

УДК 621.452.3:681.51

С. И. СУХОВЕЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТЕПЕНИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРА В НАРУЖНОМ КОНТУРЕ ТРДДФ ПРИ ДОВОДКЕ САУ

В процессе создания и доводки САУ ТРДДФ был выполнен синтез двух вариантов алгоритма регулирования степени повышения давления вентилятора в наружном контуре ( $\pi_{в2}$ ) ТРДДФ. Проведен анализ преимуществ и недостатков этих алгоритмов по результатам стендовых испытаний. Показано, что вариант алгоритма с формированием промежуточной заданной площади сечения сопла и последующим формированием тока управления ( $\pi_{в2} \rightarrow F_c \rightarrow I$ ) проще и удобней в доводке, так как позволяет независимо выполнять подстройку контура  $F_c \rightarrow I$ . Однако лучшие динамические свойства обеспечил вариант алгоритма с формированием тока управления непосредственно по  $\pi_{в2}$  ( $\pi_{в2} \rightarrow I$ ).

**Ключевые слова:** САУ ТРДДФ, контур регулирования  $\pi_{в2}$ , динамические свойства САУ.

### Введение

В настоящее время предъявляются высокие требования к динамике ГТД. Эти требования обусловлены необходимостью обеспечения высоких уровней безопасности, а также эксплуатационных и тактико-технических характеристик летательных аппаратов [1,2]. Сложность обеспечения высоких динамических характеристик ГТД существенным образом зависит от типа двигателя. По сумме высоких требований к динамике и сложности их реализации, обусловленной особенностями рабочего процесса, бесспорным лидером является ТРДДФ на форсажных режимах. Сложность регулирования обусловлена наличием трех контуров управления, оказывающих взаимное влияние друг на друга.

Режим работы газогенератора определяется приведенной частотой вращения ротора вентилятора или степенью повышения давления в компрессоре  $\pi_k^*$ , которые регулируются за счет изменения расхода топлива в основной камере сгорания (ОКС). Контур, регулирующий подачу топлива в форсажную камеру сгорания (ФКС) и определяющий дополнительную тягу на форсированных режимах - разомкнутый. Процесс горения в ФКС оказывает существенное влияние на работу газогенератора. Работа контура, парирующего влияние ФКС на газогенератор,

основана на поддержании степени понижения давления в турбине  $\pi_T$  [3, 4] или  $\pi_{в2}$  за счет изменения площади критического сечения сопла. Этот контур ограничивает динамику форсажных режимов, так как его исполнительным устройством является регулируемое реактивное сопло, динамика которого уступает динамике дозаторов форсажного топлива. На приемистости динамика контура регулирования  $\pi_{в2}$  оказывает существенное влияние на формирование тяги и сохранение запасов газодинамической устойчивости вентилятора.

Для синтеза САУ ТРДДФ в классической теории управления использовалась концепция спектрального разделения, а современная теория управления предлагает возможность создания многомерных систем [5]. Второй подход позволяет улучшить качество системы, но ведет к существенному, в некоторых случаях неоправданному, ее усложнению.

В данной работе рассмотрены два варианта построения контура регулирования  $\pi_{в2}$  ТРДДФ методами классической теории управления, которые были разработаны в процессе создания и доводки САУ.

### 1. Алгоритм $\pi_{в2} \rightarrow F_c \rightarrow I$

На рис. 1 приведена схема алгоритма управления с внутренней обратной связью. В этом

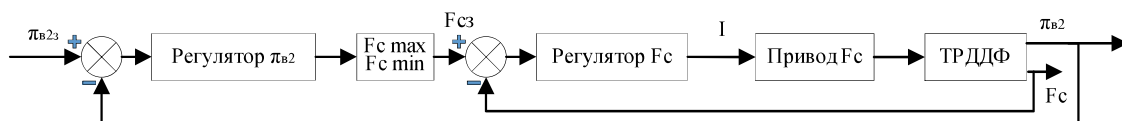


Рис. 1. Алгоритм регулирования  $\pi_{в2}$  с внутренней обратной связью ( $\pi_{в2} \rightarrow F_c \rightarrow I$ )

варианте алгоритма «Регулятор  $\pi_{B2}$ » формирует заданную площадь сечения сопла  $F_{C3}$  по рассогласованию  $\pi_{B2}$ , которую после блока ограничения обрабатывает «Регулятор  $F_c$ », формируя управляющий ток на привод сопла по рассогласованию заданной  $F_{C3}$  и измеренной  $F_c$  площади сопла.

Очевидным преимуществом такого алгоритма является простота реализации ограничения максимальной  $F_{c \max}$  и минимальной  $F_{c \min}$  площади сечения сопла для исключения механических ударов элементов конструкции об ограничитель. Это обеспечивается блоком ограничения заданной площади сопла  $F_{C3}$ , установленным после «Регулятора  $\pi_{B2}$ ».

Синтез контура с использованием математических моделей ТРДДФ и исполнительных устройств показал, что для обеспечения необходимой точности ограничения площади реактивного сопла и поддержания требуемой точности  $\pi_{B2}$  основной и внутренней контуры должны быть астатическими. Однако это не обеспечивало требуемой точности поддержания  $\pi_{B2}$  в динамических процессах при работе форсажной камеры сгорания. Это проблему удалось решить путем введения коррекции  $F_{C3}$  по темпу изменения форсажного топлива (рис. 2).

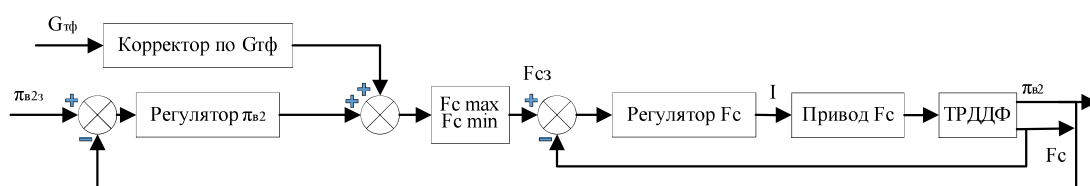


Рис. 2. Алгоритм регулирования  $\pi_{B2}$  с внутренней обратной связью ( $\pi_{B2} \rightarrow F_c \rightarrow I$ ) и коррекцией по темпу изменения  $G_{тф}$

При отработке на полунатурном стенде контура стабилизации  $F_c$  («Регулятора  $F_c$ ») набор гидроцилиндров двигателя заменялся одним эквивалентным, а воздействие сворков сопла — нагрузочным устройством. Очевидно, что такие существенные отличия от штатного варианта системы не позволили учесть всех особенностей реальной системы.

Предложенная структура алгоритма дала возможность при доводке САУ уточнить регулировки контура стабилизации площади сопла, основываясь на результатах обработки заданной площади сечения реактивного сопла  $F_{C3}$ . В такой структуре особенности динамики контуров были учтены в индивидуальных настройках каждого регулятора.

Для обеспечения максимальных динамических свойств системы в процессе доводки на моторном стенде были выполнены работы по уточнению коэффициентов усиления контура стабилизации площади сопла и настроек

алгоритма, парирующего зону нечувствительности.

В целом, предложенный алгоритм обеспечил все необходимые эксплуатационные свойства двигателя, однако был чувствителен к отклонению свойств экземпляров исполнительных устройств и двигателей при их замене. Для обеспечения высокой динамики в ряде случаев требовалась индивидуальная подстройка алгоритма для экземпляра двигателя.

Резервом для обеспечения робастности такого алгоритма является исключение одного из двух последовательно расположенных интегрирующих звеньев в регуляторах, каждое из которых дает задержку по фазе.

## 2. Алгоритм $\pi_{B2} \rightarrow I$

Для исключения одного интегрирующего звена был выполнен переход к управлению  $\pi_{B2}$  посредством формирования тока управления, минуя  $F_c$  ( $\pi_{B2} \rightarrow I$ ). Схема такой системы приведена на рис. 3.

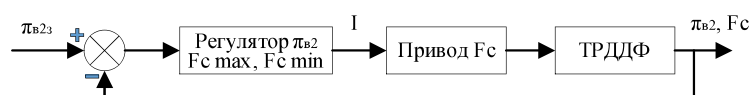


Рис. 3. Алгоритм регулирования  $\pi_{B2}$  посредством формирования тока управления  $I$  ( $\pi_{B2} \rightarrow I$ )

Для ограничения площади сопла параллельно контуру регулирования  $\pi_{B2}$  были введены контуры  $F_{c \max} \rightarrow I$  и  $F_{c \min} \rightarrow I$ .

В таком варианте системы формируется три контура: регулирования  $\pi_{B2}$ , ограничения максимальной и минимальной площади

сечения сопла. Каждый контур – астатический ПИ-регулятор. Переключение контуров осуществляется по результату сравнения пропорциональных компонент регуляторов с последующим интегрированием. Результат

выбора контролируется по значению переменной  $N$ , которая принимает значения от 1 до 3. На рис. 4 приведена структурная схема регулятора.

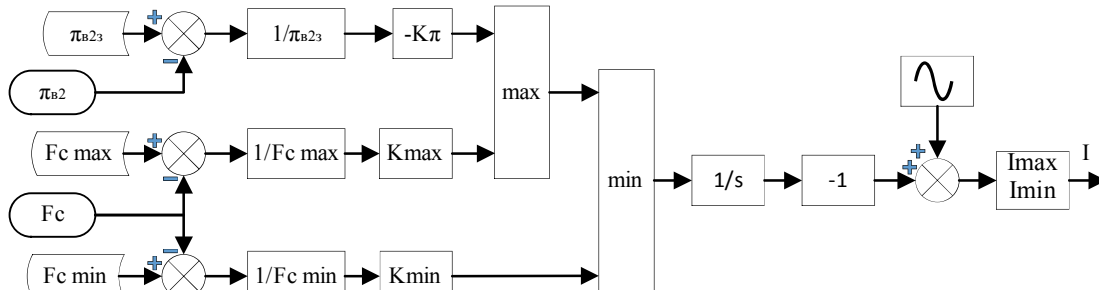


Рис. 4. Структурная схема регулятора  $\pi_{в2}$ ,  $F_{c \max}$ ,  $F_{c \min}$  с логикой переключения контуров

### 3. Отработка алгоритмов при стендовых испытаниях ТРДДФ

Доводка алгоритмов была выполнена в процессе стендовых испытаний двигателя. За время стендовых испытаний отработка выполнялась на нескольких экземплярах двигателя с различным набором исполнительных устройств, что позволило оценить робастность алгоритмов.

Для данного типа двигателя регламентируется три вида приемистости: малый газ (МГ) - максимальный режим (Макс), Макс - полный форсаж (ПФ) и МГ-ПФ. Доводка алгоритмов осуществлялась в процессе последовательной отработки всех видов приемистостей при неизменных настройках контуров, формирующих расход топлива в ОКС.

На рис. 5 приведены результаты отработки приемистости МГ-Макс с первым вариантом алгоритма, а на рис. 6 – со вторым.

Как следует из нижнего графика рис. 6, б в процессе приемистости МГ-Макс сопло перемещалось из положения максимального упора ( $N = 2$ ) в положение минимального упора ( $N = 3$ ), а в промежутке поддерживалось заданное значение  $\pi_{в23}$  ( $N = 1$ ). Время перекадки сопла между граничными значениями на приемистости со вторым вариантом алгоритма составило 1.5 с, что на 1 с меньше, чем с первым вариантом. Во втором случае в течение примерно 0.9 с движение происходило при максимальном токе управления, в то время как в первом случае ток не превышал 40%. Оба переходных процесса имели близкое рассогласование по  $\pi_{в2}$ . Полного согласования по  $\pi_{в2}$  не наступило и по завершению переходного процесса, так как сопло находилось на нижнем граничном значении  $F_{c \min}$ .

На верхнем графике рис. 5, а видно, что в ходе приемистости фактическое значение площади сопла принимало значения меньше  $F_{c \min}$ . Имело место перерегулирование. Исключить его без потери динамики в области

регулирования  $\pi_{в2}$  в данной структуре не представлялось возможным.

В регуляторе  $\pi_{в2} \rightarrow I$  удалось обеспечить работу контуров ограничения  $F_{c \max}$ ,  $F_{c \min}$  без перерегулирования (верхний график на рис. 6, а). Скорость приближения к граничным значениям регулировалась настройками соответствующих контуров (рис. 4) и не затрагивала динамику контура регулирования  $\pi_{в2}$ .

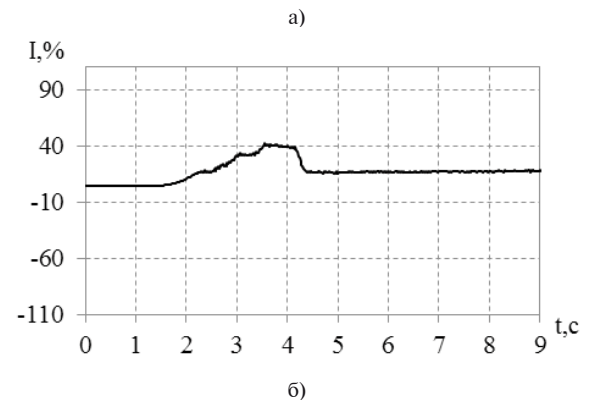
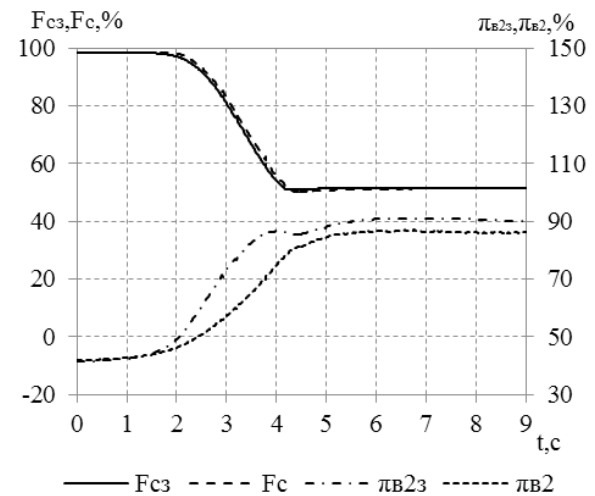


Рис. 5. Приемистость МГ-Макс (алгоритм  $\pi_{в2} \rightarrow F_c \rightarrow I$ ): а)  $F_c$ ,  $\pi_{в23}$ ; б)  $I$

Приемистость МГ-ПФ отработывалась после доводки приемистостей МГ-Макс и Макс-ПФ. На рис. 7, 8 приведены изменение параметров в процессе приемистости МГ-ПФ для вариантов алгоритма  $\pi_{B2} \rightarrow F_c \rightarrow I$  и  $\pi_{B2} \rightarrow I$ .

В процессе приемистости сопло переходило из полностью открытого положения в закрытое, а после розжига ФКС при увеличении расхода форсажного топлива открывалось. С первым вариантом алгоритма сопло не успевало достичь нижнего упора в процессе приемистости до розжига ФКС. Со вторым вариантом алгоритма сопло в течение одной секунды находилось на минимальном упоре. Это обусловлено тем, что динамика сопла по поддержанию  $\pi_{B2}$  во втором случае была выше. В завершающей стадии приемистости, когда сопло находилось на минимальном упоре, рассогласование по  $\pi_{B2}$  определялось только динамикой ротора вентилятора. В этом случае фактическое  $\pi_{B2}$  определялось частотой вращения вентилятора  $n_B$ , а заданное значение  $\pi_{B23}$  рассчитывалось по  $n_B$ .

Согласование по  $\pi_{B2}$  наступило во втором случае за 3 с, а в первом - за 5 с.

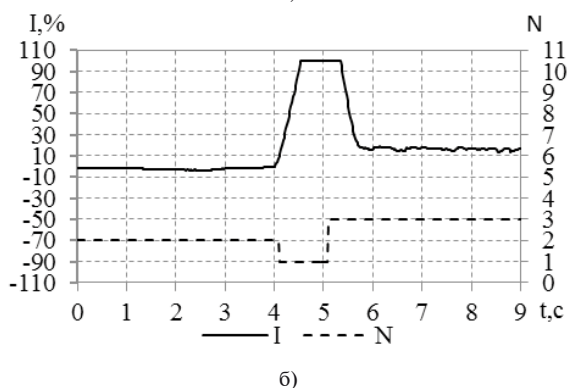
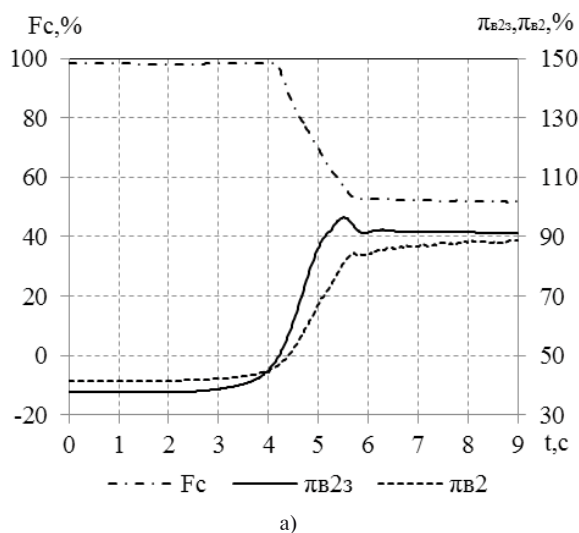


Рис. 6. Приемистость МГ-Макс (алгоритм  $\pi_{B2} \rightarrow I$ ): а)  $F_c$ ,  $\pi_{B2}$ ; б)  $I$ ,  $N$

Несмотря на то, что при использовании второго варианта алгоритма диапазон изменения площади сопла шире, динамика выше, перерегулирование на завершающей стадии процесса приемистости существенно ниже по сравнению с первым вариантом алгоритма. За счет повышения запасов устойчивости необходимость в индивидуальной подстройке алгоритма  $\pi_{B2} \rightarrow I$  для других экземпляров двигателя и при замене исполнительных устройств существенно снизилась.

### Закключение

Для ТРДДФ на форсажных режимах важной задачей является обеспечение неизменного режима работы газогенератора при изменении режима работы ФКС. Для решение этой задачи в САУ двигателей вводится контур, регулирующий один из параметров газогенератора (обычно это  $\pi_T$  или  $\pi_{B2}$ ) за счет изменения площади критического сечения сопла.

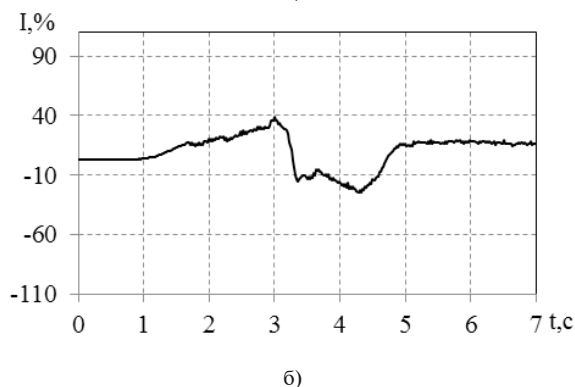
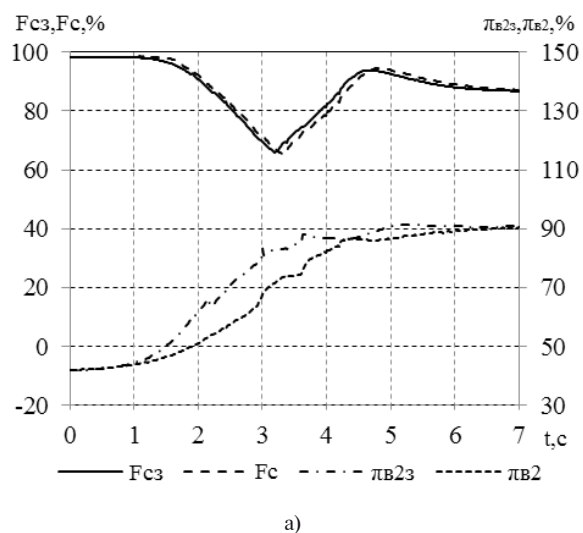


Рис. 7. Приемистость МГ-ПФ (алгоритм  $\pi_{B2} \rightarrow F_c \rightarrow I$ ): а)  $F_c$  и  $\pi_{B2}$ ; б)  $I$

Этот контур определяет динамику сопла на приемистости, а это существенно влияет на характер изменения тяги и запасов газодинамической устойчивости вентилятора.

Учитывая высокие требования к приемистости такого типа двигателей, необходимо обеспечить высокую динамику контуров регулирования  $\pi_T$  или  $\pi_{B2}$ .

В данной статье изложен опыт разработки и доводки контура регулирования  $\pi_{B2}$  ТРДДФ.

Последовательно было разработано и внедрено два варианта алгоритма:  $\pi_{B2} \rightarrow F_c \rightarrow I$  и  $\pi_{B2} \rightarrow I$ . Оба алгоритма обеспечили работу двигателя в соответствии с требованиями технического задания при стендовых и летных испытаниях.

Преимущество первого варианта алгоритма – простота реализации законов ограничения максимальной и минимальной площади критического сечения сопла, а также возможность автономной отладки контура  $F_c \rightarrow I$  с последующей отладкой контура  $\pi_{B2} \rightarrow F_c \rightarrow I$ .

Второй вариант алгоритма обеспечил улучшение динамики и робастности контура регулирования. Возможность регулирования момента переключения контуров и скорости подхода к граничным значениям площади сопла исключила перерегулирование и возможные удары о механические упоры при ограничении минимальной и максимальной площади сопла. В этой структуре стала возможна независимая настройка контура регулирования  $\pi_{B2}$ . Следует отметить, что в этом варианте алгоритма использовались параметры, полученные при автономной отладке контура  $F_c \rightarrow I$ .

### Литература

1. Jaw Link C. Aircraft engine control : Design, System analysis, and Health Monitoring [Text] / Link C. Jaw, Jack D. Mattingly // AIAA Education Series. – 2009. – 361 с.
2. Richter Hanz. Advanced Control of Turbofan Engines [Text] / Hanz Richter // Springer-Verlag New York Inc. – 2014. – 266 с.
3. Черкасов Б. А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей [Текст] : учеб. для вузов / Б.А. Черкасов – М. : Машиностроение, 1988. – 360 с.
4. Синяков А. Н. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками [Текст] : учеб. для вузов / А. Н. Синяков, Ф. А. Шаймарданов – М. : Машиностроение, 1991. – 320 с.
5. Spang III, H. A. Control of Jet Engines [Text] / H. A. Spang III, H. Brown // Control Engineering Practice 7, Elsevier Science Ltd. – 1999. – С. 1043-1059.

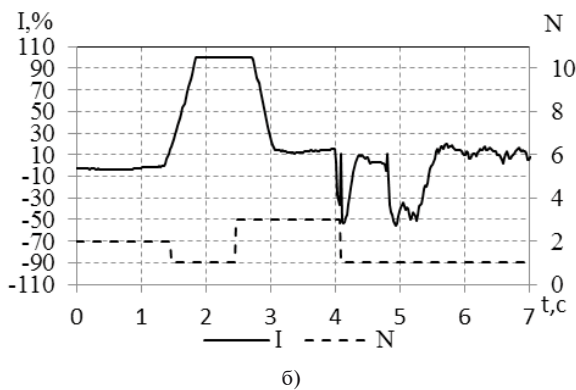
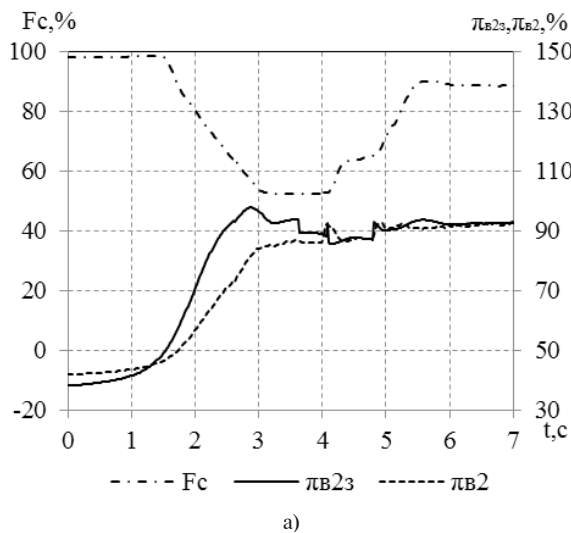


Рис. 8. Приемистость МГ-ПФ (алгоритм  $\pi_{B2} \rightarrow I$ ):  
а)  $F_c, \pi_{B2}$ ; б)  $I, N$

Поступила в редакцию 12.05.2016

**С.І. Суховій. Покращення динаміки регулювання ступеня підвищення тиску вентилятора в зовнішньому контурі ТРДДФ під час доведення САК**

*Під час створення і доведення САК ТРДДФ було виконано синтез двох варіантів алгоритму регулювання ступеня підвищення тиску вентилятора в зовнішньому контурі ( $\pi_{\delta 2}$ ) ТРДДФ. Проведено аналіз переваг та недоліків алгоритмів за результатами стендових випробувань. Показано, що алгоритм, в якому формування проміжної заданої площі сопла з подальшим визначенням току керування ( $\pi_{\delta 2} \rightarrow F_c \rightarrow I$ ) простіший та більш придатний для доведення, оскільки дозволяє незалежно налаштувати контур  $F_c \rightarrow I$ . Проте кращі динамічні властивості забезпечив варіант алгоритму з формуванням току керування безпосередньо за  $\pi_{\delta 2}$  ( $\pi_{\delta 2} \rightarrow I$ ).*

**Ключеві слова:** САК ТРДДФ, контур керування  $\pi_{\delta 2}$  ТРДДФ, динамічні властивості САК.

**S.I. Sukhovey. Turbofan bypass ducting fan pressure ratio control improvement during development test**

*During designing and development test of turbofan control system two algorithms of turbofan bypass ducting fan pressure ratio ( $\pi_{f2}$ ) control were synthesized. Advantages and disadvantages of the algorithms were discussed based on development test results. It is shown that algorithm which forms intermediate nozzle area and then control current is simple and convenient for development test. But algorithm that forms control current based on  $\pi_{f2}$  error provides more dynamics.*

**Key words:** turbofan engine control system,  $\pi_{f2}$  control loop of turbofan, control system dynamic properties.