

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 ТРДДФ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ПРЕДИКТОРА СМИТА

В процессе доводки САУ ТРДДФ было предложено использовать алгоритм предиктора Смита для регулирования степени повышения давления вентилятора в наружном контуре ($\pi_{в2}$). Это позволило улучшить динамические свойства двигателя и повысить робастность алгоритма управления за счет учета запаздывания в контуре. Была выполнена оценка влияния отклонения параметров исполнительного устройства в процессе эксплуатации от параметров модели математической модели нормального состояния на точность регулирования. Предложена модификация алгоритма, снижающая влияние изменения технического состояния исполнительного устройства на качество регулирования.

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

Введение

Специфика применения ТРДДФ предопределяет высокие требования к его динамике. Это обусловлено эксплуатационными, тактико-техническими характеристиками летательных аппаратов, на которых используется этот тип двигателя и необходимостью обеспечения высоких уровней безопасности и надежности [1, 2].

Наибольшую сложность представляет обеспечение высоких динамических свойств на форсажных режимах, что обусловлено сложностью и взаимным влиянием физических процессов, протекающих в узлах двигателя.

Процесс горения в форсажной камере сгорания (ФКС) оказывает существенное влияние на газогенератор. На форсажных режимах необходимо обеспечить максимальный режим работы газогенератора, но при этом не допустить превышения параметрами предельных уровней, так как это приведет к повышенной выработке ресурса или разрушению элементов конструкции.

Влияние ФКС на газогенератор парируется изменением площади сопла. Это обеспечивается путем регулирования одного из параметров газогенератора: степени понижения давления в турбине π_t или степени повышения давления в наружном контуре вентилятора $\pi_{в2}$. Для этого формируется контур регулирования $F_c \rightarrow \pi_t$ [3, 4] или $F_c \rightarrow \pi_{в2}$ [5].

Этот контур в значительной мере определяет динамику ГТД, так как его исполнительным устройством является регулируемое сопло. Динамика сопла существенно меньше динамики дозаторов форсажного и основного топлива.

Поэтому важным фактором для улучшения динамических свойств ТРДДФ является применение алгоритмов управления, использующих все резервы для обеспечения максимальной динамики контура регулирования $\pi_{в2}$. Опыт разработки и доводки САУ показал, что эффективным способом повышения динамики контура является учет запаздывания в алгоритмах управления.

Наличие задержки в контуре управления снижает запасы устойчивости [6]. Это не позволяет использовать высокие коэффициенты усиления и обеспечить высокие динамические свойства системы.

Способ решения проблемы управления объектами с временными задержками был предложен в 1957 году профессором Отто Смитом [7]. В настоящей работе предлагается использовать регулятор Смита в контуре регулирования $\pi_{в2}$ для улучшения его динамических свойств.

1. Регулятор Смита

Предложенный Отто Смитом регулятор (рис. 1) включает в себя математическую модель объекта управления, учет запаздывания и получил название предиктор Смита.

Передаточная функция такой системы имеет вид

$$W(s) = \frac{Y(s)}{Y_0(s)} = \frac{W_p(s) W_{oy}(s) e^{-\tau s}}{1 + (1 - e^{-\tau s}) W_p(s) W_m(s) + W_p(s) W_{oy}(s) e^{-\tau s}}$$

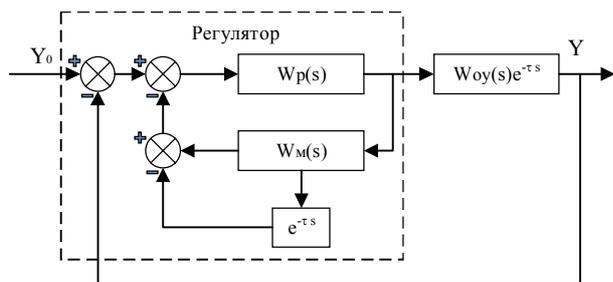


Рис. 1. Блок-схема системы с регулятором Смита

Здесь $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора, $W_m(s)$ – математическая модель объекта управления, $W_{oy}(s)$ и $e^{-\tau s}$ – передаточные функции объекта управления и временной задержки.

Если математическая модель (ММ) точно соответствует объекту управления и $W_m(s) = W_{oy}(s)$, то передаточная функция примет вид

$$W(s) = \frac{Y(s)}{Y_0(s)} = \frac{W_p(s)W_{oy}(s)}{1 + W_p(s)W_{oy}(s)} e^{-\tau s}.$$

В данном случае это произведение передаточной функции системы без запаздывания и звена задержки. Переходная характеристика будет как в системе без запаздывания, но смещена по времени на величину временной задержки. Принципиальным является то, что предиктор Смита позволяет исключить временную задержку из замкнутого контура, что позитивно сказывается на запасах устойчивости системы.

2. Алгоритм регулирования $\pi_{в2}$ с предиктором Смита

Кроме основной функции – поддержания параметра $\pi_{в2}$ за счет изменения площади критического сечения сопла – регулятор должен ограничивать минимальную и максимальную площади сопла, чтобы исключить удары элементов конструкции о ме-

ханические упоры. Для этого в регуляторе формируется три контура, один из которых поддерживает $\pi_{в2}$, а два других ограничивают площадь сопла (рис. 2).

Один из основных элементов предиктора Смита – математическая модель объекта управления. В данном случае это математическая модель привода сопла. Привод сопла включает насос, гидромеханический регулятор, гидроцилиндры и систему тяг. Каждая из составляющих включает в себя множество элементов, поэтому построение и доводка математической модели такой системы достаточно сложная и трудоемкая задача. Ситуация осложняется тем, что для построения такой математической модели необходимо знать усилие на штоках гидроцилиндров со стороны створок реактивного сопла. Это усилие зависит от режима работы двигателя, режима полета и внешних условий. И если при стендовых испытаниях его можно определить экспериментально с приемлемой точностью за счет установки дополнительных датчиков, то для всего множества полетных условий расчетное или экспериментальное определение затруднительно.

В связи с этим при разработке САУ на первом этапе составлялась и отлаживалась поэлементная ММ привода сопла. Такая ММ требовала значительных вычислительных ресурсов и не могла быть использована в реальном времени для полунатурного стенда. Затем по серии откликов на различные входные воздействия определялась аппроксимация ММ в виде элементарного динамического звена.

Наилучшую аппроксимацию в данной задаче обеспечило аperiодическое звено

$$W_m(s) = \frac{K}{Ts+1},$$

где K – коэффициент усиления,
 T – постоянная времени.

На рис. 3 приведены результаты моделирования параметров двигателя в процессе приемистости малый газ (МГ) – полный форсаж (ПФ) при отсутствии временной задержки в контуре.

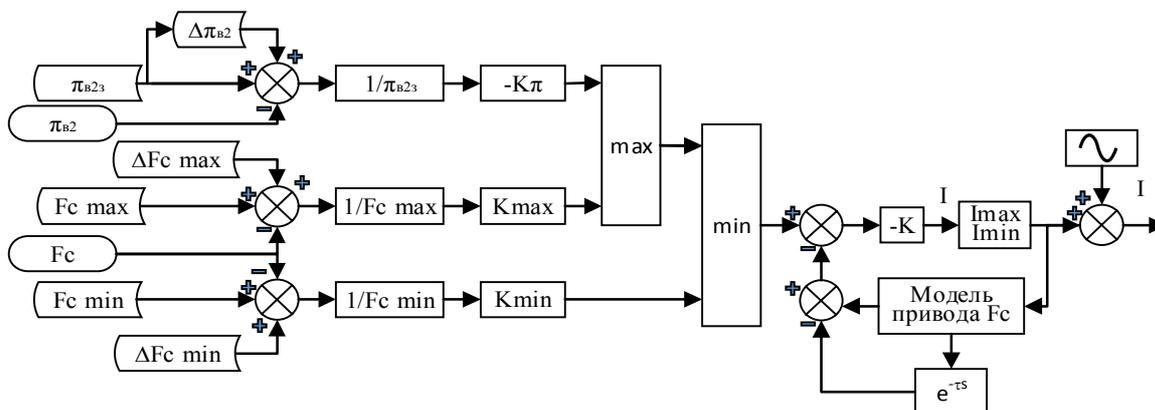


Рис. 2. Алгоритм регулирования $\pi_{в2}$ с предиктором Смита

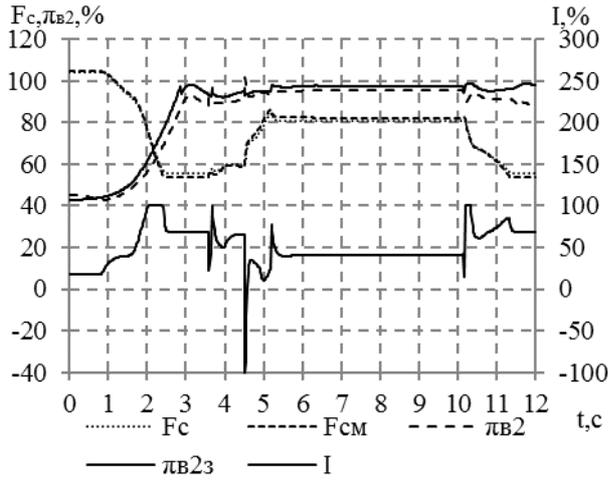


Рис. 3. Приемистость МГ-ПФ без временной задержки в контуре

Здесь F_c – фактическая площади сопла, F_{cm} – площадь сопла, рассчитанная по ММ, I – ток управления.

На рис. 4 приведены результаты моделирования приемистости при наличии задержки 0,04 с, однако без учета задержки в алгоритме управления. Уменьшение запасов устойчивости проявилось в колебательном характере изменения тока управления и увеличении забросов по площади сопла.

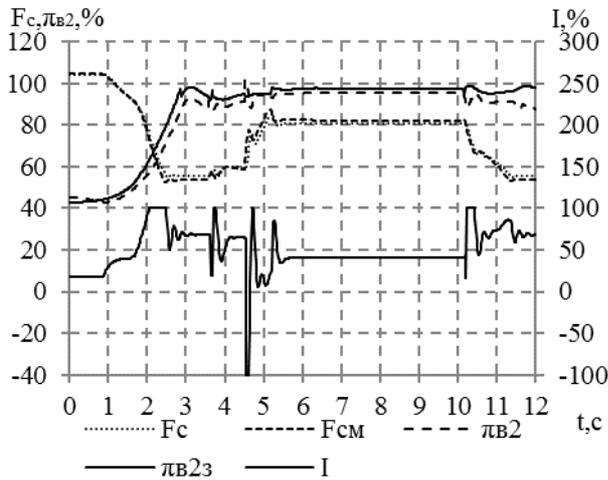


Рис. 4. Приемистость МГ-ПФ с временной задержкой 0,04 с, без учета задержки в алгоритме управления

На рис. 5 приведены результаты моделирования приемистости с задержкой в контуре и с алгоритмом управления, учитывающим эту задержку. Характер изменения тока управления близок к системе без запаздывания (рис. 3), что свидетельствует о восстановлении запасов устойчивости в системе. Т. е. получили систему с параметрами, идентичными системе без задержки.

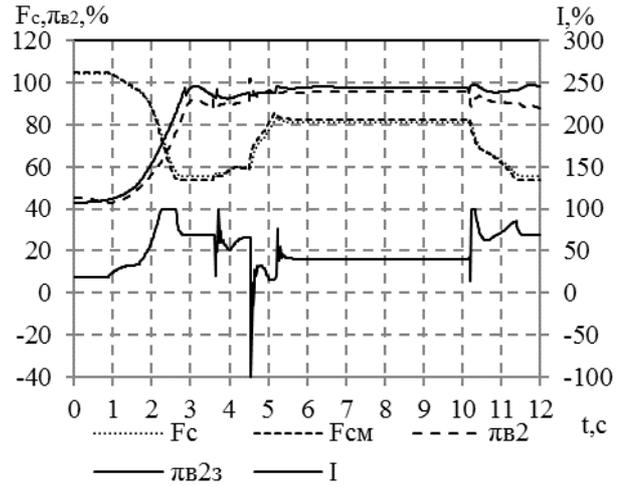


Рис. 5. Приемистость МГ-ПФ с временной задержкой 0,04 с и с учетом задержки в алгоритме управления

Увеличилось отставание площади сопла, рассчитанной по ММ F_{cm} , и фактической F_c на величину задержки.

Это идеальный случай, когда ММ полностью соответствует объекту управления. Однако в процессе эксплуатации это соответствие может нарушаться. Для оценки последствий такого нарушения было выполнено исследование влияния отклонения параметров K и T привода сопла от номинальных значений ММ нормального состояния, а также смещения равновесного тока управления.

На рис. 6 и 7 приведены результаты моделирования приемистости МГ-ПФ при отклонении параметра K на 10% и равновесного тока на 25%. В первом случае это привело к увеличению диапазона изменения площади сопла, рассчитанной по ММ F_{cm} , по сравнению с фактическим ее значением F_c .

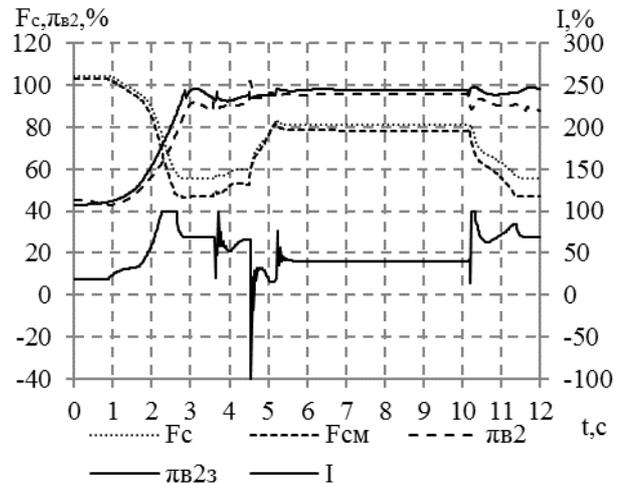


Рис. 6. Приемистость МГ-ПФ с временной задержкой 0,04 с, с учетом задержки в алгоритме управления и отклонением K на 10%

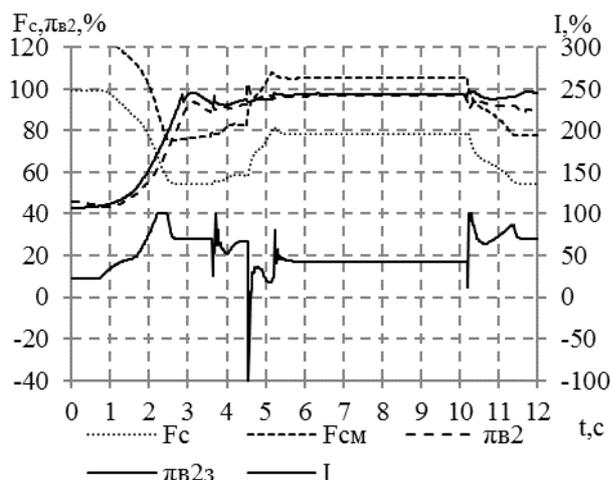


Рис. 7. Приемистость МГ-ПФ с временной задержкой 0,04 с, с учетом задержки в алгоритме управления и отклонением равновесного тока на 25%

А во втором случае – к смещению F_{cm} относительно F_c . Т.е. отклонение параметров приводит к изменению динамического диапазона F_{cm} и выходу его значений за физически обусловленный диапазон. Это снижает качество регулирования и надежность алгоритма.

3. Алгоритм регулирования $\pi_{в2}$ с предиктором Смита и коррекцией тока управления

Для уменьшения влияния отклонения характеристик исполнительного устройства в процессе эксплуатации был предложен вариант алгоритма с коррекцией тока управления (рис. 8). В этом варианте алгоритма добавляется связь, которая корректирует ток управления реального исполнительного устройства пропорционально (коэффициент K_k) разности нормированного значения F_c и выхода ММ с учетом временного запаздывания. На рис. 9 и 10 приведены результаты моделирования приемистости МГ-ПФ с этим вариантом алгоритма.

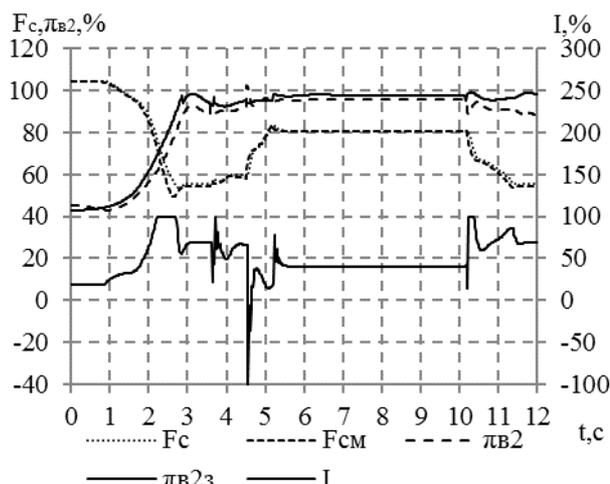


Рис. 9. Приемистость МГ-ПФ с временной задержкой 0,04 с, с учетом задержки в алгоритме управления, отклонением K на 10% и коррекцией тока управления

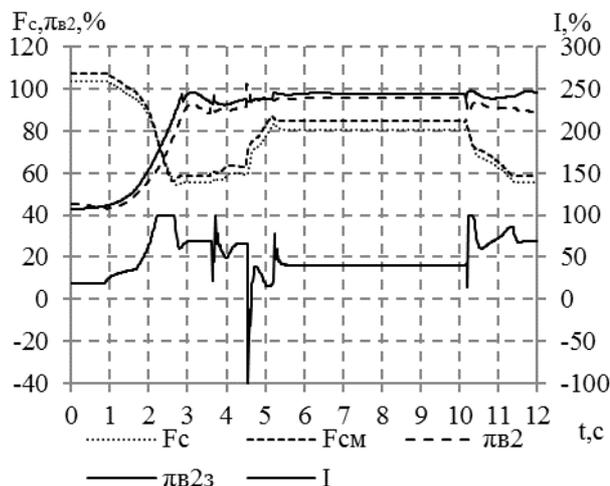


Рис. 10. Приемистость МГ-ПФ с временной задержкой 0,04 с, с учетом задержки в алгоритме управления, отклонением равновесного тока на 25% и коррекцией тока управления

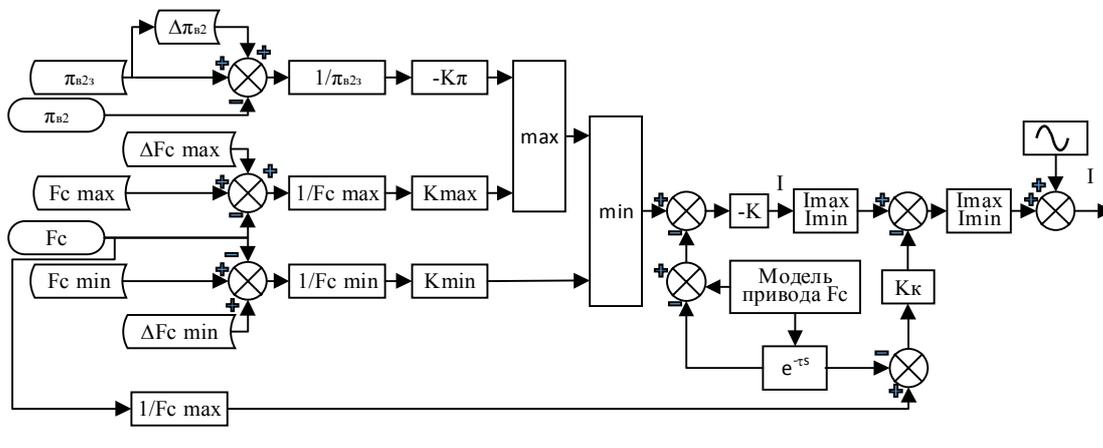


Рис. 8. Алгоритм регулирования $\pi_{в2}$ с предиктором Смита и коррекцией тока управления

При наличии отклонения параметров исполнительного устройства различие между фактической и рассчитанной по ММ площадью сопла существенно снизилось.

4. Обработка алгоритма при стендовых испытаниях ТРДДФ

Предложенный алгоритм был внедрен и доведен при стендовых испытаниях ТРДДФ. Применение алгоритма позволило перейти к пропорциональному закону управления, так как учет запаздывания в контуре позволил увеличить коэффициент усиления. Предусмотренные в алгоритме поправки позволили обеспечить приемлемые значения статических ошибок. На рис.11 приведено изменение параметров двигателя в процессе приемистости МГ-ПФ при стендовых испытаниях.

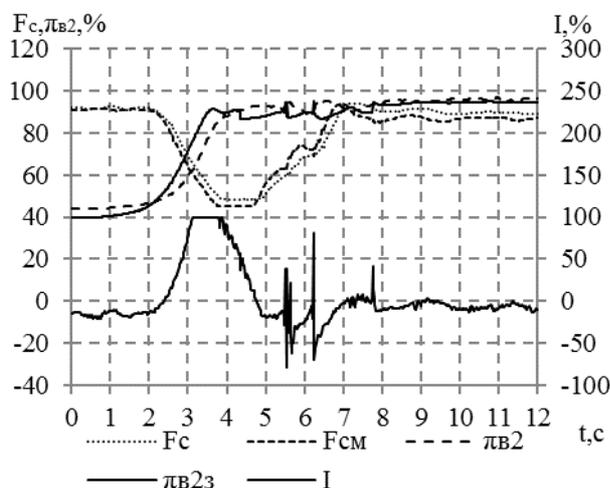


Рис. 11. Приемистость МГ-ПФ при стендовых испытаниях ТРДДФ

Заключение

Изменение тяги и запасов газодинамической устойчивости вентилятора на приемистости ТРДДФ в значительной мере определяется динамикой контура регулирования $\pi_{в2}$. Одним из способов ее улучшения является учет временной задержки в контуре регулирования.

В статье показано, что для этого можно использовать алгоритм предиктора Смита. Он эффективно парирует временное запаздывание и позволил перейти к пропорциональному закону управления в контурах регулирования $\pi_{в2}$ и ограничения площади сопла.

Однако отклонение параметров ММ, используемой в алгоритме предиктора Смита, приводит к отклонению рассчитанных и измеренных значений

параметров. Это осложняет контроль за состоянием системы и может негативно сказаться на ее динамических свойствах.

Предложен вариант алгоритма предиктора Смита с коррекцией тока управления, который позволяет уменьшить влияние отклонения параметров. Алгоритм был опробован и доведен при стендовых испытаниях двигателя, успешно прошел испытания в термобарокамере и на самолете.

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 p.
2. Richter, Hanz *Advanced Control of Turbofan Engines [Text]* / Hanz Richter // *Springer-Verlag New York Inc.* – 2014. – 266 p.
3. Черкасов, Б. А. *Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей [Текст]* : учеб. для вузов / Б. А. Черкасов – М. : Машиностроение, 1988. – 360 с.
4. Сняжков, А. Н. *Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками [Текст]* : учеб. для вузов / А. Н. Сняжков, Ф. А. Шаймарданов – М. : Машиностроение, 1991. – 320 с.
5. Исследование двухмерной САУ частотой вращения ротора вентилятора и степени повышения давления в вентиляторе двухроторного ГТД при произвольных входных воздействиях [Текст] / В. И. Гостев, С. Н. Скуртов, А. Н. Чаузов [и др.] // *Радиоэлектроника. Информатика. Управление*. – 2006. – № 1. – С. 137-144.
6. Александров, Е. С. *Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.1. Теорія автоматичного керування [Текст]* / Е. С. Александров, Е. П. Козлов, Б. І. Кузнєцов. – Х. : НТУ "ХПИ", 2002. – 490 с.
7. Оллсон, Г. *Цифровые системы автоматизации и управления [Текст]* / Г. Оллсон, Дж. Плуни. – СПб. : Невский диалект, 2001. – 557 с.

References

1. Jaw, Link C. *Aircraft engine control : Design, System Analysis, and Health Monitoring. AIAA Education Series*, 2009. 361 p.
2. Richter, Hanz. *Advanced Control of Turbofan Engines. Springer-Verlag New York Inc.*, 2014. 266 p.
3. Cherkasov, B. A. *Avtomatika i regulirovanie vozdušno-reaktivnyh dvigatelej [Automation and control of gas-turbine engines]*. Moscow, Engineering Publ., 1988. 360 p.
4. Sinjakov, A. N., Shajmardanov, F. A. *Sistemy avtomaticheskogo upravlenija LA i ih silovymi ustanovkami [Control systems of aircraft and their power plants]*. Moscow, Engineering Publ., 1991. 320 p.
5. Gostev, V. I., Skurtov, S. N., Chauzov, A. N.,

Baranov, S. S. Issledovanie dvuhmernoj SAU cha-stotoj vrashhenija rotora ventiljatora i stepen'ju povyshenija davlenija v ventiljatore dvuhrotornogo GTD pri proizvol'nyh vhodnyh vozdeystvijah [Two-dimensional fan rotor speed and fan pressure rise control system research of two-spool GTE at arbitrary input]. *Radioelektronika. Informatyka. Upravlinnya*, 2006, no. 1, pp. 137-144.

6. Aleksandrov, Ye. Ye., Kozlov, E. P., Kuznyetsov, B. I. *Avtomatychne keruvannya rukhomymu*

ob'yektamy i tekhnolohichnymy protsesamy. Teoriya avtomatychnoho keruvannya [Automatic control of moved objects and technological processes. Automatic control theory]. Kharkiv, NTU "KhPP", vol. 1, 2002. 490 p.

7. Ollson, G., Piani Dzh. *Cifrovye sistemy avtomatizacii i upravlenija* [Digital systems of automation and control]. SPb., Nevskij dialect Publ., 2001. 557p.

Поступила в редакцию 12.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом проблем управления магнитным полем Б. И. Кузнецов, Институт технических проблем магнетизма НАН Украины, Харьков.

ПОКРАЩЕННЯ ДИНАМІКИ РЕГУЛЮВАННЯ СТУПЕНЮ ПІДВИЩЕННЯ ТИСКУ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДДФ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ ПРЕДІКТОРА СМІТА

С. І. Суховій

Під час доведення САК ТРДДФ було запропоновано використовувати алгоритм предиктора Сміта для регулювання ступеню підвищення тиску вентилятора в зовнішньому контурі ($\pi_{в2}$). Це дозволило покращити динамічні властивості двигуна і підвищити робастність алгоритму керування за допомогою врахування затримки у контурі. Було виконано оцінку впливу відхилення параметрів виконавчого пристрою і параметрів його математичної моделі нормального стану на точність регулювання. Запропоновано модифікацію алгоритму, що зменшує вплив зміни технічного стану виконавчого пристрою на якість регулювання

Ключеві слова: САК ТРДДФ, контур регулювання $\pi_{в2}$, динамічні властивості САК, предиктор Сміта.

TURBOFAN FAN PRESSURE RATIO CONTROL IMPROVEMENT AT THE EXPENSE OF SMITH PREDICTOR ALGORITHM

S. I. Sukhovey

During development test of turbofan control system Smith predictor algorithm was suggested to regulate fan pressure ratio (π_{f2}). It improved engine dynamics and made control algorithm more robust at the expense of taking to account the time lag in the loop. Influence on control accuracy of actuator technical state and actuator normal state mathematical model deviation during maintenance was analyzed. Algorithm modification was suggested to decrease actuator technical state deviation influence on control quality.

Key words: turbofan engine control system, π_{f2} control loop, control system dynamic properties, Smith predictor.

Суховой Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Sukhovey Sergey Ivanovich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Aircraft engines designing, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: aedlab@gmail.com.