

УДК 681.142

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЦИФРОВОЙ САУ ГТД

Лозня С.В., к.т.н.,

Пустовой С.А., к.т.н.

*Общество с ограниченной ответственностью "Комрис",*

Ясиницкий Э.П., к.т.н.,

Ясиницкая И.Э., асп.\*

*Национальный авиационный университет*

Тел. (0619) 42-04-42

**Аннотация** – представлен опыт по разработке и применению имитационной математической модели гидромеханических агрегатов при образовании цифровой системы автоматического управления (САУ) двухконтурным турбореактивным двигателем с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ) АИ-222К-25Ф учебно-боевого истребителя Л-15 для ВПС Китая на Запорожском машиностроительном конструкторском бюро им. академика Ивченко. Полная поэлементная имитационная математическая модель двигателя и гидромеханических агрегатов САУ реализована в составе разработанного стендового регулятора авиационного двигателя типа КАИ-25Ф.

**Ключевые слова** – математическая модель гидромеханических агрегатов, цифровая система автоматического управления, двухконтурный турбореактивный двигатель.

**Введение.** В период 1999-2009 г.г. в Запорожском конструкторском бюро (ЗМКБ) им. академика А.Г. Ивченко был создан первый украинский форсированный газотурбинный двигатель АИ-222К-25Ф, при разработке и испытаниях которого был применен специализированный испытательный стенд [1].

Основные требования к стендам, предназначенным для испытаний авиационных двигателей изложены в отраслевом стандарте ОСТ 1 01021-93 [2] и включают необходимость использования в составе систем испытательного стенда специальной автоматизированной системы управления технологическим процессом испытаний (АСУ ТП).

---

© к.т.н. С. В. Лозня, к.т.н. С. О. Пустовой, к.т.н. Е. П. Ясиницкий, асп. І. Е. Ясиницка

\* Науковий керівник - к.т.н. С. В. Лозня

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

*Формулирование проблемы.* Для сокращения сроков и затрат на разработку двигателя АИ-222К-25Ф и его системы автоматического управления потребовалась реализация дополнительных функций испытательного стенда:

- реализация функций регулирования и настройки параметров регуляторов и законов управления в процессе испытаний;
- изменение функций регулирования: поддержание заданного положения управляющих органов двигателя, ручное задание управляющих сигналов на агрегаты гидромеханической части (ГМЧ) САУ;
- имитация работы САУ с моделированием динамики двигателя и агрегатов ГМЧ САУ в реальном времени;
- диагностика параметров и состояния измерительных каналов САУ.

Таким образом, возникла необходимость разработки специализированного стендового регулятора сопла и форсажа для включения его в состав испытательного стенда.

*Решение проблемы.* Для решения указанной проблемы и сокращения времени на внесение и апробацию соответствующих изменений в параметры САУ непосредственно в процессе моторных испытаний или даже непосредственно в процессе газовки без выключения двигателя была разработана полная поэлементная имитационная математическая модель двигателя (ППММ) и ГМЧ САУ реального времени. Созданная ППММ была включена непосредственно в состав стендового регулятора двигателя с соответствующей ее привязкой к калибровочным, проливочным и другим характеристикам стендовой обвязки двигателя.

Одной из ключевых задач в обеспечении качества моделирования динамики объекта управления для САУ газотурбинным двигателем (ГТД) является достаточно точное описание динамики гидромеханических устройств и агрегатов двигателя.

Исходными данными для разработки полной поэлементной математической модели агрегатов ГМЧ САУ являются предоставленные разработчиком агрегатов (Харьковское агрегатное конструкторское бюро) геометрические и гидравлические параметры агрегата.

Для обеспечения возможности реализации модели в реальном времени учитывается только ряд дифференциальных уравнений неразрывности течения рабочей жидкости в полостях сервопоршней и

гидроцилиндров. При этом инерционностью подвижных элементов агрегатов ГМЧ удалось пренебречь.

Кроме этого, при реализации расчетной схемы реального времени вводились дополнительные динамические емкости агрегата, обеспечивающие возможность исключения итерационных методов решения алгебраических систем уравнений гидравлики и приведения их к дифференциальным уравнениям заполнения емкостей агрегата.

Для привязки модели к реальному агрегату в состав модели включены калибровочные характеристики измерительных каналов, обеспечивающих стыковку параметров моделей гидромеханических агрегатов с фактическими параметрами, полученными в результате снятия метрологических характеристик узлов и агрегатов (рис. 1). Настройка параметров модели осуществляется уточнением корректирующих зависимостей, обеспечивающих воспроизведение моделью реальных проливочных характеристик топливных коллекторов, полученных в процессе полунатурных или натуральных испытаний в режиме стабилизации положения управляющих органов.

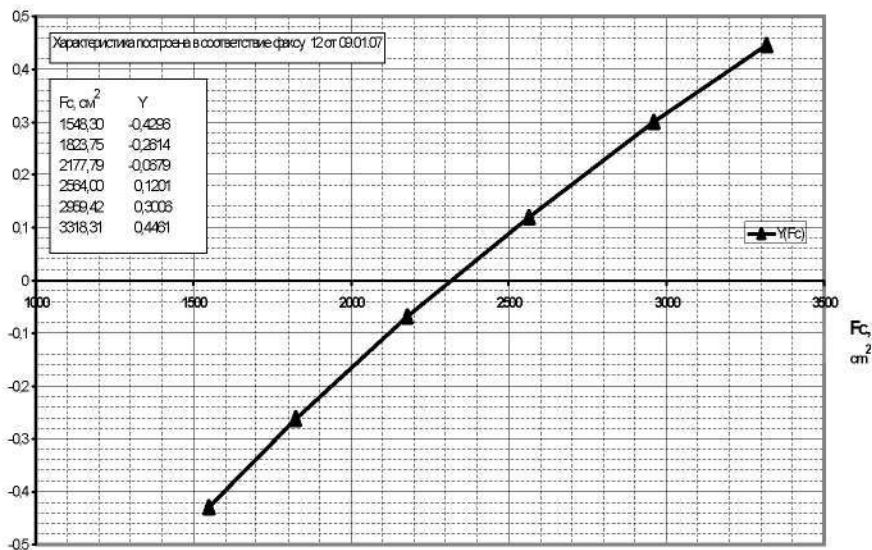


Рис. 1. Калибровочные характеристики измерительных каналов

Окончательный вид алгоритмы привязки моделей двигателя и агрегатов гидромеханической части САУ представляются в виде табличных зависимостей, используемых для коррекции сигналов измерительных каналов модели и управляющих сигналов агрегатов ГМЧ (рис. 2) и доступных для изменения оператору стенда.

Верификация полных поэлементных моделей ГМЧ САУ на установившихся режимах работы агрегата осуществляется по соответствию измеренным параметрам на полунатурном стенде или в процессе натуральных испытаний двигателя. Расхождение параметров

моделі с измеренным не превысило 0,2% от рабочего диапазона измерений.

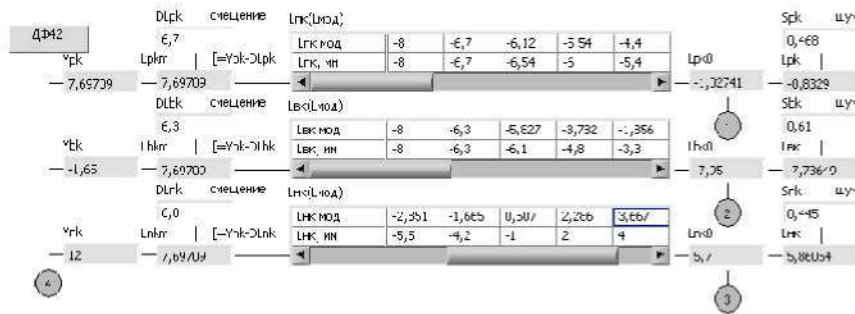


Рис. 2. Привязка измерительных каналов положения дозаторов

Верификация динамических характеристик моделей производилась по экспериментальным и расчетным данным по динамике изменения давлений в полостях сервопоршней управляющих органов агрегата (рис. 3).

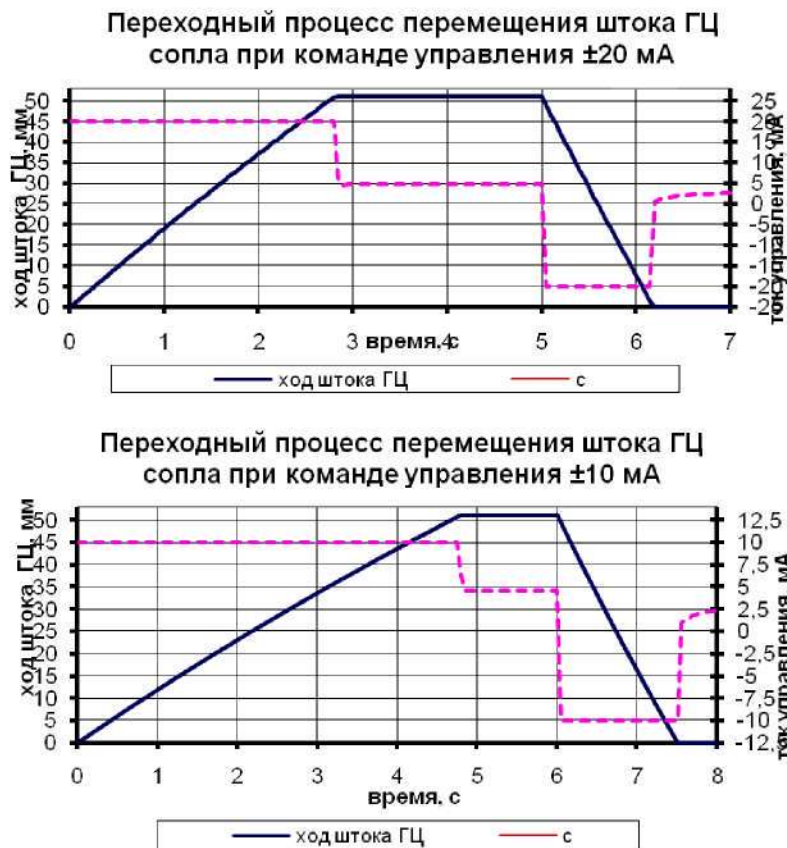


Рис. 3. Результаты верификации имитационной модели ГМЧ САУ

Полученные математические модели ГМЧ увязывались с моделями динамики двигателя по сути имитируя весь объект управления.

Данный комплекс моделей в режиме имитационного моделирования стыковался с цифровым регулятором на уровне его входных сигналов измерительных каналов и выходных управляющих воздействий регулятора, имитируя работу регулятора с реальным двигателем [3].

Программная реализация имитационных моделей выполнена в графической среде программирования LabView для Windows XP (National Instruments, США).

В то же время, требования жесткого реального времени безусловно необходимые для реализации алгоритмов управления двигателем, потребовали существенных усилий при обеспечении возможности реализации алгоритмов управления на базе многозадачной операционной системы Windows XP, используемой в угоду снижения общей стоимости разработки.

Несмотря на реализацию алгоритмов в графической среде программирования LabView (рис. 4) более полную информацию оператору станда о ходе формирования управляющих воздействий с возможностью доступа к настраиваемым параметрам модели в реальном времени в процессе испытаний дает интерактивная панель оператора алгоритма (рис. 5). Для сравнения представлена панель оператора ПИ-регулятора, реализованная в составе испытательного станда.

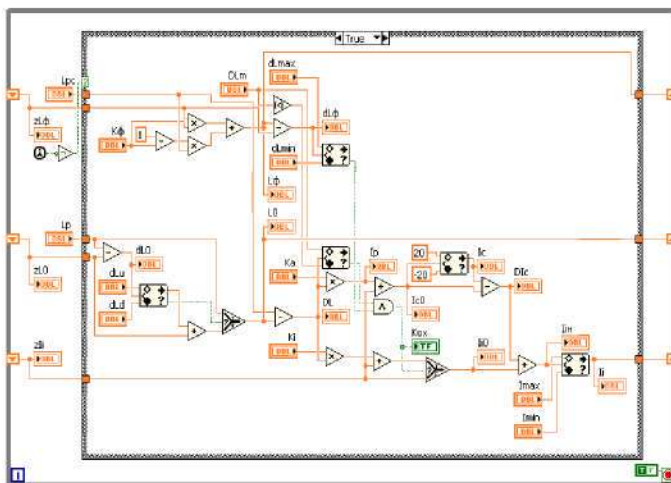


Рис. 4 Схема алгоритма ПИ-регулятора в графическом представлении на языке Lab View



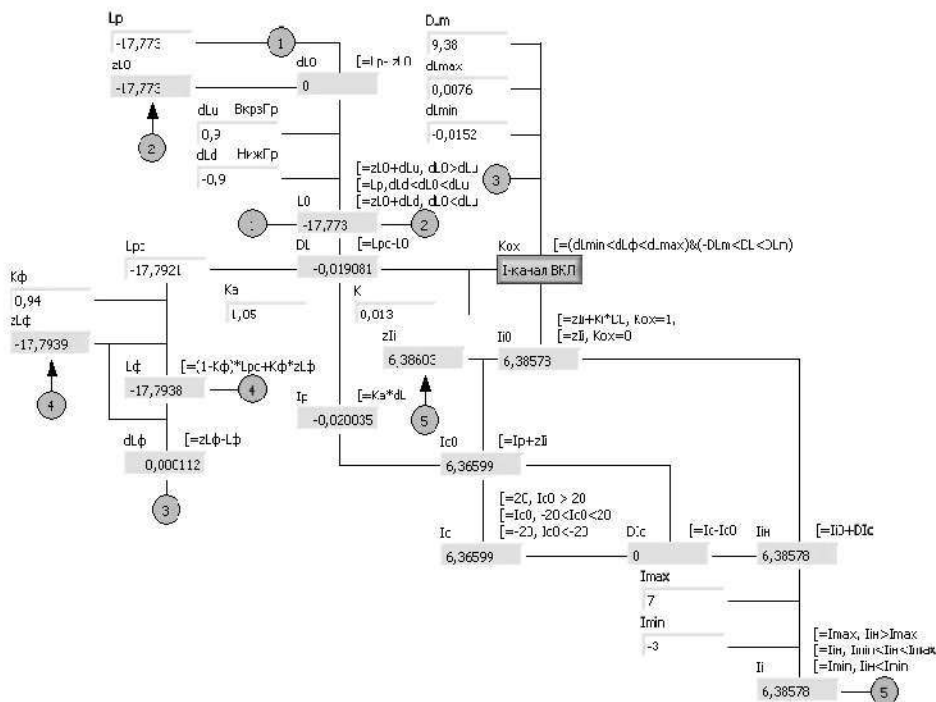


Рис. 5. Интерактивная панель оператора редактирования параметров алгоритма ПИ-регулятора в реальном времени

Применение в составе программного обеспечения стендового регулятора поэлементных математических моделей ГМЧ САУ позволило существенно повысить точность воспроизведения динамики объекта управления, в частности задержек на заполнения коллекторов форсажной камеры сгорания (ФКС). Оценка временных параметров заполнения коллекторов осуществлялась методами анализа идентифицированных импульсных переходных характеристик моделируемого и измеренного сигналов при одном и том же управляющем сигнале на входе модели и реального агрегата. При этом величина транспортного запаздывания между изменениями управляющего воздействия - заданного положения дозаторов, и выходного сигнала - давления топлива в коллекторе оценивалась по количеству значащих коэффициентов импульсной характеристики (рис. 6).

Применение технологии сопровождающего моделирования ГМЧ позволило усовершенствовать методы фильтрации измеренных сигналов САУ за счет идентификации и уточнения в реальном времени моделей измеренных сигналов, обеспечив исключение временных задержек и повышение качества фильтрации.

На основании математических моделей ГМЧ отработаны и применены в составе САУ алгоритмы диагностики сбоев измерительных каналов, существенно расширившие возможности допусковых и перекрестных методов контроля.

Принцип формирования диагностического сигнала исправности измерительного канала САУ при этом основывался на идентификации в

реальном времени статистических моделей шумовых характеристик сигнала и оценке их соответствия эталонным моделям.

В качестве статистических моделей сигналов измерительных каналов применяются авторегрессионные модели со скользящим средним. При появлении дефекта измерительного канала модель стационарного временного сигнала дает существенные ошибки прогноза в сравнении с эталонной моделью, что и свидетельствует об отказе. Дефект регистрируется в виде увеличения шума ошибок прогнозирования.

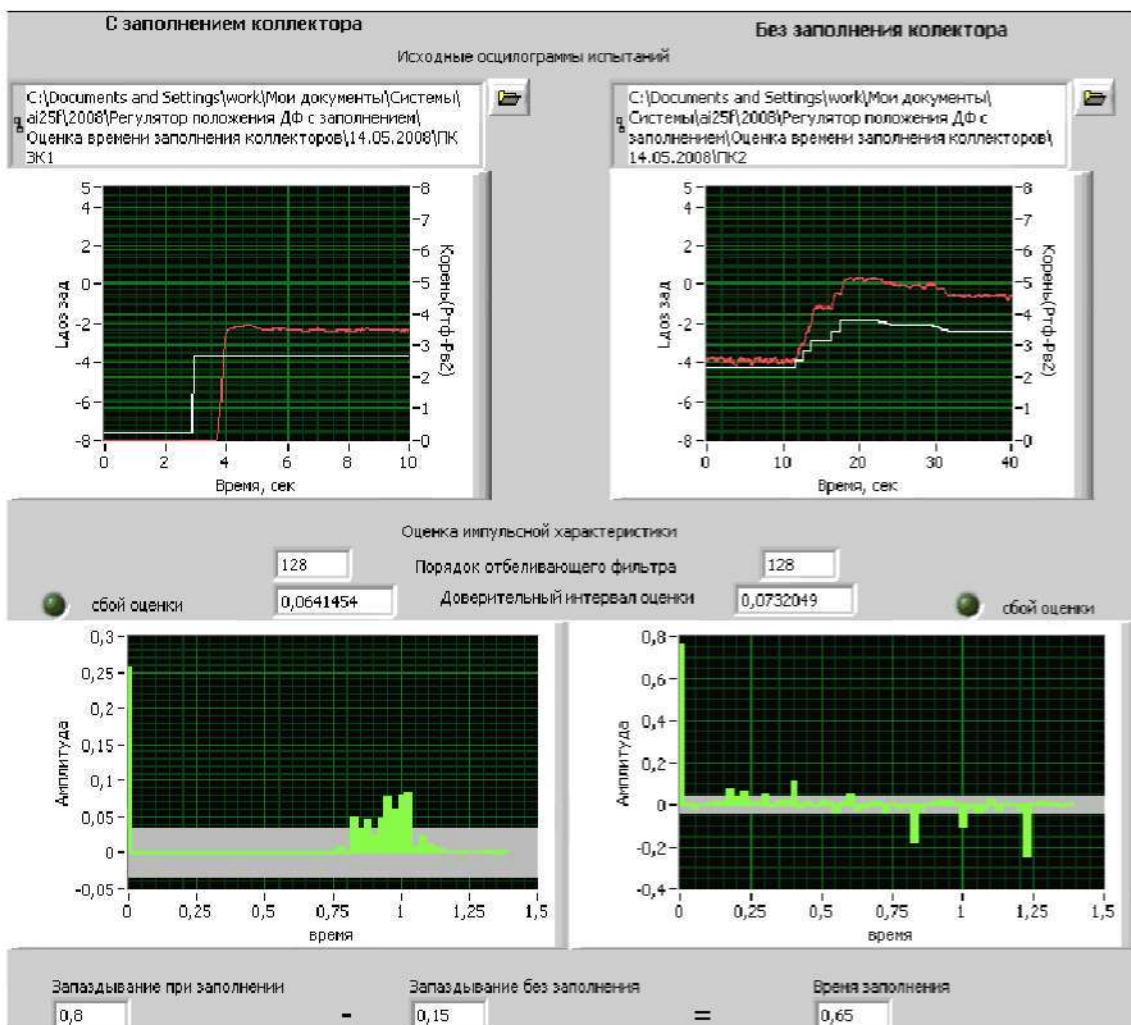


Рис. 6. Автоматизированная оценка временных характеристик гидромеханических агрегатов

Эффективность применения указанных алгоритмов подтверждена, в частности, правильным диагностированием нарушения контакта в разьеме измерительного канала давления воздуха за вентилятором САУ ТРДДФ, повлекшего как видно из рис.7 появление скачкообразных изменений измеренного сигнала на входе цифрового регулятора.

Амплитуда помех при этом не превысила 1,5% от диапазона измерения. Такой низкий уровень помех соизмерим с погрешностью измерительного канала и не может быть отсеян допускowymi и перекрестными методами контроля. В то же время, указанное изменение характеристик сигнала приводит к видимым отклонениям положения управляющего органа замкнутого контура стабилизации степени повышения давления воздуха за вентилятором (рис. 8).

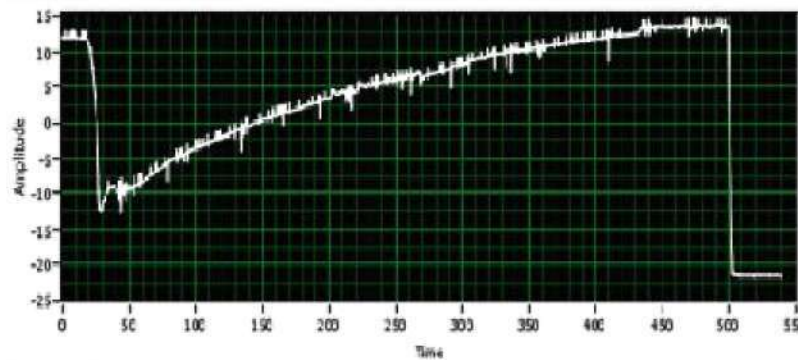


Рис. 7. Временной сигнал канала давления воздуха за вентилятором ТРДДФ при наличии дефекта в разьеме АЦП

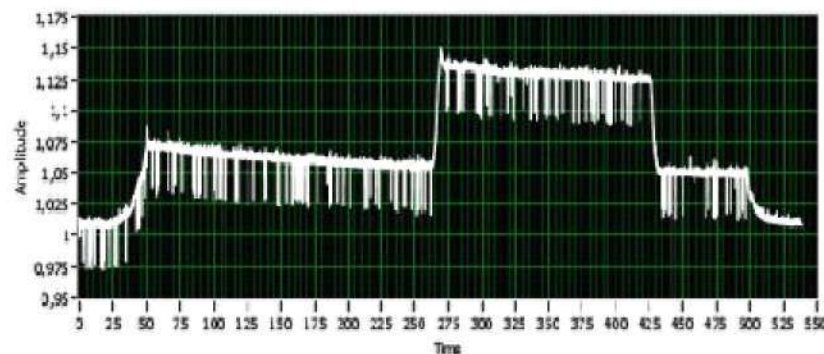
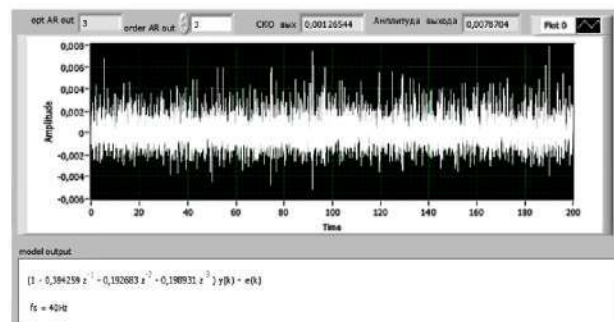


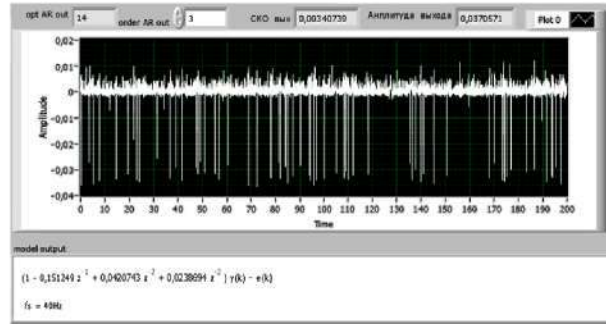
Рис. 8. Изменение положения сопла ТРДДФ при наличии дефекта в разьеме АЦП

Определенные с помощью идентифицированных эталонных авторегрессионных моделей ошибки прогноза измеряемого параметра, как видно из рис.9, А), не превысили 0,2% от диапазона измерения.



a)





б)

Рис. 9. Авторегрессионная модель и ошибка прогнозирования: а – исправного измерительного канала; б – неисправного измерительного канала

В то же время для отказавшего канала давления за вентилятором ошибки прогноза составляют порядка 1% от диапазона измерения, то есть в 5 раз превышают аналогичную величину в модели исправного канала, что уже вполне достаточно для реализации допусковых процедур контроля (рис. 9, Б).

Преимуществами используемой технологии диагностики каналов является ее достаточная вычислительная эффективность, так как идентификация авторегрессионных моделей не требует итеративных оптимизационных процедур, а результирующая модель всегда устойчива.

*Выводы.* Основным преимуществом применения при испытаниях имитационных моделей ГМЧ САУ является существенное сокращение сроков доводки и материальных расходов на испытания за счет применения гибкого программно-алгоритмического обеспечения, реализующего ряд нестандартных режимов управления гидромеханическими агрегатами САУ начиная от ручного задания управляющих сигналов и ручного позиционирования положения управляющих органов двигателя, и заканчивая ручным заданием настроек замкнутых контуров управления.

Преимущества автоматизированной системы обработки сигналов:

- возможность надежного диагностирования отказов измерительных каналов по появлению нестационарных шумов измерений на уровне единиц процентов от диапазона измерений;

- возможность применения технологий оптимальной цифровой фильтрации с увеличением соотношения сигнал/шум по каналам оценки производных от измеренных параметров до 15 раз;

- повышения качества восстановления измеренных сигналов за счет анализа и исключения временных и фазовых задержек в измеренном сигнале.

## Литература

1. Лозня С.В. Автоматизированная диагностика и настройка САУ при моторных испытаниях ТРДДФ / С.В. Лозня, М.И. Торхов, С.А. Пустовой и др. // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 3. – С. 176-181.
2. ОСТ 1 01021-93. Стенды испытательные авиационных газотурбинных двигателей. Общие требования. – М. – 1994. – 18 с.
3. Седристый В.А. Опыт разработки и применения интеллектуальных испытательных стендов авиационных газотурбинных двигателей при доводке цифровых САУ / В.А. Седристый, С.В. Лозня, С.А. Пустовой, И.И. Степаненко // Вісник інженерної академії України. – К.: Інженерна академія України. – 2009. – №1. – С.158-164.

### ДОСЛІД ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ГІДРОМЕХАНІЧНИХ АГРЕГАТІВ ПРИ РОЗРОБЦІ ЦИФРОВОЇ САУ ГТД

Лозня С.В., Пустовий С.О., Ясиницький Е.П., Ясиницька І.Е.

*Анотація* – представлено досвід з розробки та застосування імітаційної математичної моделі гідромеханічних агрегатів при створенні цифрової системи автоматичного управління (САУ) двохконтурним турбореактивним двигуном з форсажною камерою згоряння (ТРДДФ) АІ-222К-25Ф учбово-бойового винищувача Л-15 для ВПС Китаю на Запорізькому машинобудівному конструкторському бюро ім. академіка Івченко. Повна поелементна імітаційна математична модель двигуна та гідромеханічних агрегатів САУ реалізована в складі розробленого стендового регулятора авіаційного двигуна типу КАІ-25Ф.

### TRIAL OF APPLICATION OF HYDROMECHANICAL AGGREGATES IMITATING MODEL IN ENGINEERING DISCRETE SAU GTD

S. Loznya, S. Pustovoy, E. Yasisnickiy, I. Yasinickaya

#### *Summary*

Experience of development and application of simulation mathematical model of hydromechanical aggregates at creation of the digital automatic control system of "AI-222K-25F" turbo-jet bypass engine with afterburner for Air Forces of China "L-15" fighter on the «Ivchenko-Progress» Zaporozhye Design Bureau is presented. Real-time dynamic model of the engine and hydromechanic aggregates of the automatic control system is realized in composition with developed aviation engine stand regulator ("KAI-25F").