

УДК 681.5.015

Г.Г. КУЛИКОВ¹, В.Ю. АРЬКОВ¹, Г.И. ПОГОРЕЛОВ², А.И. АБДУЛНАГИМОВ¹

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия

²Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Россия

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУНАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ³

Обсуждается технология полунатурных испытаний систем автоматического управления, контроля и диагностики (САУКД) газотурбинных двигателей (ГТД), которая дает возможность проведения комплексных испытаний САУКД, включая моделирование отказов, с помощью имитационных моделей двигателя, датчиков и исполнительных механизмов (ИМ). Основной задачей данной технологии является увеличение глубины и повышение надежности испытаний САУКД за счет моделирования комбинаций и последовательностей нескольких внезапных и постепенных отказов двигателя, датчиков и исполнительных механизмов.

полунатурные испытания, газотурбинные двигатели, система автоматического управления и контроля, марковские модели

Введение

Безопасность полета зависит в значительной степени от надежной работы силовой установки, которая находится под управлением и контролем системы автоматического управления, контроля и диагностики отказов (САУКД)⁴. Современные бортовые системы, таких как FADEC, объединяют функции управления двигателем и функции контроля состояния, диагностики отказов и их парирования. Адекватное моделирование работы силовой установки, как в нормальном режиме, так и в случае отказов, представляет собой необходимую предпосылку для проектирования и испытания цифровой системы.

Самый эффективный способ тестирования бортовых систем – использование средств полунатурных испытаний.

Программа полунатурных испытаний включает все возможные статические и динамические режимы работы силовой установки, включая исправное со-

стояние и различные отказы. Подобные комплексные испытания позволяют также исследовать возможное взаимодействие и взаимное влияние алгоритмов управления, контроля, диагностики отказов и их парирования до проведения дорогостоящих натурных испытаний на двигателе и летательном аппарате.

Проверка алгоритмов контроля, диагностики отказов и их парирования требует создания различных внештатных ситуаций, всевозможных отказов и их комбинаций. Такие работы на реальном двигателе и самолете часто невозможны по соображениям безопасности либо требуют больших дополнительных затрат.

В полунатурном стенде моделирование отказов можно реализовать алгоритмически [1], т.е. без внесения изменений в оборудование стенда. Кроме того, в этом случае открывается возможность моделирования отказов двигателя, исполнительных механизмов и датчиков в заданной последовательности и в различных комбинациях.

³Работа выполнена при поддержке инновационного гранта INTAS (проект №05-1000007-421).

⁴Указанный класс систем в специальной литературе имеет название FADEC.

1. Структура полунатурного стенда

Предлагаемая структура полунатурного стенда для испытаний САУКД ГТД включает: электронную систему управления (ЭСУ), имитаторы датчиков, исполнительных механизмов (ИМ) и двигателя, а также пульт управления и логику включения отказов (рис. 1).

Пульт управления и логика включения отказов позволяют активизировать соответствующие переключения в стенде и имитировать различные отказы датчиков и исполнительных механизмов (переменный и постоянный обрыв провода, переменное и постоянное короткое замыкание и исправное состояние), а также исправное состояние и различные отказы двигателя.

Отказы двигателя моделируются путем скачкообразного или постепенного изменения коэффициентов динамической модели. Величина добавок ΔA и ΔB определяется заранее по термодинамической модели двигателя для каждого отказа. Например, в случае обрыва лопатки компрессора снижается КПД компрессора, что выражается в соответствующем изменении коэффициентов ΔA и ΔB в динамической модели $\Delta n_{н\partial}(t) = f(\Delta G_T(t))$.

Таким образом, динамика газотурбинного двигателя (ГТД) в случае имитации отказа двигателя

моделируется с помощью дифференциального уравнения [2]:

$$\dot{x} = (A + \Delta A_i(t))x(t) + (B + \Delta B_i(t))u(t); \quad (1)$$

$$x(t) = \int_0^t \dot{x} dt = \int_0^t [(A + \Delta A_i(t))x(t) + (B + \Delta B_i(t))u(t)] dt, \quad (2)$$

где i – номер отказа.

Имитаторы ИМ и датчиков имитируют обрыв электрической цепи и короткое замыкание. Кроме этого, рассматривается возможность фиксации исполнительного органа в каком-либо состоянии, когда исполнительный механизм перестает подчиняться управляющим сигналам регулятора. Также имитируется движение исполнительного механизма в одну сторону с постоянной скоростью до ограничения.

Имитационные модели разрабатываются в пакете LabView, оборудование стенда формируется из стандартных промышленных компонентов. Такой подход позволяет использовать методику быстрой разработки стендов под конкретный двигатель на основе типовых технологий АСУ ТП.

2. Марковские модели САУКД ГТД

В данной работе марковское моделирование используется как формальный инструмент описания процесса обнаружения и диагностики отказов (рис. 2). При построении САУКД проводится классификация, формализация и представление процессов контроля состояния и диагностики отказов для основных частей двигателя (компрессор, камера сгорания, турбины, сопло, и т.д.) и его систем (управления, контроля, подачи топлива и т.д.) [3].

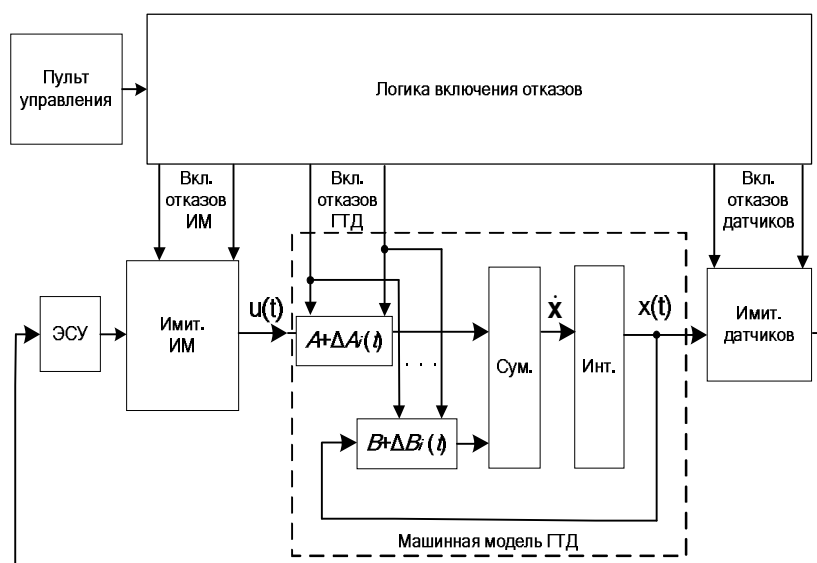


Рис. 1. Структура полунатурного стенда

Эти процессы можно представить в форме комплексных дискретных марковских цепей (диагностических марковских таблиц), которые позволяют провести анализ надежности силовой установки.

Марковская матрица вероятностей переходов для моделирования отказов и их последствий имеет универсальную структуру для всех трех уровней декомпозиции системы:

- система в целом (силовая установка);
- конструктивные блоки;
- элементы.

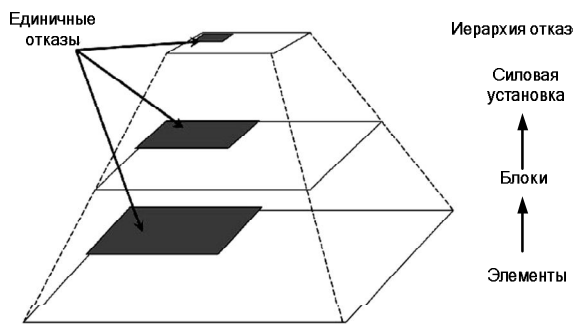


Рис. 2. Иерархическая структура марковской модели отказов

Иерархическая структура предложенной марковской модели показана на рис. 3.

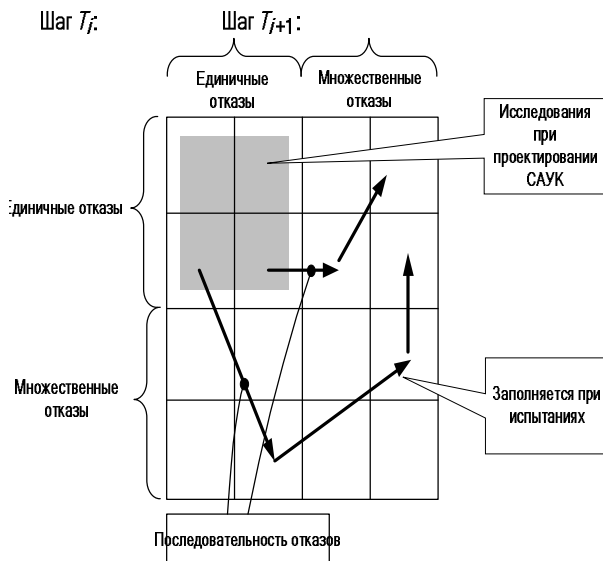


Рис. 3. Траектории состояний САУКД в марковской матрице

В обобщенном пространстве состояний, двоичные флаги отказов и реконфигурации образуют слово состояния элемента, блока, силовой установки, что позволяет проследить развитие отказа и процесс его диагностики, см. траектории на рис. 4. В ходе проектирования системы контроля, главным образом рассматривается область единичных отказов (серые области на рис. 2 и 3). Предложенная марковская модель дает возможность представить систему с множественными отказами и последовательностью отказов [4]. На рисунке 4 показан верхний уровень декомпозиции слова состояния силовой установки, отражающего все возможные отказы. Принимая во внимание, что моделирование всех множественных отказов и последовательностей отказов потребовало бы слишком много времени, выбирают только наиболее вероятные комбинации на основе статистики эксплуатации и экспертных знаний.

Матрица вероятностей переходов марковской цепи содержит вероятности P_{ij} :

$$\mathbf{P} = \{P_{ij}\}, \quad (3)$$

где каждый элемент P_{ij} представляет собой вероятность перехода из состояния X_i в состояние X_j в течение единичного интервала времени:

$$P_{ij} = \text{Pr ob}\{x(t+1) = X_j \mid x(t) = X_i\}. \quad (4)$$

$P_{ij} = \text{Pr ob}\{X_i \rightarrow X_j\}$	1	2	3
1. Исправное состояние	P_{11}	P_{12}	P_{13}
2. Отказ не приводящий к остановке двигателя	P_{21}	P_{22}	P_{23}
3. Отказ приводящий к остановке двигателя	P_{31}	P_{32}	P_{33}

Повторный запуск в полете

Рис. 4. Матрица вероятностей перехода силовой установки в течение одного полета

Агрегирование состояний марковской цепи при переходе от модели отказов элементов к модели отказов блоков выполняется следующим образом:

$$x(t) = X_i^* \quad \forall x(t) \in \{X_i^1, \dots, X_i^n\}, \quad (5)$$

где X_i^1, \dots, X_i^n – состояния отказов элементов; X_i^* – агрегированное состояние i -го отказа блока САУКД.

Агрегирование матрицы вероятностей переходов проводится в соответствии с правилом сложения вероятностей для независимых элементарных событий:

$$P_{ij}^* = \sum_{k=1}^n P_{ij}^k = \text{Pr ob}(x(t+1) = X_j^* | x(t) = X_i^*), \quad (6)$$

где P_{ij}^* – агрегированная вероятность для уровня конструктивно-сменного блока.

Марковская модель представляет собой вероятностную модель, отражающую семейство процессов диагностики. Каждый процесс исследуется на полунатурном испытательном стенде, где реальное оборудование системы управления и контроля FADEC работает в замкнутом контуре с имитационной моделью двигателя. Общее схемное решение испытательного стенда, реализующее предложенную технологию, представлено на рис. 5. Поскольку для заполнения марковской матрицы необходимо провести большое количество однотипных испытаний САУКД с моделированием различных отказов и их комбинаций, предлагается проводить такую программу тестов и заполнения матрицы в автоматизированном режиме [5, 6]. Функция автоматизированного режима полунатурных испытаний САУ (Test Scripting) является элементом таких систем автоматизированного проектирования САУ, как, например, dSPACE. В данной работе эта функция используется для автоматизированного исследования САУКД ГТД с помощью марковских моделей.

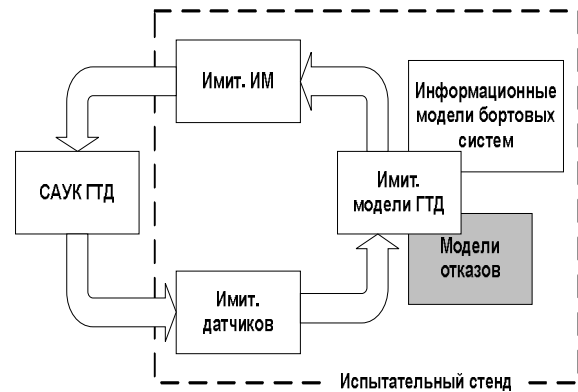


Рис. 5. Полунатурный испытательный стенд с моделированием отказов

На рис. 6 приведены примеры переходных процессов, зарегистрированных при полунатурных испытаниях цифровой САУКД газотурбинного двигателя. С помощью полунатурного стенда имитировался отказ датчика частоты вращения ротора турбокомпрессора $n_{нд}$. После обнаружения данного отказа в САУКД была автоматически проведена реконфигурация с целью парирования отказа. При этом контур регулирования газогенератора переключился с программы поддержания постоянной частоты вращения $n_{нд} = \text{const}$ на программу поддержания постоянной степени повышения давления в компрессоре $\pi_k^* = \text{const}$. В качестве управляющего воздействия в обоих случаях используется расход топлива G_T . На графиках можно увидеть, что реконфигурация системы управления вызвала переходной процесс в ГТД, что объясняется несогласованностью заданных значений параметров двигателя для разных контуров управления на одном и том же установившемся режиме работы [7, 8]. Для решения данной проблемы было предложено внести коррективы в техническое задание на САУКД в раздел, касающийся алгоритмов управления. Таким образом, испытания алгоритмов контроля и диагностики позволяют уточнить параметры алгоритмов управления в рамках интегрированной САУКД.

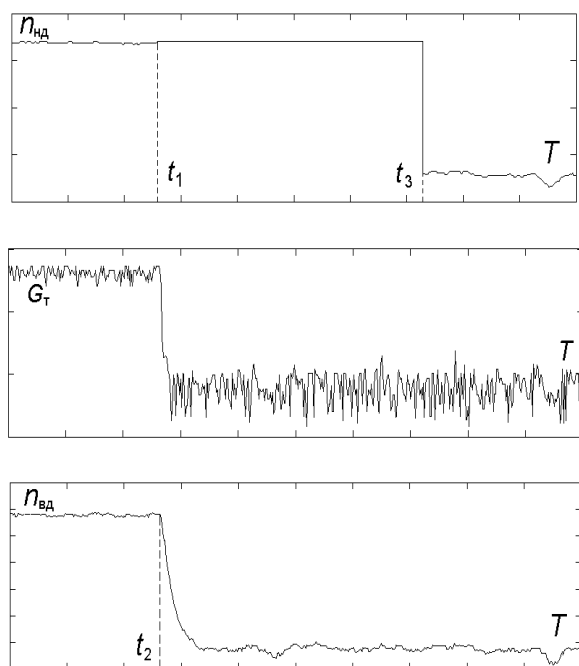


Рис. 6. Переходные процессы
реконфигурации САУКД

Заключение

Предлагаемая технология полунатурных испытаний САУКД ГТД позволяет моделировать отказы различных элементов, датчиков, исполнительных механизмов, двигателя при полунатурных испытаниях САУКД ГТД, а также комбинации и последовательности отказов, за счет чего снижается объем натурных испытаний электронных систем на двигателе и самолете. Технология полунатурного моделирования и испытаний может представлять интерес для разработчиков авиационных силовых установок и наземных газотурбинных установок (генераторы и газоперекачивающие установки).

Литература

1. Интеллектуальные информационные технологии контроля и диагностики авиационных двигателей и их систем на протяжении жизненного цикла / В.Ю. Рутковский, Г.Г. Куликов, П.С. Котенко, В.С. Фатиков, В.Ю. Арьков, Г.И. Погорелов // Тр. ИПУ РАН. – М.: ИПУ, 2002. – С. 37-41.

2. Полунатурное моделирование отказов ГТД для испытаний систем контроля и диагностики двигателей / В.Ю. Арьков, Г.Г. Куликов, С.В. Епифанов, И.И. Минаев // Авиационно-космическая техника и технология: Научн.-техн. журн. – 2004. – №7 (15). – С. 167-173.

3. Dynamic modelling of gas turbines: identification, simulation, condition monitoring and optimal control / Gennady G. Kulikov and Haydn A. Thompson, eds. Advances in Industrial Control Series. Springer-Verlag, London. – 2004. – 309 p.

4. Arkov V.Y., Kulikov G.G., Breikin T.V. Application of Markov chains to identification of turbine engine dynamic models // Proc. ASME TURBO EXPO 2002 Int. Conf., 2002, paper GT-2002-30038. – 6 p.

5. Development of Condition Monitoring Module for Aircraft Engines and Its Experimental Investigation / V. Arkov, G. Kulikov, S. Epifanov, I. Minaev // Proc. 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, St. Petersburg, Russia, 14-18 June, 2004. – P. 503-508.

6. Куликов Г.Г., Арьков В.Ю. Марковские модели динамических систем // Вестник УГАТУ. – 2002. – Т. 3, № 2. – С. 137-144.

7. Breikin T.V., Arkov V.Y., Kulikov G.G. Application of Markov chains to identification of gas turbine engine dynamic models // International Journal of Systems Science. – 2006. – Vol. 37, № 3, February. – P. 197-205.

8. Intelligent control and monitoring unit and its investigation using Markov modeling / V. Arkov, G. Kulikov, V. Fatikov, P. Kotenko, T. Breikin, S. Epifanov // Prepr. of IFAC Int. Conf. on Intelligent Control Systems and Signal Processing ICONS-2003, Faro, Portugal. – 2003. – P. 489-493.

Поступила в редакцию 25.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.