

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ДОВОДКЕ ЦИФРОВЫХ САУ

*ЛОЗНЯ С.В.*, к.т.н., доцент, ТОВ "Котрис",  
(8-044) 456-21-42, serge.loznya@kotris.com.ua,  
*ПУСТОВОЙ С.А.*, к.т.н., с.н.с., ТОВ "Котрис",  
(8-044) 456-21-42, pustovoy@kotris.com.ua

В настоящем докладе представлен опыт компании "Котрис" по разработке и применению при моторных испытаниях двухконтурного турбореактивного двигателя с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ) интеллектуального испытательного стенда (ИИС) КАИ-25Ф для доводки цифровой системы управления соплом и форсажом авиационного двигателя АИ-222К-25Ф учебно-боевого истребителя Л-15 для ВВС Китая на Запорожском машиностроительном конструкторском бюро им. академика Ивченко (ЗМКБ).

Конечной целью разработки стенда являлось создание системы автоматического управления (САУ) форсажной камеры сгорания (ФКС) и реактивного сопла (РС) для первого в Украине ТРДДФ.

Разработка столь сложной системы, как и системы управления любого современного ТРДДФ, относящейся к классу многоконтурных многосвязных систем автоматического регулирования, если не учитывать предшествующий опыт, полученный по анализу и доработке САУ ТРДДФ двигателей аналогов, таких как РД-33-2С самолета МиГ-29, Ал-31Ф самолета Су-27, была осуществлена в достаточно короткие сроки и включала следующие этапы:

- 1999-2001 г.г.: создание полной поэлементной динамической модели (ППММ) двигателя АИ-222К-25Ф на основании предоставленных ЗМКБ экспериментальных и расчетных данных по характеристикам его узлов;
- 2005-2006 г.г.: разработка ППММ двигателя АИ-222К-25Ф реального времени и разработка облика САУ;
- 2007 г.: разработка ППММ агрегатов гидромеханической части (ГМЧ), разработка аппаратной части и программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) интеллектуального испытательного стенда с встроенной системой регулирования ФКС и РС;
- август 2007 г.: первый запуск форсажа двигателя со стендовыми регуляторами расхода форсажного топлива и сопла;
- 2008 г.: доводка и патентование алгоритмов управления ТРДДФ;
- февраль 2009 г.: первый запуск двигателя со штатным бортовым электронным цифровым регулятором (ЭЦР);
- план на июнь 2009: отгрузка первых двигателей с ЭЦР заказчику.

На сегодняшний день можно констатировать следующие результаты данной разработки:

- успешный запуск производства серийной САУ форсированного

двигателя (НТ СКБ "Полисвит", ГНПП "Объединение Коммунар", г.Харьков, Украина);

- получение патента Украины на способ запуска ФКС.

Заслуживает достаточного внимания и финансовая сторона вопроса, особенно учитывая тот факт, что состояние экономики Украины никак не способствует существенному увеличению капиталовложений в авиационную отрасль, по словам тогдашнего директора ЦИАМ уже в 1987 году стоимость разработки САУ достигала 50% стоимости двигателя.

Стоимость аппаратной части разработанного ИИС КАИ-25Ф можно оценить по средней стоимости одного измерительного канала стенда, которая по текущим ценам составляет порядка 7200 грн/канал (рис.1). Стоимость программно-алгоритмической части по аналогичной оценке в перерасчете на один программный модуль, как, например, драйвер АЦП, модуль отображения трендов реального времени и др., составляет порядка 5800 грн/модуль (рис.2). Для сравнения следует привести средние данные по ценовой нише вибрационного диагностического оборудования, которая по оценкам российских компаний на сегодняшний день доходит до 2500 \$ на один измерительно-вычислительный канал, то есть почти вдвое превышает затраченную при разработке ИИС КАИ-25Ф.

Чтобы оценить экономическую эффективность применяемых подходов при разработке ИИС, можно сравнить затраты на его разработку с затратами на разработку штатной бортовой электронной системы управления, которая на сегодняшний день по нашим оценкам уже сравнялась со стоимостью двигателя и превосходит затраты на разработку ИИС в 30 раз.

По нашему мнению, полученный результат, как в техническом, так и в экономическом плане является весьма убедительным и требует детального анализа и распространения в аналогичных сферах авиационной промышленности.

Для выяснения основных причин получения данного эффекта следует выделить основные подходы, примененные при разработке САУ.

Основные требования к стендам, предназначенным для испытаний авиационных двигателей изложены в отраслевом стандарте ОСТ 1 01021-93 и включают необходимость использования в составе систем испытательного стенда специальной автоматизированной системы управления технологическим процессом испытаний (АСУ ТП).

Данная система по существующим требованиям должна обеспечить в темпе эксперимента только управление режимом испытаний.

В то же время при разработке САУ ТРДДФ АИ-222К-25Ф потребовалась реализация дополнительных функций, что привело к существенному сокращению сроков и затрат на разработку САУ, а именно:

- функции регулирования: поддержание заданных параметров двигателя в соответствии с законами управления, поддержание заданного положения управляющих органов двигателя, ручное задание управляющих сигналов на агрегаты ГМЧ САУ;

- моделирование динамики двигателя и агрегатов ГМЧ САУ в реальном времени с точностью до узла двигателя и элемента агрегата ГМЧ САУ;
- диагностика параметров и состояний двигателя и САУ.

Основным подходом к разработке САУ, позволившим достигнуть положительного результата, на наш взгляд, явился некоторый уход от классического образа действий в разработке регуляторов двигателя, основанного на предварительном упрощенном моделировании с применением линейных моделей, хотя и существенно облегченном ввиду наличия таких глубоко продвинутых в данном плане интегральных пакетов анализа и синтеза САУ, как MatLab (Mathworks Штс, США), LabView (National Instruments, США) и др.

Применение непосредственно в составе моторного испытательного стенда ППММ двигателя и ГМЧ САУ реального времени с соответствующей их привязкой к калибровочным, проливочным и другим характеристикам стендовой обвязки двигателя и ГМЧ САУ позволили существенно сократить время на внесение и апробацию соответствующих изменений в параметры САУ непосредственно в процессе моторных испытаний, а порой и непосредственно в процессе газовки без выключения двигателя и, таким образом, сократить время на доводку САУ и материальные расходы на испытания, которые уже в первые месяцы испытаний превысили стоимость самого стенда.

Особенностью оборудования стенда, обеспечивающего его высокую экономическую эффективность, является его ориентация на серийно выпускаемые и широко применяемые в наземных установках элементы АСУ ТП: промышленный компьютер на базе Windows XP, стандартные модули нормализации сигналов и т.п. (рис.1).

В то же время, требования жесткого реального времени абсолютно необходимые для реализации алгоритмов управления двигателем, потребовали существенных усилий при обеспечении возможности реализации алгоритмов управления на базе операционной системы далеко не реального времени Windows XP, используемой в угоду снижения общей стоимости разработки (рис.2).

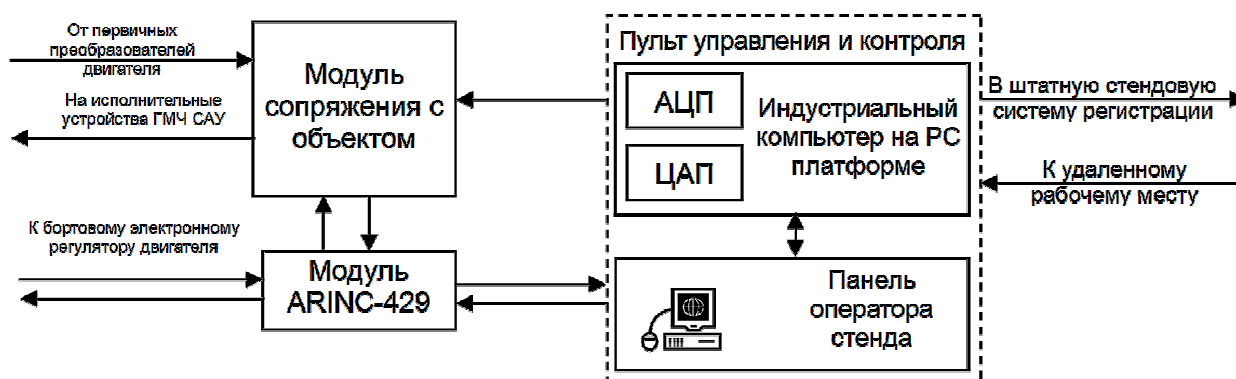


Рис.1. Структура аппаратной части интеллектуального испытательного стенда КАИ-25Ф



Рис.2. Структура программно-алгоритмического обеспечения интеллектуального испытательного стенда КАИ-25Ф

Таким образом, применение ИИС позволило реализовать эффективную технологию разработки алгоритмов бортовых цифровых регуляторов, включающую следующие этапы:

- аппроксимация расчетных и экспериментальных характеристик двигателя и агрегатов ГМЧ САУ поэлементными моделями реального времени;
- привязка к статическим и динамическим характеристикам стендовой обвязки двигателя и агрегатов САУ;
- оптимизация параметров ПЗУ, структуры и параметров регуляторов САУ в процессе имитационного моделирования;
- программная реализация алгоритмов в составе интеллектуального испытательного стенда;
- доводка алгоритмов в процессе моторных испытаний с управлением от стендового регулятора;
- формализация алгоритмов управления на базе бортового ЭЦР.