

Ю. М. Гусев, О. Е. Данилин, Б. И. Бадамшин

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТВВД С ОПТИМИЗАЦИЕЙ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА

Предлагается подход к решению задачи построения подсистемы оптимизации удельного расхода топлива в составе системы автоматического управления (САУ) турбовинтовентиляторным двигателем (ТВВД). Решение задачи показано на примере линейно-динамической модели ТВВД с применением двухэтапного метода на основе генетических алгоритмов и нейронных сетей. Приведены результаты численного эксперимента. *Генетический алгоритм; ТВВД; математическая модель; алгоритм управления*

Проблема топливной эффективности и вытекающие отсюда задачи обеспечения экономичности и экологичности авиационного двигателя являются актуальными для современных летательных аппаратов (ЛА). Так как большинство силовых установок современного летательного аппарата являются многодвигательными, то даже незначительное повышение экономичности работы каждого из двигателей и связанная с этим экономия топлива могут улучшить характеристики летательного аппарата по дальности полета, снизить эксплуатационные затраты и уменьшить выброс вредных продуктов сгорания авиационного топлива в атмосферу.

Решение вопросов оптимального управления ТВВД как сложного динамического объекта представлены в работах В. Ю. Рутковского, Ю. С. Кабальнова, Б. Г. Ильясова, О. Д. Лянцева, В. Г. Крымского [1, 2, 3].

В статье предлагается решение задачи снижения удельного расхода топлива ТВВД на основе построения подсистемы оптимизации в составе САУ с использованием методов интеллектуального управления.

1. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

ТВВД состоит из собственно двигателя – тепловой машины и соосного винтовентилятора (ВВ) – движителя. Основными регулирующими параметрами ТВВД являются величина расхода топлива в камеру сгорания G_T , положения лопаток направляющих аппаратов компрессоров низкого и высокого давления $\alpha_{НД}$ и $\alpha_{ВД}$ и углы установки лопастей переднего и заднего винтов ВВ $\varphi_{ПВ}$, $\varphi_{ЗВ}$. Выходными величинами рассматриваемой модели ТВВД являются частоты вращения валов компрессоров низкого и высокого

давления $n_{НД}$, $n_{ВД}$, частоты вращения переднего и заднего винтов ВВ $n_{ПВ}$, $n_{ЗВ}$ и тяга ВВ $R_{ВВ}$.

Из-за слабого влияния движителя на динамические свойства двигателя целесообразно провести декомпозицию математической модели ТВВД на математическую модель двигателя (газогенератора) и математическую модель ВВ, связанные между собой через мощность на валу свободной турбины (турбины винтовентиляторов) $N_{СТ}$. Декомпозиция модели ТВВД на модели газогенератора (ГГ) и ВВ приведена на рис. 1. С целью уменьшения размерности уравнений математической модели газогенератора из всех регулирующих параметров двигателя рассматривается только величина расхода топлива G_T как параметр, непосредственно определяющий режим работы газогенератора [4, 5].

Предполагается, что остальные регулирующие параметры изменяются по программам регулирования с помощью регуляторов, которые не оказывают существенного влияния на статические и динамические характеристики двигателя. При решении задач синтеза и анализа САУ ТВВД наиболее предпочтительным с точки зрения использования вычислительных ресурсов является применение упрощенных математических моделей объекта управления, описывающих характеристики ТВВД в виде линейных динамических моделей с основными нелинейностями.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

С целью решения задачи оптимизации удельного расхода топлива ТВВД в его САУ вводится подсистема оптимизации – блок оптимизации (БО). Задача БО заключается в снижении удельного расхода топлива $C_{уд}$ при постоянной тяге R за счет корректировки значений частот вращения переднего $n_{ПВ}$ и заднего $n_{ЗВ}$.

винтов ВВ и углов установки направляющих аппаратов (НА) компрессора низкого давления (КНД) $\alpha_{\text{НД}}$ и компрессора высокого давления (КВД) $\alpha_{\text{ВД}}$.

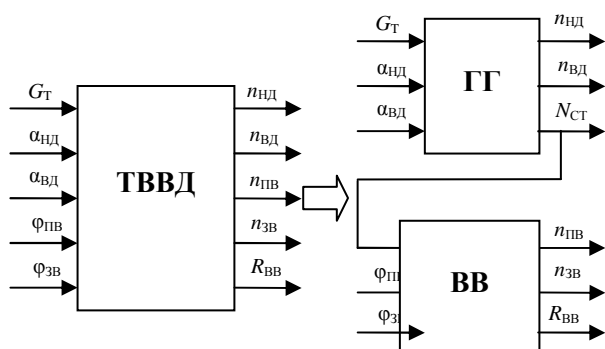


Рис. 1. Декомпозиция модели ТВВД на модели ГГ и ВВ

Решение задачи оптимизации предлагается с использованием двухэтапного метода. На первом этапе поиск решения ведется на базе математической модели ТВВД. На втором этапе производится корректировка найденного на первом этапе решения для конкретных условий полета – высота полета H , число M полета, заданная тяга $R_{\text{ж}}$.

Основной целью разработанного метода является повышение топливной экономичности ТВВД.

Поставленная цель достигается при решении следующих задач:

- разработка алгоритма оптимизации удельного расхода топлива ТВВД;
- разработка структуры подсистемы оптимизации САУ ТВВД;
- разработка метода оптимизации удельного расхода топлива ТВВД на основе генетических алгоритмов и нейронных сетей.

3. МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА ТВВД

В силу слабого воздействия ВВ ТВВД на динамические свойства ГГ их модели допустимо рассматривать как автономные, поэтому можно оптимизировать удельный расход топлива отдельно по ВВ и по ГГ.

В отличие от метода, предложенного в [2], снижение расхода топлива достигается не только за счет оптимизации программы регулирования частот вращения винтов ВВ, но и за счет изменения углов установки НА КНД и КВД. Отличие имеется и в самой методике оптимизации – используется двухэтапный метод оптимизации с применением интеллектуальных мето-

дов управления. Блок-схема этапов оптимизации приведена на рис. 2.

На первом этапе алгоритм оптимизации работает с математической моделью (ММ) ТВВД. В качестве алгоритма оптимизации на первом этапе используется генетический алгоритм (ГА). Его преимущество над другими методами оптимизации заключается в том, что он работает непосредственно с целевой функцией, а не с ее производной, позволяет находить глобальный экстремум, обеспечивает оптимальное время поиска решения многопараметрических задач оптимизации, не ограничивает количество варьируемых параметров целевой функции, то есть существует возможность расширения состава управляющих величин [6].

На втором этапе оптимизации используется нейронная сеть (НС). В результате работы первого этапа оптимизации формируется обучающая выборка, содержащая значения частот вращения винтов винтовентилятора и углов установки НА для различных условий полета – число M полета, высота полета H и заданная тяга $R_{\text{ж}}$, при которых достигается минимальный удельный расход топлива $C_{\text{уд}}$. По этим данным производится обучение нейросетевой модели подсистемы оптимизации. Преимущества использования НС: она способна интерполировать и находить решение между точками обучения; все вычисления в сети производятся параллельно и поиск решения с помощью обученной НС занимает одну итерацию (при использовании НС прямого распространения).

Схема обучения подсистемы оптимизации в процессе эксплуатации ЛА приведена на рис. 3.

Перед началом эксплуатации подсистемы оптимизации на конкретном ЛА производится сбор полетных данных для двигательной установки (ДУ) во время полета ЛА на различных стационарных режимах.

Далее производится считывание накопленной во время полета информации, осуществляется подстройка ММ ТВВД по полученным полетным данным. Затем осуществляется первый этап оптимизации, обучение НС для подсистемы оптимизации и включение ее в состав САУ ТВВД, обновление программного обеспечения электронной системы управления (ЭСУ) ДУ, запись переобученной НС подсистемы оптимизации. Далее осуществляется второй этап оптимизации – эксплуатация подсистемы оптимизации в составе САУ ТВВД в полете.

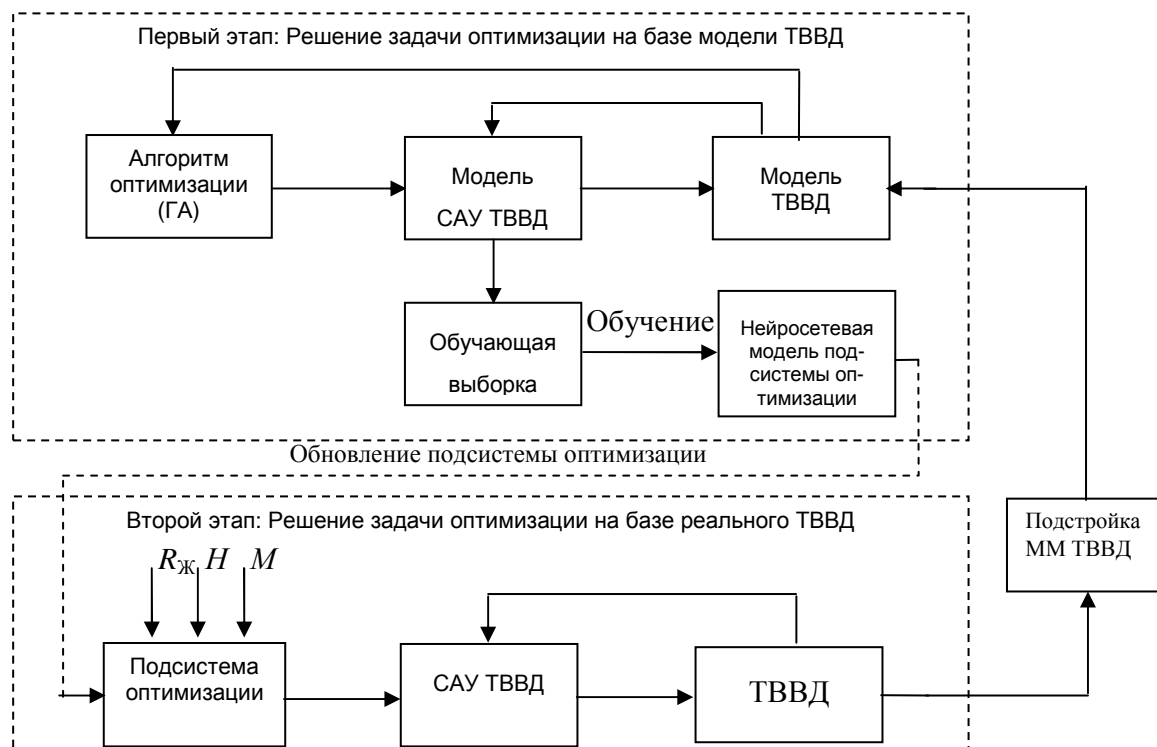


Рис. 2. Структурная схема этапов оптимизации удельного расхода топлива ТВВД

Подстройка подобной модели ТВВД должна проводиться с определенной периодичностью. Так как данные управляющие параметры получены на базе модели, которая корректируется в соответствии с характеристиками конкретного двигателя, то предлагаемый метод оптимизации можно отнести к комбинированному способу, то есть включающему в себя как пассивную, так и активную оптимизацию [7].

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА НА БАЗЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Целевая функция задачи оптимизации удельного расхода топлива ТВВД задана в следующем виде:

$$C_{уд} = F(n_{пв}, n_{зв}, \alpha_{вд}, \alpha_{нд}) \quad (1)$$

при $R = \text{const}$, $\Delta K_y < 20\%$, где $n_{пв}$ – частота вращения переднего винта ВВ, $n_{зв}$ – частота вращения заднего винта ВВ, $\alpha_{нд}$ – угол установки ВНА КНД, $\alpha_{вд}$ – угол установки ВНА КВД, R – тяга двигателя, ΔK_y – коэффициент запаса устойчивости компрессора. Значение ΔK_y должно быть меньше 20%, так как это предельная величина запаса устойчивости компрессора для двигателей транспортной авиации.

Главное отличие данной функции пригодности от той, что приведена в работе [2]: добавлены аргументы $\alpha_{вд}$, $\alpha_{нд}$ – углы направляющих аппаратов высокого давления и низкого давления соответственно, то есть размерность задачи оптимизации увеличена в два раза.

Целевая функция задана неявно, так как достаточно трудно учесть все параметры, влияющие на расход топлива. Поэтому решения (значения $n_{пв}$, $n_{зв}$, $\alpha_{вд}$, $\alpha_{нд}$) каждый раз должны проверяться на модели ТВВД, если речь идет о первом этапе оптимизации или на реальном двигателе в полете. Неявное задание целевой функции означает, что в алгоритме оптимизации не будет использоваться алгебраическое выражение функции. Так как полное описание всех параметров, влияющих на расход топлива ТВВД, приведет к сложному и громоздкому алгебраическому выражению, на расчет которого потребуется недопустимое количество машинного времени, поэтому оптимальным вариантом для отладки алгоритма оптимизации является использование математической модели ТВВД, в которой каждое решение будет просчитываться столько же времени, сколько реальный двигатель будет реагировать на подачу со стороны ЭСУ управляющих сигналов для регулятора соосных винтов, который, в свою очередь, устанавливает углы положения лопастей винта.

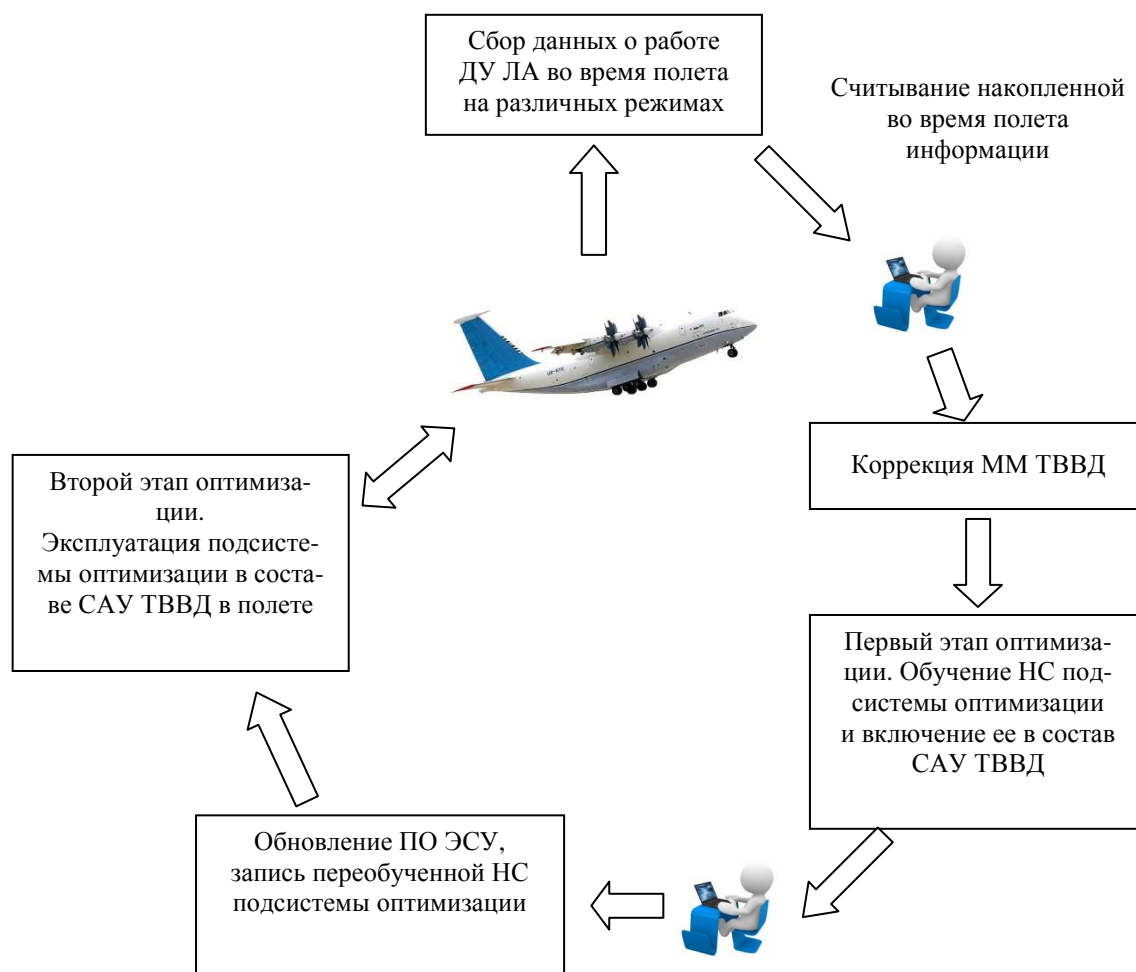


Рис. 3. Схема обучения подсистемы оптимизации в процессе эксплуатации ЛА

Из-за изменения угла установки лопастей изменяются частоты вращения винтов, а соответственно, и тяга двигателя. ЭСУ отслеживает реальную тягу двигателя и регулирует ее изменением расхода топлива. Таким образом, влияя на углы установки лопастей, а следовательно, и на частоты вращения винтов, мы влияем на расход топлива.

Блок-схема модифицированного ГА для первого этапа оптимизации приведена на рис. 4. Рассмотрим работу ГА. Перед запуском алгоритма задаются входные параметры:

- режим полета и соответствующие режиму полета $R_{ж}$ – заданная тяга, высота полета H , число M полета;

- предельные значения частот вращения переднего и заднего винтов;
- предельные значения углов установки направляющих аппаратов;
- вероятности скрещивания и мутации.

Далее генерируется начальная популяция особей. Особь представляет собой четыре хромосомы, каждая из которых определяет один из четырех параметров: значения частоты вращения переднего и заднего винтов и углы установки направляющих аппаратов компрессоров низкого и высокого давления. Структура особи приведена на рис. 5.

После генерации начальной популяции выполняется расчет функции пригодности. Так как функции пригодности в явном виде не существует, ее значение (удельный расход топлива $C_{уд}$) вычисляется по модели ТВВД.

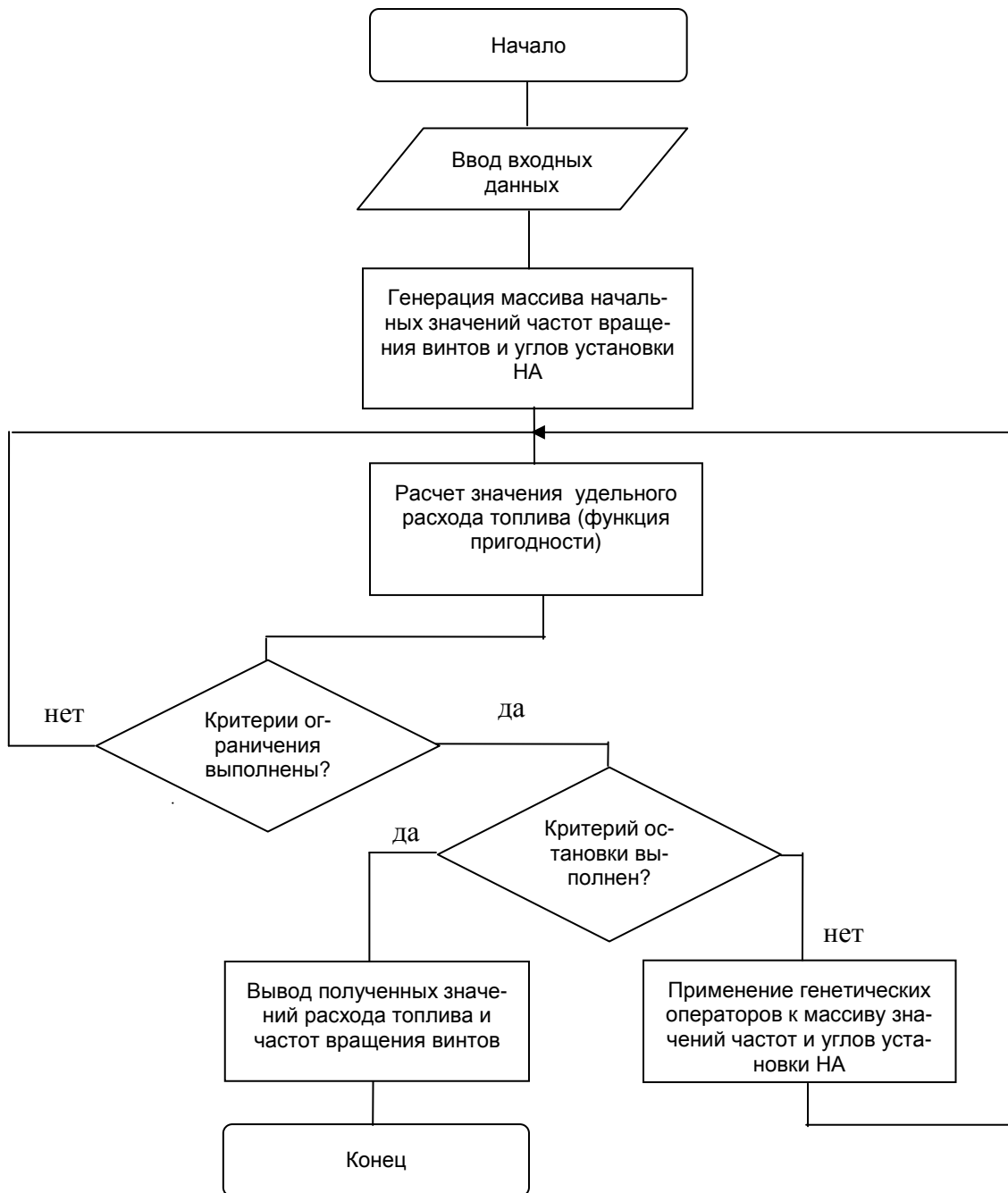


Рис. 4. Блок-схема модифицированного ГА первого этапа оптимизации

$n_{ПВ}$				$n_{ЗВ}$				$\alpha_{НД}$				$\alpha_{ВД}$			
0	1	...	14 15	0	1	...	14 15	0	1	...	14 15	0	1	...	14 15

Рис. 5. Структура особи

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА

5.1. Синтез имитационной модели САУ ТВВД

Для анализа работы алгоритма оптимизации удельного расхода топлива необходима имитационная модель САУ ТВВД.

Имитационная модель САУ ТВВД состоит из неизменяемой части – ГГ и ВВ и изменяемой – регуляторы, входящие в состав ЭСУ.

Рассмотрим подробнее структуру синтезированной САУ ТВВД совместно с подсистемой оптимизации (БО), представленную на рис. 6, где $\alpha_{руд}$ – угол установки ручки управления двигателем (РУД), $\psi_{шдпв}$, $\psi_{шдзв}$ – сигналы управления шаговыми двигателями переднего и заднего винтов ВВ, которые входят в состав регулятора соосного винтовентилятора (РСВ), $I_{нд}$, $I_{вд}$ – сигналы управления регулятором направляющих аппаратов (РНА), G'_T – заданный расход топлива, разница между заданным и фактическим расходом топлива является управляющей величиной для насоса-регулятора (НР).

Подсистему оптимизации можно рассматривать как источник внешнего воздействия на САУ, который вносит возмущения путем изменения частот вращения винтов ВВ и углов установки НА. Изменение частот вращений винтов ВВ и углов установки НА ведет к колебательным процессам в САУ на время переходного процесса, поэтому быстродействие системы и запас устойчивости во многом определяются регуляторами частот вращения винтов и углов установки НА. На вход подсистемы оптимизации поступают три сигнала: заданная тяга $R_{ж}$, высота H и число M полета, на выходе выдаются значения частот вращения вентиляторов $n'_{пв}$, $n'_{зв}$ и углов установки НА $\alpha'_{нд}$ и $\alpha'_{вд}$, при которых достигается минимальный удельный расход топлива для текущих условий полета. Полученные значения сигналов $n'_{пв}$, $n'_{зв}$ и $\alpha'_{нд}$, $\alpha'_{вд}$ поддерживаются на заданном уровне с помощью регуляторов.

5.2. Анализ работы генетического алгоритма оптимизации удельного расхода топлива с использованием имитационной модели САУ ТВВД

В процессе анализа работы имитационной модели совместно с подсистемой оптимизации, реализующей метод ГА, был проведен ряд ис-

следований. Целью исследований являлась оценка эффективности использования ГА в составе имитационной модели САУ ТВВД. В процессе исследования производилась оценка среднего числа поколений, необходимого для поиска оптимального решения, оценка оптимального соотношения вероятностей скрещивания и мутации.

Для поиска оптимального значения удельного расхода топлива программе моделирования потребовалось в среднем 10 поколений, экономия топлива при этом составила 5,5%. При этом была выбрана вероятность скрещивания 0,6, вероятность мутации 0,4. Каждое поколение состоит из 10 особей, то есть решений. На проверку одного решения требовалось порядка 10 секунд – это время включает в себя учет инерционности самого ТВВД, а также время переходных процессов в САУ ТВВД. Таким образом, на поиск оптимального значения удельного расхода топлива требуется перебрать в среднем 110 решений, на что уйдет около 1100 секунд (~18 минут). Эксперимент проводился на ПК типа Core 2 Duo, 1 Гб ОЗУ.

На рис. 7 приведена зависимость числа поколений p , которое потребовалось для поиска минимального значения расхода топлива $C_{уд}$ при различных соотношениях вероятностей скрещивания и мутации $P_{кр} \setminus P_{mut}$. Наименьшее число поколений, а следовательно, и наивысшая скорость поиска решения имеет место при вероятности скрещивания 0,4, мутации 0,6. Наибольшее число поколений требуется ГА для поиска оптимального решения, когда вероятность мутации равна 0, то есть мутация вообще исключена. В этом случае обновление поколения происходит только за счет скрещивания особей внутри поколения, то есть новых значений поколение не получает, и в итоге особи вырождаются. Если вероятность мутации сделать ненулевой, то число поколений, необходимых ГА для поиска оптимального решения, резко пойдет вниз. Это происходит из-за того, что мутация позволяет «прыгать» во всем диапазоне возможных решений, исключая попадание алгоритма в локальные экстремумы. Но если вероятность мутации будет превышать вероятность скрещивания, то алгоритм будет постоянно «прыгать» по всему диапазону решений и при этом терять решения, поэтому число поколений возрастает при значительной вероятности мутации.

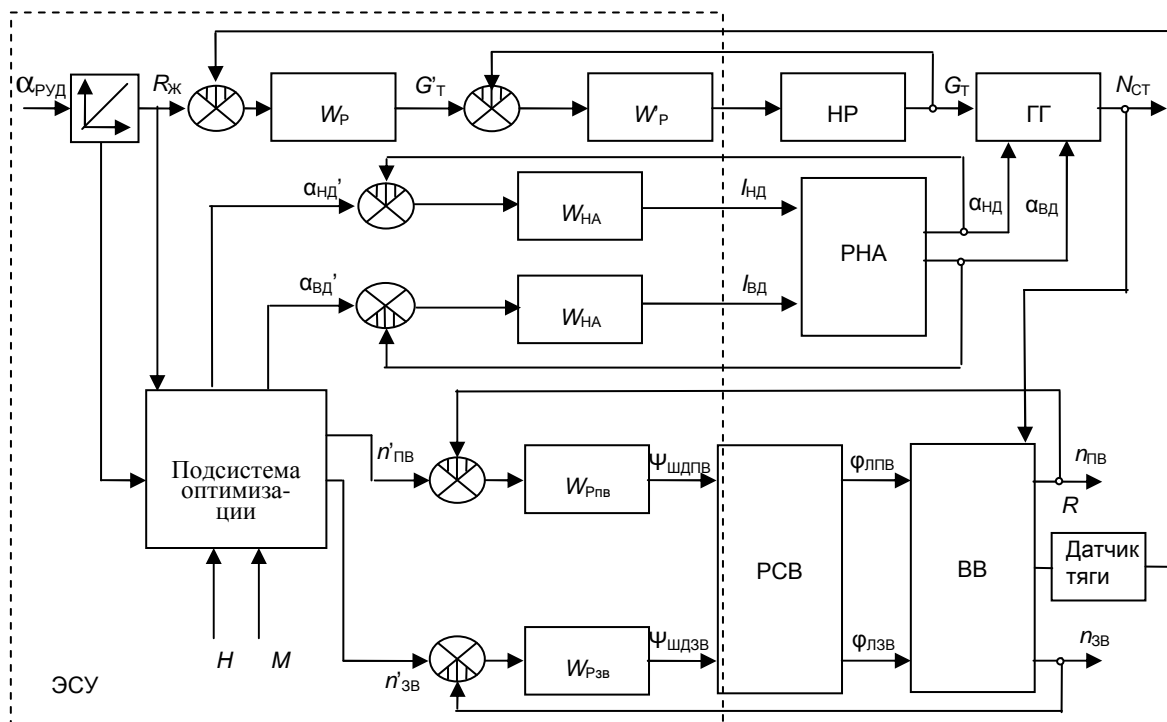


Рис. 6. Структура САУ ТВД совместно с подсистемой оптимизации

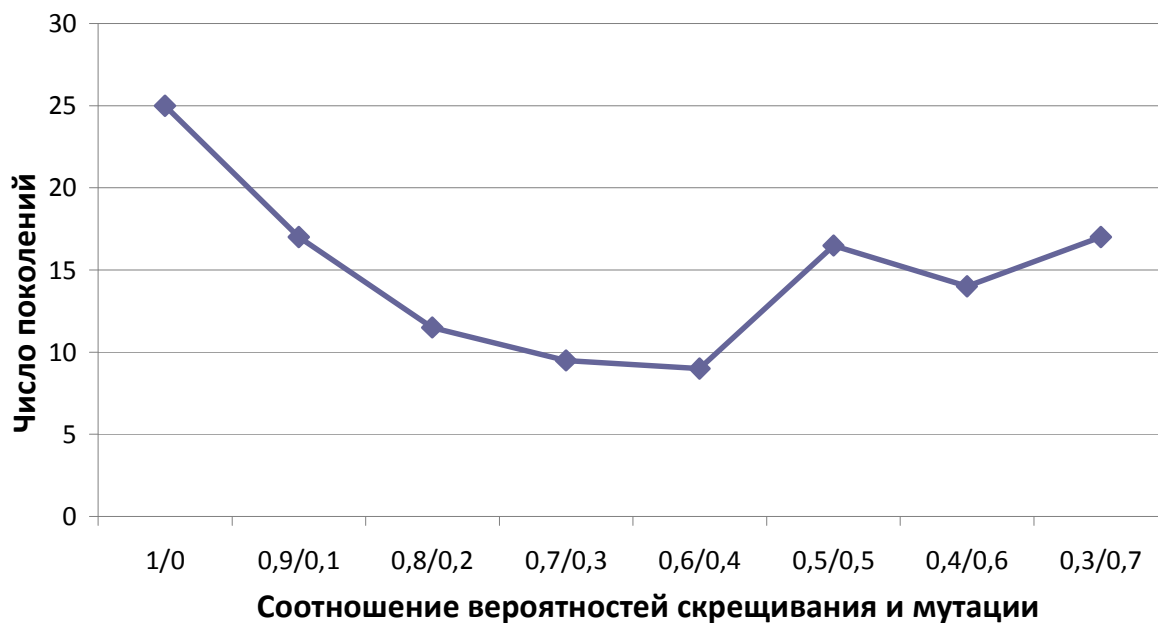


Рис. 7. Зависимость числа поколений (скорость работы алгоритма оптимизации) от соотношения вероятностей скрещивания и мутации

Анализ характера изменения удельного расхода топлива ТВВД $C_{уд}$ при различных значениях частот $n_{ПВ}$ и $n_{ЗВ}$ для крейсерского режима полета (высота полета $H = 11$ км, число M полета $M = 0,7$) показал, что увеличение частот вращения как переднего, так и заднего винтов, по сравнению с номинальными значениями этих частот для данного режима полета (одинаковые для обоих винтов ВВ), приводит к снижению как абсолютного, так и удельного расхода топлива ТВВД. Характер изменения относительной величины удельного расхода топлива $C_{уд}$ в зависимости от изменения частот вращения винтов ВВ отражен в таблице и в виде графической зависимости на рис. 8.

Из таблицы видно, что наименьший расход топлива при постоянной тяге получается при увеличении частот вращения переднего и заднего винтов ВВ относительно штатных настроек. В таблице приведены относительные величины частот вращения – $\bar{n}_{ПВ}$, $\bar{n}_{ЗВ}$ и удельного расхода топлива $\bar{C}_{уд}$. За единицу приняты штатные настройки частот вращения винтов ВВ.

Таким образом, минимальный удельный расход топлива составил 0,945 ($\bar{n}_{ПВ} = 1,1294$, $\bar{n}_{ЗВ} = 1,0117$), что на 5,5% ниже номинального расхода топлива при штатных настройках частот вращения винтов ВВ.

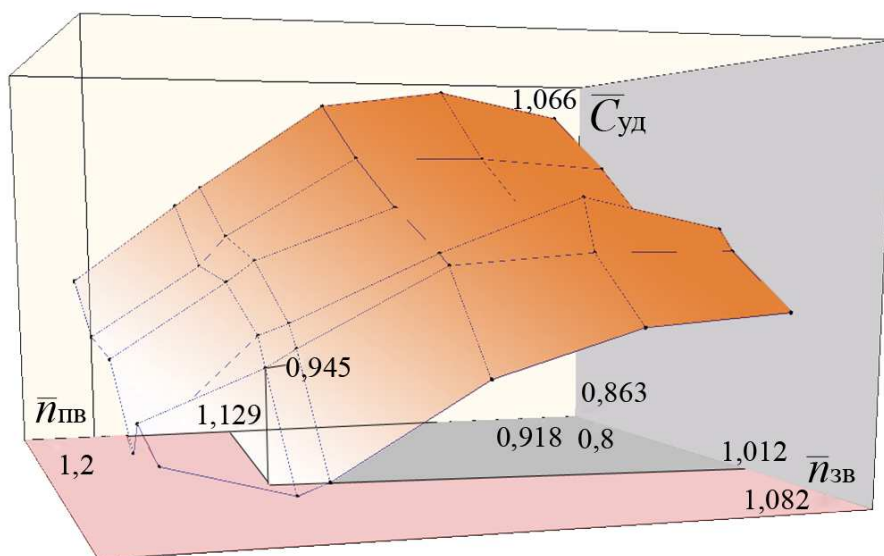


Рис. 8. Зависимость расхода топлива ТВВД от частот вращения винтов ВВ

Зависимость расхода топлива ТВВД от частот вращения винтов ВВ

$\bar{n}_{ЗВ} \backslash \bar{n}_{ПВ}$	0,9411	1	1,0588	1,1177	1,1294	1,1882
0,8235	1,046	1,059	1,051	1,005	0,995	0,954
0,8823	1,015	1,020	1,020	0,980	0,964	0,929
0,9411	0,980	0,990	0,995	0,970	0,959	0,924
1	0,985	1	0,975	0,960	0,950	0,888
1,0117	0,975	0,975	0,970	0,954	0,945	0,904
1,0705	0,949	0,944	0,924	0,883	0,878	0,893

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛОВ УСТАНОВКИ НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ КОМПРЕССОРА ТВВД НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА

В результате расчета термодинамической модели двигателя [8] в пакете программ Gas-Turb получен ряд зависимостей, приведенных ниже. Рассматривается крейсерский режим (высота полета $H = 11$ км, число M полета $M = 0,7$, мощность свободной турбины $N_{СТ} = \text{const}$). Частоты вращения винтов ВВ, при которых достигается оптимальный расход топлива, установлены, тяга постоянная. Изменяется угол установки входного направляющего аппарата (ВНА) только для КНД.

С увеличением угла установки входного направляющего аппарата КНД расход воздуха увеличивается, что ведет к снижению частоты вращения ротора КНД. Угол установки ВНА КВД практически не влияет на расход топлива и устойчивость компрессора, так как расход воздуха определяется входным сечением КНД.

При $N_{СТ} = \text{const}$ в результате увеличения расхода воздуха и снижения частот вращения роторов КНД и КВД температура газов падает.

С увеличением $\alpha_{нд}$ ($\alpha_{вд} = \text{const}$) запас устойчивости КНД $\Delta K_{уКНД}$ снижается до некоторого предельного значения (~20% для двигателей транспортной авиации) – рис. 9. Это определяет диапазон изменения угла ВНА КНД от 0 до 21°. При этом запас устойчивости КВД растет.

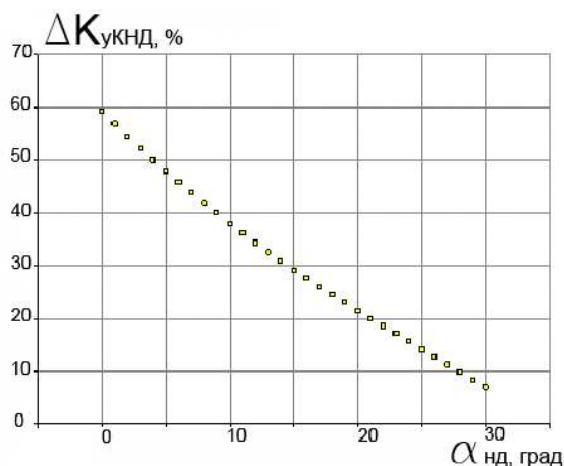


Рис. 9. Зависимость запаса устойчивости КНД $\Delta K_{уКНД}$ от угла установки ВНА

Зависимость относительной величины удельного расхода топлива $\bar{C}_{уд}$ от угла установки ВНА приведена на рис. 10. Таким образом, с увеличением угла установки ВНА КНД увеличивается расход воздуха, что приводит к

снижению частот вращения роторов КНД и КВД, что, в свою очередь, ведет к снижению температуры газов, из чего следует, что удельный расход топлива падает.

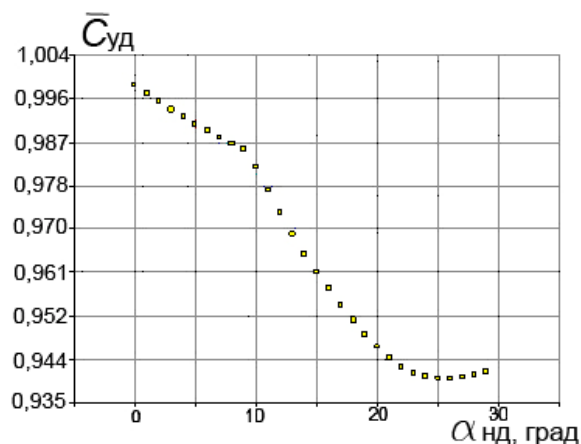


Рис. 10. Зависимость удельного расхода топлива от угла установки ВНА

Минимальное значение $\bar{C}_{уд}$ достигается при $\alpha_{нд} = 25^\circ$, но поскольку диапазон изменения угла ограничен на 21° , минимальный допустимый удельный расход топлива составляет $\bar{C}_{уд} = 0,946$. Относительная экономия удельного расхода топлива по сравнению со штатным режимом ($\bar{C}_{уд} = 1, \alpha_{нд} = 0^\circ$) составляет 5,4%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен метод оптимизации удельного расхода топлива ТВВД, основанный на двухэтапном подходе с применением генетических алгоритмов и нейронных сетей, который позволяет обеспечить снижение удельного расхода топлива за счет оптимизации программ регулирования как частот вращения винтов винтовентилятора, так и углов установки направляющих аппаратов.

Разработана структура подсистемы оптимизации, которая введена в состав базовой САУ ТВВД на программном уровне, без внесения изменений в аппаратную часть.

Показано, что за счет управления частотами вращения винтов ВВ достигается снижение удельного расхода топлива на 5,5%, а за счет управления углами установки КНД достигается снижение удельного расхода топлива на 5,4% по сравнению со штатными установками для крейсерского режима полета..

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивные системы управления газотурбинными двигателями летательных аппаратов / В. Ю. Рутковский [и др.]. М.: МАИ, 1994. 224 с.
2. **Лянцев О. Д.** Цифровые многосвязные САУ ГТД, оптимальные по удельному расходу топлива. Уфа: Башкирская энциклопедия, 2001. 98 с.
3. Управление динамическими системами в условиях неопределенности / С. Т. Кусимов [и др.]; под ред. С. Т. Кусимова, Б. Г. Ильясова, В. И. Васильева. М.: Наука, 1998. 452 с.
4. **Куликов Г. Г.** Динамические модели авиационных газотурбинных двигателей для создания и эксплуатации систем управления // Вестник УГАТУ. 2000. № 2. С. 157–165.
5. Системный анализ и организация интегрированного управления самолетом с турбовинтовентиляторными двигателями при посадке на короткие площадки / Г. Г. Куликов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 10, № 2 (27). С. 12–19.
6. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с.
7. **Гайсинский С. Я., Караваяев И. В.** К выбору законов оптимизации режимов работы

ТВВД // Автоматическое регулирование двигателей летательных аппаратов. Тр. ЦИАМ. 1990. № 1263. Вып. 26. С. 40–50.

8. Термогазодинамические расчеты авиационных ГТД: учеб. пособие / А. М. Ахметзянов [и др.]. Уфа: УАИ, 1990. 340 с.

ОБ АВТОРАХ

Гусев Юрий Матвеевич, проф. каф. электр. биомед. техн., засл. деятель науки РФ и РБ, академик МАН ВШ. 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, доц. той же каф. Дипл. инженер по электронной технике (УАИ, 1982). Канд. техн. наук по системн. анализу и автоматическ. управлению техническ. объектами (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. идентификации сложных нелинейных моделей и анализа и синтеза иерархических систем управления, контроля, диагностики сложн. техн. объектов.

Бадамшин Булат Ильдарович, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий по электронике и микроэлектронике (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. системного анализа, управления и обработки информации.