

УДК 621.452.3.001

С.И. СУХОВЕЙ

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

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ДОЗАТОРОМ ТОПЛИВА ГТД ЗА СЧЕТ УЧЕТА ДИНАМИКИ КЛАПАНА ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ (КППД)

Проведен анализ учета динамики КППД с целью повышения точности дозирования топлива в САУ ГТД при сохранении динамических свойств системы. Выполнен сравнительный анализ трех вариантов контура управления: без учета динамики КППД, с учетом динамики КППД в замкнутом контуре и с коррекцией заданного значения в соответствии с динамикой КППД. Учет КППД в замкнутом контуре дает преимущества в динамике при небольших коэффициентах усиления, но не позволяет обеспечить высоких значений коэффициента как в системе без учета КППД. Использование алгоритма с коррекцией заданного значения в соответствии с динамикой КППД позволяет обеспечить высокие значения коэффициента усиления и повысить точность дозирования топлива.

Ключевые слова: повышение точности регулирования ГТД, регулирование расхода топлива, дозатор топлива, расход топлива.

Введение

Для обеспечения эффективности, большого ресурса и высокого уровня надежности ГТД к системам автоматического управления (САУ) предъявляются высокие требования. Комплекс требований обуславливает необходимость обеспечения высоких значений показателей качества САУ ГТД. Как показывает опыт доводки САУ двигателей [1-4], успех решения этой задачи во многом определяется динамикой и точностью исполнительных устройств. Получение высокой точности и хороших динамических свойств агрегатов – это комплексная задача, решаемая на этапе разработки их конструкции и синтеза контуров управления.

Расход топлива как регулируемый фактор используется в ГТД любого типа. Точность и динамические свойства этого контура имеют первостепенное значение при отработке программ разгонного ускорения и противопомпажной защиты, а также в значительной степени влияют на показатели качества САУ двигателя в целом.

В статье исследуется возможность повышения точности контура поддержания расхода топлива за счет учета динамики КППД.

1. Математическая модель дозатора топлива

Математическая модель дозатора топлива представляет собой произведение двух передаточных функций. Одна из них определяет динамику дозирующего элемента, а вторая – динамику клапана постоянного перепада давления.

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s), \quad (1)$$

$$W_1(s) = \frac{\Delta I}{\Delta i} = \frac{0.3}{10s+1}, \quad (2)$$

$$W_2(s) = \frac{\Delta G_T}{\Delta i} = \frac{225}{0.05s+1}, \quad (3)$$

где Δi – изменение тока управления, мА;
 ΔI – изменение перемещения датчика положения дозирующей иглы, см;

ΔG_T – изменение расхода топлива, кг/ч;

τ_1 – постоянная времени дозирующей иглы, с;

τ_2 – постоянная времени клапана постоянного перепада, с.

На рис. 1 приведена переходная характеристика объекта управления.

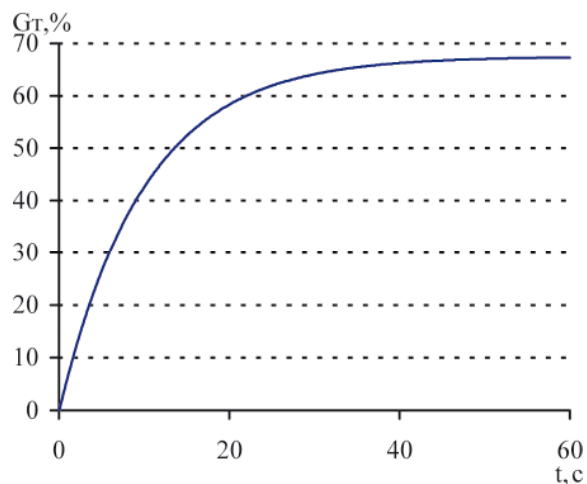


Рис. 1. Переходная характеристика объекта управления

В большинстве случаев при синтезе САУ динамикой КППД пренебрегают [5]. Так как обратная связь замыкается по фактическому положению дозирующего элемента (без учета КППД), а постоянная времени КППД существенно меньше постоянной времени дозирующего элемента.

2. Синтез регулятора дозатора топлива

Алгоритмы противопомпажной защиты и восстановления режимов работы ГТД требуют высокого быстродействия и точности. Это может быть обеспечено с помощью П-регулятора при достаточно высоких коэффициентах усиления (если это возможно) для минимизации статической ошибки регулирования [6]. Синтез контура регулирования дозатора топлива был выполнен с помощью корневых годографов [7] для частоты дискретизации 50 Гц. В качестве критерия синтеза было выбрано обеспечение коэффициента демпфирования в системе не ниже 0.707.

2.1. Синтез регулятора с учетом динамики КППД

На рис. 2 приведена структура регулятора с учетом динамики КППД. В таком регуляторе обратная связь замыкается не по расходу, пересчитанному из положения дозирующего элемента, а по расходу топлива, который определяется с учетом динамики КППД. При этом передаточная функция, отражающая динамику КППД, реализуется в блоке управления.

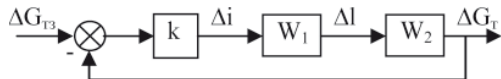


Рис. 2. Структура замкнутого контура регулирования дозатора топлива с учетом динамики КППД

На рис. 3 приведены корневой годограф и корни характеристического уравнения, обеспечивающие заданный критерий синтеза. Внутри единичной окружности выделена область, обеспечивающая заданное демпфирование системы. Корневой годограф пересекает эту область в вертикальном направлении. Таким образом, возможные варианты настройки системы ограничены участком годографа внутри обозначенной границы. Увеличению коэффициента усиления соответствует перемещение корней от действительной оси вверх и вниз. На рис. 3 изображено положение корней, которое обеспечивает запас устойчивости по амплитуде 25.3 дБ, по фазе - 72.2°. Это соответствует коэффициенту усиления $k = 0.86$. При этом корни характеристического уравнения замкнутой системы комплексно-сопряженные $0.824 \pm 0.0895j$.

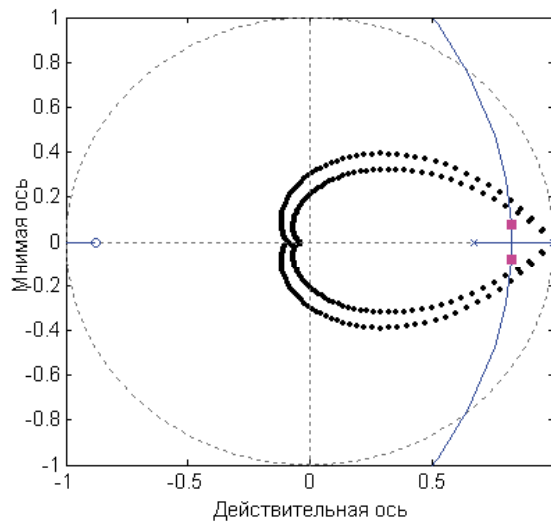


Рис. 3. Положение корней характеристического уравнения системы с учетом динамики КППД на комплексной плоскости.

2.2. Синтез регулятора без учета динамики КППД

На рис. 4 приведена структурная схема контура управления без учета динамики КППД. В этом случае вместо передаточной функции КППД используется усилительное звено, выполняющее пересчет положения дозирующего элемента в расход топлива.

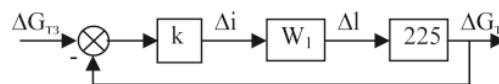


Рис. 4. Структура замкнутого контура регулирования дозатора топлива без учета динамики КППД

На рис. 5 приведен корневой годограф для этой системы с границей, соответствующей коэффициенту демпфирования 0.707. В данном случае характеристическое уравнение замкнутой системы имеет один действительный корень. На рис. 5 показано его положение (0.89) для запаса устойчивости по амплитуде 25.3 дБ, полученного в предыдущем варианте системы. При этом запас по фазе - 87.9°, коэффициент усиления - $k = 0.8$. В данной системе увеличению коэффициента усиления соответствует перемещение корня влево по действительной оси, т. е. имеется существенный резерв по увеличению коэффициента усиления системы.

2.3. Сравнительный анализ регуляторов

На рис. 6 приведены переходные процессы для двух вариантов регулятора по фактическому расходу топлива – расходу топлива за КППД.

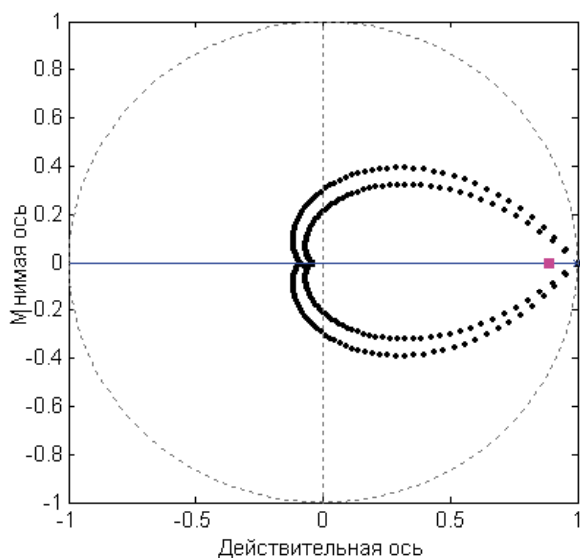


Рис. 5. Положение корней системы на комплексной плоскости системы без учета динамики КППД.

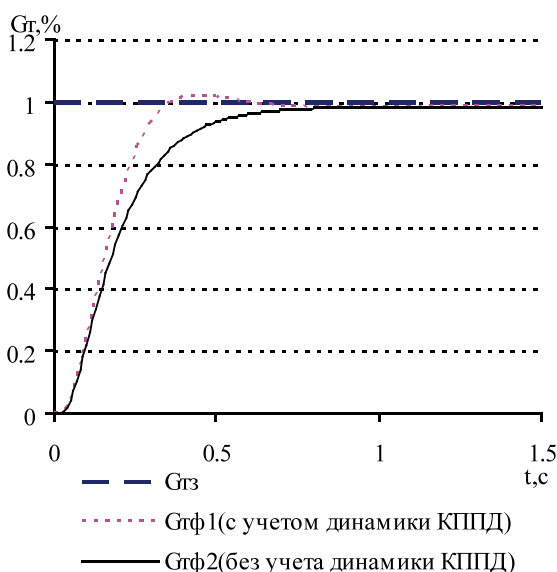


Рис. 6. Переходные процессы для двух вариантов регулятора

Очевидно, что при одинаковых запасах устойчивости по амплитуде и близких по фазе время первого согласования системы с учетом динамики КППД в два раза меньше. При этом в динамике разница фактических расходов топлива достигает 16%.

Однако в системе без учета динамики КППД имеются возможности по увеличению коэффициента k до 7.4 при сохранении заданных демпфирующих свойств системы и приемлемых запасов устойчивости (6дБ по амплитуде, 60° по фазе). В такой системе имеется существенный резерв по улучшению динамических свойств.

3. Регулятор с коррекцией заданного значения

Объединить преимущества двух ранее рассмотренных систем позволяет регулятор, структурная схема которого приведена на рис. 7.



Рис. 7. Структура замкнутого контура регулирования дозатора топлива с коррекцией заданного значения

Корректирующее звено, учитывающее динамику КППД, имеет следующий вид:

$$W_k = 0.05s + 1$$

Корневой годограф будет такой же, как и для системы без учета динамики КППД (рис. 5). То есть имеется достаточно широкий диапазон настройки регулятора.

На рис. 8 приведена отработка гармонического заданного воздействия в системе с коррекцией заданного значения и без ($k=4$).

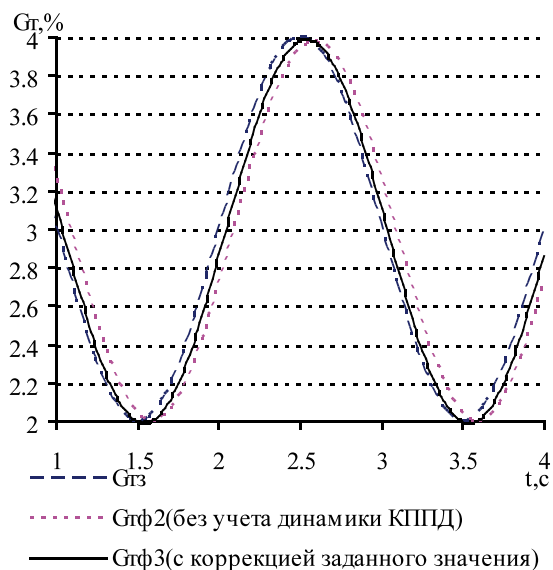


Рис. 8. Отработка гармонического входного воздействия в системе с коррекцией заданного значения и без

Результаты моделирования показали, что применение коррекции заданного значения в системе без учета динамики КППД позволило уменьшить отставание по фазе при отработке гармонического воздействия с 21° до 10° .

4. Испытания с реальным объектом

Была выполнена отработка алгоритма с коррекцией заданного значения с натурным дозатором топлива. Схема стенда приведена на рис. 9.

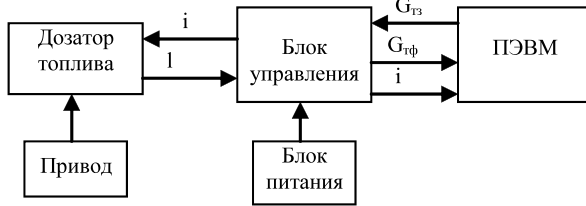


Рис. 9. Схема испытательного стенда.

Формирование законов изменения заданного значения расхода топлива осуществлялось с помощью ПЭВМ. Регистрация фактического расхода топлива и тока управления выполнялась в реальном масштабе времени для последующего анализа.

На рис. 10 приведена структурная схема регулятора, которая была реализована в блоке управления.

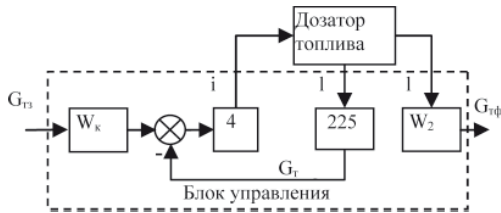


Рис. 10. Структурная схема регулятора, реализованная в блоке управления

Обратная связь выполнена по расходу топлива $G_{тф}$, пересчитанному по положению дозирующего элемента 1. Фактический расход топлива $G_{тф}$ определялся по положению дозирующего элемента с помощью передаточной функции КППД W_2 .

На рис. 11 и 12 приведены результаты отработки системой ступенчатого и гармонического законов изменения заданного расхода топлива.

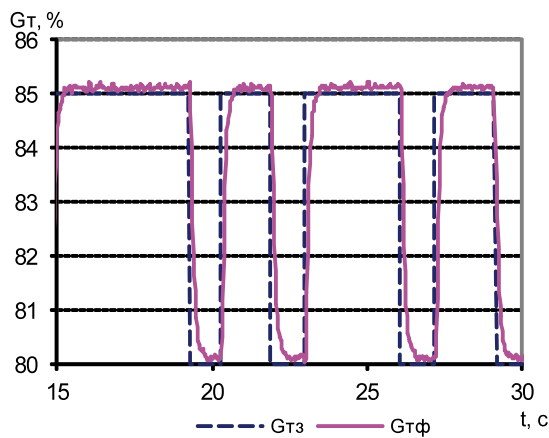


Рис. 11. Отработка системой ступенчатого входного воздействия

Полученные переходные процессы соответствуют результатам предварительного математического моделирования и позволяют обеспечить необходимые показатели качества системы управления ГТД.

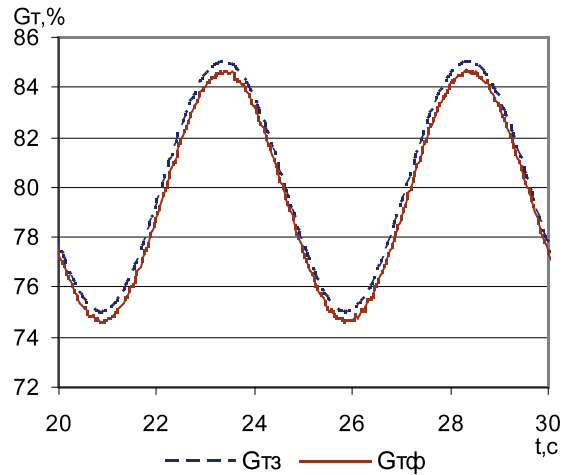


Рис. 12. Отработка системой гармонического закона изменения расхода топлива ($f=1$ Гц)

Заключение

Включение КППД в обратную связь, как динамического звена, существенно снижает максимальное значение коэффициента усиления П-регулятора. Хотя при граничных для данного регулятора коэффициентах усиления он обеспечивает лучшую динамику по сравнению с традиционным вариантом без учета КППД.

П-регулятор с коррекцией задающего воздействия в соответствии с динамикой КППД позволяет улучшить точность при использовании таких же коэффициентов усиления, как и в традиционном регуляторе. Это возможно благодаря тому, что динамическое звено КППД не включено в обратную связь. Такой вариант алгоритма был внедрен и успешно опробован в САУ ТРДД.

Литература

1. Адаптивная САУ расходом топлива с приводом дозатора от электромеханического преобразователя [Текст] / Е.В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховой, С.Н. Емельянов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 4(30). – С.92-95.
2. Павлюк Е.В. Синтез контура управления частотой вращения свободной турбины вспомогательной силовой установки [Текст] / Е.В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховой // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 8(16). – С.110-113.

3. Исследование динамических свойств контура управления частотой вращения свободной турбины вертолетной двигательной установки [Текст] / С.В. Безуглый, С.В. Епифанов, Е.В. Павлюк, С.И. Суховей // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – №10(26).– С.158-162.

4. Согласование контура управления механизацией служебного компрессора с контуром управления подачей топлива для обеспечения ГДУ компрессора ВСУ [Текст] / Е.В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховей, Р.Л. Зеленский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 10(87).– С.218-221.

5. Павлюк Е.В. Модификация математических моделей агрегатов гидромеханической части на различных этапах разработки САУ ГТД [Текст] / Е. В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховей, Т.В. Кулик// *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7(94).– С.176-179.

6. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации [Текст] /В.В. Денисенко// *Современные технологии автоматизации*. – 2006. №4. – С. 66 – 74.

7. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления [Текст]: пер. с англ. / Б. Куо. – М.: Машиностроение, 1986. – 448с.

Поступила в редакцию 15.05.2015

С.І. Суховій. Підвищення точності контуру керування дозатором палива ГТД за допомогою врахування динаміки клапана постійного перепаду тиску (КППТ)

Наведено аналіз врахування динаміки КППТ для підвищення точності дозування палива в САК ГТД при збереженні динамічних властивостей системи. Виконано порівняльний аналіз трьох варіантів контуру: без врахування динаміки КППТ, з врахуванням динаміки КППТ в замкненому контурі та з корекцією заданої змінної у відповідності з динамікою КППТ. Врахування динаміки КППТ в замкненому контурі надає переваги у динаміці при невеликих коефіцієнтах підсилення, але не дозволяє забезпечити високі значення коефіцієнта як у системі без врахування КППТ. Застосування алгоритму з корекцією заданої змінної у відповідності до динаміки КППТ дозволяє забезпечити високі значення коефіцієнту підсилення і підвищити точність дозування палива.

Ключові слова: підвищення точності регулювання ГТД, регулювання витрати палива, дозатор палива, витрати палива.

S. I. Sukhovii. Fuel distributor control loop accuracy increasing by means of constant pressure drop valve dynamics accounting

Analysis of CPDV dynamics accounting for fuel distributor control loop accuracy increasing was performed. Three control loops were compared: loop which does not include CPDV dynamics, loop which includes CPDV dynamics and loop in which setting value is corrected according to CPDV dynamics. CPDV accounting in closed loop provides higher dynamics at low gains but does not allow high gains that are possible in system without CPDV accounting. System with setting value correction according to CPDV dynamics provides high loop gains and fuel distributor accuracy increasing.

Key words: GTE control accuracy increasing, fuel flow control, fuel distributor, fuel flow.