

УДК 621.438:681.5.09

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Августинович Валерий Георгиевич,

д-р техн. наук, профессор каф. авиационных двигателей Аэрокосмического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь – ГСП, Комсомольский пр., 29. E-mail: august@avid.ru

Кузнецова Татьяна Александровна,

канд. техн. наук, доцент каф. конструирования и технологий в электротехнике Электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь – ГСП, Комсомольский пр., 29. E-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки алгоритмических методов повышения надежности систем автоматического управления нового поколения газотурбинных двигателей (САУ ГТД), применяемых в различных отраслях промышленности, в частности в газотурбинных электростанциях, утилизирующих нефтяной попутный газ на нефтяных месторождениях Российской Федерации.

Цель работы: обоснование эффективности создания алгоритмической избыточности на основе применения встроенных математических моделей для повышения надежности САУ ГТД. Разработка робастной линейной адаптивной математической модели газотурбинного двигателя, работающей в реальном масштабе времени, удовлетворяющей высоким требованиям к точности отображения объекта в условиях детерминированных, стохастических и случайных изменений состояния двигателя.

Методы исследования. Построение динамической линейной модели ведется методом пространства состояний, при этом в качестве основы статической модели двигателя используется дроссельная характеристика индивидуального двигателя, полученная на сдаточных испытаниях или на «гонке» в эксплуатации после проведения обслуживания. Учет детерминированных изменений состояния двигателя ведется методом введения поправки статической характеристики на ухудшение КПД узлов двигателя с наработкой по ресурсу, которое определяется с помощью матрицы коэффициентов влияния. Учет стохастических изменений ведется методом анализа диагностической матрицы ситуаций, в том числе с применением численных методов Монте-Карло с использованием последовательностей случайных чисел, полученных по алгоритму И.М. Соболя (LРт-последовательностей). Учет случайных изменений ведется на основе методов одномерной и многомерной Калман-фильтрации. При разработке алгоритмов применялись методы объектно-ориентированного программирования на языке С++ и методы модельного эксперимента в среде MatLab.

Результаты. Разработаны алгоритмы адаптивной встроенной математической модели газотурбинного двигателя, позволяющей выполнять функции определения отказов информационных каналов и замещения информации отказавших каналов в условиях детерминированных, стохастических и случайных изменений состояния двигателя. Проведенные стендовые безмоторные и моторные испытания разработанных алгоритмов показали их работоспособность и высокую эффективность для повышения надежности САУ ГТД.

Ключевые слова:

Система автоматического управления, газотурбинный двигатель, встроенная модель двигателя, надежность, адаптивность, помехи, изменения двигателя, Калман-фильтрация, LРт-последовательности.

Введение

Проблема выбора оптимальных направлений утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) связана с решением актуальных социально-экономических вопросов.

По экспертным оценкам [1] до 12 % от общего объема загрязнений в России составляют выбросы на факельных установках. Из-за сжигания попутного нефтяного газа в атмосферный воздух происходит выброс вредных загрязняющих веществ, в частности диоксида углерода, вызывающего парниковый эффект.

В Энергетической стратегии России на период до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1 715-р от 13.11.2009 г., являющейся одним из основопола-

гающих нормативных документов по развитию топливно-энергетического комплекса, отдельно выделено направление, связанное с рациональным использованием попутного нефтяного газа. В соответствии с Постановлением правительства РФ № 7 от 8 января 2009 г. «О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания ПНГ на факельных установках» ограничен объем сжигания ПНГ в факелах на месторождениях в размере не более 5 % от общего объема его добычи и установлены штрафные платежи за сверхлимитное сжигание газа.

При этом ПНГ является ценным углеводородным компонентом. В этой связи возможность рационального использования ПНГ делают его важным ресурсом оздоровления экологической обста-

новки и увеличения объема российских углеводородных запасов.

В частности, к путям утилизации ПНГ можно отнести его использование в качестве топлива на локальных энергоцентрах – высокотехнологичных газотурбинных электростанциях (ГТЭС). Основу ГТЭС составляет один или несколько газотурбинных двигателей (ГТД) – силовых агрегатов, механически связанных с электрогенератором и объединенных системой управления в единый энергетический комплекс.

ГТД как объект управления является сложной динамической системой, параметры которой характеризуются случайным разбросом в широком диапазоне, вызванным внешними и внутренними помехами.

Надежность двигателя во многом определяется качеством систем автоматического управления (САУ ГТД). Одним из основных направлений повышения надежности цифровых САУ ГТД является создание алгоритмической избыточности на основе применения встроенных адаптивных математических моделей двигателя, инвариантных к действию широкого спектра внешних и внутренних помех.

Основные методы и содержание исследования

Идея алгоритмического резервирования системы управления двигателем на основе встроенной математической модели очевидна и не нова [2–4]. Математическая модель как дополнительный (третий) независимый источник информации позволяет построить мажоритарную систему в двухканальных САУ (рис. 1) [5], выявляющую такие трудно идентифицируемые отказы отдельного канала, как «дрейф» параметра (неидентифицируемых в двухканальных схемах), и распознавать ситуации «отказ двигателя».

Основными требованиями к встроенным моделям является малый объем занимаемой памяти, высокое быстродействие (имитация процессов в реальном масштабе времени), заданная точность отображения параметров двигателя в статике и динамике в широком диапазоне режимов работы, условий и состояний многомерного и многосвязного объекта идентификации – газотурбинного двигателя (ГТД). Очевидно, что эти требования во многом являются противоречащими друг другу, что обуславливает необходимость оптимизации в смысле некоторых выбранных комплексных критериев качества моделируемых процессов. Как

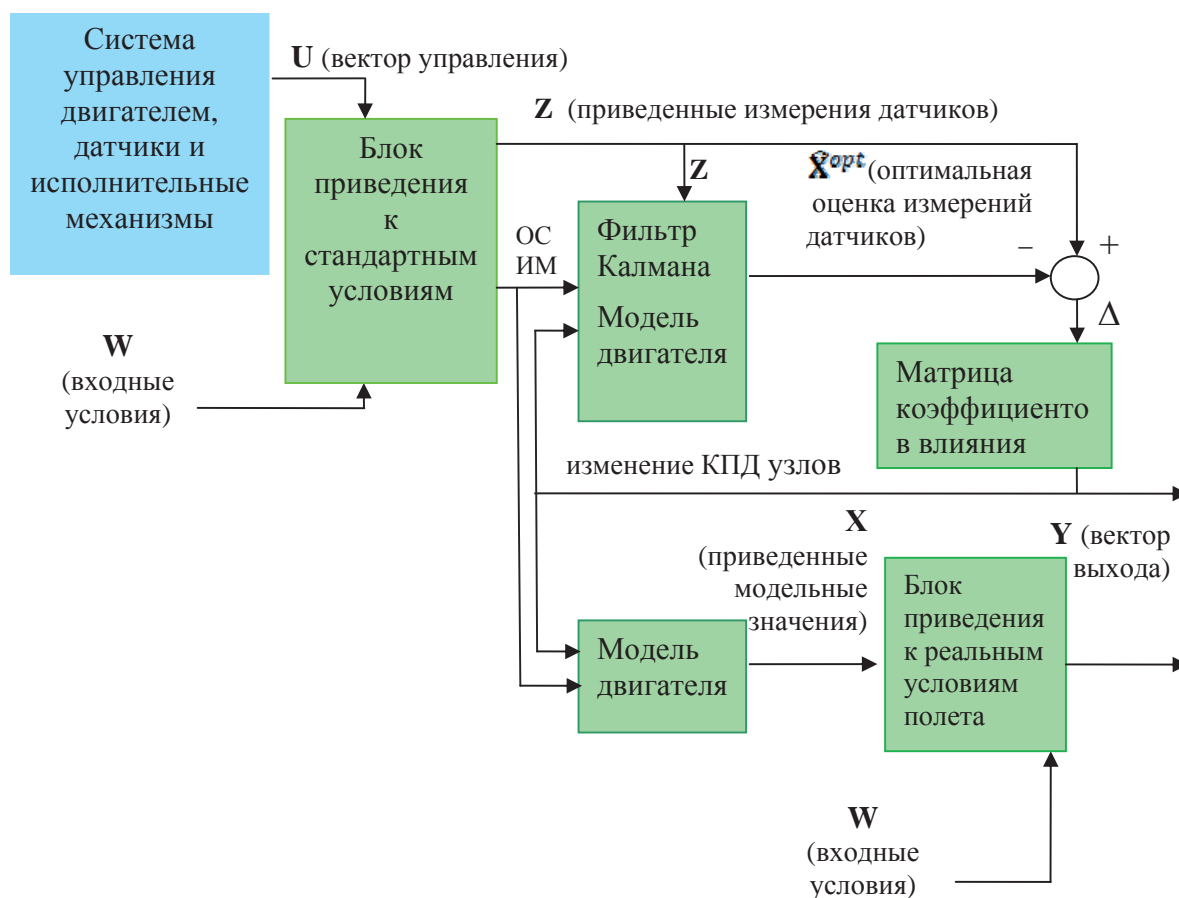


Рис. 1. Структурная схема САУ со встроенной моделью ГТД

Fig. 1. Structure diagram of automated control system (ACS) with the built-in model of gas-turbine engine (GTE)

правило, на практике компромиссное решение находят за счет понижения точности модели, так как требования к объему памяти и быстродействию являются безусловными. Такое понижение точности осуществляется в основном за счет понижения уровня модели.

В связи с этим возникает проблема выбора уровня математической модели для решения поставленной задачи. Следует отметить, что в настоящее время существует опыт практического применения как линейных (низкого уровня), так и нелинейных узловых моделей (высокого уровня) в системах моделирования, сопровождающих натурные испытания [6, 7], и алгоритмического резервирования во встроенных моделях, работающих в реальных условиях [8–10].

Тем не менее, создание алгоритмической избыточности на основе применения встроенных математических моделей сопровождается определенными технологическими и теоретическими трудностями, связанными с высокой размерностью пространства состояний двигателя, которая, как правило, существенно превосходит размерность вектора измеряемых в процессе эксплуатации параметров. В этой связи установить детерминированное однозначное соответствие между ними достаточно сложно. В результате возникают проблемы идентификации отказа датчика с последующим замещением информации модельным значением и распознавания «отказа» (изменения конфигурации) двигателя.

Обозначенная проблема является общетеоретической независимо от уровня используемой модели двигателя. На практике повышение уровня модели не приводит автоматически к повышению надежности САУ. Таким образом, при идентификации неисправного информационного канала и его замещения в системе автоматического управления с помощью встроенной модели ГТД одним из основных ее свойств необходимо признать адаптивность к упомянутым выше изменениям состояния объекта. Более того, это свойство адаптивности модели во многом является критическим для успешности решения поставленных задач.

Предлагается применение линейной адаптивной встроенной модели двигателя (LABEM – Linear Adaptive Built-in Engine Model), предназначенной для работы совместно с системой управления газотурбинным двигателем в реальной среде и удовлетворяющей предъявляемым требованиям надежности. В качестве основы статической модели двигателя используется дроссельная характеристика (1) индивидуального двигателя, полученная на сдаточных испытаниях или на «гонке» в эксплуатации после проведения обслуживания (например, замене электронно-цифрового регулятора САУ), т. е.

$$\mathbf{X}, \mathbf{Y} = f(\mathbf{U}, \mathbf{W}), \quad (1)$$

где \mathbf{W} – вектор входа; \mathbf{U} – вектор управления; \mathbf{Y} – вектор выхода; \mathbf{X} – вектор состояния.

Для элиминации множества значений векторов входа в модели используется понятие *обобщенного вектора входа* (параметры с индексом «0»), который формируется с помощью теории подобия газотурбинного двигателя процедурой, известной как «приведение к стандартным атмосферным условиям».

Динамическая линейная модель строится по методу пространства состояний [11–13]. Модель имеет следующий канонический вид системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (2), задающих зависимость от обобщенного вектора входа:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_0 &= \mathbf{A}(x)\mathbf{X}_0 + \mathbf{B}(x)\mathbf{U}_0, \\ \mathbf{Y}_0 &= \tilde{\mathbf{N}}(x)\mathbf{X}_0 + \mathbf{D}(x)\mathbf{U}_0 + \mathbf{V}, \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{V} – вектор информационного шума сигнала от первичных преобразователей (датчиков).

Изменения состояния объекта (двигателя) (в том числе, в результате действия внешних и внутренних помех) могут быть в общем случае классифицированы как:

- детерминированные, априорно известные изменения под влиянием контролируемых факторов (условия эксплуатации, наработка по ресурсу и т. п.);
- стохастические изменения, обусловленные, например, различным начальным тепловым состоянием роторов и статоров (изменения радиальных зазоров и др.), неконтролируемыми отборами воздуха и мощности и др.;
- случайные изменения, вызванные неконтролируемым изменением конфигурации двигателя (например, повреждения лопаток турбокомпрессора, загрязнение проточной части двигателя, изменение характеристик вентилятора и др.).

Соответственно, необходимы три вида поправок для адаптации модели к возможному изменению состояния двигателя.

Для учета **детерминированных изменений двигателя** в LABEM предусмотрена поправка статической характеристики на ухудшение КПД узлов двигателя с наработкой по ресурсу в рабочих циклах. Соответствующее изменение параметров (в %) определяется с помощью коэффициентов влияния КПД на параметры двигателя в зависимости от режима работы с последующим линейным суммированием. Учет изменений производится в поправке на состояние двигателя с помощью диагностической матрицы.

Принципы использования диагностической матрицы применим и при учете **стохастических изменений двигателя**. При этом предполагается, что большинство состояний, отличных от базовой характеристики двигателя с учетом поправок, отображается в *неизменяемых параметрах двигателя* – отклонениях КПД турбины высокого давления (ТВД), КПД турбины низкого давления (ТНД), утечек воздуха из-за компрессора высокого давления (КВД) в наружный контур и величин отборов воздуха из-за КВД.

Для определения множественных неизвестных неизмеряемых параметров двигателя решалась стандартная задача многокритериальной оптимизации. В качестве двух критериев были выбраны минимум суммы модулей разностей между левыми и правыми (F) частями уравнений и минимум Евклидовой нормы (Q) вектора решения системы $X(x_i)$. Суперпозиция целевых функций выбранных критериев, взятых с различными весовыми коэффициентами, позволила получить интегральный критерий. Весовые коэффициенты в интегральной целевой функции выбирались на основе экспертных оценок.

Оптимизация велась в два этапа. Сначала определялось «грубое» решение, далее в его окрестностях – точное решение. Переменными параметрами поиска явились: задаваемый диапазон изменения (поиска) параметров, число итераций в первом и втором прогоне, весовые коэффициенты в интегральном минимизируемом критерии.

В частности при задании: диапазона изменения параметров от 0 до 100 %, числе итераций при первом и втором прогоне $N=5000$, весовых коэффициентах в первом прогоне при интегральном критерии при F и Q , равных 0,3 и 0,7 соответственно, а во втором прогоне – 0,5, доверительном интервале $\pm 0,5$, суммарная среднеквадратичная ошибка полученного решения тестовой задачи по всем восьми координатам составила $\sigma=0,31$. При изменении числа итераций при втором прогоне до $N=1000$, доверительного интервала до $[-0,4; +0,6]$ суммарная среднеквадратичная ошибка решения уменьшается до $\sigma=0,28$. При этом по одной координате в обоих случаях средняя абсолютная ошибка по модулю составляет $\Delta=0,21$, а относительная ошибка изменяется в диапазоне $\varepsilon \in [0,017; 0,231]$.

Очевидно, что возможно дальнейшее повышение точности решения путем изменения параметров поиска и оптимального выбора интегральной целевой функции (как на основе изменения весовых коэффициентов, так путем изменения самих критериев).

Следует учитывать, что после определения отклонений неизмеряемых параметров необходимо провести сравнение с ограничителями (лимитерами) на отклонения. В случае если расчетные отклонения превышают лимитеры, при вычислении поправок принимаются их лимитированные значения. В решаемой практической задаче для КПД турбокомпрессоров ограничение составляет $+5 \dots -5$ %, для отборов и утечек ограничение составляет $0 \dots +10$ %.

Для уменьшения погрешностей модели в пределах определенного диапазона **случайных изменений двигателя** предусматривается работа интегратора на установившемся режиме, «подтягивающего» модельные значения параметров, определенных выше, к средним измеренным значениям исправных управляющего и резервного каналов. Это обеспечивает устойчивую идентификацию отказавшего канала с помощью модели и в случае отка-

за каналов плавный переход на управление по модельным значениям параметров. Работа интегратора описывается формулой (4). При интегрировании производится корректировка модельного физического значения в сторону уменьшения разности с измеренным значением:

$$\dot{Y} = Y + \int (\dot{Y} - Y_{\text{изм}}) dt. \quad (4)$$

При этом выполняются логические операции ограничения, вследствие которых величина абсолютной интегральной поправки не может превосходить заранее заданную величину. Далее интегральные поправки вычисляются в относительном виде для последующей коррекции модели. Вычисленные поправки суммируются линейно с соответствующим знаком с базовой характеристикой.

Кроме того, для повышения надежности и точности модели в условиях действия случайных помех применяется *Калман-фильтрация входных и выходных параметров модели*. Необходимость в использовании дополнительных устройств идентификации, к которым следует относить фильтр Калмана, обусловлена действием внешних и внутренних помех (в том числе, отказов), как в канале встроенной модели (обусловленных ошибкой моделирования), так и в канале измерения (обусловленных погрешностью датчиков и отказами узлов двигателя) [16, 17]. Возможность применения фильтров Калмана обусловлена нормальностью распределения случайных величин и эргодичностью случайных процессов в каналах ЛАВЕМ, доказанными на основе статистической обработки данных испытаний двигателя [18–20].

Входная одномерная фильтрация ведется по ходу дозирующей иглы (ДИ). Для реализации алгоритма Калман-фильтрации в блок фильтрации входных параметров встраивается математическая модель ДИ, вырабатывающая сигнал модельного (прогнозируемого) значения хода поршня ДИ. Алгоритмы Калман-фильтрации строятся на сравнении измеренных ($z_{\text{ди}}$) и модельных ($x_{\text{ди}}$) значений хода дозирующей иглы с целью определения в текущий момент оптимального коэффициента Калмана (K) на основе решения задачи минимизации математического ожидания квадрата ошибки $\min M(e^2)$ оптимальной оценки хода дозирующей иглы ($e = x_{\text{ди}} - \hat{x}_{\text{ди}}$) [21–23]. При этом оптимальная оценка хода дозирующей иглы вычисляется с помощью рекуррентного соотношения (5):

$$\hat{x}_{\text{ди}k+1} = K_{k+1} z_{\text{ди}k+1} + (1 - K_{k+1}) (\hat{x}_{\text{ди}k} \Delta x_{\text{ди}k}). \quad (5)$$

Полученная оптимальная оценка положения поршня ДИ поступает на вход модели регулятора перепада давления (дифференциального клапана), выходом которой является расход топлива, подаваемый на вход ЛАВЕМ.

По аналогичному принципу строится *многомерная Калман-фильтрация выходных параметров* линейной адаптивной встроенной модели двигателя. На выходе ЛАВЕМ подключается многомер-

ный фильтр Калмана, определяющий оптимальные оценки выходных параметров – частот вращения турбин низкого (n_1) и высокого (n_3) давления, температуры газа за турбиной (T_T), давления (P_K) с помощью матричного уравнения (6):

$$\hat{X}_k = (1 - K_k)X_k + K_k Z_k, \quad (6)$$

где на k -шаге: $X_k = \{n_1, n_3, T_T, P_K\}$ – вектор-столбец прогнозируемых модельных значений координат выхода LABEM; \hat{X}_k – вектор-столбец оптимальных оценок этих координат; Z_k – вектор-столбец их измеренных датчиками значений; K_k – матрица коэффициентов Калмана для выходных координат.

Точность алгоритмов одномерной и многомерной фильтрации Калмана зависит от корректности задания по всем идентифицируемым параметрам дисперсий модели и датчиков. Выбор значений дисперсий ведется на основе статистической обработки больших массивов данных стендовых и натурных испытаний двигателей.

Результаты моделирования и экспериментальных исследований

Результаты натурных испытаний LABEM в составе САУ на моторном стенде показали высокую точность вычислений. Пример осциллограммы изменения температуры за турбиной (T_T , град С) по времени, полученной в результате моделирования и измерений с помощью двухканальной системы термопар, приведен на рис. 2.

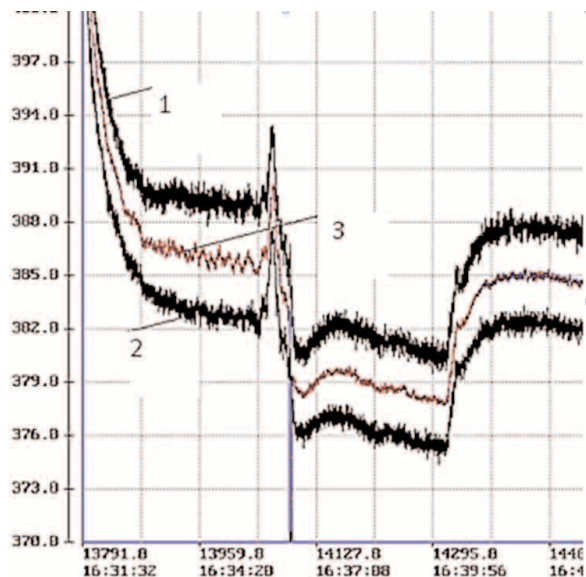


Рис. 2. Осциллограмма результатов натурных испытаний LABEM на моторном стенде (1, 2 – измерения основного и резервного каналов двухканальной системы термопар, 3 – модельное значение температуры за турбиной)

Fig. 2. Oscillogram of the results of LABEM full-scale testing on a motor bench (1, 2 are the measurements of the main and redundant channels of two-channel systems of thermocouples, 3 is the model value of the temperature behind the turbine)

Результаты стендовых безмоторных испытаний многомерного фильтра по каналам температуры газа за турбиной частоты и вращения ротора компрессора низкого давления (КНД) приведены на рис. 3, 4.

Следует отметить, что решаемая задача Калман-фильтрации есть задача идентификации, а не сглаживания. Фильтр Калмана не рассчитан на сглаживание получаемых с датчиков данных, а нацелен на определение наиболее вероятного значения измеряемого с их помощью реального параметра – его оптимальной оценки, полученной с учетом «зашумленных» модельного (прогнозируемого) значения и измерения датчика. В качестве «расплаты» за обеспечение большей достоверности и надежности модели фильтр Калмана может внести некую ошибку (шум), изменяющуюся по случайному закону, который предлагается отфильтровывать (сглаживать) на выходе Фильтра Калмана с помощью, например, алгоритмов скользящего среднего или алгоритмов Хэмминга. Кроме того, эта ошибка может быть минимизирована и путем применения алгоритмов скользящего среднего на выходе измерителей (датчиков).

Заключение

Проведенное моделирование в среде MatLab и результаты полунатурных (моторных испытаний) позволяют сделать вывод о работоспособности разработанных алгоритмов в условиях действия внешних и внутренних помех, повышении точности идентификации и качества управления.

Однако при проектировании встроенных моделей газотурбинных двигателей следует учитывать, что, поскольку объект имеет существенно нелинейные свойства, применение модели в качестве замещения объекта в информационном пространстве ограничено. В частности, модель двигателя не может быть использована по своему назначению на режимах авторотации, запуска, а также в таких ситуациях, как самопроизвольное погасание камеры сгорания, помпаж компрессора и некоторых других.

Оценка погрешности настоящей модели, полученная посредством сравнения результатов моделирования на узловую нелинейной модели, дала следующие результаты для основных режимов эксплуатации двигателя: по частоте вращения ротора низкого давления 1,5 %, по частоте вращения ротора высокого давления 0,5 %, по давлению за компрессором 4 %, по температуре газа за турбиной 2,5 %. Как и следовало ожидать, погрешность модели увеличивается с уменьшением режима из-за нелинейности характеристик, достигая двукратной величины на минимальном режиме. Учитывая, что основные режимы работы составляют 90 % времени эксплуатации, полученные величины погрешности модели являются приемлемыми.

В целом полученные результаты соответствуют современным международным требованиям к

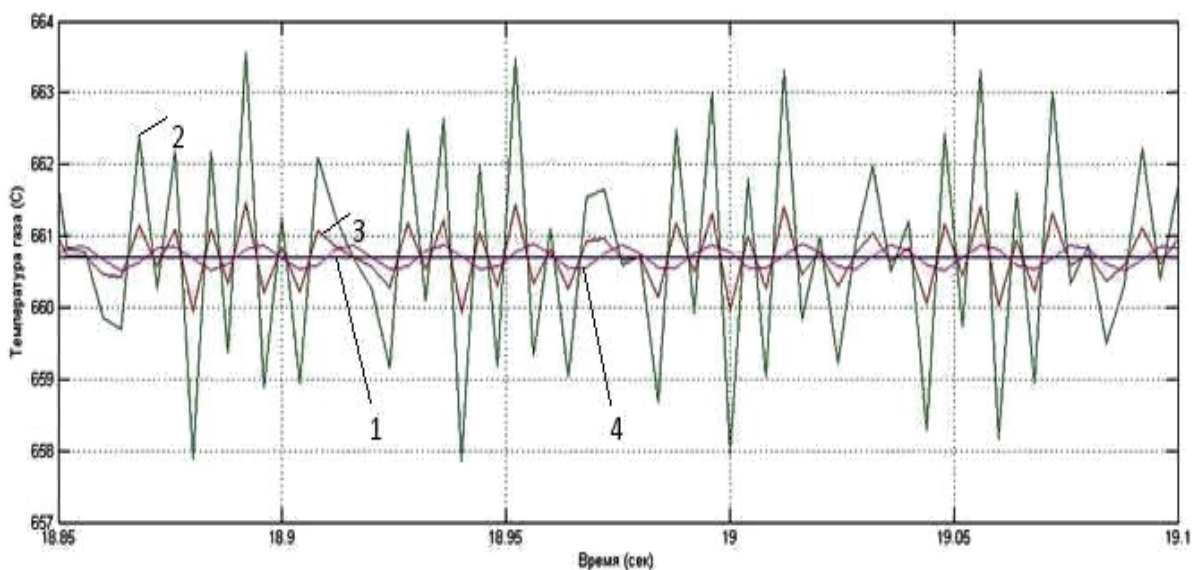


Рис. 3. Осциллограмма изменения сигнала температуры газа за турбиной на выходе многомерного фильтра Калмана (1 – модельное значение, 2 – измеренные значения, 3 – значения параметра на выходе фильтра Калмана, 4 – на выходе фильтра Калмана и Хэмминга)

Fig. 3. Oscillogram of the change in gas temperature signal behind the turbine at the output of multidimensional Kalman filter (1 is the model value, 2 are the measured values, 3 are the values of the parameter at the Kalman filter output, 4 are the values of the parameter at the Kalman and Hamming filter output)

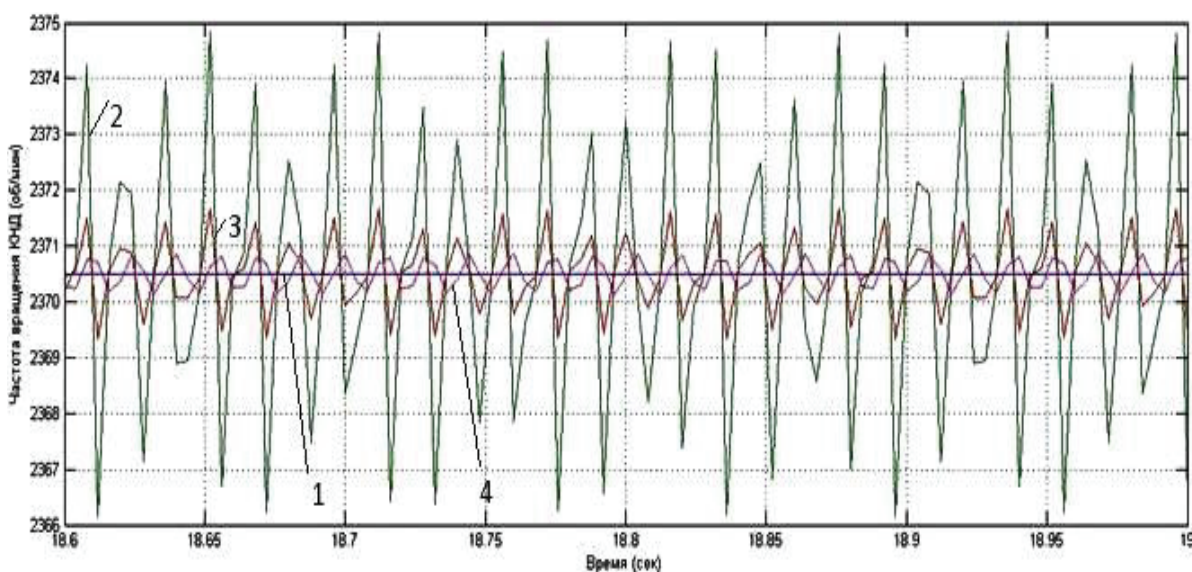


Рис. 4. Осциллограмма изменения сигнала частоты вращения КНД на выходе многомерного фильтра Калмана (1 – модельное значение, 2 – измеренные значения, 3 – значения параметра на выходе фильтра Калмана, 4 – на выходе фильтра Калмана и Хэмминга)

Fig. 4. Oscillogram of the change in the low pressure compressor (LPC) rotation frequency signal at the output of multidimensional Kalman filter (1 is the model value, 2 are the measured values, 3 are the values of the parameter at the Kalman filter output, 4 are the values of the parameter at the Kalman and Hamming filter output)

системным исследованиям структуры и функционированию сложных объектов и могут быть использованы при проектировании отказоустойчи-

вых систем автоматического управления газотурбинными двигателями для повышения его надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кириллов В.В. Полезное использование попутного нефтяного газа в Российской Федерации: текущая ситуация и перспективы // Опыт Правительства Российской Федерации и нефтяных компаний по эффективному использованию попутного нефтяного газа: Материалы Региональной конф. по странам Европы и Центральной Азии. – Сургут, 2013. URL: <http://rpn.gov.ru/node/686> (дата обращения: 20.04.2015).
- Panov V. Auto-tuning of real-time dynamic gas turbine models // Proc. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. – Germany, Düsseldorf, 2014. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1908299> (дата обращения: 15.01.2015).
- Kong Ch., Kang M., Park G. Study on Condition Monitoring of 2-Spool Turbofan Engine Using Non-Linear Gas Path Analysis Method and Genetic Algorithms // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2013. – V. 1. – № 2. – P. 214–220.
- Assessment of Modeling Uncertainties Impact on Performance Recovery Analysis of Overhauled Civil Turbofan Engines / A. Kando, J. Kuschke, H. Schulte, S. Staudache // Challenges in Technology Innovation: Global Collaboration: Proc. 21st International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE 2013). – Busan, Korea, 2013. – V. 1. – P. 892–904.
- Malloy D.J., Webb A.T., Kidman D. F-22/F119 Propulsion System Ground and Flight Test Analysis Using Modeling and Simulation // Power for Land, Sea, and Air: Proc. ASME Turbo-Expo 2002. – Amsterdam, Netherlands, 2002. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1574588> (дата обращения: 20.01.2015).
- Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Ю.С. Белкин, Б.В. Боев и др. – М.: Машиностроение, 1983. – 283 с.
- Идентификация систем управления авиационных ГТД / В.Г. Августининович, В.А. Акиндинов, Б.В. Боев и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 196 с.
- Kobayashi T., Simon D.L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2007. – V. 129 (4). – P. 986–993.
- Kobayashi T., Simon D.L. Aircraft Engine On-Line Diagnostics through Dual-Channel Sensor Measurements: Development of Baseline System // Power for Land, Sea, and Air: Proc. ASME Turbo-Expo 2008. Berlin, Germany, 2008. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1623492&resultClick=3> (дата обращения: 20.03.2015).
- Borguet S., L'eonard O. A sensor-fault-tolerant diagnosis tool based on a quadratic programming approach // Power for Land, Sea and Air: Proc. ASME Turbo Expo 2007. – Montreal, Canada, 2007. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1591276&resultClick=3> (дата обращения: 20.03.2015).
- Steady State Detection in Industrial Gas Turbines for Condition Monitoring and Diagnostics / C. Celis, E. Xavier, T. Teixeira, G. Pinto // Turbine Technical Conference and Exposition: Proc. ASME Turbo Expo 2014. – Dusseldorf, Germany, 2014. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1908296&resultClick=3> (дата обращения: 15.01.2015)
- Simon D.L., Lift J.S. A data filter for identifying steady-state operating points in engine flight data for condition monitoring applications // Power for Land, Sea and Air: Proc. ASME Turbo Expo 2007. – Glasgow, UK, 2010. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1608411&resultClick=3> (дата обращения: 25.01.2015).
- Кузнецова Т.А., Кулютникова Е.А., Рябуха А.А. Идентификация электрических цепей при моделировании динамических режимов методом пространства состояний // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 188–190.
- Соболь И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973. – 312 с.
- Соболь И.М. Равномерно распределенные последовательности с дополнительным свойством равномерности // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1976. – Т. 16. – № 5. – С. 1332–1337.
- Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – V. 82 (series D). – P. 35–45.
- Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана–Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 200 с.
- Кузнецова Т.А., Августининович В.Г., Якушев А.П. Статистический анализ процессов в системах управления авиационных двигателей с бортовыми математическими моделями // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 236–238.
- Лялькина Г.Б., Бердышев О.В. Математическая обработка результатов эксперимента // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 180.
- Mihankhah A., Salmasi F.R., Salahshoor K. Partial and total actuator faults accommodation for input-affine nonlinear process plants // ISA Transactions. – 2013. – V. 52 (3). – P. 351–357.
- Borguet S., Dewalle P., L'eonard O. On-line transient engine diagnostics in a Kalman filtering framework // Power for Land, Sea and Air: Proc. ASME Turbo Expo 2005. – Reno-Tahoe, Nevada, USA, 2005. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1584182&resultClick=3> (дата обращения: 15.02.2015).
- Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. URL: http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (дата обращения: 25.01.2015).
- Кузнецова Т.А., Губарев Е.А., Лихачева Ю.В. Алгоритмы оптимальной фильтрации в задачах идентификации параметров систем автоматического управления авиационных двигателей // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – Т. 12. – № 9. – С. 12–20.

Поступила 15.05.2015 г.

UDC 621.438:681.5.09

ENHANCEMENT OF GAS-TURBINE ENGINE CONTROL RELIABILITY USING ALGORITHMIC PROCEDURES

Valeriy G. Avgustinovich,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy Avenue,
Perm, 614990, Russia. E-mail: august@avid.ru

Tatiana A. Kuznetsova,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy Avenue,
Perm, 614990, Russia. E-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com

The relevance of the work is caused by the need to develop the algorithmic methods of improving reliability for automatic control systems of new generation of gas-turbine engines (ACS GTE). The ACS GTE are used in different branches of industry, including gas-turbine power plants utilizing oil-associated gas on oil fields of the Russian Federation.

The main aim of the study is to evaluate the effectiveness of developing algorithmic redundancy using the built-in mathematical models to improve the ACS GTE reliability; to develop the robust adaptive linear gas-turbine engine model, operating in real time, satisfying the high accuracy requirements under deterministic, stochastic and random changes in the engine condition.

The methods used in the study. The dynamic linear model is built by the state space method; herewith the individual engine throttle characteristic is used as the basis of static model. This throttle characteristic was obtained in the acceptance tests or «race» during the operation after the maintenance. The account of the deterministic changes in the engine condition is based on the method of adjusting the static characteristics to the worsening of engine components efficiency due to expenditure of resources, which is defined by a matrix of influence coefficients. The account of the stochastic variations is based on the method of analysis of the diagnostic matrix of situations, including the use of numerical methods Mont Carlo using the random numbers sequences obtained by the I.M. Sobol algorithm (LP τ -sequences). The account of the random changes is based on the methods of one-dimensional and multi-dimensional Kalman-filtering. The methods of object-oriented programming in C++ and experimental modeling in MatLab were used for developing the algorithms.

The results. The authors have developed the algorithms of the adaptive built-in mathematical model of an gas-turbine engine which allows determining the failure of information channels, and replacing the failed channel information in case of deterministic, stochastic and random changes of the engine parameters. The carried out non-motorized and motorized bench developed algorithms' testing showed their operability and high efficiency to improve the ACS GTE reliability.

Key words:

Automatic control systems, gas-turbine engine, built-in engine model, reliability, adaptability, interference, engine changes, Kalman-filtering, LP-sequence.

REFERENCES

1. Kirillov V.V. Poleznoye ispolzovaniye poputnogo neftyanogo gaza v Rossiyskoy Federatsii: tekushchaya situatsiya i perspektivy [The usage of associated petroleum gas in the Russian Federation: current situation and prospects]. *Materialy Regionalnoy konferentsii po stranam Evropy i Tsentralnoy Azii. Opyt Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii i neftnyanym kompaniy po effektivnomu ispolzovaniyu poputnogo neftyanogo gaza* [Proc. of the Reg. Europe and Central Asia Conf. The experience of the Russian Government and the oil companies on the effective use of associated petroleum gas]. Surgut, Russia, 2013. Available at: <http://rpn.gov.ru/node/686> (accessed 20 April 2015).
2. Panov V. Auto-tuning of real-time dynamic gas turbine models. *Proc. of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. Düsseldorf, Germany, 2014. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1908299> (accessed 15 January 2015).
3. Kong Ch., Kang M., Park G. Study on Condition Monitoring of 2-Spool Turbofan Engine Using Non-Linear Gas Path Analysis Method and Genetic Algorithms. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 214–220.
4. Kando A., Kuschke J., Schulte H., Staudache S. Assessment of Modeling Uncertainties Impact on Performance Recovery Analysis of Overhauled Civil Turbofan Engines. *Proc. of 21st International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE 2013). Challenges in Technology Innovation: Global Collaboration*. Busan, Korea, 2013, vol. 1, pp. 892–904.
5. Malloy D.J., Webb A.T., Kidman D. F-22/F119 Propulsion System Ground and Flight Test Analysis Using Modeling and Simulation. *Proc. ASME Turbo-Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*. Amsterdam, Netherlands, 2002. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1574588> (accessed 20 January 2015).
6. Belkin Yu.S., Boyev B.V. *Integralnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya silovymi ustanovkami samoletov* [The Integrated automatic control system of aircraft power plants]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1983. 283 p.
7. Avgustinovich V.G., Akindinov V.A., Boyev B.V. *Identifikatsiya sistem upravleniya aviatsionnykh GTD* [The identification of aircraft gas turbine engines control systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 196 p.
8. Kobayashi T., Simon D.L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, vol. 129 (4), pp. 986–993.
9. Kobayashi T., Simon D.L. Aircraft Engine On-Line Diagnostics through Dual-Channel Sensor Measurements: Development of Baseline System. *Power for Land, Sea, and Air. Proc. ASME Turbo-Expo 2008*. Berlin, Germany, 2008. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1623492&resultClick=3> (accessed 20 March 2015).
10. Borguet S., L'eonard O. A sensor-fault-tolerant diagnosis tool based on a quadratic programming approach. *Power for Land, Sea and Air. Proc. ASME Turbo Expo 2007*. Montreal, Canada, 2007. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.as>

- me.org/proceeding.aspx?articleid=1591276&resultClick=3 (accessed 20 March 2015).
11. Celis C., Xavier E., Teixeira T., Pinto G. Steady State Detection in Industrial Gas Turbines for Condition Monitoring and Diagnostics. *Turbine Technical Conference and Exposition. Proc. ASME Turbo Expo 2014*. Dusseldorf, Germany, 2014. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1908296&resultClick=3> (accessed 15 January 2015).
 12. Simon D.L., Lift J.S. A data filter for identifying steady-state operating points in engine flight data for condition monitoring applications. *Power for Land, Sea and Air. Proc. ASME Turbo Expo 2007*. Glasgow, UK, 2010. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1608411&resultClick=3> (accessed 25 January 2015).
 13. Kuznetsova T.A., Kulyutnikova E.A., Ryabukha A.A. Identifikatsiya elektricheskikh tsepey pri modelirovanii dinamicheskikh rezhimov metodom prostranstva sostoyaniy [The identification of the electrical circuit in dynamic conditions modeling by state space method]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya*, 2013, no. 3, pp. 188–190.
 14. Sobol I.M. *Chislennyye metody Monte Karlo* [The numerical methods of Monte Carlo]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 312 p.
 15. Sobol I.M. Ravnomerno raspredelennyye posledovatel'nosti s dopolnitelnym svoystvom ravnomernosti [The uniformly distributed sequences with an additional feature of uniformity]. *Zhurnal Vychislitel'noy Matematiki i Matematicheskoy Fiziki*, 1976, vol. 16, no. 5, pp. 1332–1337.
 16. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82 (series D), pp. 35–45.
 17. Brammer K., Ziffling G. *Filtr Kalmana–Byusi. Determinirovannoye nablyudeniye i stokhasticheskaya filtratsiya* [Kalman–Bussi filtre. Determined observation and stochastic filtration]. Moscow, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1982. 200 p.
 18. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G., Yakushev A.P. Statisticheskii analiz protsessov v sistemakh upravleniya aviatsionnykh dvigateley s bortovymi matematicheskimi modelyami [The statistical analysis of processes in aircraft engine control systems with on-board mathematical models]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya*, 2014, no. 5, pp. 236–238.
 19. Lyalkina G.B., Berdyshev O.V. Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta [Mathematical processing of the experimental results]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 3, pp. 180.
 20. Mihankhah A., Salmasi F.R., Salahshoor K. Partial and total actuator faults accommodation for input-affine nonlinear process plants. *ISA Transactions*, 2013, vol. 52 (3), pp. 351–357.
 21. Borguet S., Dewallef P., L'eonard O. On-line transient engine diagnostics in a Kalman filtering framework. *Power for Land, Sea and Air. Proc. ASME Turbo Expo 2005*. Reno-Tahoe, Nevada, USA, 2005. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1584182&resultClick=3> (accessed 15 February 2015).
 22. Welch G., Bishop G. *An Introduction to the Kalman Filter*. Available at: http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (accessed 25 January 2015).
 23. Kuznetsova T.A., Gubarev E.A., Likhacheva Yu.V. Algoritmy optimal'noy filtratsii v zadachakh identifikatsii parametrov sistem avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnykh dvigateley [The optimal filtering algorithms in tasks of automatic control aircraft engine parameters identification]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*, 2014, vol. 12, no. 9, pp. 12–20.

Received: 15 May 2015.