание выбранных особей выполняется с вероятностью P_c .

Исследования показали, что наиболее эффективным с точки зрения конечного результата является универсальный кроссинговер, который выполняется следующим образом.

Генерируется шаблон двоичных чисел длиной K . Шаблон указывает, какие гены должны наследоваться от первого родителя (остальные гены берутся от второго родителя).

Для первого потомка, если в j -й позиции шаблона 1, то j -й ген для данного потомка берется от первого родителя, а если 0 – то от второго. Для второго потомка: если в j -й позиции шаблона 1, то j -й ген для данного потомка берется от второго родителя, а если 0 – то от первого.

Операция мутации выполняется над выбранной хромосомой с вероятностью P_m .

Данный оператор необходим для «выбивания» популяции из локального экстремума и препятствует преждевременной сходимости. Это достигается за счет того, что изменяется случайно выбранный ген g_i ($i = 1, 2, \dots, N$) в хромосоме. В выбранном гене случайный разряд инвертируется. При этом если $g_i > MF$, то $g_i = MF - g_i$.

Формирование родительской популяции (родительского пула).

В родительскую популяцию отбираются все особи исходной, значения функции приспособленности которых не меньше среднего значения функции приспособленности.

Отбор особей для скрещивания

К настоящему времени отсутствуют четкие и однозначные рекомендации по выбору схем селекции для конкретных условий решаемой задачи.

Особи для скрещивания выбираются из родительской популяции.

Первая хромосома обычно выбирается случайным способом.

Для задач подобного вида обычно используют следующие разновидности выбора второй хромосомы для скрещивания.

1. Аутбридинг – выбирается хромосома с максимальным значением расстояния до первой выбранной $S = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (g_i^1 - g_i^2)^2} \rightarrow \max$.

Данный вид отбора обеспечивает снижение скорости сходимости алгоритма к локальному экстремуму и увеличивает вероятность достижения глобального экстремума.

2. Инбридинг (близкородственное скрещивание) – выбирается хромосома с минимальным расстоянием от выбранной первой $S = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (g_i^1 - g_i^2)^2} \rightarrow \min$.

Данный вид отбора обеспечивает максимально быструю сходимость алгоритма к локальному экстремуму.

3. Случайный выбор.

Для обеспечения сохранения лучших найденных особей создается так называемая элитная популяция, особи которой автоматически включаются в дочернюю популяцию на текущем шаге алгоритма.

Размер элитной популяции определяется как $iL_{el} = k_{el}iLP$, где k_{el} – коэффициент элитизма, iLP – размер исходной популяции.

Обобщенная схема простого ГА представлена на рис. 1.

Исследование и результаты моделирования показали, что простой ГА при решении рассматриваемой задачи достаточно быстро сходится к локальному экстремуму.

Для $N = 6$ приемлемое решение достигается уже за 100 поколений (итераций алгоритма) при размере популяции в 200 особей. При этом на вычислительном комплексе со следующими характеристиками: процессор – IntelCorei7-3632QM 2.2 GHz; ОЗУ – 6 Гб; ОС – MS Windows 8.1 x64, время формирования одного поколения (итерация алгоритма) составляет 8 мс. С ростом размера популяции время решения задачи растет в квадратичной зависимости.

«Качество» получаемого решения при использовании простого ГА вследствие сходимости к случайному локальному экстремуму может варьироваться в зависимости от начальной инициализации исходной популяции.

Таким образом, достоинствами ГА являются: независимость от вида целевой функции и ограничений; возможность получения не только лучшего, но и ряда альтернативных решений; возможность использования в качестве критерия останова не только количества итераций, но времени решения задачи; простота вычислительных процедур; быстрая сходимость к локальному экстремуму.

Основным недостатком ГА является невозможность гарантированного получения оптимального решения.

Для получения более стабильного по качеству результата предлагается использовать островной (параллельный) ГА (ОГА), являющийся модификацией простого ГА, схема алгоритма которого представлена на рис. 2.

Сущность островного алгоритма заключается в следующем. Одновременно и независимо друг от друга работают несколько простых ГА со своими популяциями. Каждый из них, вследствие случайной начальной инициализации исходной популяции, в ходе выполнения последовательного формирования N^{Ex} поколений сходится к своему локальному экстремуму (острову). С определенной периодичностью (через определенное число поколений (итераций) N^{Ex}), по определенной схеме ГА обмениваются заданным числом лучших особей (осуществляется миграция особей), после чего процесс решения продолжается. Это позволяет с большей вероятностью получить лучшее решение (в том числе достичь глобального экстремума). Совокупность шагов алгоритма, завершающаяся обменом лучшими особями между островами (миграцией особей), составляет одну итерацию ОГА.

Подобная схема позволяет обеспечить выход простых ГА в каждом из островов из области локального экстремума, обеспечить большее разнообразие особей в популяциях и с большей вероятностью получить лучшее решение (в том числе достичь глобального экстремума). В качестве схемы миграции особей чаще всего используется миграция с топологией полной сети, миграция с топологией кольца и их модификации [9–11].

Слишком частая миграция практически сводит ОГА к простому ГА с большей по размеру популяцией особей. Слишком редкая миграция приводит к существенному увеличению времени решения вследствие сходимости островов к локальным экстремумам. Рациональным считается выбор такого интервала миграции особей, когда острова только достигают некоторой области локального экстремума.

Среди исследованных методов репродукции наилучшими как по скорости, так и по эффективности являются методы репродукции с аутбридингом в качестве оператора выбора родителей для одноостровного ГА (простого ГА) и инбридинга и случайного отбора для многоостровного ГА с использованием стратегии элитизма и случайной генерацией особей для дополнения новой популяции до постоянного объема.

Для определения параметров для данного ГА было проведено исследование, в ходе которого менялись вероятность кроссовера, вероятность мутации и коэффициент элитизма. Наилучшие показатели простой ГА и ОГА при решении данной задачи имеют при $P_c = 0,8$; $P_m = 0,1$; $k_{el} = 0,1$. В качестве критерия останова алгоритма использовалось выполнение заданного числа итераций.

Время решения задачи ОГА линейно растет с увеличением числа островов NIsLand и нелинейно с увеличением размера популяции.

Для одного из вариантов размещения РТС и частотного диапазона: островов 6; итераций 5; длина популяции 200; поколений в итерации 100, время решения с отбором на основе аутбридинга и инбридинга составляет 42–43 с, для случая случайного отбора – 24 с. Для 2-х островов соответственно 14 и 8 с.

После каждой итерации осуществляется миграция лучших особей между островами по выбранной схеме.

При этом слишком частая миграция особей приводит к тому, что ОГА сводится к простому ГА с увеличенной в NIsland раз популяцией. Слишком редкая миграция приводит к увеличению времени решения задачи. Расчеты показывают, что наиболее эффективным является осуществление миграции особей на стадии, когда острова осуществили сближение к локальным экстремумам.

Наибольшую плотность результатов (десяти лучших по результатам решения особей (min SKO функции принадлежности)) показывает селекция на основе инбридинга (с наибольшим количеством лучших элементов близких к оптимальному). Случайная селекция показывает нестабильный результат с выбросами как в сторону улучшения, так и ухудшения качества решения.

Для ОГА достаточно остро встает вопрос выбора схемы репродукции. Возможны следующие варианты отбора особей: аутбридинг; инбридинг; случайный отбор; смешанная или гибридная схема.

При смешанной или гибридной схеме вариант селекции для каждого острова выбирается при инициализации случайно из группы: аутбридинг, инбридинг, случайный отбор. Это позволяет, в совокупности, несколько сгладить недостатки каждого из вариантов отбора особей.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальной проверки эффективности схем селекции при решении задач. Всего решалось по 20 задач для каждого варианта схемы отбора с параметрами, приведенными выше. Данные обрабатывались для особей элитной популяции, сформированной на последней итерации ОГА.

Из таблицы 1 видно, что наиболее предпочтительным для ОГА является использование инбридинга и случайного отбора в схеме селекции особей. При этом случайный отбор требует

существенно меньших затрат вычислительных ресурсов. Однако эффективность применения схемы репродукции в каждом конкретном случае существенно зависит от исходных данных и начальной инициализации исходных популяций ОГА.

Таблица 1

Результаты экспериментальной оценки эффективности схем селекции особей в ОГА

Схема отбора	Значение функции приспособленности			СКО			Среднее время решения (с)
	max	min	среднее	max	min	среднее	
Аутбридинг	510,63	507,73	509,03	1,12	0,37	0,79	43
Инбридинг	511,22	508,09	509,71	1,34	0,43	0,75	43
Случайный отбор	510,90	508,06	509,17	1,23	0,30	0,77	24
Смешанная схема	510,43	507,86	509,34	1,12	0,38	0,78	42

В связи с этим предлагается использовать схему адаптации ОГА в части выбора схемы селекции, суть которой состоит в следующем.

В каждую хромосому включаются признаки, значение которых соответствует используемой при ее формировании схеме селекции. Значение данных признаков формируется при использовании конкретных вариантов отбора.

На каждом шаге алгоритма, для каждого острова определяются вероятности применения каждой из схем отбора. На начальном этапе схемы отбора используются с равными вероятностями.

По результатам формирования элитной популяции по завершении эволюции заданного числа поколений формируется статистика частоты попадания особей сформированных каждой из схем репродукции в элитную популяцию. На основании этого определяются вероятности использования каждой из схем репродукции на следующей итерации ОГА.

В таблице 2 представлены результаты экспериментальной проверки эффективности адаптивной схемы селекции.

Таблица 2

Результаты экспериментальной оценки эффективности адаптивной схемы селекции особей в ОГА

Схема отбора	Значение функции приспособленности			СКО			Среднее время решения (с)
	max	min	среднее	max	min	среднее	
Адаптивная	511,17	508,71	509,26	1,5	0,33	0,77	34

На рис. 3 представлено изменение вероятности применения схем отбора в ходе работы ОГА с адаптивной схемой отбора особей на примере одного из островов. Из результатов экспериментальной проверки видно, что адаптивная схема отбора особей обеспечивает сокращение времени решения задачи по сравнению со схемой на основе инбридинга. При этом прослеживается явная тенденция отсекаания аутбридинга от участия в отборе особей к 3–5 итерациям алгоритма. Кроме того, у ряда островов адаптивная схема отбора, несмотря на миграцию особей между островами после каждой итерации, вырождается в случайный отбор либо в инбридинг. С ростом числа островов количество вырождений адаптивной схемы к одному из вариантов отбора снижается. С ростом числа итераций от 20 и более адаптивная схема стремится к смешанной (гибридной) в составе инбридинга и случайного отбора. При этом ОГА сходится к одному из локальных экстремумов уже к 8–10-й итерации, и в дальнейшем качество получаемого решения не улучшается.



Рис. 1. Обобщенная схема простого генетического алгоритма



Рис. 2. Обобщенная схема островного генетического алгоритма

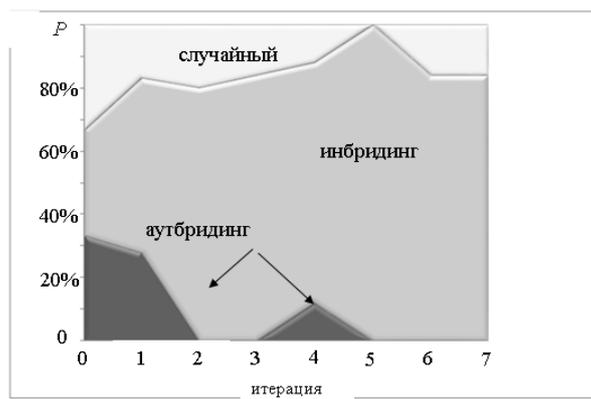


Рис. 3. Результаты экспериментальной проверки адаптивной схемы отбора в ОГА

Таким образом, адаптивная схема отбора особей является перспективной для использования и позволяет без проведения дополнительных исследований решаемой задачи и исходных данных на предмет выбора схемы репродукции для ОГА получать решение задачи. Применение островного генетического алгоритма позволяет получать приемлемое по качеству решение задачи выбора рабочих частот радиотехнических средств системы управления воздушным движением, в том числе в условиях жестких временных ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акиншин Р.Н., Карпов И.Е., Самсонов А.Д. Методика оценки уровня информационной безопасности в автоматизированной системе управления воздушным движением // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 193 (7). С. 75–78.
2. Акиншин Р.Н., Карпов И.Е., Самсонов А.Д. Модель и программный комплекс для оценки эффективности системы обеспечения безопасности полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 193 (7). С. 126–133.
3. Государственная программа обеспечения безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации: Распоряжение Правительства РФ от 06.05.2008 № 641-р.

4. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП): Doc.9859-AN1460. Монреаль: ИКАО, 2006.
5. Тимофеев В.В. Концепция использования радиоспектра. М.: Электросвязь, 1994.
6. Ильюшко С.Г. Анализ и методика расчета электромагнитной совместимости в системах связи, радиолокации и телевидении: учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. 105 с.
7. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: 2nd ed. Cambridge, MA, MIT Press, 1992.
8. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с пол. И.Д. Рудинского. 2-е изд., стереотип. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 384 с.
9. Есиков О.В., Андреев А.В., Абрамов П.И. Особенности применения метода РОЯ частиц для решения задач численной оптимизации // Сб. научных трудов НТО РЭС им. А.С. Попова. 2015. Выпуск XXXIII. С. 71–74.
10. Матренин П.В. Разработка и исследование адаптивных методов роевого интеллекта в задачах календарного планирования // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 109–114.
11. Есиков О.В., Абрамов П.И., Иванов В.В. Многоагентные алгоритмы обучения искусственных нейронных сетей // Сб. научных трудов НТО РЭС им. А.С. Попова. 2015. Выпуск XXXIII. С. 74–85.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреев Андрей Владимирович, начальник отдела ЗАО «Сокол-АТС», электронный адрес: sokol-ats@inbox.ru.

Румянцев Владимир Львович, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника отдела АО ЦКБА, электронный адрес: rts@cdbae.ru.

Есиков Олег Витальевич, доктор технических наук, профессор, главный специалист АО ЦКБА, электронный адрес: rts@cdbae.ru.

Акиншин Руслан Николаевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник СПП РАН, электронный адрес: rakinshin@yandex.ru.

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM FOR IN SOLVING THE PROBLEM OF CHOICE OF OPERATING FREQUENCY FOR AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM

Andrei V. Andreyev

«Sokol-ATS», Belgorod, Russia, sokol-ats@inbox.ru

Vladimir L. Rumyantsev

Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, Russia, rts@cdbae.ru

Oleg V. Esikov

Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, Russia, rts@cdbae.ru

Ruslan N. Akinshin

Section of applied problems under the Presidium
of the Russian academy of science, Moscow, Russia
rakinshin@yandex.ru

ABSTRACT

It is shown that complex electromagnetic environment in an aerodrome zone is characterized by a considerable increase of an unintended interference level and the number of unintentional emitters. The whole set of these factors leads to

the problem of ensuring electromagnetic compatibility of banked radio-technical systems (RTS), i.e., ensuring a goal performance under the conditions of intersystem interference. Air traffic control organization suggests a continuous interaction between air-crews and air traffic controllers during the whole flight, i.e., it is necessary to consider mutual influence of RTSs situated in adjacent zones of responsibility. As the zones overlap, frequency allocation should be performed simultaneously taking into consideration the RTSs, which determines a huge dimension of the problem. The problem of choice of operating frequency for air traffic control system radio-technical aids is formalized. It is offered to use a genetic algorithm as one of the stochastic search methods for solution of the formalized problem of the choice of operating frequencies for air traffic control system. The parameters of the genetic algorithm, and providing a better quality solution are determined. It is shown that the adaptive scheme of selection of individuals is promising for use, and it enables to receive the required solution of the problem without performing additional research of the current task and the bench-mark data concerning choice of a reproduction scheme for the generalized genetic algorithm.

Key words: air traffic control, choice of operating frequency, radio-technical aids, genetic algorithm.

REFERENCES

- 1. Akinshin R.N., Karpov I.E., Samsonov A.D.** Technique of evaluation of information security level in air-traffic control automated system. Nauchnyi Vestnik MGTUGA [Journal of the MSTU CA], 2013, no. 193 (7), pp. 75–78. (in Russian)
- 2 Akinshin R.N., Karpov I.E., Samsonov A.D.** Model and bundled software for evaluation of flight safety system performance. Nauchnyi Vestnik MGTUGA [Journal of the MSTU CA], 2013, no. 193 (7), pp. 126–133. (in Russian)
- 3.** Government program for promotion of civil aircraft safety. The RF Government Executive Order of 06.05.2008 № 641-r.
- 4.** Flight safety management manual. Doc.9859-AN1460. Montreal, ICAO, 2006.
- 5. Timofeev V.V.** Kontseptsiya ispol'zovaniya radiospektra [Radio spectrum use conception]. Moscow, Elektrosvyaz' Publ., 1994. (in Russian)
- 6. Il'yushko S.G.** Analiz i metodika raschyota elektromagnitnoy sovместimosti v sistemah svyazi, radiolokatsyi i televidenii. Uchebnoe posobie. [Analysis and design procedure of electromagnetic compatibility in communication, radar and television systems. Study guide], Petropavlovsk-Kamchatsky, KamchatTGU Publ., 2007, 105 p. (in Russian)
- 7. Holland J.H.** Adaptation in Natural and Artificial Systems: 2nd ed. Cambr., MA, MITPress, 1992.
- 8. Rutkovskaya D.** Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechyotkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Goryachaya liniya Telkom Publ., 2013, 384 p. (in Russian)
- 9. Esikov O.V., Andreev A.V., Abramov P.I.** Features of particle-swarm method use for solving of numerical optimization problems. Sb. nauchnykh trudov NTORES im. A.S. Popova [Proc. of A.S. Popov technical society of radio engineering, electronics engineering and communication]. 2015, issue XXXIII, pp. 71–74. (in Russian)
- 10. Matryonin P.V.** Development and research of adaptive swarm-intellect methods in scheduling problems. Avtomatika i programmaya inzheneriya [Automation and software engineering]. 2013, no. 1 (3), pp. 109–114. (in Russian)
- 11. Esikov O.V., Abramov P.I., Ivanov V.V.** Multi-agent algorithms of training of artificial neural networks. Sb. nauchnykh trudov NTORES im. A.S. Popova [Proc. of A.S. Popov technical society of radio engineering, electronics engineering and communication]. 2015, issue XXXIII, pp. 74–85. (in Russian)