

УДК 681.5.09

**Т.А. Кузнецова, Е.А. Губарев, Ю.В. Лихачева, А.П. Якушев**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ САУ ГАЗОТУРБИННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МНОГОМЕРНОГО  
ФИЛЬТРА КАЛМАНА**

Проводится анализ внешних и внутренних помех, вызывающих изменение характеристик систем автоматического управления авиационных газотурбинных двигателей (САУ ГТД). Решение задачи адаптации САУ и мониторинга параметров ГТД ведется на основе применения методов идентификации. Целью исследования является разработка многомерного фильтра Калмана, подключаемого на выходе встроенной математической динамической модели ГТД для повышения точности идентификации параметров ГТД и достижения высокого качества автоматического управления. Проведено обоснование возможности применения фильтра Калмана для динамических процессов рассматриваемого класса путем статистического анализа экспериментальных данных испытаний ГТД на основе проверки выполнимости условия Слуцкого. Приведены основные математические соотношения, положенные в основу алгоритмов оптимальной многомерной фильтрации. Методами математического моделирования в среде MatLab проведена апробация предложенных алгоритмов. Результаты моделирования показали, что применение многомерных матричных фильтров Калмана в составе встроенной в САУ модели авиационного двигателя позволяет достичь более высоких показателей точности идентификации параметров САУ ГТД, чем в применяемых на практике аналогах.

**Ключевые слова:** система автоматического управления авиационным газотурбинным двигателем, внешние и внутренние помехи, идентификация, встроенная математическая динамическая модель авиационного двигателя, многомерный фильтр Калмана, статистический анализ, точность, качество управления

**T.A. Kuznetsova, Y.V. Likhacheva, E.A. Gubarev, A.P. Yakushev**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE IDENTIFICATION OF THE GAS TURBINE ENGINE  
PARAMETERS BY THE MULTIDIMENSIONAL KALMAN FILTER**

The internal and external interferences causing changes in the characteristics of automatic control systems of aircraft gas-turbine engines (ACS GTE) are analyzed. Solution of the adaptation problem and monitoring ACS GTE parameters' is based on the application of identification methods. The purpose of this work is the development of multi-dimensional Kalman filter connected to the output of the built-in mathematical dynamic model of the gas-turbine engine to improve the parameters' identification and to achieve high-quality automatic control. The possibility of using the Kalman filter for this class of dynamic processes was proved by statistical analysis of experimental statistics method, based on Slutsky criterion. The basic

mathematics, which are underlying the algorithms of optimal multidimensional filtering, were considered. The approbation of the proposed algorithms was made by MatLab. The simulation results showed that the using of multi-dimensional matrix Kalman filters in ACS GTE model allows to achieve higher rates parameters' identification accuracy than analogues used in current technology practice.

**Keywords:** automatic control systems of gas-turbine engine, internal and external interference, identification, gas-turbine engine built-in mathematical dynamic model, multi-dimensional Kalman filter, statistical analysis, accuracy, automatic control quality

Современный авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) является сложной нелинейной системой, характеристики которой имеют значительный разброс. Качество встроенных математических моделей ГТД, входящих в состав САУ, в значительной степени определяют качество управления и возможность применения современного математического аппарата синтеза САУ, а также средств проектирования и эксплуатации [1].

Удовлетворение предъявляемым требованиям к надежности и качеству регулирования ГТД возможно лишь на пути расширения функциональных возможностей средств управления, в частности, наделения их способностью быстрой адаптации к изменению характеристик объекта и внешних условий.

Изменение характеристик ГТД обусловлено множеством причин, основными из которых являются:

- технологический разброс параметров, обусловленный допусками на изготовление и сборку узлов;
- отклонение в подобию режимов при различных внешних условиях эксплуатации;
- изменение характеристик в процессе наработки ресурса (отказы и износ узлов).

Внешние помехи обусловлены широким спектром внешних дестабилизирующих факторов, действующих на двигатель при эксплуатации, вызывающих дополнительные погрешности и сокращающих ресурс:

- широкий диапазон рабочих температур в пределах от  $-50$  до  $100$  °С;
- механические удары, линейное ускорение и вибрация, соответствующие перегрузкам  $10 \dots 15$  г и более;
- нестабильность источников питания САУ, в том числе из-за воздействия импульсов, которые практически в два раза превышают номинал;
- электромагнитные помехи;
- пульсации давления с амплитудой  $20 \dots 90$  % от верхнего предела;
- химически агрессивные примеси в окружающей среде и др.

Решение вопросов адаптации САУ, а также контроля состояния в реальном масштабе времени и диагностики отказов неизбежно требует использования методов идентификации. При этом структура и точность применяемой математической модели определяются характером задачи, для решения которой они применяются.

Процесс обеспечения стабильности параметров двигателя на всех режимах работы является одной из приоритетных задач при проектировании САУ ГТД. При этом САУ ГТД выполняет следующие основные функции: автоматическое управление пуском двигателя, быстрый переход на другие режимы работы при управлении двигателем или при резком изменении внешних условий, поддержание заданного режима работы двигателя или его изменение в соответствии с программами управления, исключение выхода двигателя на опасные режимы работы. Особую сложность представляют режимы запуска и переходные режимы работы двигателя в условиях внешних и внутренних помех [2].

Для реализации вышеперечисленных функций необходимым условием является получение достоверных данных о текущих параметрах ГТД в условиях полета (в реальном масштабе времени), таких как расход топлива, температура, давление, обороты роторов высокого и низкого давления и т.п. [3]. Учитывая, что САУ ГТД работает в условиях помех как в канале встроенной модели (обусловленных неточностью модели и помехами в канале связи), так и в канале измерения (обусловленных погрешностью датчика и помехами канала связи), актуальной задачей является обеспечение точности идентификации параметров с учетом расчетных данных, полученных с помощью встроенной модели, и данных текущих бортовых измерений. Точность идентификации определяется применяемыми методами [4].

В настоящем исследовании повышение точности идентификации параметров ГТД достигалось путем применения многомерного фильтра Калмана на выходе встроенной математической динамической модели ГТД, построенной на основе динамической и дроссельных характеристик двигателя, позволяющей идентифицировать параметры и моделировать работу двигателя в стационарных и динамических режимах [5]. Многомерная фильтрация ведется по четырем параметрам – скоростям турбины высокого  $N_{ВД}$  и низкого давления  $N_{НД}$ , температуре  $T_T$ , давлению  $P_K$ .

Рекурсивный фильтр Калмана был выбран как наиболее точный и удобный в моделировании, обладающий необходимыми свойствами

адаптации – самокоррекции в процессе фильтрации данных. Адаптация строится на основе применения переменного оптимального коэффициента Калмана, полученного в текущий момент при решении задачи минимизации математического ожидания квадрата ошибки идентифицируемого параметра с учетом ошибки в предыдущий момент (что определяет рекуррентность полученных соотношений) [6].

Фильтры Калмана применяются для эргодических процессов, действующих в условиях помех, характеризующихся известной дисперсией, не зависящей от времени, и нулевым математическим ожиданием [7].

В данной работе эргодичность процессов исследовалась по идентифицируемым параметрам. Для анализа была рассмотрена выборка из 973 значений по каждому параметру, замеренных во время испытаний двигателя ПД-14 на статическом режиме  $N_{ВД} = 12\ 800$  об/мин.

Для доказательства эргодичности процесса была проверена выполнимость условия Слуцкого, в соответствии с которым автоковариационная функция эргодического процесса должна стремиться к нулю при увеличении значения лага. Результаты исследований показали правильность гипотезы об эргодичности наблюдаемых процессов. Результаты анализа для  $N_{НД}$ ,  $T_T$ ,  $P_K$  приведены на рис. 1–3.

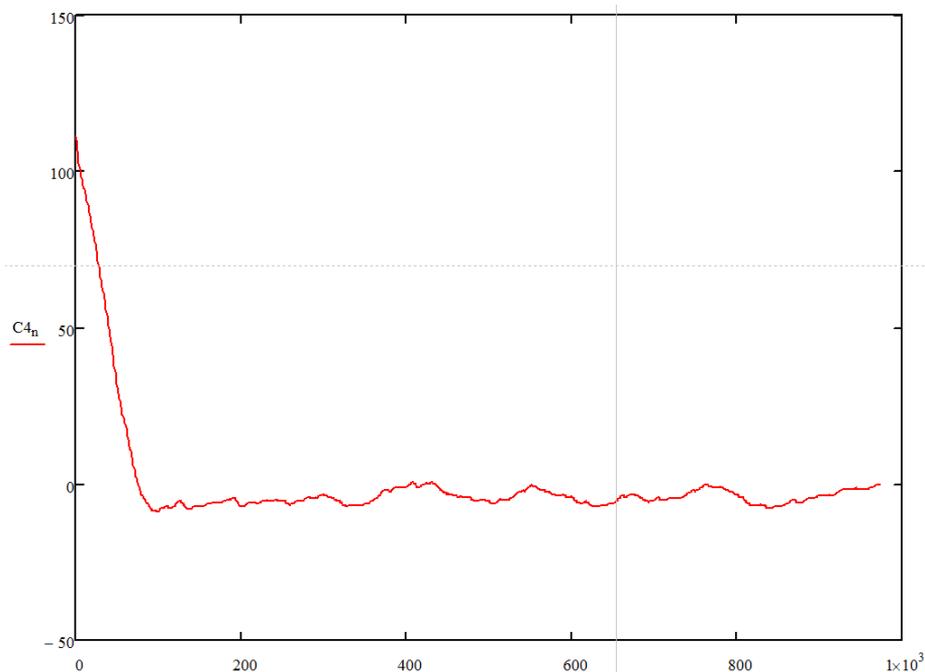


Рис. 1. Автоковариационная функция для  $N_{НД}$

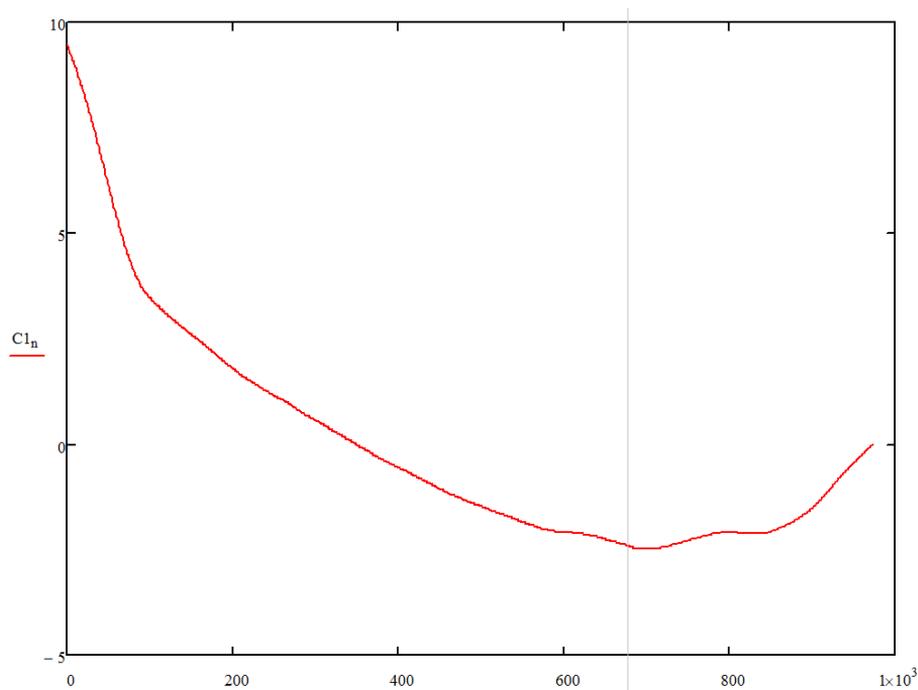


Рис. 2. Автоковариационная функция для  $T_T$

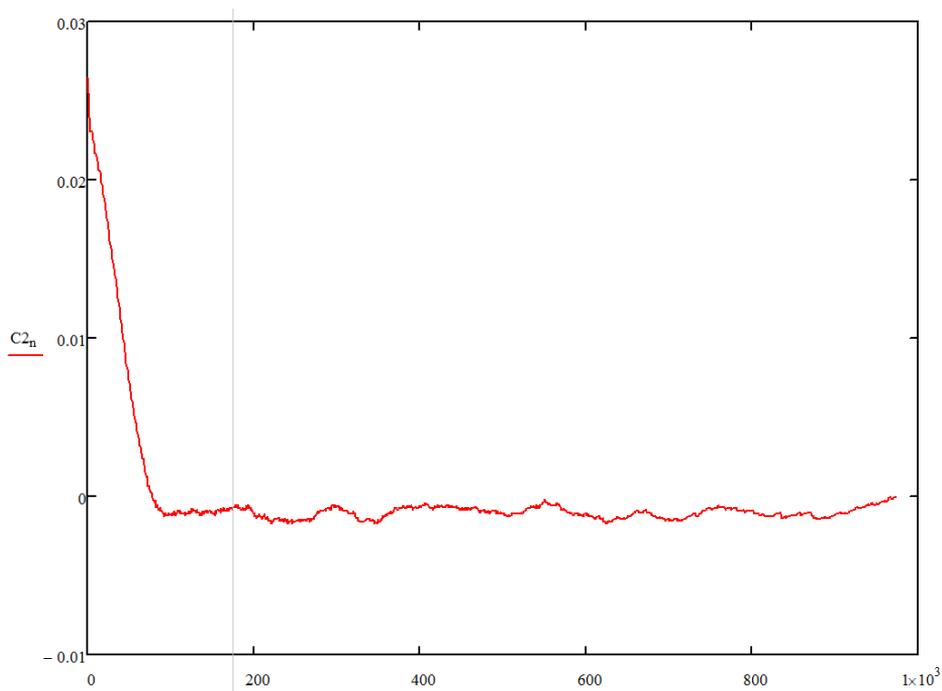


Рис. 3. Автоковариационная функция для  $P_K$

Анализ реальных шумов, полученных по данным наземных испытаний двигателя ПД-14, показал, что все они характеризуются нулевым математическим ожиданием, постоянной дисперсией и одинаковыми спектрами при исследовании одной выборки большой длительности и нескольких выборок. Таким образом, снова подтвердилась гипотеза эргодичности рассматриваемых процессов, поскольку величины математического ожидания и дисперсии одинаковы как по времени, так и по числу реализаций. Применение критерия Пирсона показало нормальность распределения шумов.

Все это позволяет сделать вывод о возможности применения фильтров Калмана для данного класса процессов [8].

В задаче идентификации с применением оптимальной фильтрации по Калману требуется в текущий момент времени максимально исключить ошибку как в канале модели (прогнозируемое значение идентифицируемого параметра), так и в канале измерения (текущие показания датчика) по рассматриваемым четырем параметрам. Для этого применяется рекуррентное матричное соотношение, позволяющее определить матрицу квадрата ошибки ковариации по всем координатам [9]:

$$\mathbf{E}_k^2 = \mathbf{E}_{k-1}^2 + \boldsymbol{\sigma}_\xi^2, \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}_k^2$  – вектор-столбец квадрата ошибки ковариации по координатам  $N_{ВД}$ ,  $N_{НД}$ ,  $T_T$ ,  $P_K$  на  $k$ -м шаге,  $\boldsymbol{\sigma}_\xi^2$  – матрица дисперсий модели по координатам  $N_{ВД}$ ,  $N_{НД}$ ,  $T_T$ ,  $P_K$ .

Решение задачи минимизации  $\mathbf{E}_k^2$  позволяет определить элементы матрицы коэффициента Калмана:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{E}_k^2 [\mathbf{E}_k^2 + \boldsymbol{\sigma}_\eta^2]^{-1}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{K}_k$  – вектор-столбец коэффициента Калмана для координат  $N_{ВД}$ ,  $N_{НД}$ ,  $T_T$ ,  $P_K$  на  $k$ -м шаге,  $\boldsymbol{\sigma}_\eta^2$  – матрица дисперсий измерителя (датчика) по матрице дисперсий модели по координатам  $N_{ВД}$ ,  $N_{НД}$ ,  $T_T$ ,  $P_K$ .

Идентификация параметров (получение оптимальной оценки) ведется через вектор-столбец коэффициентов Калмана, определяющий в матричной форме соотношение расчетной (модельной) и измеренной составляющих в оптимальных значениях идентифицируемых параметров:

$$\mathbf{X}_k^{\text{opt}} = \mathbf{X}_k (1 - \mathbf{K}_k) + \mathbf{K}_k \mathbf{Z}_k, \quad (3)$$

где  $\mathbf{X}_k^{\text{opt}}$  – вектор-столбец оптимальных оценок координат  $N_{\text{ВД}}, N_{\text{НД}}, T_{\text{Т}}, P_{\text{К}}$  на  $k$ -м шаге;  $\mathbf{X}_k$  – вектор-столбец модельных значений координат  $N_{\text{ВД}}, N_{\text{НД}}, T_{\text{Т}}, P_{\text{К}}$ , вычисленных на  $k$ -м шаге;  $\mathbf{Z}_k$  – вектор-столбец измеренных датчиками значений координат  $N_{\text{ВД}}, N_{\text{НД}}, T_{\text{Т}}, P_{\text{К}}$  на  $k$ -м шаге.

Следует отметить, что решаемая с применением калмановской фильтрации задача не есть задача сглаживания, а является задачей идентификации [10]. Фильтр Калмана не рассчитан на сглаживание данных с датчика, а нацелен на получение наиболее близких к реальным координатам  $N_{\text{ВД}}, N_{\text{НД}}, T_{\text{Т}}, P_{\text{К}}$ , значений их оптимальных оценок в текущий момент времени, полученных в условиях внешних и внутренних помех в каналах встроенной модели и измерений и записанных в вектор-столбец  $\mathbf{X}_k^{\text{opt}}$ .

Поставленная задача проектирования алгоритмов многомерной фильтрации Калмана решалась на основе модельного эксперимента. В качестве среды моделирования использовалась интерактивная среда Simulink, позволяющая строить динамические модели исследуемых объектов управления на основе блок-диаграмм в виде направленных графов. Основными ее преимуществами являются многообразие встроенных библиотек, в том числе, входящих в состав среды MatLab, наглядность и простота моделирования, возможность наблюдения состояния системы в реальном масштабе времени, удобство интерфейса, позволяющего легко воздействовать на проектируемый алгоритм и модельный эксперимент.

Задача проектирования алгоритма сводится к моделированию математических формул (1)–(3) для вычисления указанных величин на каждом шаге. За основу вычислений в алгоритмах многомерной фильтрации Калмана были взяты дисперсии модели и датчиков по координатам  $N_{\text{ВД}}, N_{\text{НД}}, T_{\text{Т}}, P_{\text{К}}$ , полученные путем статистической обработки данных стендовых и летных испытаний ГТД.

Обобщенная структурная схема модели многомерного фильтра Калмана, осуществляющего в реальном масштабе времени одновременную идентификацию по четырём координатам – скоростям турбины высокого и низкого давления, температуре, давлению, приведена на рис. 5. Детализированная функциональная схема фильтрации по одной координате приведена на рис. 6.

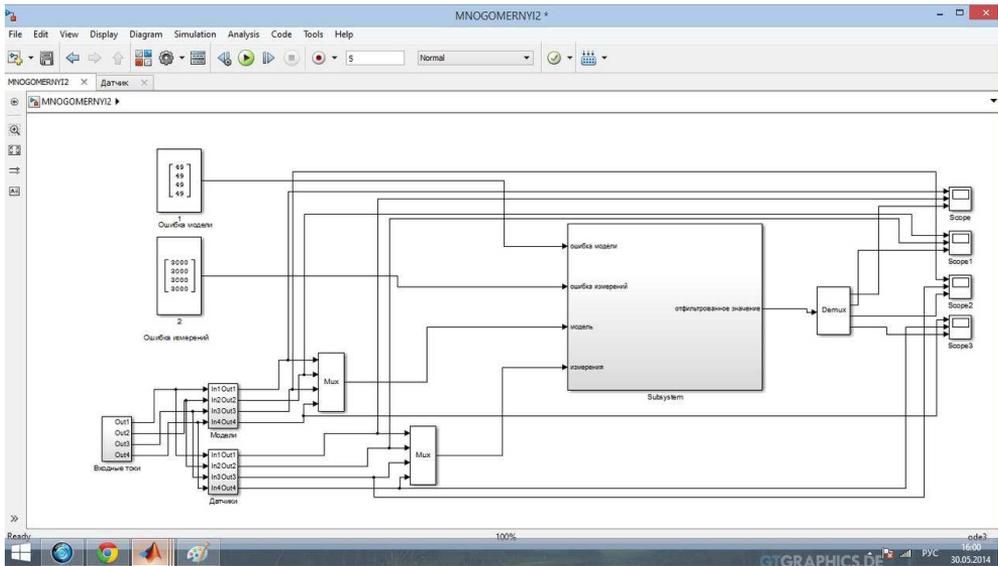


Рис. 5. Обобщенная структурная схема многомерного фильтра Калмана в Simulink

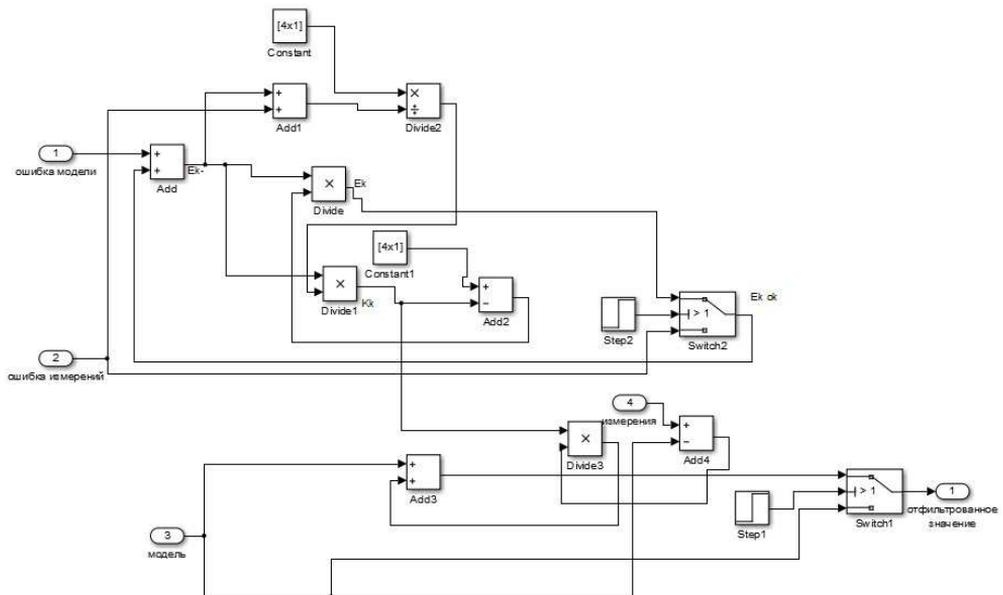


Рис. 6. Функциональная схема фильтрации по одной координате в Simulink

В модельном эксперименте значения координат вектора-столбца показаний датчиков  $Z_k$  в условиях помех моделировались наложением на расчетные значения нескольких видов шумов:

- гауссова шума;
- реального шума, выделенного по экспериментальным данным, полученным в ходе стендовых испытаний двигателя ПД-14 для рассматриваемых режимов и типов входных сигналов;
- нескольких синусоид высокой частоты;
- комбинированных шумов, полученных наложением на реальные шумы нескольких синусоид высокой частоты.

Результаты фильтрации в условиях действия комбинированных шумов при подаче входных сигналов, обеспечивающих изменение идентифицируемых величин во всем рабочем диапазоне для различных входных сигналов (приемистость – рабочий режим – сброс) по одной координате, представлены на рис. 7–8, где:

- первая кривая описывает изменение во времени координат вектора-столбца  $\mathbf{X}_k$  – расчетных (модельных) значений  $N_{ВД}$ ,  $N_{НД}$ ,  $T_T$ ,  $P_K$ ;
- вторая кривая описывает изменение во времени координат вектора-столбца  $\mathbf{Z}_k$  – измеренных датчиками значений координат  $N_{ВД}$ ,  $N_{НД}$ ,  $T_T$ ,  $P_K$ ;
- третья кривая описывает изменение во времени координат вектора-столбца  $\mathbf{X}_k^{\text{opt}}$  – оптимальных оценок координат  $N_{ВД}$ ,  $N_{НД}$ ,  $T_T$ ,  $P_K$ .

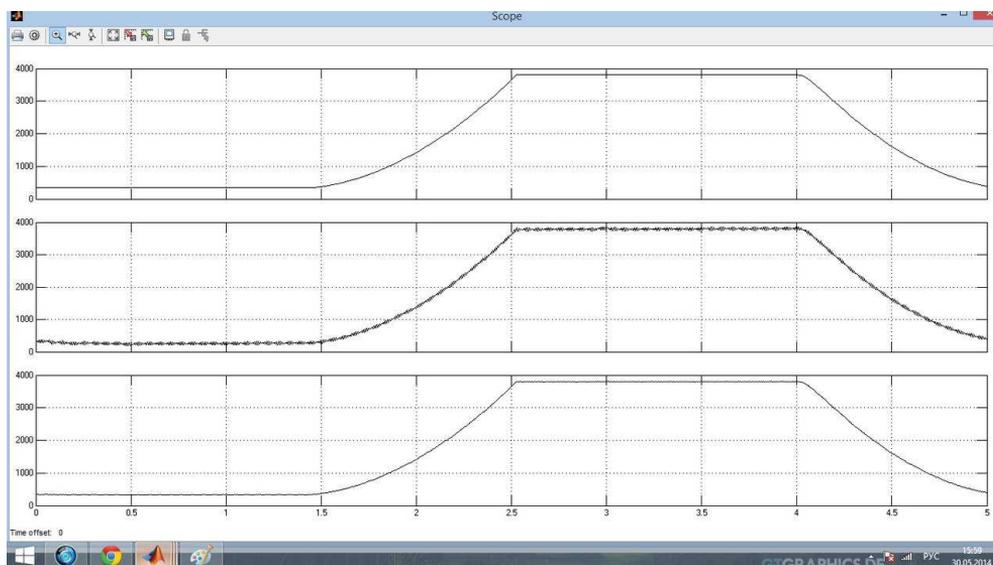


Рис. 7. Результаты применения фильтра Калмана на режимах приемистость – сброс в условиях комбинированных шумов

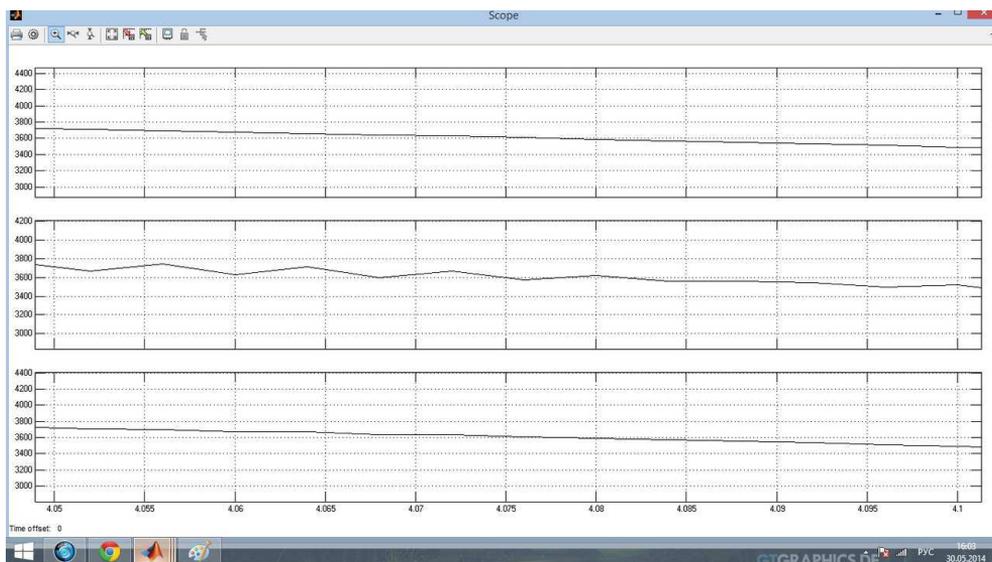


Рис. 8. Результаты применения фильтра Калмана в рабочем режиме в условиях комбинированных шумов

Как показали исследования, относительная погрешность сигналов на выходе фильтра Калмана по всем исследуемым координатам не превышает 0,5 %, что соответствует заданным техническим требованиям точности алгоритмов идентификации.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что применение многомерных матричных фильтров Калмана позволяет достичь более высоких показателей точности, чем аналогичные модели, разработанные без применения алгоритмов оптимальной фильтрации в решении задач идентификации параметров.

Разработанная модель фильтра Калмана работает как в статическом, так и в динамическом режиме в условиях действия «жестких» внешних и внутренних возмущений в широком диапазоне режимов работы двигателя.

Видятся перспективными испытания разработанной модели в замкнутом контуре управления САУ ГТД и сравнительный анализ полученных результатов с результатами применения в аналогичных режимах поэлементной модели и данных стендовых и летных испытаний.

### **Библиографический список**

1. Malloy D.J., Webb A.T., Kidman D.S. F-22/f119 Propulsion system ground and flight test analysis using modeling and simulation techniques // GT-2002-30001, ASME TURBO EXPO 2002. – Amsterdam, Netherlands, June 3–6, 2002. – 8 p.
2. Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.А. Шевякова. – М.: Машиностроение, 1983. – 283 с.
3. Borguet S., Léonard O. A Study on Sensor Selection for Efficient Jet Engine Health Monitoring // 12<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Vol.: ISROMAC-2008–20072.
4. Kim J., Lee S. A Disign study on Gas Turbine Engine Controller using Engine Sensor Signal Reconfiguration method // XXI International Symposium on Air Breathing Engines: ISABE 2013–1329.
5. Августинович В.Г., Акиндинов В.А. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.
6. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. – 1960 by ASME. – 82 (Series D). – P. 35–45.
7. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана–Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация. – М.: Главная ред. физ.-мат. лит-ры, 1982. – 200 с.
8. Расчетное исследование динамической характеристики одновального турбореактивного двигателя / Д.А. Ахмедзянов, Ю.М. Ахметов, А.Б. Козловская, А.Е. Михайлов // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – № 1(41). – С. 15–25.
9. Машаров К.В. Применение фильтра Калмана для оценки координат цели в РЛС // Вестник СибГУТИ. – 2011. – № 3. – С. 59–66.
10. Mirzaee A., Salahshoor K. Fault Tolerant Control of an Industrial Gas Turbine Based on a Hybrid Fuzzy Adaptive Unscented Kalman Filter // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2013 by ASME. – 135(12). – 122501 (Sep 20, 2013) Paper No: GTP-12-1496.

## References

1. Malloy D.J., Webb A.T., Kidman D.S. F-22/f119 F-22/f119 Propulsion system ground and flight test analysis using modeling and simulation techniques. GT-2002-30001. *ASME TURBO EXPO 2002*. Amsterdam, Netherlands, June 3-6, 2002. 8 p.
2. Sheviakov A.A. Integral'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniia silovymi ustanovkami samoletov [Integral systems of automatic control of power plants of airplanes] Moscow: Mashinostroenie, 1983. 283 p.
3. Borguet S., Léonard O. A Study on Sensor Selection for Efficient Jet Engine Health Monitoring. *12th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. Vol. ISROMAC-2008-20072.
4. Kim J., Lee S. A Design study on Gas Turbine Engine Controller using Engine Sensor Signal Reconfiguration method. *XXI International Symposium on Air Breathing Engines*. ISABE 2013-1329.
5. Avgustinovich V.G., Akindinov V.A. Identifikatsiia sistem upravleniia aviatsionnykh gazoturbinnykh dvigatelei [Identification of management systems of aviation turbine jets]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 200 p.
6. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, no. 82 (Series D), pp. 35-45.
7. Brammer K., Ziffling G. Fil'tr Kalmana-B'iusi. Determinirovannoe nabludenie i stokhasticheskaiia fil'tratsiia [The determined observation and stochastic filtering]. Moscow: Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1982. 200 p.
8. Akhmedzianov D.A., Akhmetov Iu.M., Kozlovskaiia A.B., Mikhailov A.E. Raschetnoe issledovanie dinamicheskoi kharakteristiki odnoval'nogo turboreaktivnogo dvigatel'ia [Estimated research of a response characteristic of a single-shaft turbojet]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 15, no. 1(41), pp. 15-25.
9. Masharov K.V. Primenenie fil'tra Kalmana dlia otsenki koor-dinat tseli v radiolokatsionnykh stantsiiakh [Use of the filter of Kallman for an assessment of coordinates of the purpose in radar stations]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikatsii i informatiki*, 2011, no. 3, pp. 59-66.
10. Mirzaee A., Salahshoor K. Fault Tolerant Control of an Industrial Gas Turbine Based on a Hybrid Fuzzy Adaptive Unscented Kalman Filter. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, no. 135(12), 122501. Paper no. GTP-12-1496.

### **Сведения об авторах**

**Кузнецова Татьяна Александровна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com).

**Лихачева Юлия Витальевна** (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: likhachevajul@rambler.ru).

**Губарев Евгений Андреевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eugenegubarev@gmail.com).

**Якушев Алексей Павлович** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: arhangel2010@mail.ru).

### **About the author**

**Kuznetsova Tatiana Aleksandrovna** (Perm, Russian Federation) is Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com).

**Likhacheva Yulia Vitalievna** (Perm, Russian Federation) is student the Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: likhachevajul@rambler.ru).

**Gubarev Evgeniy Andreevich** (Perm, Russian Federation) is student the Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: eugenegubarev@gmail.com).

**Yakushev Alexey Pavlovich** (Perm, Russian Federation) is student the Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: arhangel2010@mail.ru).

Получено 10.06.2014