

УДК 681.142

В.А.Седристый¹, **С.В. Лозня²** к.т.н., **С.А. Пустовой²** к.т.н., **И.И. Степаненко²****ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ДОВОДКЕ ЦИФРОВЫХ САУ**¹Государственное предприятие “Ивченко - Прогресс”, Украина, progress@ivchenko-progress.com²Общество с ограниченной ответственностью “Котрис”, Украина, kotris@kotris.com.ua

В статье представлен опыт разработки и применения при моторных испытаниях двухконтурного турбореактивного двигателя с форсажной камерой сгорания интеллектуального испытательного стенда КАИ-25Ф для доводки цифровой системы управления соплом и форсажем авиационного двигателя АИ-222К-25Ф учебно-боевого истребителя Л-15 для ВВС Китая на Запорожском машиностроительном конструкторском бюро им. академика Ивченко.

1. Постановка проблемы

Разработка цифровой системы автоматического управления (САУ) современного авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) является сложной интеллектуалоемкой научно-технической задачей, в решении которой участвуют высоко квалифицированные коллективы специализированных конструкторских бюро (КБ) совместно со специалистами КБ разработчика двигателя. Уже в 1987 году, по словам тогдашнего директора ЦИАМ, стоимость разработки САУ достигала 50% стоимости самого двигателя. На сегодняшний день оптимальность решения данной задачи определяется наличием специализированного инструментария, позволяющего автоматизировать сложные процедуры настройки и оптимизации параметров регуляторов разомкнутых и замкнутых контуров управления авиационным двигателем. В первую очередь это касается аппаратно-программных средств испытательных стендов, развитие которых может позволить значительно сократить материальные и временные затраты на создание цифровой САУ ГТД.

2. Анализ известных решений

Как известно, основными этапами типового подхода к разработке регуляторов цифровых САУ являются:

- получение исходных данных объекта управления;
- идентификация линейных моделей;
- аналитический синтез или оптимизация регуляторов;
- программная и аппаратная реализация;
- доводка при полунатурных и моторных испытаниях.

Однако, недостатками типового подхода, на наш взгляд, являются:

- противоречие между возможностями синтеза и качеством идентификации;
- различие между синтезированными регуляторами и реализованными;
- большие затраты при доводке на стендах.

Основные требования к стендам, предназначенным для испытаний авиационных двигателей, изложены в отраслевом стандарте ОСТ 1 01021-93 [1] и включают необходимость использования в составе систем испытательного стенда специальной автоматизированной системы управления технологическим процессом испытаний (АСУ ТП). Данная система по существующим требованиям фактически должна обеспечить в темпе эксперимента только управление режимом испытаний.

3. Формулирование задачи

Конечной целью разработки интеллектуального испытательного стенда (ИИС) КАИ-25Ф являлось создание САУ форсажной камеры сгорания (ФКС) и реактивного сопла (РС) для первого в Украине турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания АИ-222К-25Ф учебно-боевого истребителя Л-15 для ВВС Китая на Запорожском машиностроительном конструкторском бюро (ЗМКБ) им. академика Ивченко.

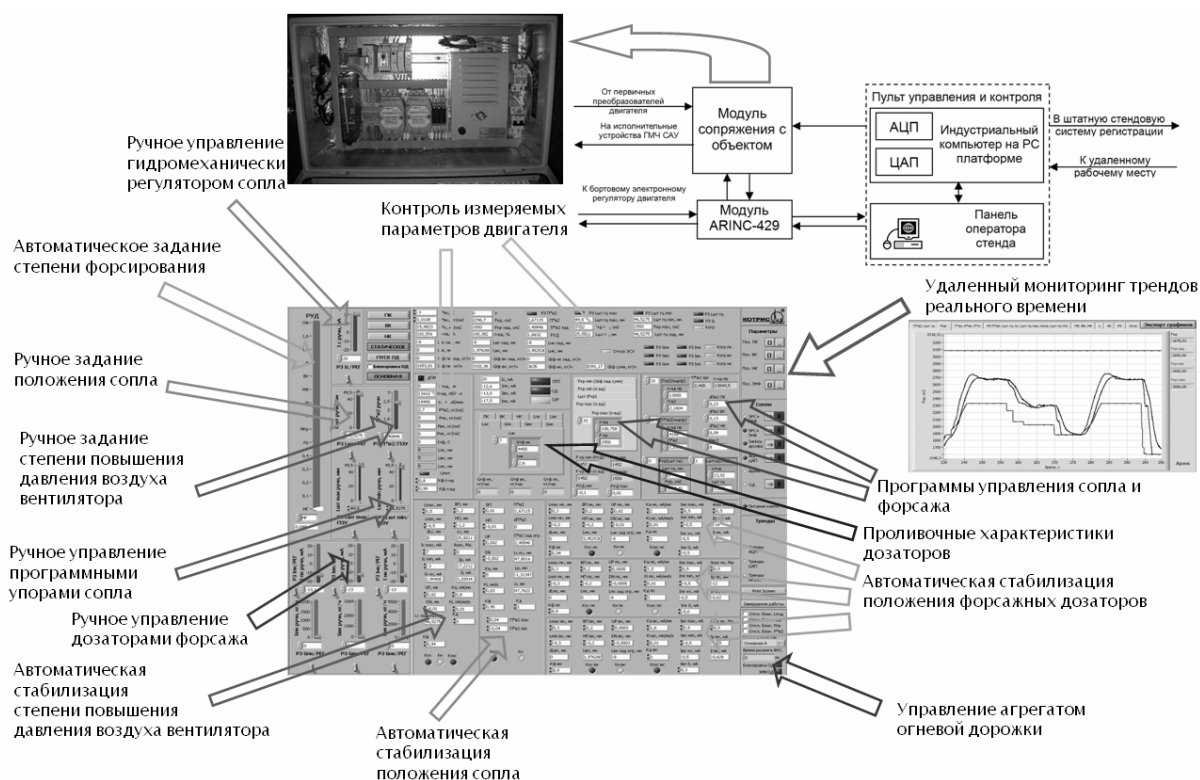
4. Решение задачи

Разработка столь сложной системы, как и системы управления любого современного ТРДДФ, относящейся к классу многоконтурных многосвязных систем автоматического регулирования, если не учитывать предшествующий опыт разработчиков, 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 [2-4]:

- 1999-2001 г.г.: создание полной поэлементной динамической математической 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 (рис.1);
- 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);
- 2009 г.: отгрузка первых двигателей с ЭЦР заказчику.

На сегодняшний день можно констатировать следующие результаты данной разработки:

- успешный запуск производства серийной САУ форсированного двигателя (НТ СКБ "Полисвет", ГНПП "Объединение Коммунар", г. Харьков, Украина);
- получение патента Украины на способ управления форсажным контуром ТРДДФ [5].



Заслуживает достаточно внимания и финансовая сторона вопроса, особенно учитывая тот факт, что состояние экономики Украины не позволяет финансировать авиационную отрасль в необходимом объеме. Особенностью оборудования стенда КАИ-25Ф, обеспечившего его высокую экономическую эффективность, явилась его ориентация на серийно выпускаемые и

широко применяемые в наземных установках элементы АСУ ТП: промышленный PC-компьютер на базе Windows XP, стандартные модули нормализации сигналов, аналого-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового преобразования (ЦАП) и т.п. (рис.1). Таким образом, стоимость одного измерительно-вычислительного канала аппаратной части разработанного ИИС КАИ-25Ф вдвое меньше средней для данного класса оборудования.

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 самого двигателя и превосходит затраты на разработку ИИС в 30 раз.

По нашему мнению, полученный результат, как в научно-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 [1] и включают необходимость использования в составе систем испытательного стенда специальной АСУ ТП испытаний. Однако, как указывалось выше, 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 [6].

Основным подходом к разработке САУ ТРДДФ АИ-222К-25Ф, 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 Inc, 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 (рис.2) 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.

Исходными данными для разработки полных поэлементных моделей двигателя являются данные по характеристикам турболопаточных машин, потерям и отборам по тракту двигателя, предоставляемые его разработчиком – ЗМКБ. Исходными данными для разработки ППММ агрегатов ГМЧ САУ являются предоставленные разработчиком агрегатов – ХАКБ, геометрические и гидравлические параметры агрегата.

Для обеспечения возможности реализации модели в реальном времени учитываются только дифференциальные уравнения неразрывности, пренебрегая инерционностью подвижных золотников и др. элементов. При реализации в расчетные схемы реального времени вводятся дополнительные динамические емкости агрегата, обеспечивающие возможность перехода от итерационных методов решения алгебраических систем уравнений к дифференциальным уравнениям заполнения емкостей агрегата. Полученный комплекс математических моделей увязывается между собой в соответствии с реальными связями двигателя и является, по сути, имитатором объекта управления.

Комплекс моделей стыкуется с реальным регулятором через его входные сигналы измерительных каналов и выходные управляющие сигналы регулятора, имитируя работу регулятора с реальным объектом управления.

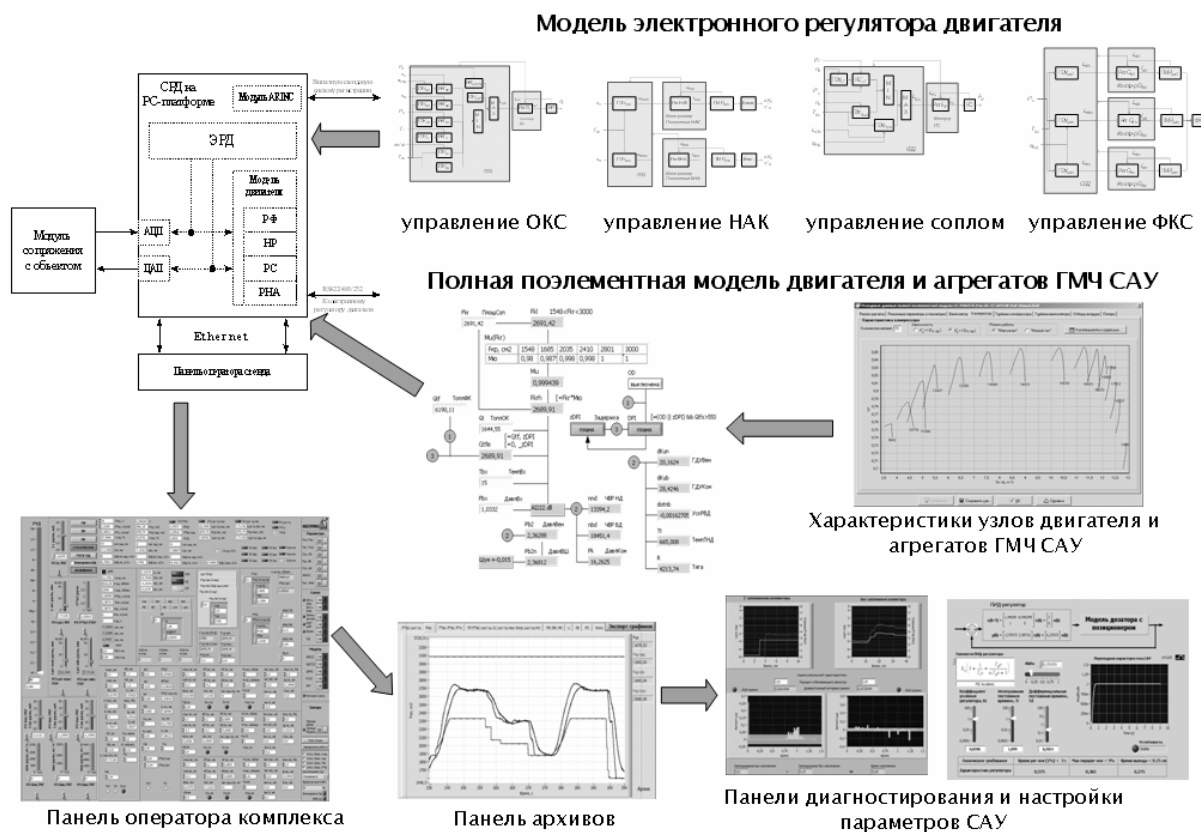


Рис.2. Структура программной части ИИС

Верификация полных поэлементных моделей двигателя осуществляется по соответствию расчетным параметрам на установившихся режимах с соответствующей статической моделью разработчика двигателя. Приемлемым для целей моделирования считается расхождение на уровне 0,2%. Верификация динамических моделей производилась по предоставленным разработчиком двигателя и ГМЧ экспериментальным и расчетным данным по динамике изменения давлений в полостях сервопоршней управляющих органов агрегата.

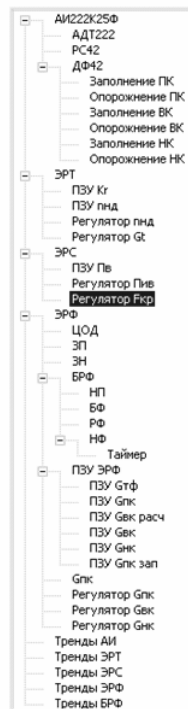
Для функционирования модели с реальным регулятором необходимо включить в ее состав реальные калибровочные характеристики измерительных каналов, обеспечивающих с одной стороны стыковку моделей гидромеханических агрегатов с моделью двигателя, например в виде зависимости площади критического сечения от положения гидроцилиндров сопла, определяющихся свойствами рычажной системы привода сопла. Окончательная подгонка контуров управления осуществляется введением корректирующих зависимостей, обеспечивающих воспроизведение моделью, например, реальных проливочных характеристик топливных коллекторов с регуляторами положения управляющих органов.

Окончательный вид алгоритмы привязки моделей двигателя и агрегатов ГМЧ САУ принимают в виде табличных зависимостей, корректирующих сигналы измерительных каналов модели и управляющих сигналов регуляторов.

Несмотря на реализацию алгоритмов в графической среде программирования LabView, более полную информацию оператору стенда о ходе формирования управляющих воздействий с возможностью изменения параметров регуляторов в реальном времени в процессе испытаний дает интерактивная панель оператора алгоритма. Для сравнения на рис.3 представлена панель оператора ПИ-регулятора, реализованная в составе испытательного стенда. По данной технологии обеспечено представление всех алгоритмов из состава алгоритмов реального времени.

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 (рис.2), используемой в угоду снижения общей стоимости разработки.

Состав алгоритмов реального времени сопла и форсажа



Интерактивная панель оператора редактирования алгоритма ПИ-регулятора в реальном времени

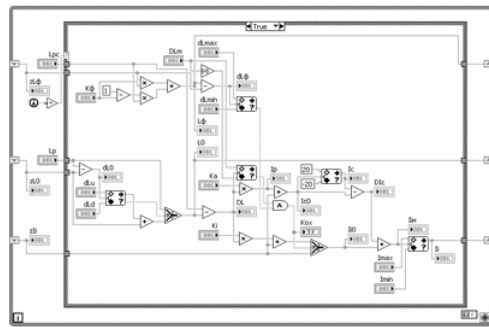
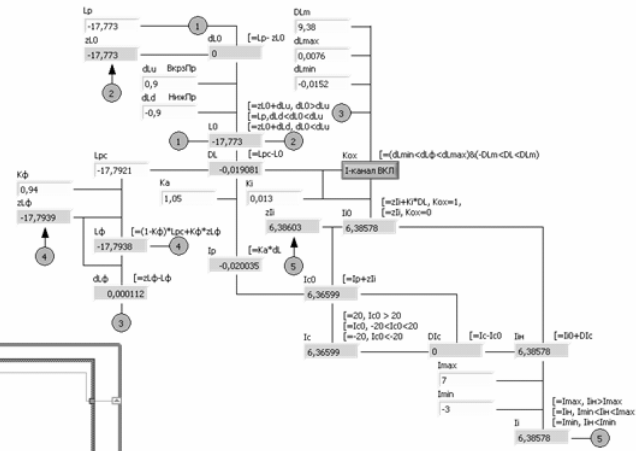


Схема алгоритма ПИ-регулятора в графическом представлении на языке LabView

Рис.3. Интерактивные алгоритмы регулирования ИИС реального времени

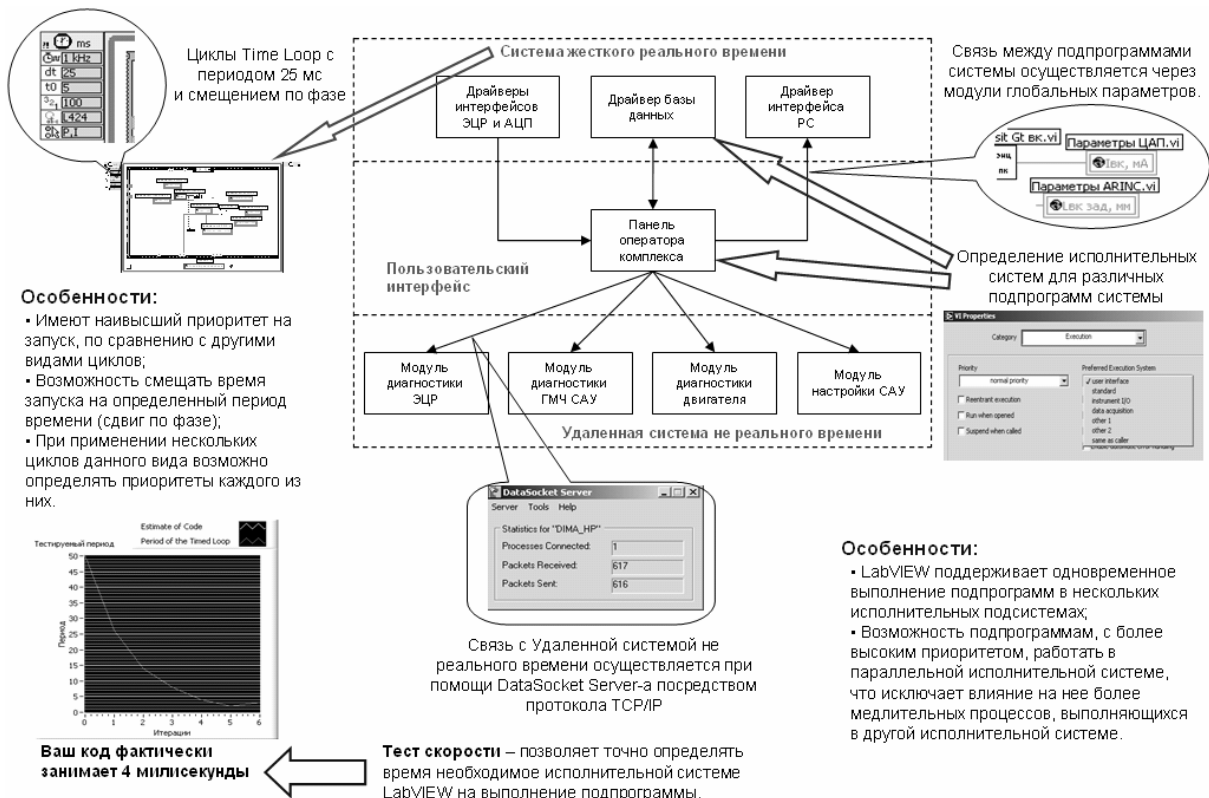


Рис.4. Системное программное обеспечение ИИС

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение ИИС позволило автоматизировать математическую обработку экспериментальных и расчетных характеристик испытываемого ГТД и выработать рекомендации по его настройке, отладке и регулировке.

Реализованные режимы работы ИИС:

- автоматическое управление в соответствии со штатными алгоритмами;
- ручное управление отдельными параметрами двигателя и гидромеханическими агрегатами;
- имитация динамики двигателя, гидромеханических устройств и измерительных каналов в реальном времени, испытания и метрологическое обеспечение;
- диагностика двигателя и его САУ [6].

Пульт управления и контроля ИИС обеспечивает (см. рис.1):

- управление технологическим процессом испытаний и измерение предусмотренных параметров и сигналов испытываемого ТРДДФ, как в автоматическом, так и в ручном режимах;
- бесступенчатый переход с автоматического режима управления на ручной и обратно в процессе испытаний по команде оператора;
- автоматическая и ручная настройка параметров контуров управления двигателем в реальном времени при проведении испытаний;
- обмен информацией с измерительной системой стенда по каналам ARINC 429, RS 232, Ethernet.

Реализованная на базе разработанного ИИС автоматизированная система управления испытаниями позволяет выполнять:

- нормализацию сигналов датчиков и исполнительных устройств двигателя;
- оцифровку сигналов датчиков и аналоговое преобразование сигналов исполнительных устройств;
- управление технологическим процессом испытаний с пульта оператора;
- обмен данными по цифровому каналу ARINC с другими системами;
- наладку и метрологическую поддержку комплекса;
- взаимодействие с внешними системами для удаленного просмотра трендов реального времени, сбора, архивирования и последующего анализа данных моторных испытаний.

ИИС отвечает современным требованиям к многоканальным системам для сбора и регистрации данных испытаний газотурбинных двигателей или их агрегатов и контроля за процессом испытаний в режиме реального времени. Измерительные каналы обеспечивают измерение параметров двигателя на установившихся режимах с погрешностью в соответствии с ОСТ 1 01021-93 [1].

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 программно-задающих устройств (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.

5. Выводы

Преимущества применения ИИС в процессе разработки доводки цифровых САУ:

- существенное удешевление стендового оборудования за счет использования компьютеров промышленного исполнения на базе серийно выпускаемых сред разработки (LabView);
- существенное сокращение сроков доводки за счет применения гибкого программно-алгоритмического обеспечения, реализующего ряд ручных режимов управления гидромеханическими агрегатами САУ, начиная от ручного задания токов управления, далее ручного позиционирования положения управляющих органов двигателя, далее ручного задания настроек замкнутых контуров управления.

Список литературы

1. ОСТ 1 01021-93. Стенды испытательные авиационных газотурбинных двигателей. Общие требования. – М. – 1994. – 18 с.
2. Лозня С.В., Торхов М.И., Пустовой С.А. Программно-аппаратный комплекс сопровождения разработки и испытаний САУ ТРДДФ // Ювілейна науково-практична конференція “Актуальні проблеми експлуатації, ремонту, розробки та модернізації авіаційної техніки” (Національний авіаційний університет, Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ, 5-6 липня 2007 р): Тез.доп. – К: НАУ. – 2007. – С.51.
3. Лозня С.В., Торхов М.И., Пустовой С.А., Седристый В.А., Черкасов Ю.В. Автоматизированная диагностика и настройка САУ ТРДДФ // Науково-практична конференція “Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки” (Національний авіаційний університет, Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ, 19-20 червня 2008 р): Тез.доп. – К: НАУ. – 2008. – С.57.
4. Лозня С.В., Пустовой С.А. Опыт применения интеллектуального испытательного стенда авиационного газотурбинного двигателя при диагностике и настройке САУ // Науково-практична конференція “Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки” (Національний авіаційний університет, Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ, 18-19 червня 2009 р): Тез.доп. – К: НАУ. – 2009. – С.57.
5. Спосіб керування форсажним контуром ТРДДФ. Патент на корисну модель №35345 / Торхов М.І., Дударев Є.А., Лозня С.В., Пустовий С.О., Степаненко І.І., Лозня Д.С., Воронов В.С., Кравченко І.Ф., Павлюк Є.В., Седристый В.О., Черкасов Ю.В., Шпильовий О.В. (заявл. 24.04.08., № заявки и 2008 05330). – Опубл. 10.09.2008. – Бюл. № 17.
6. Лозня С.В., Торхов М.И., Пустовой С.А., Седристый В.А., Черкасов Ю.В. Автоматизированная диагностика и настройка САУ при моторных испытаниях ТРДДФ// Вестник двигателестроения. – 2008. – № 3.– С. 176-181.

Ключевые слова: интеллектуальный испытательный стенд, цифровая система автоматического управления, турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания.

Ключові слова: інтелектуальний випробувальний стенд, цифрова система автоматичного керування, турбореактивний двоконтурний двигун з форсажною камерою згорання.

Key words: intellectual test stand, automatic control digital system, turbo-jet bypass engine with afterburner.