

УДК (681.5+ 519.6):621.45

Ю. М. ГУСЕВ, О. Е. ДАНИЛИН, Б. И. БАДАМШИН

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА ТВВД НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предлагается подход к решению задачи оптимизации удельного расхода топлива ТВВД. Решение задачи проводится в 2 этапа. Первый этап поиска решения осуществляется на земле на базе математической модели двигателя. Второй этап осуществляется во время полета и заключается в корректировке результатов, полученных на земле. Генетический алгоритм обеспечивает эффективное решение поставленной задачи при работе с большим количеством управляемых параметров. *Генетический алгоритм; ТВВД; математическая модель; алгоритм управления*

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач современного авиационного двигателестроения является уменьшение удельного расхода топлива. Разрабатываемая система оптимизации удельного расхода топлива будет использоваться на турбовинтовентиляторном двигателе (ТВВД). Так как двигателей на самолете может быть несколько, то даже незначительное повышение экономичности работы каждого из двигателей в силовой установке самолета и связанная с этим экономия топлива могут существенно снизить эксплуатационные затраты.

В этой статье приводится подход к решению задачи оптимизации удельного расхода топлива ТВВД, обосновывается целевая функция, а также определяется место системы оптимизации расхода топлива в структурной схеме электронной системы управления (ЭСУ) ТВВД. Помимо этого рассматривается решение самой задачи оптимизации на всех этапах, методы и особенности решения.

### 1. МОДЕЛЬ ТВВД

ТВВД состоит из двигателя – тепловой машины и соосного винтовентилятора ВВ – движителя, соединенных между собой посредством редуктора, а также входного устройства и реактивного сопла.

Основными регулирующими параметрами ТВВД являются величина расхода топлива в камере сгорания  $G_c$ , положение направляющих аппаратов компрессора  $\alpha_{нд}$  и  $\alpha_{вд}$ , положение лопастей винтовентиляторов  $\phi_{пв}$  и  $\phi_{зв}$ , положение клапанов перепуска воздуха  $h_{нд}$ .

Математическую модель ТВВД можно представить в виде совокупности математической модели двигателя и математической модели винтовентилятора (ВВ), связанных между собой через мощность на валу свободной турбины (турбины винтовентиляторов)  $N_{ст}$  (рис. 1).

Основными регулирующими параметрами ВВ являются углы установки лопастей переднего  $\phi_{пв}$  и заднего  $\phi_{зв}$  винтов. Выходными параметрами ВВ являются частоты переднего  $n_{пв}$  и заднего  $n_{зв}$  винтов, тяга  $R_{ВВ}$  [2].

Основной задачей ЭСУ двигателя является постоянство тяги, которую обеспечивает встроенный в ЭСУ регулятор тяги. Путем изменения углов установки лопастей винтов изменяются частоты вращения переднего и заднего винтов, при этом изменяется тяга двигателя. Задача регулятора тяги заключается в том, чтобы отследить это изменение и снизить или увеличить расход топлива для поддержания тяги на требуемом уровне. Таким образом осуществляется влияние изменения частот вращения винтов на расход топлива. Отсюда и возникает задача подбора оптимальных значений частот переднего и заднего винтов, при которых будет минимальным удельный расход топлива [6].

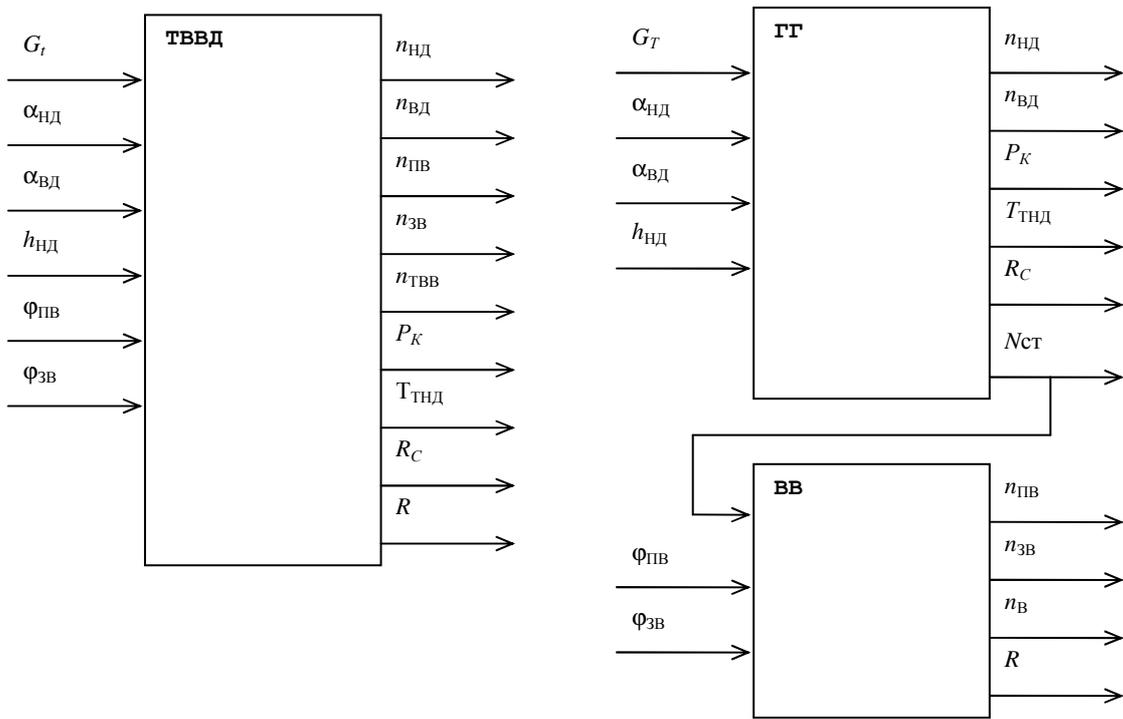


Рис. 1. Декомпозиция модели ТВВД на модели ГТ и ВВ

## 2. СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ РАСХОДА ТОПЛИВА

### 2.1. Описание структурной схемы САУ ТВВД

На рис. 2 приведена структурная схема САУ ТВВД.

Пилот задает желаемую тягу  $R_{ж}$ . Далее, с помощью регулятора  $W_p$ , ЭСУ получает значение желаемого расхода топлива, которое с помощью регулятора  $W'_p$  преобразуется в управляющий сигнал для насоса-регулятора (НР). В свою очередь, он задает реальный расход топлива  $G_t$ . Газогенератор (ГТ) формирует мощность  $N_{ст}$ , которая передается винтовентилятору (ВВ) через вал свободной турбины.

В соответствии с положением рычага управления двигателем (РУД) в кабине пилота, задается не только желаемая тяга, но и заранее запрограммированные для каждого режима полета частоты для ВВ. Заданные значения частот подаются на регуляторы  $W_{P_{нв}}$  и  $W_{P_{зв}}$ , которые в свою очередь выдают управляющие сигналы  $\psi_{шдпв}$  и  $\psi_{шдзв}$  шаговым двигателям, находящимся в регуляторе соосного винтовентилятора (РСВ). Шаговые двигатели выставляют лопасти ВВ на углы  $\phi_{пв}$  и  $\phi_{зв}$ . ЭСУ контролирует два выходных параметра ВВ – тягу  $R$  и частоты переднего  $n_{пв}$  и заднего  $n_{зв}$  винтов. В случае их отклонения от заданных значений, регуляторы выводят их на заданный

уровень. Тяга корректируется посредством изменения  $G_t$ , а частоты вращения через изменение углов установки лопастей [2].

### 2.2. Блок оптимизации в структурной схеме САУ ТВВД

На рис. 3 приведена структурная схема САУ с блоком оптимизации (БО). БО подбирает оптимальные значения частот вращения винтов. Данная схема отличается от предыдущей тем, что используется дополнительный блок, который в свою очередь контролирует текущее значение тяги [4].

Блок оптимизации расхода топлива выдает управляющие сигналы для шаговых двигателей, которые выставляют углы установки лопастей через регулятор соосного винтовентилятора. Формируемая ВВ тяга  $R$  сравнивается с желаемой  $R_{ж}$ , и в случае отклонения от заданной изменяется расход топлива. Установленные БО частоты  $n'_{пв}$  и  $n'_{зв}$  контролируются посредством регулятора, так как частоты вращения винтов могут меняться не только вследствие изменения углов установки, но и из-за изменения мощности свободной турбины  $N_{ст}$ , то есть расхода топлива, который является одним из основных регулирующих параметров ТВВД [5].



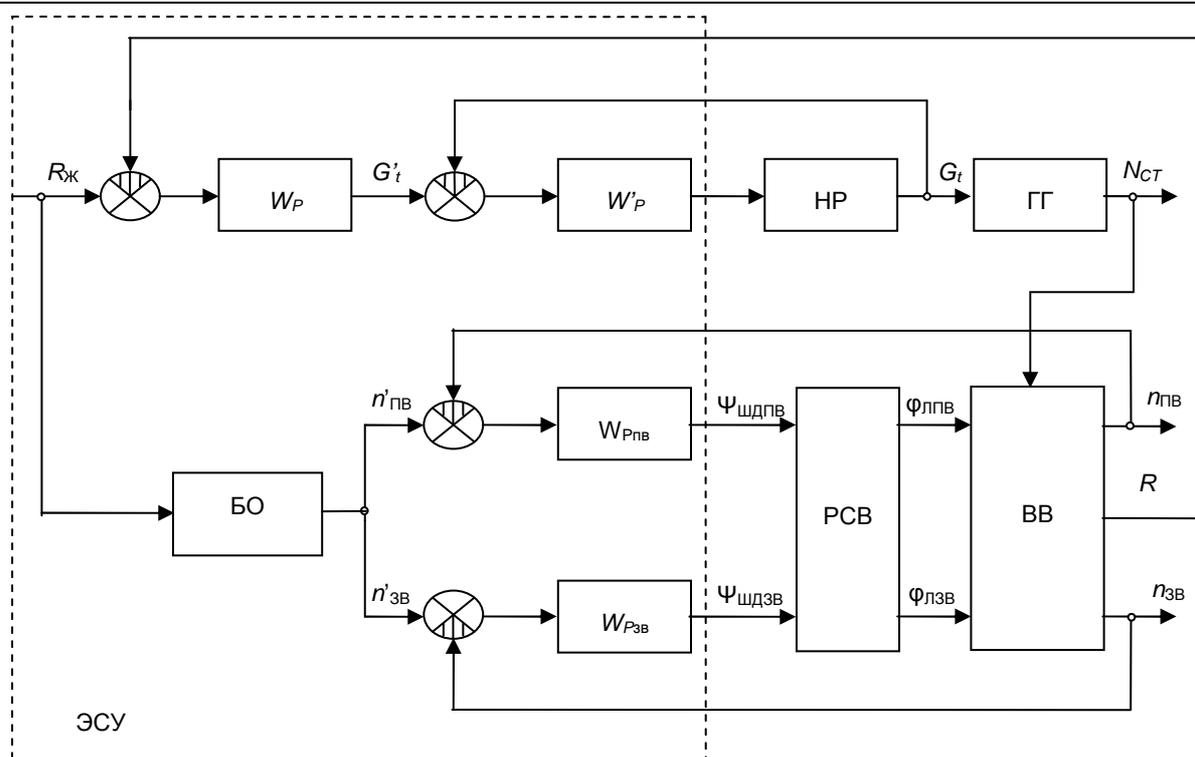


Рис. 3. Структурная схема САУ с БО

## 4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

### 4.1. Методы многопараметрической оптимизации

Задача БО состоит в повышении экономичности, то есть снижении  $G_T$  при сохранении заданной тяги  $R$ . Рассматривается крейсерский режим полета как наиболее продолжительная фаза полета, в которой возникает необходимость снижения расхода топлива. Таким образом, необходимо подобрать оптимальное соотношение частот вращения переднего и заднего винтов (ПВ, ЗВ), при котором расход топлива  $G_T$  будет минимальным. Причем изменение частот вращений винтов допускается в процессе полета самолета в пределах 5% за одну итерацию (под итерацией понимается проверка одного решения на модели двигателя). БО в процессе оптимизации контролирует значение желаемого расхода топлива  $G'_t$ , который в свою очередь зависит от тяги. Исходя из функции пригодности (1), встает задача многопараметрической оптимизации, так как эта функция учитывает несколько параметров, часть из которых присутствует в ней в неявном виде.

Существуют различные методы многопараметрической оптимизации. Оптимальными по точности и скорости являются интеллектуальные методы оптимизации. К ним относятся

генетические алгоритмы, нейронные сети, нечеткая логика.

Генетические алгоритмы представляют собой комбинированный метод, объединяющий в себе переборный и градиентные методы.

Генетические алгоритмы (ГА) – большая группа методов адаптивного поиска и многопараметрической оптимизации [3].

ГА представляют собой метод поиска глобального экстремума, основанный на использовании в процессе поиска сразу нескольких закодированных соответствующим образом точек (решений), которые образуют развивающуюся по определенным законам популяцию. При этом используется механизм отбора, основанный на эволюционной теории Дарвина, который позволяет отсеять наименее подходящие варианты.

С помощью нечеткой логики также можно искать оптимум путем пошагового подбора решений. То есть в виде решения будет выступать некое нечеткое множество, степень принадлежности к которому будет определяться с помощью функции принадлежности. Вычисляя значение функции принадлежности, можно определить насколько близко к оптимуму полученное решение и в какую сторону необходимо изменять его.

ГА может использоваться для поиска решения в достаточно большом диапазоне, а нечеткая логика больше подходит для уточнения

полученного ранее решения, то есть для поиска внутри небольшого диапазона.

Также задачу оптимизации можно решить с помощью нейронной сети Хопфилда. Нейронная сеть Хопфилда – полносвязная нейронная сеть с симметричной матрицей связей. В процессе работы динамика таких сетей сходится к одному из положений равновесия. Эти положения равновесия являются локальными минимумами функционала, называемого энергией сети. Для решения задачи оптимизации необходимо закодировать искомые параметры активностью нейронов и так подобрать связи между ними, чтобы энергия сети оказалась связанной с целевой функцией. Но при использовании оригинальной схемы Хопфилда высока вероятность застревания на локальных экстремумах [3].

#### 4.2. Подходы к решению задачи оптимизации удельного расхода топлива

Задача оптимизации решается на двух этапах (рис. 4). На первом этапе поиск решения производится на земле, на базе компьютерной модели ТВВД. На этом этапе в качестве алгоритма оптимизации используется метод ГА. Этот метод наиболее подходящий для первого этапа, так как необходимо перебрать достаточно большой диапазон значений, а в таких задачах ГА является наиболее быстрым и точным методом поиска оптимального решения. Также при работе с моделью двигателя на земле время поиска жестко не ограничено, что позволит ГА перебрать весь диапазон значений и найти наиболее точное решение. При этом рассматривается крейсерский режим работы ТВВД.

Так как целевая функция нам известна лишь в неявном виде, то каждое новое решение будет проверяться на модели ТВВД. Критерием остановки алгоритма может быть как время поиска, так и динамика изменения целевой функции, а также возможно объединение двух этих критериев остановки. Так как первый этап оптимизации проводится на земле и на базе модели двигателя, у нас есть возможность достаточно долго искать оптимальное решение, но чтобы поиск слишком не затягивался, будет использован дополнительный критерий остановки по динамике изменения значения целевой функции, то есть при сильном замедлении изменения значения функции будет произведен останов. Данный этап явля-

ется этапом настройки БО, который позволит получить решения, приближенные к конкретным полетным режимам, то есть перед каждым полетом, учитывая его условия, будут просчитываться оптимальные значения частот вращения винтов. Далее в процессе полета эти значения будут уточняться на реальном двигателе. В этом и заключается второй этап оптимизации. На втором этапе критичным становится время поиска решения. Ориентировочно оно должно составлять не более одной минуты. Если учесть время реакции двигателя на изменение управляющих сигналов в ЭСУ (около трех секунд), то на поиск решения может быть отведено не более 20 итераций. Поэтому на этом этапе будет использоваться более быстрый, но при этом и менее точный метод оптимизации. Отсюда становится понятна необходимость более точного первого уровня оптимизации. В качестве такого метода оптимизации может использоваться метод нечеткой логики, который и характеризуется пошаговым небольшим изменением параметров целевой функции с целью достижения оптимума. Он проводит поиск в небольшом диапазоне и позволяет уточнить найденное на первом этапе решение.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА

Для моделирования работы блока оптимизации удельного расхода топлива было написано приложение для ПК. Вместо модели двигателя используется таблица значений, отражающая зависимость  $G_f$  от частот вращения переднего и заднего винтов  $n_{пв}$  и  $n_{зв}$  соответственно [1].

Алгоритм работы программы моделирования приведен на рис. 5.

Перед запуском алгоритма задаются входные параметры:

1)  $R$  – тяга двигателя, так как поиск оптимального расхода топлива происходит при постоянной тяге;

2) предельные значения частот вращения переднего и заднего винтов ( $n_{vp\_max}$ ,  $n_{vp\_min}$ ,  $n_{vz\_max}$ ,  $n_{vz\_min}$ );

3) специальные параметры выбранного метода оптимизации (вероятность скрещивания  $P_{kr}$  и мутации  $P_{mut}$ ).

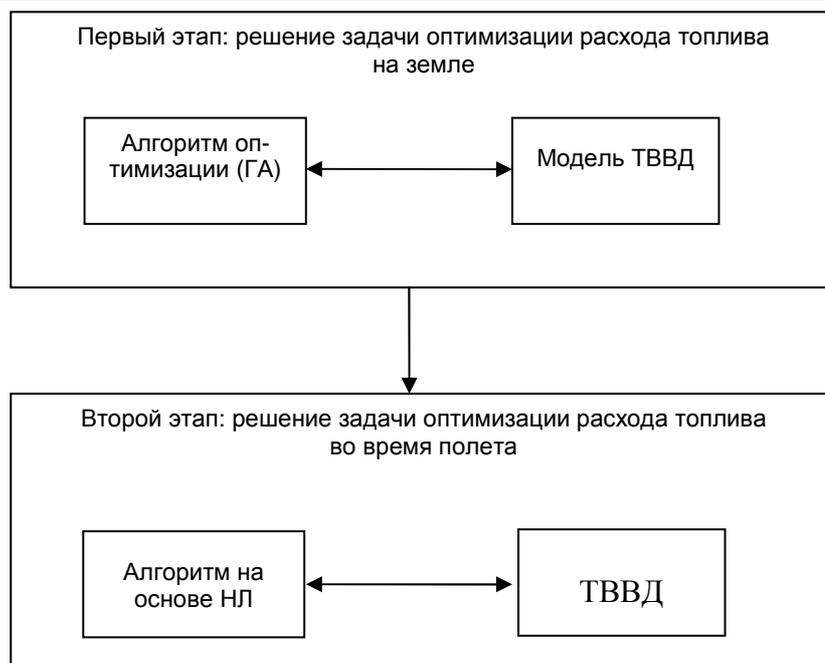


Рис. 4. Структурная схема этапов оптимизации удельного расхода топлива ТВВД

Далее генерируется массив начальных значений частот вращения винтов винтовентилятора. Значения частот вращения винтов записаны в специальные массивы – особи, которые состоят из двух значений частот – переднего и заднего винтов. Структура особи приведена на рис. 6.

Для использования генетических операторов скрещивания и мутации значения частот необходимо представить в двоичной форме. В этом случае ген представляет собой бит данных. Значения частоты в программе оптимизации представлены переменными типа `unsigned short int`, то есть беззнаковые, целые числа длиной 16 бит.

После генерации массива начальных значений частот выполняется расчет расхода топлива (функции пригодности). Так как функции пригодности в явном виде не существует, ее значение (расход топлива  $G_t$ ) вычисляется по таблице зависимости  $G_t$  от  $n_{ПВ}$  и  $n_{ЗВ}$  при заданной тяге  $R$  [1]. Работа с данной таблицей показана на рис. 9.

Далее проверяется критерий остановки поиска оптимального значения. В данном алгоритме критерий остановки выполняется тогда, когда значение расхода топлива будет меньше заданного. Если критерий остановки не выполнен, то алгоритм переходит на выполнение специальных операций по отношению к значениям частот вращения переднего и заднего винтов, которые в паре представляют собой

особь: селекция, скрещивание и мутация. Селекция проводится методом «колесо рулетки». Он заключается в том, что колесо делится на число секторов, равное числу особей в популяции, а размеры секторов определяются соответственно величинам функций пригодности данных особей. В результате вращения выпадают определенные сектора и далее в следующем поколении остаются только те особи, чьи сектора выпали при вращении рулетки. Так формируется родительский пул. Особенность этого метода применительно к данной задаче заключается в том, что два самых больших сектора (размер сектора зависит от величины функции пригодности особи, соответствующей данному сектору) увеличиваются на определенные рейтинговые коэффициенты по сравнению с остальными секторами, чтобы тем самым увеличить вероятность выпадения этих секторов. Таким образом реализован так называемый «элитный отбор» особей.

Механизм скрещивания приведен на рис. 7. С вероятностью скрещивания  $P_{Кг}$  выбираются пары особей, которые будут подвержены скрещиванию, затем случайным образом выбирается точка скрещивания – локус. Механизм скрещивания одноточечный, поэтому разрывается только одна хромосома в особи, другая остается неизменной, это показано на рис. 7.

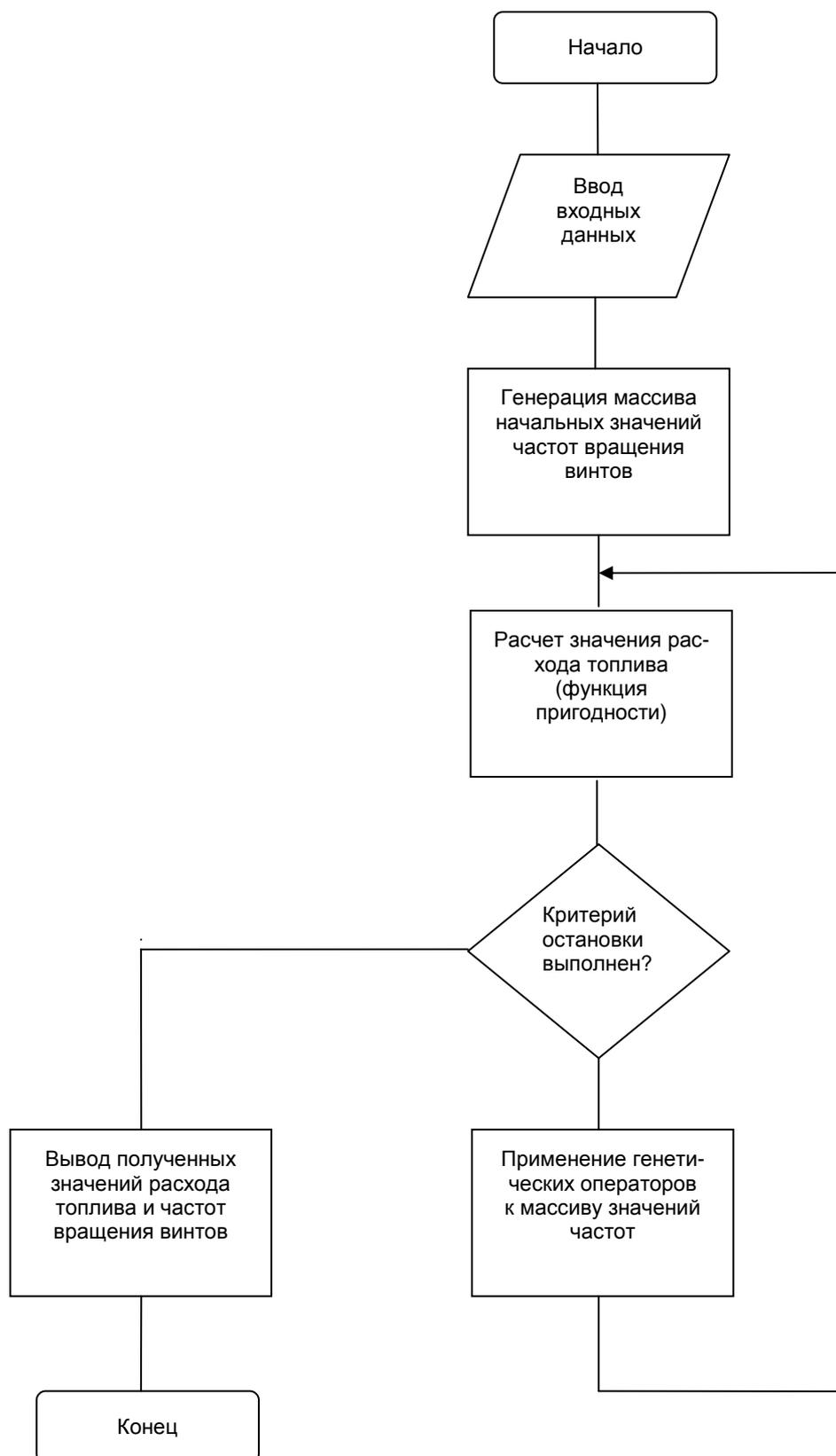


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы БО

$n_{пв}$					$n_{зв}$				
1	2	...	15	1	2	...	15		

Рис. 6. Структура особи

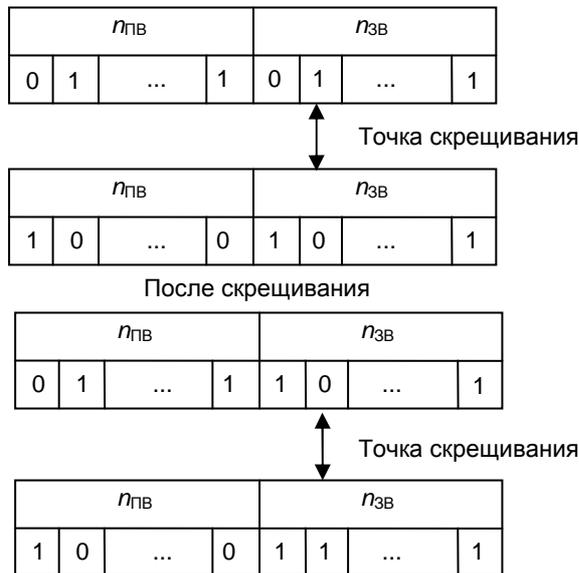


Рис. 7. Схема скрещивания

Механизм мутации приведен на рис. 8. С вероятностью мутации  $P_{mut}$  выбираются особи, которые будут подвержены мутации, а также номера генов особи. Мутация представляет собой инверсию генов, то есть изменение значения гена на противоположное.

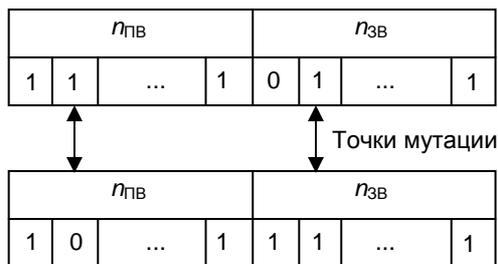


Рис. 8. Схема мутации

После применения селекции, скрещивания и мутации формируется новый массив значений частот, то есть поколение особей, для которого аналогично вычисляются соответствующие значения расхода топлива (функции пригодности). При достижении оптимального значения полученные значения  $G_i$ ,  $n_{пв}$  и  $n_{зв}$ , а также число поколений  $p$ , которое понадобилось для поиска решения, выводятся на экран.

В процессе анализа работы программы моделирования были получены следующие результаты.

Для поиска оптимального значения  $G_i$  программе моделирования требуется в среднем 40 поколений, экономия топлива составила 2%. При этом вероятность скрещивания 40%, мутации 60%. На рис. 10 приведена зависимость числа поколений  $p$ , которое потребовалось для поиска оптимального значения расхода топлива при различных соотношениях вероятностей скрещивания и мутации  $P_{kr}/P_{mut}$ , от соотношения вероятностей скрещивания и мутации. Наименьшее число поколений, а следовательно, и наивысшая скорость поиска решения имеет место при вероятности скрещивания 40%, мутации 60%. На рис. 11 приведена зависимость числа поколений  $p$  от точности поиска оптимального значения удельного расхода топлива. Из этой зависимости видно, что при изменении точности поиска в пределах 1% наблюдается резкое падение числа поколений, а следовательно, и увеличение скорости поиска решения. Необходимо заметить, что исследование проводилось на модели, представленной в виде табличных данных с небольшим количеством значений. Если исследовать более точную модель ТВВД, то время поиска решения значительно увеличится.

### ВЫВОДЫ

1. В процессе решения задачи оптимизации удельного расхода топлива ТВВД был разработан алгоритм оптимизации, позволяющий снизить удельный расход топлива не менее, чем на 2% по сравнению с режимом работы двигателя без оптимизации.

2. Работа системы оптимизации удельного расхода топлива ТВВД осуществляется в составе САУ двигателя и, таким образом, обеспечивает решение задач по удержанию заданного значения тяги при минимизации расхода топлива.

3. Введение функции самообучения системы оптимизации на обоих этапах работы (наземном и в полете) обеспечивает сохранение найденных оптимальных решений для определенных условий полета (высота полета, температура окружающей среды, давление и т. п.). И во время следующего полета при похожих условиях, система оптимизации уже будет начинать поиск решения относительно полученных ранее частот, что позволит существенно снизить время поиска решения.

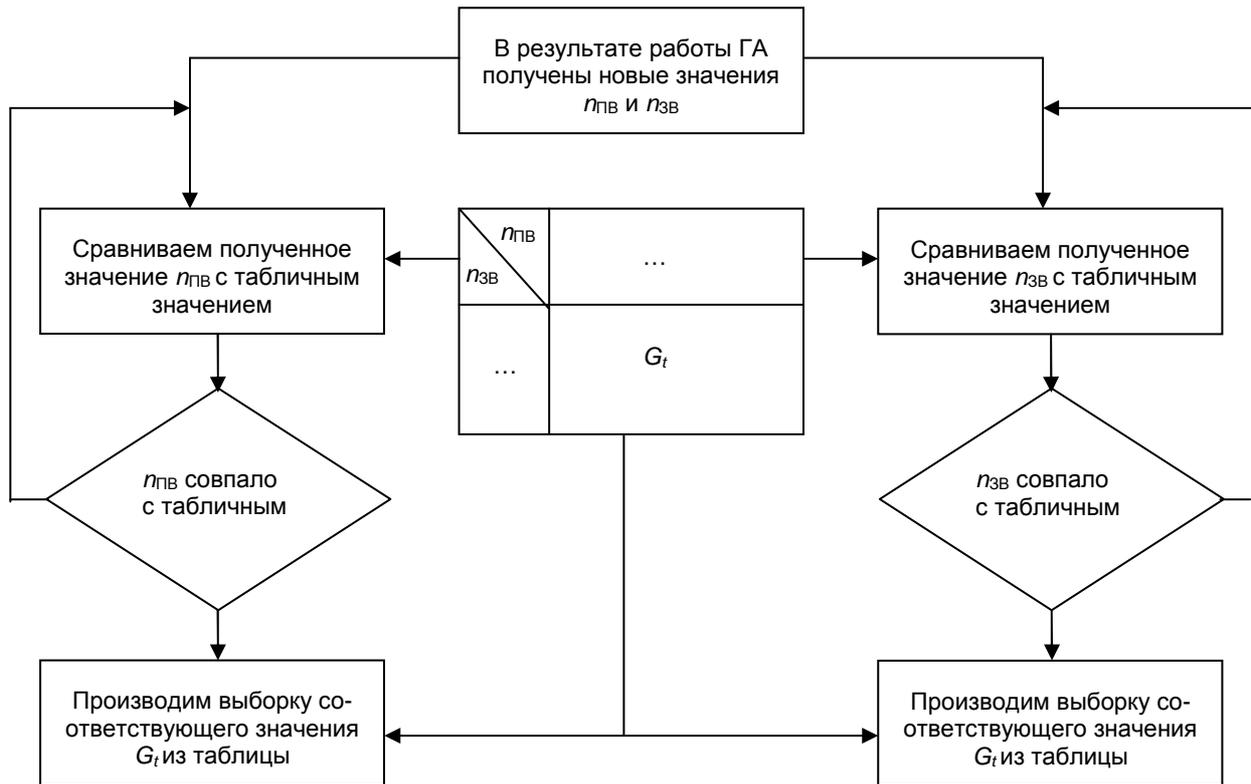


Рис. 9. Работа с таблицей зависимости  $G_T$  от  $n_{ПВ}$  и  $n_{ЗВ}$  при заданной тяге

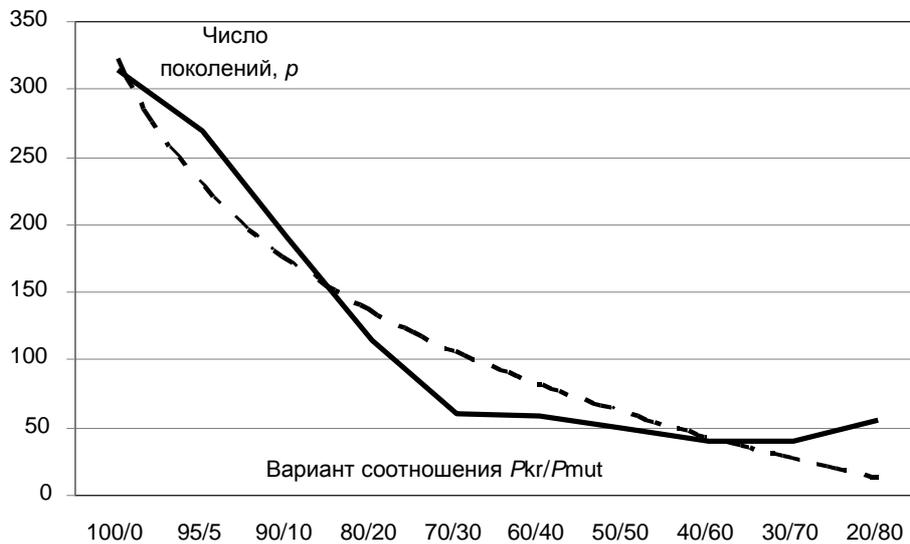
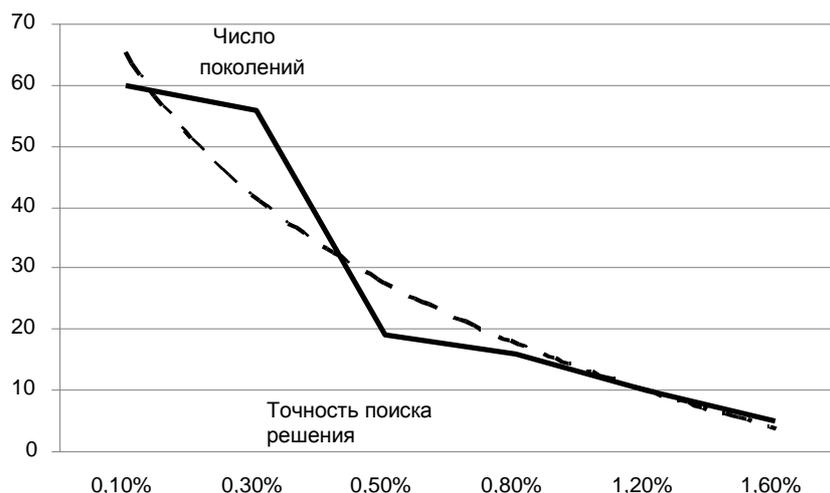


Рис. 10. Зависимость числа поколений (скорость работы алгоритма оптимизации) от соотношения вероятностей скрещивания и мутации:  
 — — экспериментальная зависимость, --- — экстраполированная зависимость



**Рис. 11.** Зависимость числа поколений (скорость работы алгоритма оптимизации) от точности поиска оптимального значения удельного расхода топлива ТВВД:  
 — — экспериментальная зависимость, --- — экстраполированная зависимость

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лянцев О. Д.** Цифровые многосвязные САУ ГТД, оптимальные по удельному расходу топлива. Уфа: Башкирская энциклопедия, 2001. 98 с.
2. Теория автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов. Управление ВРД / Под ред. А. А. Шемякова. М.: Машиностроение, 1976. 344 с.
3. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 452 с.
4. **Данилин О. Е., Бадамшин Б. И.** Задача оптимизации удельного расхода топлива ТВВД на основе интеллектуальных методов управления // Электронные устройства и системы: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2008. С. 103–106.
5. **Кусимов С. Т.** Управление динамическими системами в условиях неопределенности. М.: Наука, 1998. 452 с.
6. **Кабальнов Ю. С., Мунасыпов Р. А., Распопов Е. В.** Синтез самонастраивающихся систем с эталонной моделью: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1991. 101 с.

### ОБ АВТОРАХ

**Гусев Юрий Матвеевич**, проф. каф. пром. электр. Дипл. инженер по технике высоких напряжений (ЛПИ, 1960). Д-р техн. наук по управл. авиац. и космич. системами (ЦИАМ, 1980). Иссл. в обл. проектир. электрич. систем управления энергетич. объектами в условиях риска и неопределенности.



**Данилин Олег Евгеньевич**, канд. техн. наук, доц. той же каф. Дипл. инж. по электр. техн. (УАИ, 1982). Канд. техн. наук по системн. анализу и автоматическ. упр-ю техн. объектами (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. идентификации сложн. нелинейн. моделей и анализа и синтеза иерарх. систем упр-я.



**Бадамшин Булат Ильдарович**, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. системн. анализа, упр-я и обработки информации.

