

ЗАЩИТА ОТ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЯГИ В ПОЛЕТЕ, СОЗДАВАЕМОЙ ТУРБОВИНТОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ВОЗДУШНЫМ ВИНТОМ ИЗМЕНЯЕМОГО ШАГА

А. В. ИВАНОВ, А. М. ДАНИЛИХИН, А. В. АФАНАСЬЕВА, В. А. ШУКАЛЮК

vint@aerosila.ru

АО «НПП «Аэросила»

Поступила в редакцию 21.11.2023

Аннотация. В статье рассмотрены основные причины возникновения в полете отрицательной тяги турбовинтового двигателя с воздушным винтом изменяемого шага, приведено подробное описание существующих методов и средств защиты от возникновения отрицательной тяги, предложен современный подход к построению системы защиты с применением расчетного значения тяги воздушного винта.

Ключевые слова: воздушный винт; отрицательная тяга; турбовинтовой двигатель; защита от отрицательной тяги; расчет тяги воздушного винта; управление по неизменяемому параметру; управление по тяге воздушного винта.

ВВЕДЕНИЕ

Применение турбовинтовых двигателей (ТВД) с воздушными винтами (ВВ) изменяемого шага на летательных аппаратах (ЛА), в отличие от применения турбореактивных двигателей, характеризуется опасностью возникновения отрицательной тяги в полете [1]. В настоящее время системы автоматического управления (САУ) и системы защиты ТВД проектируются таким образом, что появление отрицательной тяги является практически невероятным событием и может произойти только вследствие возникновения нескольких (как минимум двух) отказов. Однако при некорректно составленных алгоритмах защиты или при неправильном расчете численных значений, используемых в условиях таких алгоритмов, возникновение отрицательной тяги может произойти вследствие единичного отказа в системе двигатель-ВВ-САУ. Рассмотрим подробнее вызванные отказом ТВД ситуации, приводящие к возможному возникновению отрицательной тяги, и применяемые способы защиты от отрицательной тяги.

ОТКАЗЫ ТУРБОВИНТОВОГО ДВИГАТЕЛЯ, ПРИВОДЯЩИЕ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЯГИ. СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЯГИ

Наиболее опасные ситуации, приводящие к возможному возникновению отрицательной тяги ТВД в полете, можно классифицировать по двум группам в зависимости от источника возникновения отказа:

а) отказы двигателя или его САУ, приводящие к снижению мощности на валу ВВ:

– погасание камеры сгорания;

– помпаж;

– самопроизвольное уменьшение расхода топлива в камеру сгорания;

– другие отказы, приводящие к самопроизвольному уменьшению режима газогенератора;

б) отказы ВВ или его САУ, приводящие к самопроизвольному перемещению лопастей ВВ в сторону минимального сопротивления вращению (в сторону облегчения), как правило, сопровождающемуся увеличением частоты вращения ВВ (раскруткой):

– разгерметизация гидравлического канала управления ВВ (для ВВ обратной схемы с гидравлическим механизмом изменения шага);

- ложная выдача гидравлической или электрической команды на перемещение лопастей ВВ в сторону облегчения (для ВВ прямой и обратной схем с гидравлическим или электромеханическим механизмами изменения шага);
- другие отказы, приводящие к самопроизвольному перемещению лопастей ВВ в сторону облегчения.

Для парирования описанных выше отказов применяются следующие защитные устройства ВВ и его САУ [2]:

- промежуточный упор, предотвращающий перемещение лопастей ВВ ниже минимального полетного угла;
- гидравлический или механический фиксатор шага ВВ, позволяющий ограничить перемещение лопастей ВВ в сторону облегчения в момент срабатывания;
- гидравлический или механический затяжелитель, срабатывание которого приводит к перемещению лопастей ВВ в сторону флюгерного углового положения (в сторону затяжеления);
- система флюгерования (ручная и автоматическая), срабатывание которой приводит к установке лопастей ВВ во флюгерное угловое положение.

Наряду с перечисленными защитными устройствами также возможно применение различных устройств ограничения скорости перемещения лопастей ВВ в сторону облегчения (дроссели, программные каналы ограничения и др.), если такие устройства не оказывают критического влияния на управляемость ВВ.

Как правило, промежуточный упор является полностью автономным (надсистемным по отношению к САУ ВВ) устройством, конструктивно реализуемым непосредственно во втулке ВВ. Принцип действия промежуточного упора заключается в выдаче команды (гидравлической или механической) на срабатывание фиксатора шага ВВ (гидравлического или механического) при выполнении следующего условия: $\varphi \leq \varphi_{пу}$, где φ – угловое положение лопастей ВВ; $\varphi_{пу}$ – заданное угловое положение лопастей ВВ, при котором происходит срабатывание промежуточного упора.

Ввиду отсутствия возможности перенастройки величины $\varphi_{пу}$ в процессе работы ТВД в зависимости от скорости и высоты полета (следствие полной автономности устройства), промежуточный упор является эффективным средством защиты от возникновения большой отрицательной тяги только на режимах малого газа ТВД при снижении ЛА для посадки. На режимах высокой мощности, на больших высотах и скоростях полета отрицательная тяга может возникнуть еще до установки лопастей ВВ на промежуточный упор [3]. На рис. 1 представлены результаты моделирования отказной ситуации ВВ мощностью 3000 л.с. с самопроизвольным перемещением лопастей ВВ в сторону облегчения. Видно, что отрицательная тяга возникает при нахождении лопастей ВВ выше промежуточного упора. Для защиты ТВД от возникновения недопустимой отрицательной тяги во всем диапазоне эксплуатации ТВД в настоящее время могут применяться следующие условия, при выполнении которых САУ по заложенным алгоритмам выдает команды на защитные устройства [2].

- 1) Защита по минимальному значению крутящего момента:

$$M_{кр} \leq M_{кр.min},$$

где $M_{кр}$ – измеренное значение крутящего момента на валу ВВ; $M_{кр.min}$ – расчетное значение минимального крутящего момента на валу ВВ, при котором возникает отрицательная тяга.

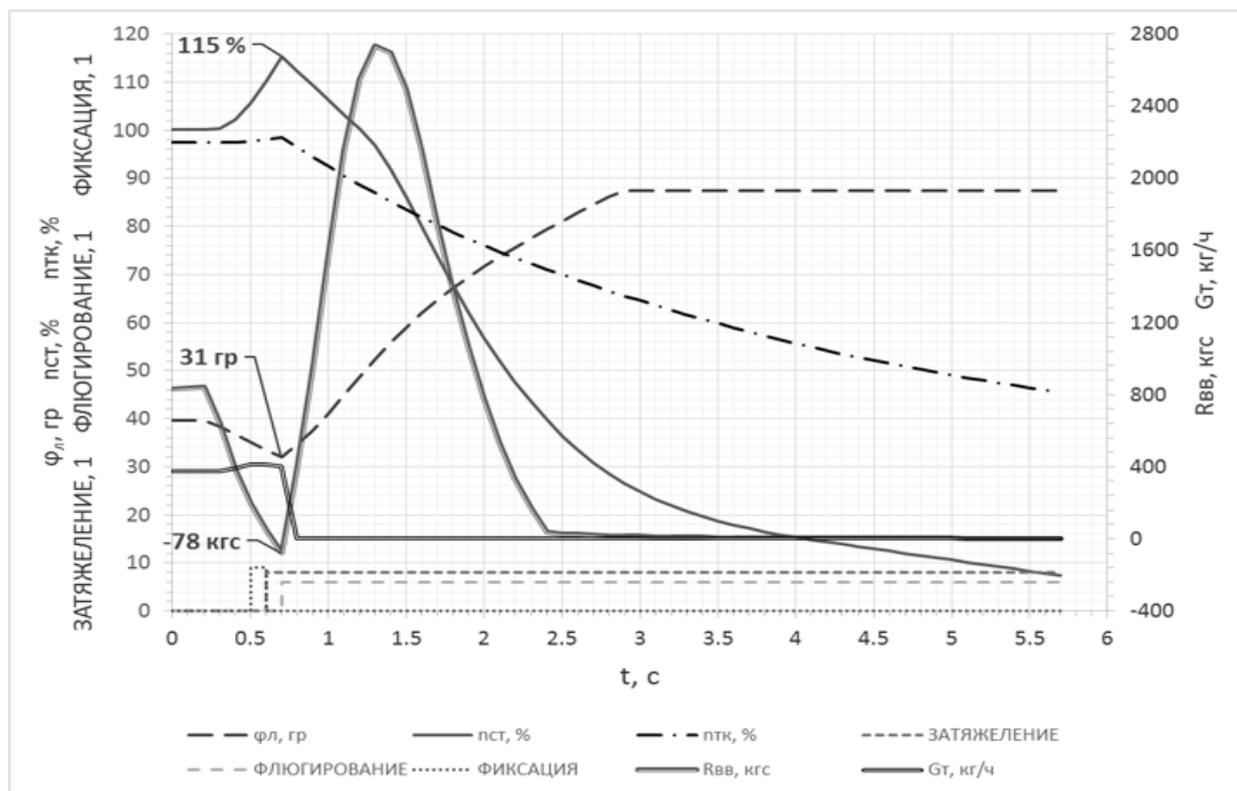


Рис. 1. Возникновение отрицательной тяги при самопроизвольном перемещении лопастей ВВ в сторону облегчения при полете на высоте $H = 6000$ м и скорости $V = 500$ км/ч

В зависимости от требований, предъявляемых к ограничению отрицательной тяги, величина $M_{кр.min}$ может быть представлена в виде следующих функций:

$$\begin{aligned} & - M_{кр.min} = const; \\ & - M_{кр.min} = f(a_{руд}); \\ & - M_{кр.min} = f(V, p_H); \end{aligned}$$

где $a_{руд}$ – угловое положение рычага управления двигателем; V – скорость полета; p_H – давление воздуха окружающей среды.

Защита по минимальному значению крутящего момента может быть реализована в программе электронного регулятора или в конструкции гидромеханического регулятора ВВ.

2) Защита по максимальной частоте вращения ВВ:

$$n_{ВВ} \geq n_{ВВ.max},$$

где $n_{ВВ}$ – измеренное значение частоты вращения ВВ; $n_{ВВ.max}$ – максимальное значение частоты вращения ВВ.

Значение максимальной частоты вращения ВВ определяется из условий допустимости последствий раскрутки и, как правило, задается постоянным $n_{ВВ.max} = const$. Защита по максимальной частоте вращения ВВ может быть реализована в программе электронного регулятора, в конструкции ВВ или в конструкции гидромеханического регулятора ВВ.

3) Защита по минимальному значению углового положения лопастей ВВ:

$$\varphi \leq \varphi_{min},$$

где φ – измеренное значение углового положения лопастей ВВ; φ_{min} – минимальное значение углового положения лопастей ВВ.

В зависимости от требований, предъявляемых к ограничению отрицательной тяги, величина φ_{min} может быть представлена в виде следующих функций:

$$\varphi_{min} = f(\lambda);$$

$$\varphi_{min} = f(V, n_{ВВ}, p_H, t_H),$$

где λ – относительная поступь ВВ; t_H – температура наружного воздуха.

Ввиду сложной зависимости указанных функций их реализация возможна только в программе электронного регулятора.

4) Защита по минимальному значению тяги ВВ.

Тяга R , создаваемая ТВД, определяется зависимостью:

$$R = R_{ВВ} + R_{ВУ},$$

где $R_{ВВ}$ – расчетное значение тяги ВВ; $R_{ВУ}$ – расчетное значение тяги выходного устройства ТВД.

Ввиду незначительного влияния тяги выходного устройства ТВД на общую тягу ТВД можно допустить, что $R = R_{ВВ}$. В этом случае условие срабатывания защиты от отрицательной тяги ТВД примет вид:

$$R_{ВВ} \leq R_{min},$$

где R_{min} – минимальное допустимое значение тяги в полете, задаваемое разработчиком ЛА.

В зависимости от требований, предъявляемых к ограничению отрицательной тяги, величина R_{min} может быть представлена в виде следующих функций:

$$\begin{aligned} R_{min} &= const; \\ R_{min} &= f(V, H), \end{aligned}$$

где H – высота полета.

Как правило, величина R_{min} определяется по значению тяги ТВД на режиме полетного малого газа, задаваемому разработчиком ЛА в виде функции $R_{пмг} = f(V, H)$ (см. рис. 2)

Защита по минимальному значению тяги ВВ может быть реализована в программе электронного регулятора или в конструкции гидромеханического регулятора ВВ.

Системы защиты от отрицательной тяги строятся на комбинации описанных выше условий (совместном их применении). Дополнительно каждое условие может выполняться при различных допустимых значениях контролируемого параметра, определяющих уровень защиты. В зависимости от уровня защиты заложенные в САУ алгоритмы задействуют различные защитные устройства: фиксатор шага, затыжелитель, система флюгирования.

В настоящее время наиболее эффективным является применение в системе защиты от отрицательной тяги ТВД условия срабатывания по минимальному значению тяги ВВ, а наиболее эффективным средством защиты является система флюгирования [3]. Защита по минимальному значению тяги применяется в ТВД, конструкции которых имеют измеритель тяги ВВ: двигатель АИ-20(М, Д) с ВВ АВ-68Д(ДМ,И) (устанавливаемый на самолеты Ан-8, Ан-12, Ан-32, Ил-18, Ан-10, Ил-38, Бе-12), двигатель АИ-24(Т,ВТ) с ВВ АВ-72(Т) (устанавливаемый на самолеты Ан-24, Ан-26, Ан-30), двигатель Д-27 с соосным винтовентилятором СВ-27 (устанавливаемый на самолет Ан-70).

При отсутствии в конструкции ТВД измерителя тяги ВВ наиболее эффективной является защита по минимальному крутящему моменту. Такая защита применяется в следующих ТВД: двигатель НК-12(МП, МА) с ВВ АВ-60К, АВ-90 (устанавливаемый на самолеты Ту-95, Ту-142, Ан-22), двигатель ТВ3-117ВМА-СБМ1 с ВВ АВ-140 (устанавливаемый на самолет Ан-140) двигатель ТВ7-117С(СМ, СТ) с ВВ СВ-34, АВ112, АВ112-114 (устанавливаемый на самолеты Ил-114, Ил-112В, Ил-114-300).

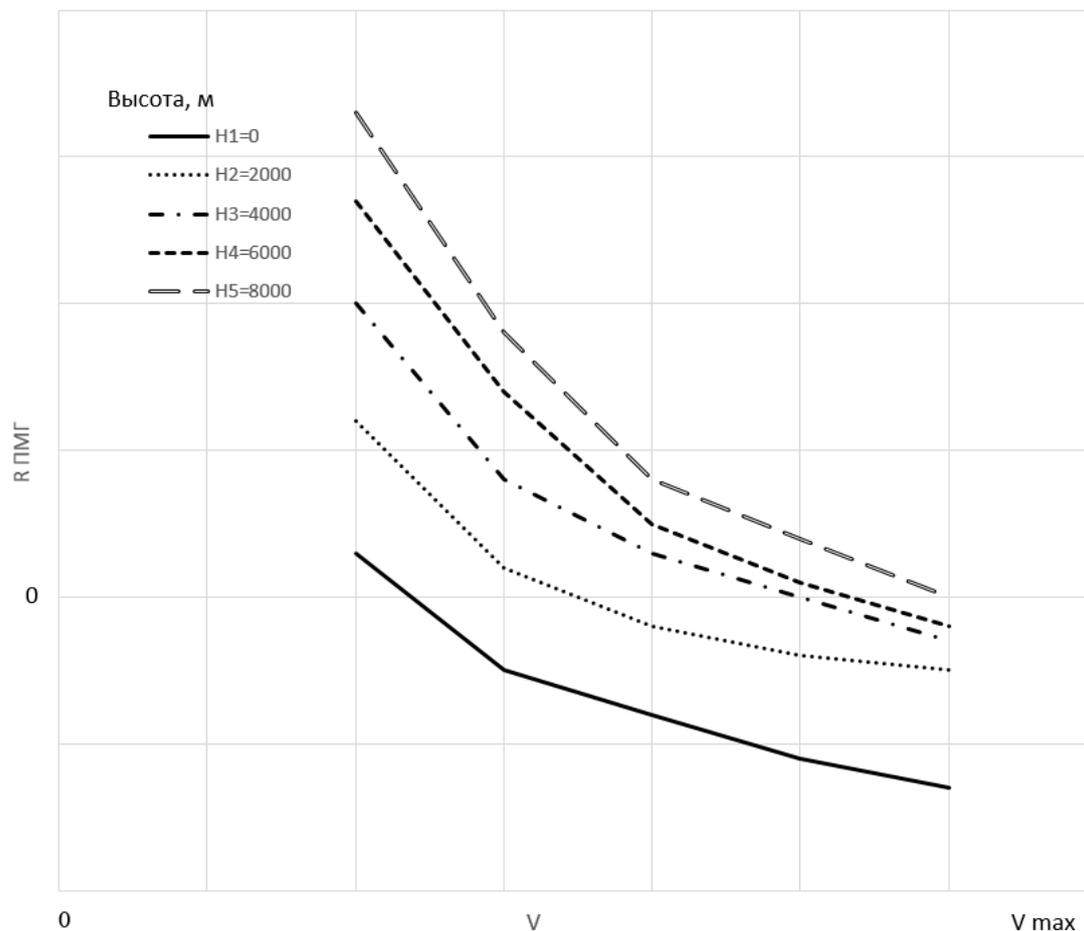


Рис. 2. Типовая зависимость тяги ТВД на режиме полетного малого газа $R_{\text{ПМГ}}$ от скорости V и высоты полета H , задаваемая разработчиком ЛА

Ввиду отсутствия в настоящее время консолидированного подхода к созданию ТВД, в том числе единой нормативной базы, учитывающей все особенности проектирования двигателей такого типа в РФ, в конструкции разрабатываемых двигателей не закладываются решения, необходимые для организации систем защиты и управления ВВ (узел измерителя тяги, элементы узла измерителя углового положения лопастей ВВ). Данное обстоятельство усложняет вопрос обеспечения безопасности полетов самолетов с ТВД.

Учитывая реалии настоящего времени, для защиты от отрицательной тяги рассматриваются алгоритмы с использованием измеренного значения углового положения лопастей ВВ, которые являются не менее эффективными в сравнении с защитой по минимальному крутящему моменту. Однако ввиду достаточно трудоемких расчетных работ по определению численных значений φ_{\min} , рациональным является построение системы защиты ТВД с применением в алгоритмах расчетного значения неизмеряемого параметра $R_{\text{ВВ}}$ на полетных режимах.

РАСЧЕТ ТЯГИ ВОЗДУШНОГО ВИНТА НА ПОЛЕТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Современные электронные блоки, входящие в состав САУ газотурбинных двигателей, обладают достаточно высокими вычислительными мощностями [4, 5], что позволяет реализовать в них функции расчета значений неизмеряемых параметров [6], в том числе функцию расчета значения параметра тяги ВВ в режиме реального времени для организации системы защиты ТВД от отрицательной тяги на полетных режимах работы.

Для осуществления возможности расчета значения параметра тяги ВВ на полетных режимах работы должны быть выполнены следующие требования:

– наличие в конструкции ТВД узла измерения углового положения лопастей ВВ, обеспечивающего точность замера в соответствии с предъявляемыми требованиями по точности расчета значения тяги ВВ;

– наличие аэродинамических характеристик ВВ (полученных расчетным или экспериментальным путем), охватывающих в том числе область отрицательных значений тяги ВВ (отрицательных значений коэффициента тяги α);

– точность аэродинамических характеристик ВВ должна соответствовать предъявляемым требованиям к точности расчета значения тяги ВВ;

– измерение (непосредственное или посредством бортовых систем) электронным блоком САУ следующих параметров: приборная скорость полета $V_{пр}$, давление воздуха окружающей среды p_H , температура воздуха окружающей среды t_H , частота вращения ВВ $n_{ВВ}$, угловое положение лопастей ВВ φ ;

– точность измерения перечисленных выше параметров должна соответствовать предъявляемым требованиям к точности расчета значения тяги ВВ.

Если все описанные выше требования выполнены, в программе электронного блока САУ можно реализовать алгоритм расчета значения тяги ВВ. Расчетная функция тяги ВВ представлена в виде:

$$R_{ВВ} = f(V_{пр}, p_H, t_H, n_{ВВ}, \varphi),$$

где $V_{пр}$ – значение приборной скорости полета, км/ч; p_H – измеренное значение давления воздуха окружающей среды, $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$; t_H – измеренное значение температуры воздуха окружающей среды, °С; $n_{ВВ}$ – измеренное значение частоты вращения воздушного винта, об/мин; φ – измеренное значение углового положения лопастей ВВ, °.

Расчет значения $R_{ВВ}$ производится в следующей последовательности (пп. 1–6).

1. Расчет значения плотности наружного воздуха ρ_H , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$:

$$\rho_H = \frac{341.752 \cdot p_H}{t_H + 273.15}$$

2. Расчет значения истинной скорости полета $V_{ист}$, км/ч:

$$V_{ист} = V_{пр} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_H}},$$

где $\rho_0 = 1.225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха в соответствии с Международной стандартной атмосферой для высоты $H = 0$ км, температуры воздуха $t_H = 288,15$ К.

3. Расчет значения относительной поступи ВВ λ , 1:

$$\lambda = \frac{V_{ист}/3.6}{D \cdot \frac{n_{ВВ}}{60}}$$

4. Расчет значения числа Маха M , 1:

$$M = \frac{V_{ист}/3.6}{\sqrt{k \cdot R \cdot (t_H + 273.15)}}$$

где $k = 1,401$ – показатель адиабаты для наружного воздуха, 1; $R = 287,05$ – газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

5. Расчет значения коэффициента тяги α .

Коэффициент тяги α определяется по многомерной аэродинамической характеристике ВВ, представленной в виде зависимости $\alpha = f(M, \varphi, \lambda)$ [7], путем поузловых линейных интерполяций, проводимых в 3 этапа (см. рис. 3) [8].

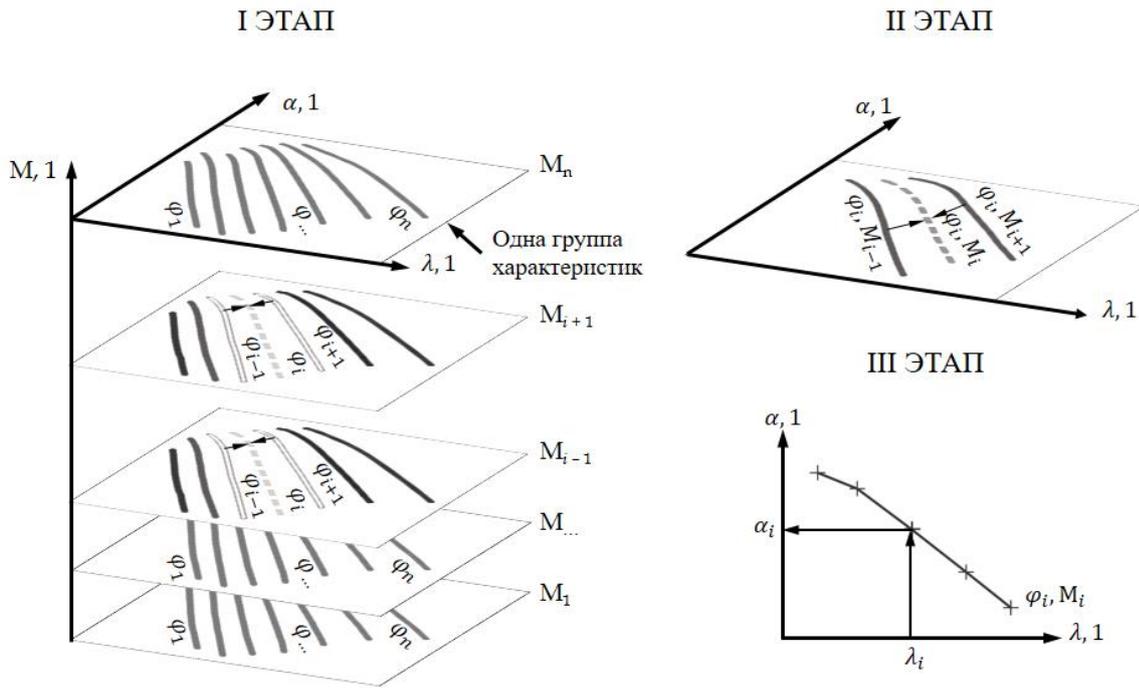


Рис. 3. Этапы интерполяции многомерной аэродинамической характеристики ВВ

На первом этапе производится выбор двух групп характеристик $\alpha = f(\varphi, \lambda)$ для чисел M_{i-1} и M_{i+1} , где $M_{i-1} < M_i < M_{i+1}$, а $M_i = M$ – расчетное значение числа Маха. Затем в выбранных группах характеристик M_{i-1} и M_{i+1} производится выбор двух известных характеристик $\alpha = f(\lambda)$ для чисел φ_{i-1} и φ_{i+1} , где $\varphi_{i-1} < \varphi_i < \varphi_{i+1}$, а $\varphi_i = \varphi$ – измеренное угловое положение лопастей ВВ. Далее в выбранных группах характеристик M_{i-1} и M_{i+1} производится линейная поузловая интерполяция для нахождения характеристики $\alpha_{\varphi_i} = f(\lambda)$. Узловая линейная интерполяция заключается в последовательном расчете каждой точки характеристики $\alpha_{\varphi_i} = f(\lambda)$ по формулам (см. рис. 4):

$$\begin{aligned} \alpha_{\varphi_{i_k}} &= \alpha_{\varphi_{i-1_k}} + \\ & \frac{\alpha_{\varphi_{i+1_k}} - \alpha_{\varphi_{i-1_k}}}{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}} \cdot (\varphi_i - \varphi_{i-1}), \\ \lambda_{\varphi_{i_k}} &= \lambda_{\varphi_{i-1_k}} + \\ & \frac{\lambda_{\varphi_{i+1_k}} - \lambda_{\varphi_{i-1_k}}}{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}} \cdot (\varphi_i - \varphi_{i-1}), \end{aligned}$$

где k изменяется от 1 до n , а n – общее количество точек характеристики $\alpha_{\varphi_i} = f(\lambda)$.

На втором этапе производится поузловая линейная интерполяция для нахождения характеристики $\alpha_{\varphi_i, M_i} = f(\lambda)$ по рассчитанным на первом этапе характеристикам для известного числа M . Для этого последовательно рассчитываются значения каждой точки характеристики по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_{\varphi_i, M_{i_k}} &= \\ & \alpha_{\varphi_{i-1}, M_{i-1_k}} + \frac{\alpha_{\varphi_{i+1}, M_{i+1_k}} - \alpha_{\varphi_{i-1}, M_{i-1_k}}}{M_{i+1} - M_{i-1}} \cdot (M_i - M_{i-1}), \\ \lambda_{\varphi_i, M_{i_k}} &= \\ & \lambda_{\varphi_{i-1}, M_{i-1_k}} + \frac{\lambda_{\varphi_{i+1}, M_{i+1_k}} - \lambda_{\varphi_{i-1}, M_{i-1_k}}}{M_{i+1} - M_{i-1}} \cdot (M_i - M_{i-1}), \end{aligned}$$

где k изменяется от 1 до n , а n – общее количество точек характеристики $\alpha_{\varphi_i, M_i} = f(\lambda)$.

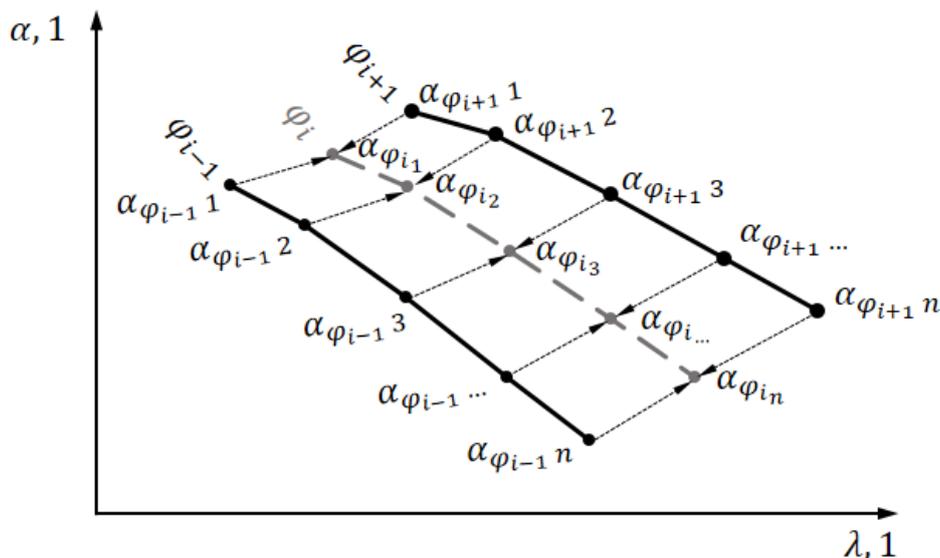


Рис. 4. Метод поузловой линейной интерполяции аэродинамических характеристик ВВ

На третьем этапе производится расчет величины α_i (см. рис. 3, Этап III) по формуле:

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1}}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \cdot (\lambda_i - \lambda_{i-1}),$$

где $\lambda_{i-1} < \lambda_i < \lambda_{i+1}$, а $\lambda_i = \lambda$ – расчетное значение относительной поступи ВВ.

Расчетное значение коэффициента тяги $\alpha = \alpha_i$.

При выходе значения параметра φ (или M , или λ) за диапазон, заложенный в применяемую аэродинамическую характеристику ВВ, его следует принимать равным соответствующему максимальному или минимальному значению диапазона параметра φ (или M , или λ).

6. Расчет значения тяги ВВ $R_{ВВ}$, кгс [9, 10]:

$$R_{ВВ} = \frac{\alpha \cdot \rho_n \cdot \left(\frac{n_{ВВ}}{60}\right)^2 \cdot D^4}{g},$$

где $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, m/c^2 .

ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТЯГИ ВОЗДУШНОГО ВИНТА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЯГИ

При реализации защиты ТВД по расчетному значению тяги ВВ необходимо учитывать, что срабатывание каждого защитного устройства должно быть инициировано условиями с различными значениями минимально допустимой тяги ВВ:

$R_{ВВ} \leq R_{min1}$ – срабатывание фиксатора шага ВВ;

$R_{ВВ} \leq R_{min2}$ – срабатывание затяжелителя;

$R_{ВВ} \leq R_{min3}$ – срабатывание системы флюгирования;

где $R_{min1} > R_{min2} > R_{min3}$.

Кроме того, величину $R_{ВВ}$ возможно использовать для организации управления ВВ по неизмеряемому параметру. Для этого в структуру регулятора частоты вращения ВВ вводится дополнительный канал, ограничивающий минимальную тягу путем воздействия на основной исполнительный механизм управления ВВ (см. рис. 5).

Система защиты от отрицательной тяги ТВД с использованием расчетного значения $R_{ВВ}$ позволяет эффективно предотвращать возникновение отрицательной тяги вне зависимости от источника, причины и вида возникшего отказа.

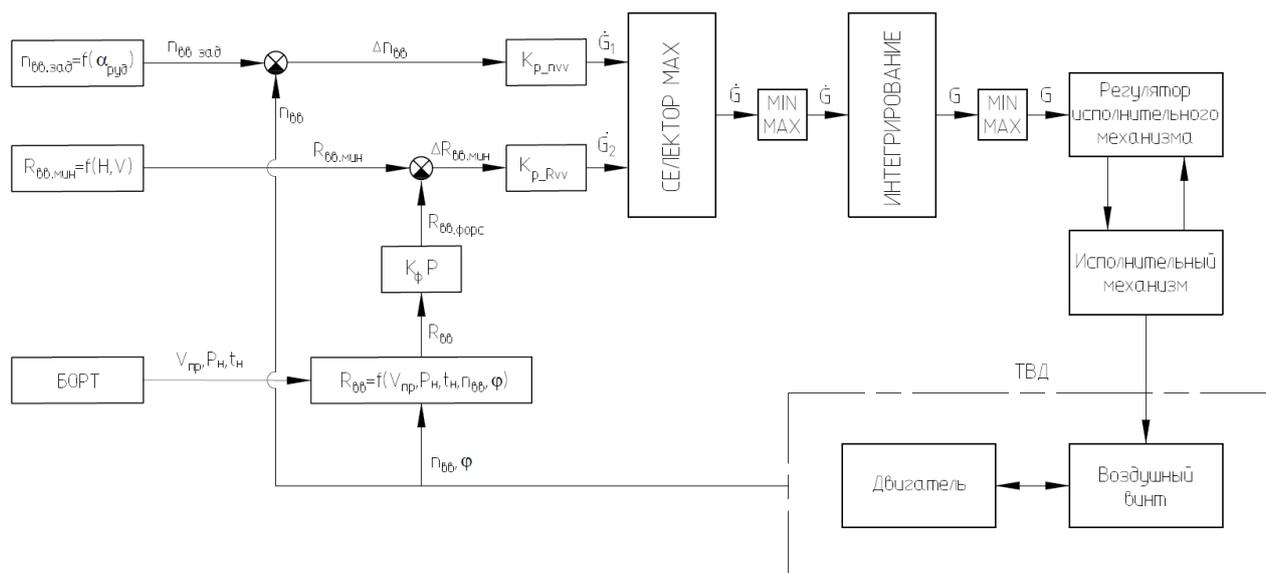


Рис. 5. Структура регулятора управления ВВ на полетных режимах работы с каналом ограничения тяги

УЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЯГИ ТВД

При проектировании системы защиты ТВД от отрицательной тяги важно учитывать запаздывание срабатывания защитных устройств. Так, включение гидравлического фиксатора шага по условию достижения максимального значения частоты вращения ВВ (без работы алгоритма защиты по минимальному значению крутящего момента) не способно предотвратить появление отрицательной тяги (см. рис. 1) вследствие наличия временных задержек.

Применяемые в конструкции современных ВВ и их САУ электрогидравлические защитные устройства имеют следующие характеристики временного запаздывания при срабатывании:

- фиксатор шага ВВ – от 0,2 до 0,5 с;
- затяжелитель – от 0,1 до 0,4 с;
- система флюгирования – от 0,1 до 0,4 с.

Для парирования запаздывания при срабатывании защитных устройств необходимо применять форсирование параметров ($M_{кр}$, $n_{ВВ}$, φ , $R_{ВВ}$), определяющих работу алгоритмов защиты или канала ограничения тяги ВВ (см. рис. 5). Постоянные времени форсирования выбираются исходя из предельной возможной задержки конкретного защитного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяемые в настоящее время алгоритмы и средства защиты способны предотвратить появление отрицательной тяги турбовинтового двигателя в случае возникновения любого единичного отказа. Наиболее эффективной является защита по минимальному значению измеренной тяги воздушного винта, позволяющая предотвращать появление отрицательной тяги вне зависимости от источника, причины и вида возникшего отказа [11]. Ввиду отсутствия в современных турбовинтовых двигателях конструктивных решений, обеспечивающих измерение тяги ВВ, предложено применение защиты по расчетному значению тяги воздушного винта. Безусловно, для подтверждения эффективности разработанного метода защиты требуется проведение значительного объема работ в аэродинамической трубе или на летающей лаборатории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филиппов В.В.** Как летчику бороться с отрицательной тягой ТВД / В.В. Филиппов. – М.: Воениздат, 1961. – 64 с. [Filipov V.V. How does a pilot fight the negative thrust of a turboprop engine. – Moscow: Voenizdat, 1961. – 64 p. (in Russian).]
2. **Дятлов В.В.** Системы управления турбовинтовыми (турбовинтовентиляторными) двигателями / В.В. Дятлов // Системы автоматического управления авиационными ГТД: Энциклопедический справочник / под ред. д.т.н., проф. О.С. Гуревича. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – С. 128–133. [Dyatlov V.V. Systems for the control of turboprop (turbo prop fan) engines // Systems for the automatic control of aviation GTEs: encyclopedic reference, edited by O.S. Gurevich. – Moscow: TORUS PRESS, 2011. – P. 128–133 (in Russian).]
3. **Землянов В.В.** Возникновение отрицательной тяги в полете. Способы борьбы с этим явлением / В.В. Землянов, М.И. Рябухин, В.Г. Тарарак // Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции «Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского» 18-19 декабря 2012 года / М-во обороны Рос. Федерации, Фил. Воен. учеб.-науч. центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2013. – С. 90–93. [Zemlyanov V.V., Ryabukhin M.I., Tararak V.G. Emergence of negative thrust during flight. Ways of fighting this phenomenon // Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference “Scientific Readings named after Professor N.E. Zhukovsky” held on 18-19 December 2012 / Ministry of Defense of the Russian Federation, Branch of the Air Force Military Educational and Scientific Center Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin. – Krasnodar: Yug Publishing House, 2013. – P. 90–93 (in Russian).]
4. **Интеллектуальные** системы управления и контроля газотурбинных двигателей / под ред. академика С.Н. Васильева. – М.: Машиностроение, 2008. – 550 с. [Intellectual systems for the control and monitoring of gas turbine engines / edited by academician S.N. Vasiliev. – Moscow: Mashinostroenie, 2008. – 550 p.]
5. **Распопов Е.В.** Интеллектуальная система запуска для нового поколения авиационных ГТД / Е.В. Распопов, Г.Г. Куликов, В.С. Фатиков, В.Ю. Арьков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – №2 (20). – С. 153-157. [Raspopov E.V., Kulikov G.G., Fatikov V.S., Ar'kov V.Yu. Intellectual start system for a new generation of aviation GTEs // Vestnik UGATU. – 2007. – Vol. 9. – №2 (20). – P. 153-157 (in Russian).]
6. **Гольберг Ф.Д.** Методы управления газотурбинными двигателями по неизмеряемым параметрам с использованием бортовой математической модели двигателя / Ф.Д. Гольберг, О.С. Гуревич, А.А. Петухов // Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями / Под ред. О.С. Гуревича. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – С. 90–96. [Golberg F.D., Gurevich O.S., Petukhov A.A. Methods for the control of gas turbine engines based on unmeasurable parameters, using an airborne mathematical model of an engine // Systems for the automatic control of aviation gas turbine engines / Edited by O.S. Gurevich. – Moscow: TORUS PRESS, 2010. – P. 90–96 (in Russian).]
7. **Кравец А.С.** Характеристики воздушных винтов / А.С. Кравец. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1941. – 261 с. [Kravets A.S. Characteristics of propellers. – Moscow: State Publishing House of the Defense Industry, 1941. – 261 p. (in Russian).]
8. **Годованюк А.Г.** Методика представления и использования характеристик соосного винтовентилятора при полунатурном моделировании ТВВД: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Годованюк Алексей Геннадьевич. – Уфа, 2011. – 166 с. [Godovanyuk A.G. Procedure for presenting and using the characteristics of a counter-rotating propfan during the semi-realistic simulation of turbo prop fan engines: Cand. Sci. thesis. – Ufa, 2011. – 166 p. (in Russian).]
9. **Александров В.Л.** Воздушные винты / В.Л. Александров. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1951. – 475 с. [Alexandrov V.L. Propellers. – Moscow: State Publishing House of the Defense Industry, 1951. – 475 p. (in Russian).]
10. **Теуш В.Л.** Общий курс воздушных винтов / В.Л. Теуш, И.А. Сидоров. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1943. – 280 с. [Teush V.L., Sidorov I.A. General course on propellers. – Moscow: State Publishing House of the Defense Industry, 1943. – 280 p. (in Russian).]
11. **Пат. RU 2 765 516 С1**, МПК В64С 11/00, F04D 29/36, F01D 21/00, G01L 5/13. Способ защиты силовой установки самолета от отрицательной тяги в полете / Сухоросов С.Ю., Точилин П.Г., Иванов А.В., Груздева А.В. Заявитель и правообладатель: АО «НПП «Аэросила». – № 2021117275; заяв. 11.06.2021; опубл. 31.01.2022; Бюл. №4. [Patent RU 2 765 516 C1, IPC B64C 11/00, F04D 29/36, F01D 21/00, G01L 5/13. Method for protecting aircraft power plant from negative thrust in flight / Sukhorosov S.Yu., Tochilin P.G., Ivanov A.V., Gruzdeva A.V. Applicant and proprietor: JSC “SPE “Aerosila”. – № 2021117275; application date 11.06.2021; publication date 31.01.2022; Bull. №4.]

ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Артем Викторович, нач. расчетно-конструкторского отдела АО «НПП «Аэросила». Дипл. инж. по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки» (МАТИ, 2011), к.т.н. по специальности 05.07.05 «Тепловые, электро-ракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (МАИ, 2019).

ДАНИЛИХИН Алексей Михайлович, нач. бригады систем автоматического управления конструкторского отдела авиационных винтов и винтовых преобразователей АО «НПП «Аэросила». Дипл. инж. по спец. «Автоматизированные системы обработки информации и управления» (МГАПИ, 1999).

ФАНАСЬЕВА Алена Витальевна, нач. бригады математического моделирования и расчета систем автоматического управления расчетно-конструкторского отдела АО «НПП «Аэросила». Дипл. инж. по спец. «Роботы и робототехнические системы» (АГУ, 2014).

ШУКАЛЮК Вадим Андреевич, инженер-конструктор расчетно-конструкторского отдела АО «НПП «Аэросила». Дипл. магистр по спец. «Информатика и вычислительная техника» (МАИ, 2019).

METADATA

Title: Protection against negative thrust in flight created by a turboprop engine with a variable-pitch propeller.

Authors: A. V. Ivanov, A. M. Danilikhin, A. V. Afanasyeva, V. A. Shukalyuk

Affiliation: Joint Stock Company "Scientific-Production Enterprise "Aerosila" (JSC "SPE "Aerosila"), Russia.

Email: vint@aerosila.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 28, no. 2 (104), pp. 66-76, 2024. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: This article considers the main reasons for the occurrence of negative thrust of a turboprop engine with variable-pitch propeller in flight and provides a detailed description of the existing methods and means of protection against negative thrust while proposing a modern approach to the construction of a negative thrust protection system using the calculated value of the propeller thrust.

Keywords: propeller; negative thrust; turboprop engine; negative thrust protection system; calculation of the propeller thrust; unmeasured control; control by propeller thrust.

About authors:

IVANOV, Artyom Viktorovich, Head of the Analysis and Design Department of JSC "SPE "Aerosila". Diploma of an engineer, specialty "Aircraft Engines and Power Plants" (MATI, 2011). Cand. Sci., specialty "Heat and Electrorocket Engines and Power Plants of Aircrafts" (Moscow Aviation Institute, 2019).

DANILIKHIN, Aleksey Mikhailovich, Head of the Team of Automatic Control Systems, the Aircraft Propeller Design Department of JSC "SPE "Aerosila". Diploma of an engineer, specialty "Automated Systems for the Processing and Control of Information" (Moscow State Academy of Instrument Engineering and Computer Science, 1999).

AFANASYEVA, Alyona Vitalievna, Head of the Team of Mathematical Modeling and Calculation of Automatic Control Systems, the Calculation and Design Department of JSC "SPE "Aerosila". Diploma of an engineer, specialty "Robots and robotic systems" (ASU, 2014).

SHUKALYUK, Vadim Andreevich, design engineer at the Calculation and Design Department of JSC "SPE "Aerosila". Master's diploma, specialty "Informatics and Computer Engineering" (Moscow Aviation Institute, 2019).