

УДК 681.586

**В.Ф. МИРГОРОД, В.М. ГРУДИНКИН***ОАО «Элемент», Одесса, Украина***ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ  
В КОНТУРЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ  $\pi_k$** 

Выполнена оценка динамических характеристик системы измерения давления по данным полетной регистрации с использованием математической модели двигателя.

**математическая модель, измерение давления, контур регулирования, динамическая погрешность**

**Введение**

Оценка динамических характеристик измерительных каналов (ИК) является важной проблемой при регистрации быстропротекающих процессов. Практическую значимость для реализуемых бортовых систем имеет оценка динамических погрешностей каналов измерения давления за компрессором, необходимая при тестировании систем противопомпажной защиты. Реализуемые в настоящее время программы регулирования авиационных ГТД по  $\pi_k$  обуславливают необходимость оценки динамических характеристик систем измерения давления  $P_k$  и  $P_{ex}$ , поскольку такие системы входят в контур регулирования и их динамические параметры необходимы для анализа устойчивости ЭСУ

**Постановка проблемы и цель исследования.** Инструментальная оценка динамических погрешностей датчиков и систем измерения давления представляет собой сложную техническую проблему [1, 2], поскольку для ее решения необходимы специализированные стенды [2, 3], оснащенные прецизионным измерительным оборудованием, современными программно-аппаратными вычислительными средствами с соответствующим программным обеспечением. Достижимая на таких стендах точность оценки динамических характеристик датчиков и систем измерения давления составляет несколько

процентов, что полагается приемлемым для решения прикладных задач. В то же время практика эксплуатационного применения датчиков и систем измерения давления требует отыскания эффективных путей оценки динамических характеристик таких ИК непосредственно по данным регистрации с той же точностью без привлечения дорогостоящего стендового оборудования. Одним из возможных способов решения поставленной задачи является создание виртуального стенда тестирования ИК с программной либо программно-аппаратной имитацией двигателя и его систем.

Целью настоящей работы является оценка динамических характеристик системы измерения давления СИД-3-148 в контуре регулирования  $\pi_k$  двигателя АИ-436-148 непосредственно по данным летной регистрации параметров двигателя и разработка элементов методики тестирования ИК данного типа на виртуальном стенде.

**Основные результаты исследования**

В основу предлагаемой методики положено сопоставление реально фиксируемого СИД изменения давления за компрессором по данным полетной регистрации в динамических режимах (приемистость, встречная приемистость) с сигналом изменения давления, полученным от математической модели (ММ), достоверно воспроизводящей основные па-

параметры двигателя в динамике. Такой подход соответствует развиваемой в настоящее время концепции возможного замещения сигналов ИК их моделируемыми значениями в случае параметрического отказа [4]. Что касается анализируемого ИК давления за компрессором, то полагается, что если ММ двигателя воспроизводит его основные параметры (в частности, изменение оборотов турбин) в динамических режимах с высокой точностью, например, (0,5...1)% ВП, то моделируемое изменение  $P_k$  также будет воспроизводить реальный сигнал с приемлемой точностью. Для достижения такого соответствия необходимы адекватная ММ двигателя и ее верификация (обучение) по базам данных применительно к особенностям конкретного экземпляра ГТД.

Разработанная С.В. Елифановым ММ двигателя АИ-436-148 в виде сочетания нелинейной таблично заданной статической и кусочно-линейной динамической модели пространства состояний [5] обеспечивает высокую степень соответствия реальным параметрам двигателя. Выполненная ее модификация и обучение по разработанной методике [6] позволяют достичь необходимой точности воспроизведения изменения оборотов каждой из трех турбин двигателя в режиме приемистости, что иллюстрирует рис. 1.

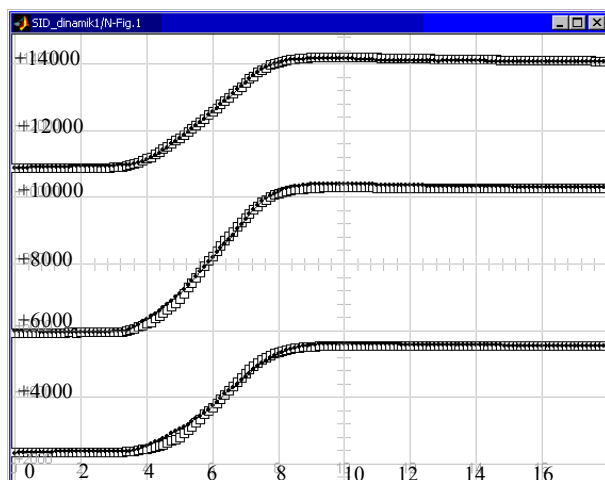


Рис. 1. Изменение оборотов турбин в режиме приемистости

На рис. 1 приведены отсчеты измеренных значений оборотов каждой из турбин с дискретностью 0,125 с. и отсчеты оборотов, полученные от ММ при задании на ее входах измеренных значениях  $G_m$ ,  $P_{ex}$ ,  $T_{ex}$ . Среднеквадратические значения отклонений составили 1,12% для  $N_{ex}$ , 0,72% для  $N_{no}$  и 0,26% для  $N_{60}$ . Рис. 2 иллюстрирует соответствующие изменения  $P_k$  и  $\pi_k$ , полученные по ИК СИД-3-148 и ЭСУ, а также от ММ двигателя.

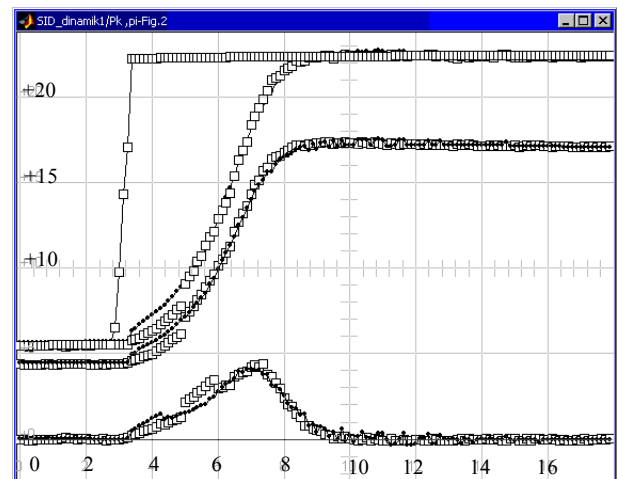


Рис. 2. Изменение параметров давления в режимах приемистости

Среднеквадратические отклонения (СКО) составляют 0,82% для  $P_k$  и 0,98% для  $\pi_k$ . Дополнительно на рис.2 приведены скорости изменения давления за компрессором по базам данных приемистости и по ММ в [атм/сек]. Для скорости изменения  $P_k$  СКО составляет 4,47%. Как это следует из Рис.2, начиная с  $\pi_k = 6$  кривые реально измеряемых СИД значений  $P_k$  и получаемых от ММ практически совпадают, скоростная ошибка воспроизводства реального закона изменения  $P_k$  отсутствует. Приведенные иллюстрации соответствуют номинальным динамическим режимам двигателя в его эксплуатации. Представляет значительный интерес выполнить аналогичный анализ и сопоставление для режимов, отличающихся от номинальных. Фрагмент базы данных на рис. 3, 4 отражает именно такой режим, в котором наблюдаются значительные динамические

отклонения всех параметров двигателя. Обороты турбин, фактические и расчетные по ММ для заданных входных параметров, приведены на рис. 3. Ошибки моделирования составляют 0,89% для  $N_{в}$ , 0,74% для  $N_{нд}$ , 0,20% для  $N_{вд}$ . На рис. 4 приведены соответствующие данные изменения  $P_K$ ,  $\pi_K$  и скоростные характеристики. Точность воспроизведения реальных законов изменения характеризует СКО: 0,37% для  $P_K$ , 2,3% по скорости изменения  $P_K$ .

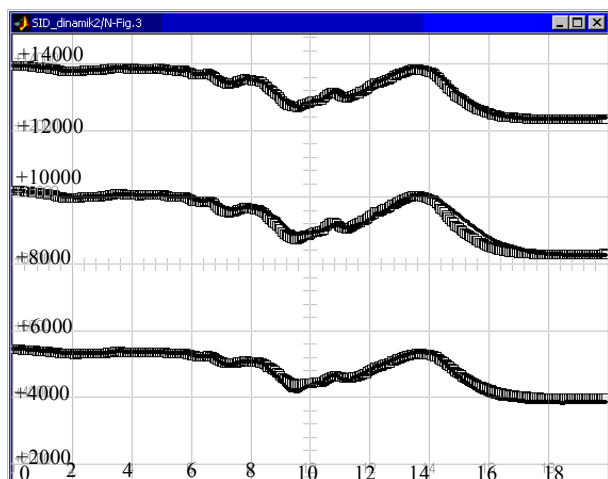


Рис. 3. Изменение оборотов турбин в динамическом режиме

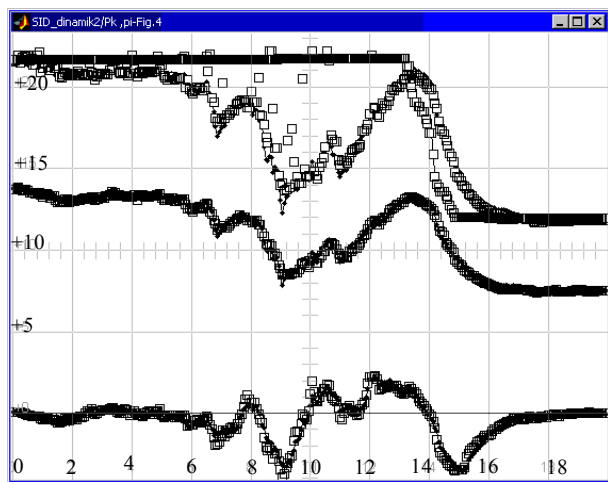


Рис. 4. Изменение параметров давления в динамическом режиме

Приведенные данные сопоставления, на наш взгляд, убедительно свидетельствуют о том, что СИД-3-148 достоверно воспроизводит динамические изменения  $P_K$  и  $\pi_K$  двигателя режимах приеми-

стости, встречной приемистости и возможных не-номинальных динамических режимах, скоростная ошибка не превосходит такта дискретизации данных, и для ЭСУ СИД-3-148 является безинерционным датчиком давления. Следовательно, устойчивость замкнутого контура регулирования  $\pi_K$  целиком определяется законами регулирования ЭСУ и выбранными их параметрами, а также соответствием этих законов параметрам конкретного двигателя. Заметим, что кроме данных о  $P_K$  и  $P_{вх}$ , СИД-3-148 формирует также  $\pi_K$  с дискретностью 12,5 мс и сигнал «Помпаж» в соответствии с ОСТ.

Таким образом, методика тестирования ИК давления двигателя состоит из следующих этапов:

1. Построение адекватных ММ двигателя и его систем.
2. Индивидуализация ММ применительно к особенностям конкретного экземпляра двигателя и ее обучение по выборках баз данных летной регистрации и/или стендовых испытаний.
3. Сопоставление моделируемых и измеренных реализаций  $P_K$  и  $\pi_K$  в динамических режимах при одинаковых условиях, в том числе по скорости изменения параметров.
4. Статистическая обработка данных сопоставления и оценка динамических характеристик ИК.
5. Выработка рекомендаций по изменению структуры и параметров ИК.

Приведенная методика является частью создаваемого в ОАО «Элемент» виртуального стенда тестирования ИК давления. Для достижения поставленных задач эта методика дополняется междисциплинарной ММ СИД-3-148, содержащей ММ чувствительного элемента, входных аналоговых блоков, цифрового контроллера и др. узлов.

Виртуальный стенд предлагаемой конфигурации позволит на этапах разработки и модернизации тестировать СИД сигналами с реальной флуктуационной компонентой, а также исследовать режимы, не

подлежащие реализации на реальном двигателе, в частности помпажного типа.

### Заключение

Проведенное моделирование в сопоставлении с параметрами летной регистрации свидетельствуют о высоких динамических характеристиках ИК давления за компрессором двигателя АИ-436-148, реализованного в виде системы измерения давления СИД-3-148. Применение обучаемой ММ двигателя открывает перспективы использовать ее выходные параметры при параметрическом отказе ИК. Такого типа ММ может служить основой виртуального стенда тестирования ИК давления газотурбинных двигателей, с чем связаны перспективы дальнейших исследований.

### Литература

1. Научный вклад в создание авиационных двигателей / Под ред. В.А. Скабина и В.И. Солонина. – М.: Машиностроение, 2000. – 725 с.
2. Специальные методы измерения, применяемые в ЦИАМ. – М.: ЦИАМ им. П.И.Баранова, 2005. – 50 с.
3. Буганова Т.М., Киссельман М.Р., Меркурьев А.И. Анализ характеристик перспективных об-

разцов датчиков абсолютного давления для обеспечения повышения точности измерения при стендовых испытаниях авиационных двигателей и их узлов / ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности. – М.: ЦИАМ, 2005. – С. 457-460.

4. Гольберг Ф.Д., Гуревич О.С., Чернышов В.И. Применение в САУ поузловой математической модели двигателя для парирования отказов датчиков / ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности. – М.: ЦИАМ, 2005. – С. 337-342.

5. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.

6. Миргород В.Ф., Бевзюк А.А. Обучение методики авиационного ГТД на выборках баз данных стендовых испытаний. // Материалы международной научно-технической конференции «Искусственный интеллект». 20-25 сентября 2004. – Таганрог–Донецк, 2004. – Т. 1. – С. 241-245.

*Поступила в редакцию 29.05.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.Г. Антошук, директор института компьютерных систем ОНПУ, Одесса.