

С.В. Лозня<sup>1</sup> к.т.н.  
С.А. Пустовой<sup>1</sup> к.т.н.  
И.И. Степаненко<sup>1</sup>

## УДАЛЕННАЯ АВТОНАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ МОТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

<sup>1</sup>Общество с ограниченной ответственностью "Котрис", Украина, kotris@kotris.com.ua

*В статье представлен алгоритм процедуры удаленной автоматической настройки цифровых регуляторов при моторных испытаниях авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). В качестве примера реализации процедуры используется автонастройка пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора степени повышения давления вентилятора по наружному контуру, воздействующего на заданную площадь сопла двухконтурного турбореактивного двигателя с форсажной камерой сгорания АИ-222К-25Ф разработки ГП "Ивченко-Прогресс". Представлены результаты экспериментальной апробации разработанного алгоритма при настройке параметров ПИД-регулятора частоты вращения газомотокомпрессора 10ГКНА.*

**Ключевые слова:** алгоритм удаленной автонастройки регуляторов, цифровая система автоматического управления, турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания.

### Постановка проблемы

Выбор режима полного форсирования (ПФ) в качестве расчетного для доводки электронного цифрового регулятора (ЭЦР) двухконтурного турбореактивного двигателя с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ) оставляет относительно мало времени для настройки параметров регулятора в процессе моторных испытаний, связан с большими материальными затратами, а также требует высокой квалификации. И поэтому, принятие в эксплуатацию системы автоматического управления (САУ) настроенной далеко не оптимально, остается вполне возможным и влечет за собой соответствующие потери в характеристиках двигателя. Существенно уменьшить эти потери, а также сократить время и качество доводки САУ на режиме ПФ позволяет автоматизация процесса настройки регуляторов в процессе моторных испытаний.

Не менее важную роль автоматизация процесса настройки сохраняет и во время эксплуатации двигателя, так как она позволяет поддерживать оптимальную настройку в течение всего жизненного цикла двигателя, несмотря на существующие в большинстве случаев непредвиденные изменения его свойств.

### Анализ известных решений

Специалистам известно, что разработка функции автонастройки для ПИ и ПИД регуляторов в ее традиционном понимании представляет собой достаточно трудную задачу. Именно поэтому существующие варианты ее решения результативны в основном на объектах управления со сравнительно простой динамикой [1-2].

Большинство существующих способов настройки предполагают наличие адекватного математического описания объекта регулирования и построенной на его основе модели системы. Следует отметить трудности, ограничивающие применение подобного подхода. Во-первых, получение достоверной адекватной модели оказывается возможным лишь для сравнительно простых, как правило, одноконтурных САУ, для которых эффективными являются эмпирические или ручные методы настройки. В свою очередь, если удастся создать адекватную модель, она оказывается жестко привязанной к множеству характеристик объекта управления (ОУ), что создает проблемы ее адаптации при изменении внешних условий и свойств ОУ. Во-вторых, сложные математические модели в совокупности с современными алгоритмами оптимизации требуют значительных вычислительных ресурсов.

### Формулирование задачи

Задача состоит в обеспечении применения автоматизированных процедур настройки регуляторов авиационных ГТД без риска возникновения аварийных ситуаций в процессе моторных испытаний за счет ограничения диапазона работы регулятора при автоматической настройке в узком диапазоне управляющего воздействия в окрестности управляющих сигналов разомкнутых контуров управления.



## 2. Результаты реализации алгоритма автонастройки

Реализация предложенной выше процедуры автонастройки выполнена на базе комплекса математических моделей ТРДДФ и САУ, входящих в состав интеллектуального испытательного стенда КАИ-25Ф [4].

Результаты автонастройки коэффициентов усиления П- и И-каналов регулятора  $\pi_6$  на различных режимах работы двигателя АИ-222К-25Ф представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты автонастройки параметров ПИ регулятора  $\pi_6$  двигателя АИ-222К-25Ф по режимам работы

Режим работы двигателя	$K_a$	$K_i$
Кр	314	0,0179
0,4-М	312	0,0135
М	97,1	0,0181
МФ	69,6	0,0308
ПФ	30,7	0,0192

Анализ оптимальных параметров ПИ регулятора  $\pi_6$  на различных режимах работы двигателя показывает, что при изменении режима от 0,4М до ПФ коэффициент усиления П-канала регулятора следует уменьшить в 10 раз. Таким образом, при настройке регулятора  $\pi_6$  на нефорсированных режимах и сохранении параметров неизменными во всем диапазоне режимов работы двигателя, настройки контура сопла могут оказаться слишком “острыми”. Что может явиться причиной снижения запасов устойчивости и “раскачки” параметров АИ-222К-25Ф при его моторных испытаниях.

С другой стороны применение в ЭЦР ПИ-регулятора с неизменной настройкой, оптимальной на расчетном режиме ПФ, может привести к сильному затягиванию переходных процессов на режимах в районе малого газа.

Таким образом, следует отметить существенную зависимость оптимального коэффициента усиления регулятора от режима работы двигателя. Причем наименьшие запасы устойчивости (меньшие коэффициенты усиления регулятора) характерны для режима полного форсирования, что подтверждает необходимость использования режима ПФ в качестве базового для настройки параметров системы.

## 3. Анализ выбора базового режима для настройках регулятора Пв

Реализация процедуры автонастройки в составе комплекса матмоделей двигателя и его САУ позволила выполнить оценку влияния выбора базового режима для настройки параметров регулятора сопла на качество управления степенью повышения давления воздуха  $\pi_6$ . Анализ производился на базе результатов имитационного моделирования процесса розжига форсажной камеры сгорания. Результаты моделирования представлены в виде двух семейств графиков переходных процессов по заданному и измеренному положению площади сопла (рис. 2) и по запасам газодинамической устойчивости компрессоров (рис 3). Верхние графики на приведенных рисунках соответствуют регулятору, настроенному на максимальном нефорсированном режиме работы двигателя, а нижние – на режиме ПФ.

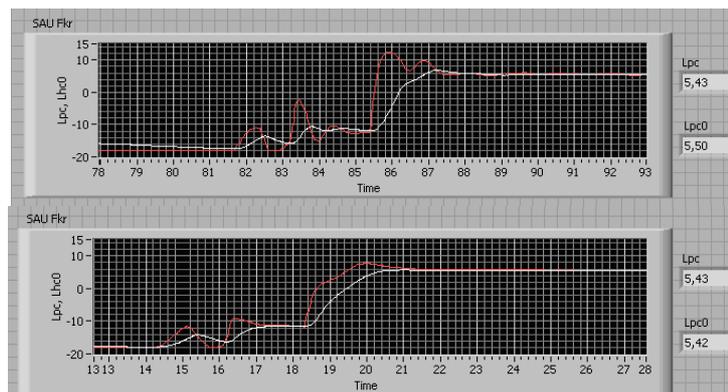


Рис.2. Заданное и фактическое значение перемещения штока гидроцилиндра сопла

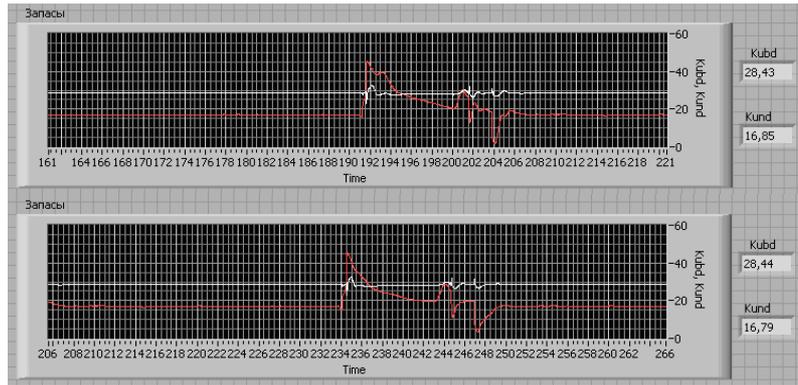


Рис.3. Запас газодинамической устойчивости компрессоров высокого Kubd и низкого Kund давлений

Анализ результатов моделирования показывает, что регулятор  $\pi_6$ , настроенный на режиме М при розжиге форсажа вызывает существенно большую колебательность параметров и ошибки регулирования сопла (см. рис. 2). Настройка регулятора сопла на режиме ПФ позволяет также повысить до 5% располагаемые запасы газодинамической устойчивости (Kund, Kubd) при включении форсажа (см. рис. 3).

#### 4. Экспериментальная апробация алгоритма автоматической настройки

Экспериментальная проверка работоспособности предложенного алгоритма автоматической настройки выполнена на базе ПИД-регулятора частоты вращения коленвала газомотокомпрессора 10ГКНА. Критерием оценки является проверка соответствия результатов автонастройки с результатами полученными эмпирическим путем и последующей ручной подстройкой параметров.

На рисунке 4 представлены результаты идентификации параметров передаточной функции объекта управления по экспериментально снятым переходным процессам при ручной перестановке крана топливного газа: коэффициент передачи двигателя  $Kou=6,133$ , постоянная времени  $T=1,23$  с и транспортное запаздывание  $TAY=0,38$  с. Здесь же приведены найденные в процессе автонастройки параметры ПИД-контроллера 10ГКНА: коэффициент усиления регулятора  $Gain=0,206$  и постоянные времени интегрального  $Integral=9,13$  и дифференциального  $Derivative=1,14$  каналов управления.

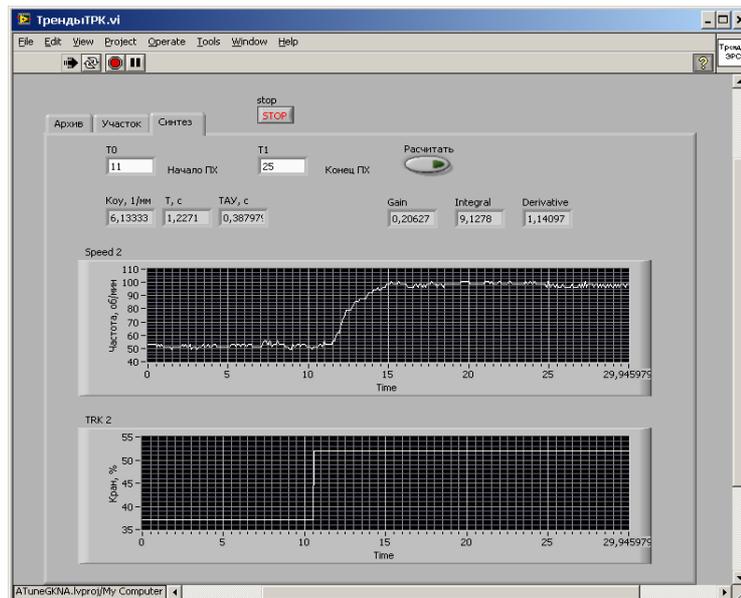


Рис.4. Настройка параметров ПИД регулятора 10ГКНА

Для оценки результатов автонастройки на этом же объекте управления выполнена процедура эмпирической настройки регулятора с последующей ручной подстройкой параметров. Результаты окончательного выбора параметров регулятора для данного двигателя приведены на рисунке 5. мы видим пример введения параметров ПИД – регулятора непосредственно в ПИД – контроллер.

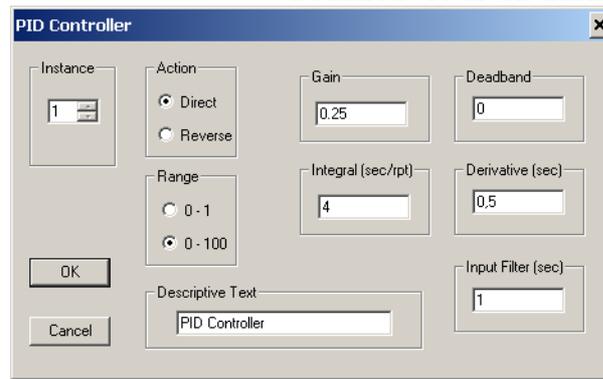


Рис.5. Результаты ручной подстройки параметров ПИД – регулятора

Сравнение полученных параметров регулятора свидетельствует о приемлемом для практических целей совпадении результатов автонастройки и окончательного варианта параметров системы.

Таким образом, разработанная процедура автонастройки вполне приемлема если не в качестве окончательной то как минимум для получения достаточно точного начального приближения параметров регулятора к оптимальным.

### Выводы

Представленный в статье процедура удаленной автоматической настройки цифровых регуляторов при моторных испытаниях авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) дает возможность настроить оптимально и тем самым уменьшить соответствующие потери в характеристиках двигателя, а также сократить время работы двигателя на режиме ПФ при доводке САУ в процессе моторных испытаний. Также дает возможность выполнения автоматизированных процедур настройки регуляторов авиационных ГТД, без риска возникновения аварийных ситуаций в процессе моторных испытаний за счет ограничения диапазона работы регулятора при автоматической настройке в узком диапазоне управляющего воздействия в окрестности управляющих сигналов разомкнутых контуров управления

### Список литературных источников

1. Бажанов В.Л. Функция самонастройки по методу масштабирования для цифровых ПИД регуляторов// Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – №12, С.39–42.
2. Страшинин Е.Э., Андреев Д.В. Построение адаптивного ПИ регулятора на основе интегрального метода оценки параметров объекта // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №8, С.34-37.
3. Страшинин Е.Э., Утешев К.А., Андреев Д.В. Метод интегральной оценки параметров объекта управления в системах промышленной автоматизации // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №6, С.22–26.
4. Седристый В.А., Лозня С.В., Пустовой С.А., Степаненко И.И. Опыт разработки и применения интеллектуальных испытательных стендов авиационных газотурбинных двигателей при доводке цифровых САУ // Вісник інженерної академії України. – К.: Інженерна академія України. – 2009. – №1. – С.158-164.