

УДК 681.51

## ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ САМОНАСТРАИВАЮЩИЙСЯ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА ГТД

В. И. ПЕТУНИН<sup>1</sup>, Р. Р. СИБАГАТУЛЛИН<sup>2</sup>, А. И. ФРИД<sup>3</sup>

<sup>1</sup>petunin\_vi@mail.ru, <sup>2</sup>radk2@mail.ru, <sup>3</sup>frid46@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 19 ноября 2014 г.

**Аннотация.** Рассмотрены принципы построения измерителей температуры газа ГТД на основе самонастраивающихся систем. Проведен анализ аналогов измерителей температуры газа ГТД. Приведены результаты моделирования, отражающие качество вычисления температуры газа на переходных режимах. Проанализирована помехоустойчивость.

**Ключевые слова:** измеритель; помехоустойчивость; система автоматического управления; газотурбинный двигатель; самонастраивающаяся система; компенсатор инерционности термопары.

### ВВЕДЕНИЕ

Для получения заданного качества переходных процессов в системах автоматического управления (САУ) газотурбинного двигателя (ГТД) необходимо точное измерение его выходных координат. Поэтому задача построения быстродействующих измерителей температуры газа в многосвязных САУ ГТД является актуальной [1].

Для измерения температуры газа ГТД могут использоваться как прямые, так и косвенные методы измерения.

Прямые методы измерения предусматривают применение датчиков температуры, в качестве которых обычно используются термопары. Проблемы проектирования таких датчиков связаны с выбором жаропрочных материалов и снижением размеров для уменьшения постоянной времени (инерционности).

Косвенные методы измерения температуры газа еще называют методом синтеза температуры. Синтез температуры заключается в измерении различных параметров ГТД, например, частоты вращения ротора и ее производной, и в определении на основе этих данных температуры газа с помощью быстродействующих вычислителей. Для этого метода характерны статические погрешности реализации модели ГТД по температуре газа [2].

Очевидно, что при построении измерителей температуры газа возможна комбинация этих методов измерения.

Известно много схем построения компенсатора инерционности термопары с алгоритмами самонастройки [2–6]. Однако эти измерители содержат в своих структурных схемах два дифференциатора, что ухудшает помехоустойчивость схемы. Необходимо провести исследование возможного построения компенсатора инерционности термопары (КИТ) замены, используя выходной сигнал только с дифференциатора сигнала термопары.

Целью данной работы является синтез такой схемы, которая не уступает по качеству переходных процессов аналогичным измерителям температуры газа ГТД. При этом структурная схема предлагаемого самонастраивающегося измерителя температуры газа ГТД должна обладать лучшей помехоустойчивостью, чем известные аналоги.

### Основные подходы, используемые при построении измерителей температуры газа ГТД

Термопару можно рассматривать как инерционное звено с передаточной функцией [7, 8]:

$$W_T(s) = \frac{K_T}{T_T s + 1},$$

где  $K_T$  – коэффициент термопары;  $T_T$  – постоянная времени термопары.

С изменением режима работы ГТД и условий полета постоянная времени термопары  $T_T$

изменяется в соответствии с изменением расхода обтекающего ее газа  $G_r$ :

$$T_T = T_{тр} \left( \frac{G_{гр}}{G_r} \right)^{0,5},$$

где  $T_{тр}$  и  $G_{гр}$  – расчетные значения. Для обычных экранированных термопар с протоком газа, устанавливаемых на ГТД, постоянная времени в стартовых условиях находится в пределах (1,5 ... 4) с.

Для компенсации динамической погрешности термопары в цепь измерения после термопары необходимо ввести последовательный компенсатор инерционности термопары (КИТ) с передаточной функцией:

$$W_K(s) = K_K \frac{T_K s + 1}{\tau_K s + 1},$$

где  $K_K$  – коэффициент КИТ;  $T_K$  – постоянная времени КИТ;  $\tau_K \ll T_K$ .

Тогда передаточная функция всего измерителя температуры

$$W_{и}(s) = W_T(s)W_K(s) = \frac{K_{и}(T_K s + 1)}{(T_T s + 1)(\tau_K s + 1)},$$

где  $K_{и} = K_T K_K$ .

При компенсации динамической погрешности термопары, близкой к идеальной ( $T_K = T_T$ ), получим

$$W_{и}(s) = \frac{K_{и}}{\tau_K s + 1}, \quad (1)$$

где  $K_{и}$  – коэффициент измерителя;  $\tau_K$  – постоянная времени КИТ.

В других случаях будет или недокомпенсация ( $T_K < T_T$ ), или перекомпенсация ( $T_K > T_T$ ), причем недокомпенсация приводит к забросу температуры газа, а перекомпенсация – к недобору тяги в замкнутой САУ ГТД во время переходных процессов.

Выполнение условия (1) на различных режимах ГТД и при разных условиях полета возможно только за счет изменения  $T_K$  в самонастраиваемом измерителе температуры газа.

При построении самонастраивающихся измерителей температуры газа воспользуемся косвенными измерениями различных параметров ГТД.

### Алгоритм косвенного измерения параметров двухвального ГТД (температуры газа, расхода газа, тяги и др.) [8]

Двухвальный двухконтурный ГТД с форсажной камерой может быть описан следующей системой уравнений в приведенных координатах:

$$\dot{n}_1 = K_{n_1 G_T}(n_2) \Delta G_T + K_{n_1 n_1}(n_2) \Delta n_1 + K_{n_1 F_3}(n_2) \Delta F_3; \quad (2)$$

$$\dot{n}_2 = K_{n_2 G_T}(n_2) \Delta G_T + K_{n_2 n_1}(n_2) \Delta n_1 + K_{n_2 F_3}(n_2) \Delta F_3; \quad (3)$$

$$\Delta X_i = K_{X_i G_T}(n_2) \Delta G_T + K_{X_i n_1}(n_2) \Delta n_1 + K_{X_i F_3}(n_2) \Delta F_3, \quad (4)$$

где

$$\Delta G_T = G_T - G_{T0}(n_2); \quad \Delta n_1 = n_1 - n_{10}(n_2);$$

$$\Delta F_3 = F_3 - F_{30}(n_2); \quad \Delta X_i = X_i - X_{i0}(n_2).$$

Здесь  $n_1$  – частота вращения ротора низкого давления;  $n_2$  – частота вращения ротора высокого давления;  $X_i$  – соответствует  $T_4^*$ ,  $G_T$ ,  $P$  и др. параметрам.

Решая систему уравнений (2) и (3) относительно величин  $\Delta G_T$  и  $\Delta F_3$ , и подставляя полученные результаты в уравнение (4), получим алгоритм для расчета температуры газа ГТД [8].

Достоинством подобного алгоритма является использование параметров ГТД, измеряемых с высокой точностью, для определения трудноизмеряемых координат.

### Анализ известных самонастраивающихся измерителей температуры газа, построенных на базе косвенных вычислений

Известно самонастраивающееся устройство для измерения температуры, содержащее основной и вспомогательные термопреобразователи, подключенные соответственно к основному и вспомогательному корректирующим звеньям, блок сравнения, входы которого соединены с выходом основного термопреобразователя и выходом вспомогательного корректирующего звена, а выход подключен к исполнительному органу, выходы которого подключены к управляющим входам корректирующих звеньев [9, с. 97, рис. 62].

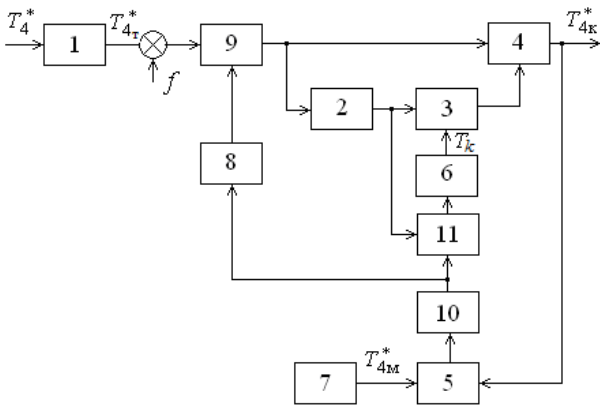
Недостатками этого устройства являются низкая динамическая точность и плохая помехоустойчивость.

Рассмотрим детально самонастраивающееся устройство для измерения быстроизменяющихся параметров (рис. 1) [4].

Устройство содержит термопреобразователь 1, первый дифференциатор 2, первый блок 3 умножения, первый сумматор 4, блок 5

сравнения, интегрирующий усилитель 6, блок 7 косвенного определения температуры, фильтр 8, второй сумматор 9, второй дифференциатор 10 и второй блок 11 умножения.

$T_4^*$  определяется на выходе ГТД по каналу температуры;  $T_{4к}^*$  – значение температуры на выходе корректирующего звена;  $T_{4т}^*$  – значение температуры на выходе термопары;  $T_{4м}^*$  – значение температуры на выходе эталонной модели;  $T_k$  – постоянная времени корректирующего звена.



**Рис. 1.** Структурная схема самонастраивающегося устройства для измерения быстроизменяющихся температур

Устройство работает следующим образом. Блок сравнения 5 по сигналам с выхода блока 7 косвенного определения температуры  $T_{4м}^*$  и выхода сумматора 4, который является одновременно и выходом устройства, формирует сигнал рассогласования  $\varepsilon = T_{4м}^* - T_{4к}^*$ . После дифференцирования во втором дифференциаторе 10 сигнал  $\dot{\varepsilon}$  умножается в блоке 11 на сигнал  $\dot{T}_{4т}^*$ , поступающий с выхода дифференциатора 2, и далее поступает на вход интегрирующего усилителя 6 с коэффициентом усиления  $\lambda$ . С выхода усилителя 6 сигнал  $T_k$ , пропорциональный величине (6), подается на вход блока 3 умножения, при этом постоянная времени корректирующего звена устанавливается равной постоянной времени термопреобразователя.

$$T_k = \lambda \int_0^{\infty} \dot{T}_{4т}^* \dot{\varepsilon} \cdot dt, \quad (6)$$

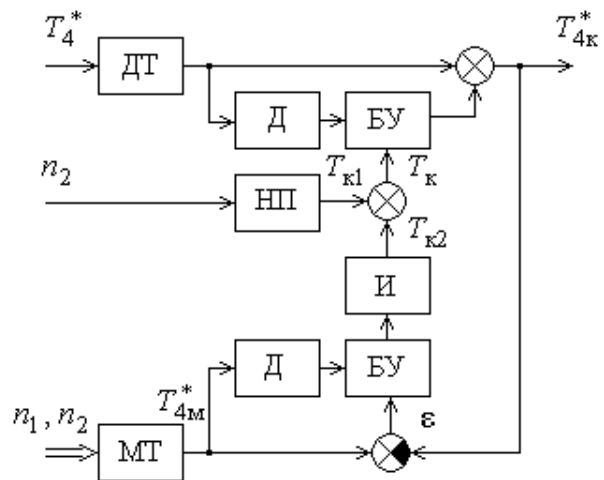
где  $\lambda$  – постоянное число, больше единицы;  $\dot{T}_{4т}^*$  – производная по времени сигнала  $T_{4т}^*$  на выходе термопреобразователя;  $\dot{\varepsilon}$  – производная величины  $\varepsilon = T_{4м}^* - T_{4к}^*$ , где  $T_{4м}^*$  – значение сигнала вырабатываемого блоком косвенного определения температуры.

Выходной сигнал  $T_{4к}^*$  формируется сумматором 4 по сигналам с выхода первого блока 3 умножения и с выхода второго сумматора 9.

При использовании устройства для измерения температуры газа ГТД в системе автоматического регулирования заброс по температуре уменьшается более чем в 3 раза, что позволяет более точно выходить на установившейся режим работы ГТД [4].

Рассмотрим другую структуру измерителя температуры газа, также с косвенным измерением температуры газа [2].

Самонастраивающийся измеритель температуры газа ГТД, так же, как и измеритель на рис. 1, построен по принципу замкнутых самонастраивающихся систем (СНС) с эталонной моделью (рис. 2), где в качестве эталонной модели используется модель ГТД по каналу температуры газа  $T_4^*$  (МТ-модель температуры), полученная согласно выражению (4); ДТ – датчик температуры; Д – дифференциатор; БУ – блок умножения; НП – нелинейный преобразователь; И – интегратор;  $T_{к1}$  – значение постоянной времени на выходе разомкнутой самонастройки;  $T_{к2}$  – значение постоянной времени на выходе замкнутой самонастройки.



**Рис. 2.** Структурная схема измерителя температуры газа с косвенным измерением температуры газа



Дифференциальное уравнение эталонной модели можно представить в виде

$$T_T \dot{T}_{4M}^* + T_{4M}^* = T_T \dot{T}_4^* + T_4^*, \quad (9)$$

где  $T_{4M}^*$  – значение температуры на выходе эталонной модели.

Так как в схеме (рис. 3) нет второго дифференциатора, то связь величин  $T_{4T}^*$  и  $T_{4M}^*$  выглядит следующим образом:

$$T_{4T}^* = \frac{1}{T_T \cdot s + 1} \cdot \dot{T}_{4M}^*, \quad (10)$$

где  $s$  – оператор преобразования Лапласа;

$$T_{4T}^* (T_T \cdot s + 1) = \dot{T}_{4M}^*.$$

После преобразования получаем следующее уравнение связи:

$$\dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^* = \dot{T}_{4M}^*. \quad (11)$$

Получаем систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} T_T \dot{T}_{4K}^* + T_{4K}^* = T_K \dot{T}_{4T}^* + T_{4T}^* \\ T_T \dot{T}_{4M}^* + T_{4M}^* = T_T \dot{T}_4^* + T_4^* \\ \dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^* = \dot{T}_{4M}^* \end{cases}. \quad (12)$$

Вычитая из второго уравнения первое и подставляя уравнение связи, получим дифференциальное уравнение относительно ошибки  $\varepsilon = T_{4M}^* - T_{4K}^*$ :

$$\begin{aligned} T_T (\dot{T}_{4M}^* - \dot{T}_{4K}^*) + T_{4M}^* - T_{4K}^* &= (T_T - T_K) (\dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^*); \\ T_T \dot{\varepsilon} + \varepsilon &= \gamma (\dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^*), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\gamma = T_T - T_K$ .

Функцию Ляпунова выбираем квадратической определенно-положительной формы:

$$V = \lambda \varepsilon^2 + \gamma^2, \quad \lambda > 0. \quad (14)$$

Производная функции Ляпунова

$$\dot{V} = 2\lambda \dot{\varepsilon} \varepsilon + 2\gamma \dot{\gamma}. \quad (15)$$

Подставляя в это уравнение выражение

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(\gamma (\dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^*) - \varepsilon)}{T_T}$$

из дифференциального уравнения относительно ошибки, получаем:

$$\dot{V} = -\frac{2\lambda}{T_T} \varepsilon^2 + \frac{2\lambda}{T_T} \varepsilon \gamma (\dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^*) + 2\gamma \dot{\gamma}. \quad (16)$$

Для обеспечения неположительности производной функции Ляпунова и устойчивости са-

монастраивающегося измерителя достаточно выполнение соотношения:

$$\frac{\lambda}{T_T} \varepsilon (\dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^*) + \dot{\gamma} = 0. \quad (17)$$

Подставляя в это равенство выражение для  $\dot{\gamma} = -\dot{T}_K$ , получаем следующий алгоритм цепи самонастройки:

$$\dot{T}_K = \frac{k \cdot \lambda}{T_T} \varepsilon (\dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^*)$$

или

$$T_K = \frac{k \cdot \lambda}{T_T} \int_0^t \varepsilon (\dot{T}_{4T}^* T_T + T_{4T}^*) dt, \quad (18)$$

где  $k$  – коэффициент усиления цепи самонастройки при вычислении постоянной времени  $T_K$ .

### Результаты моделирования измерителей

Схемы моделирования самонастраивающегося измерителя температуры построены с помощью пакета Simulink системы Matlab. Соответствующая структурной схеме на рис. 1, модель приведена на рис. 4, соответствующая структурной схеме на рис. 2 – на рис. 5, соответствующая структурной схеме на рис. 3 – на рис. 6.

На рис. 7, 8 представлены результаты моделирования трех измерителей температуры газа ГТД при  $T_T = 5$  с,  $T_{K1} = 4,5$  с и  $T_T = 1$  с,  $T_{K1} = 0,5$  с соответственно (1 – переходный процесс на выходе термопары, соответствующий схеме моделирования на рис. 4; 2 – переходный процесс на выходе термопары, соответствующий схеме моделирования на рис. 5; 3 – переходный процесс на выходе термопары, соответствующий схеме моделирования на рис. 6).

Из рис. 7, в видно, что из кривых 1, 2, 3 по качеству переходных процессов лучше процесс, соответствующий предложенной схеме (рис. 6). Он имеет плавный выход на заданное значение температуры. У кривой 2 процесс более затянутый. На кривой 1 наблюдаются колебания, что является недопустимым.

На рис. 8 наблюдается ситуация, что у кривых 1 и 2 (при  $T_T = 1$  с.) качество переходных процессов примерно одинаковое, а вот на кривой 3 наблюдаются небольшие колебания.

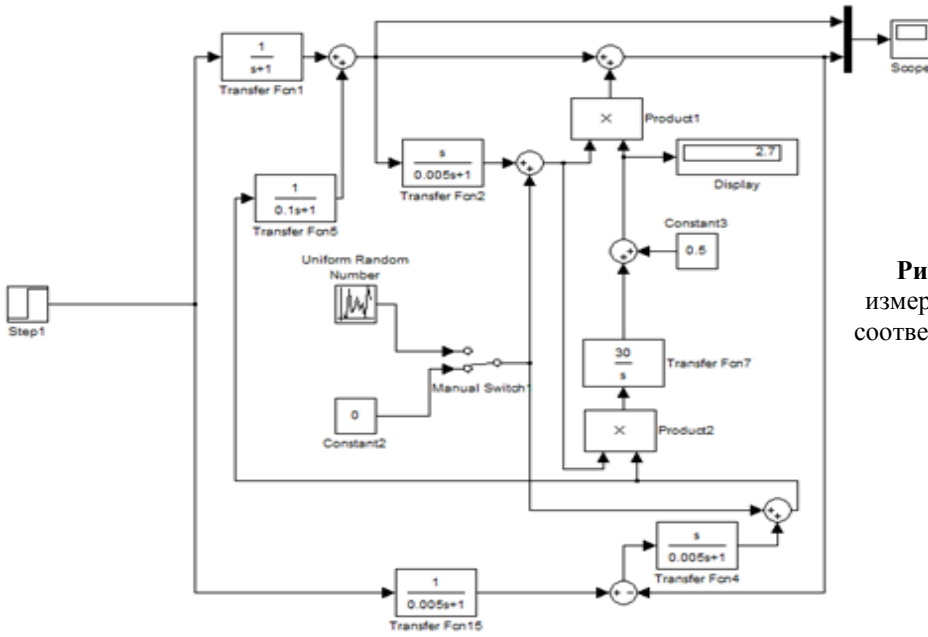


Рис. 4. Схема моделирования измерителя температуры газа ГТД, соответствующая структурной схеме на рис. 1

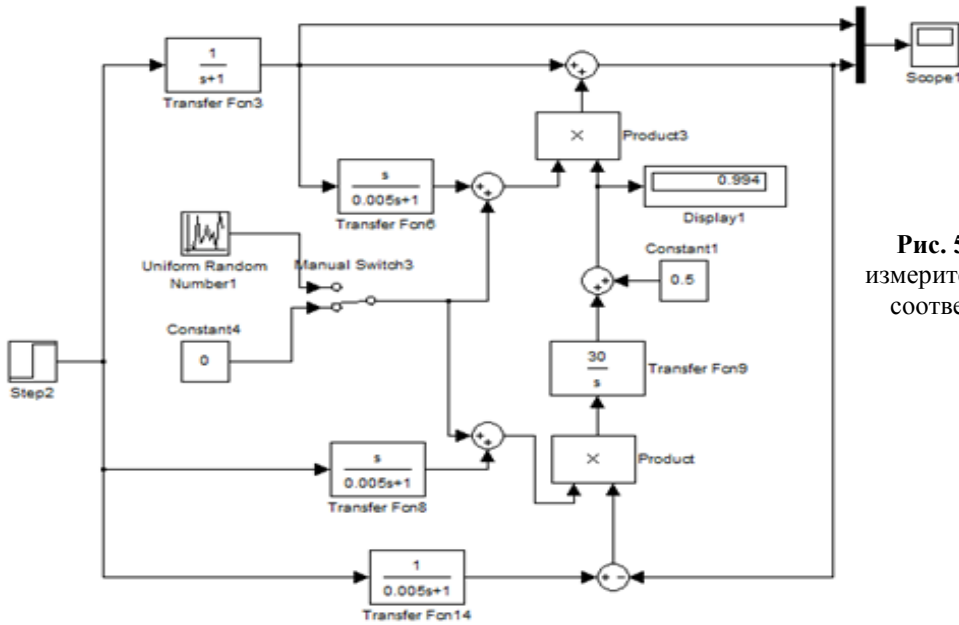


Рис. 5. Схема моделирования измерителя температуры газа ГТД, соответствующая структурной схеме на рис. 2

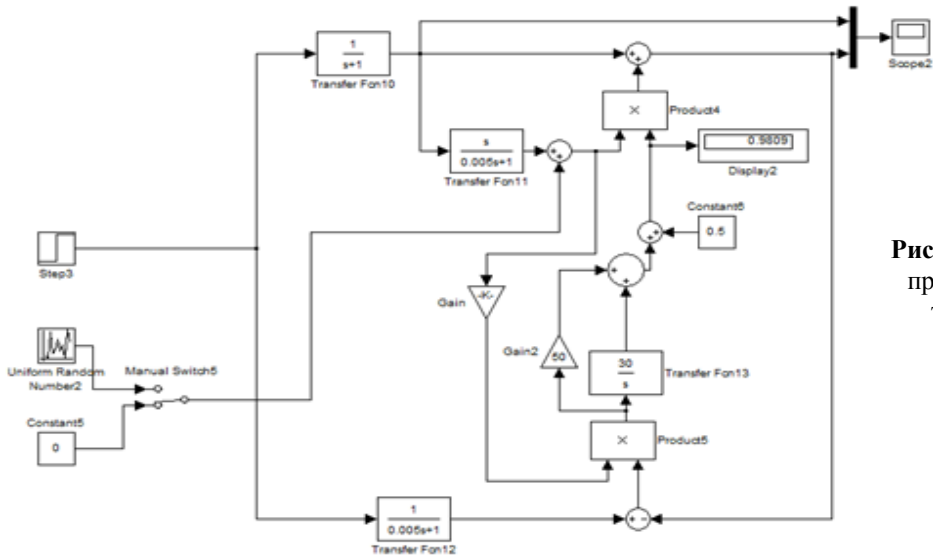
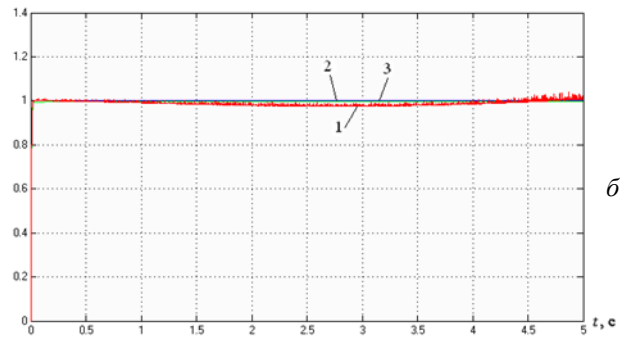
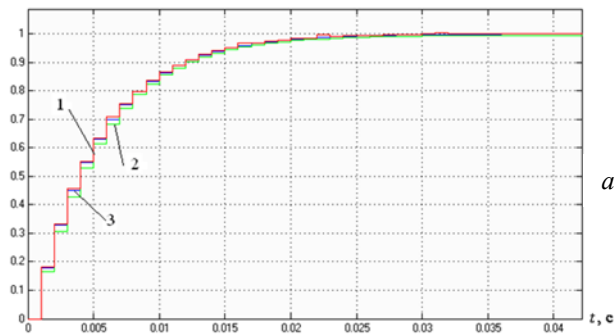
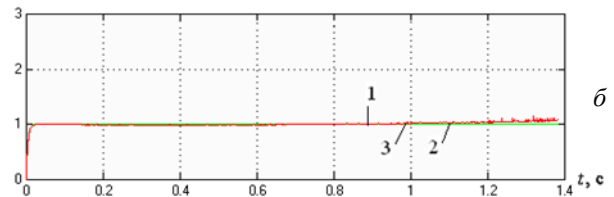
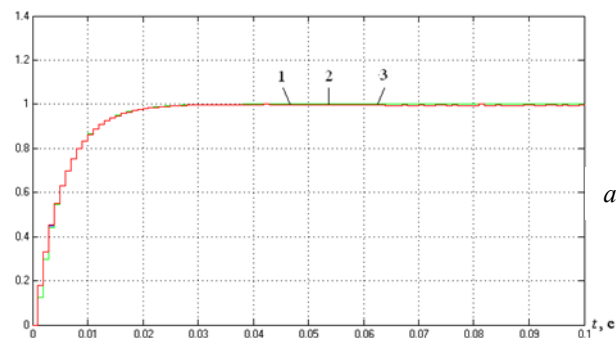
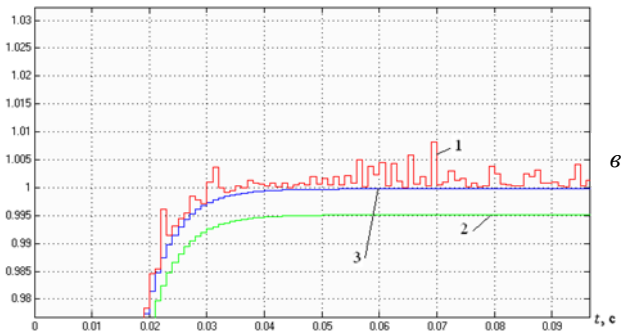


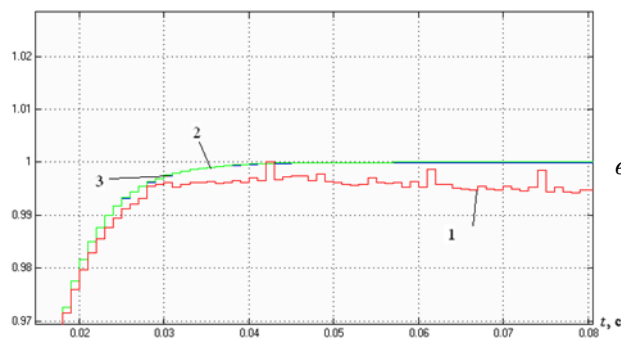
Рис. 6. Схема моделирования предлагаемого измерителя температуры газа ГТД



**Рис. 7.** Переходные процессы измерителей температуры газа при  $T_T = 5$  с за время 0,1 с (а); 5 с (б); 5 с, увеличенный масштаб (в)



**Рис. 8.** Переходные процессы измерителей температуры газа при  $T_T = 1$  с за время 0,1 с (а); 1,4 с (б); 1,4 с, увеличенный масштаб (в)



Таким образом, исходя из рис. 7, 8, можно сделать вывод, что предложенная схема (график 3) лучше остальных по качеству переходных процессов.

### Сравнение помехоустойчивости

Для проверки схем на помехоустойчивость на каждый выход дифференциатора аддитивно подавался шум в размере 1% от заданного значения температуры газа ГТД (соответствует случайному значению мощности шума от  $-0,01$  до  $0,01$ , с математическим ожиданием равным 0 и дисперсией получения случайной величины,

равной 1). Для анализа используется шум, описанный равномерным законом распределения.

На рис. 9 представлены результаты моделирования при  $T_T = 5$  с.

Из рис. 9 видно, что предложенная схема является более помехоустойчивой при  $T_T = 5$  с. Из рис. 10 видно, что предложенная схема более помехоустойчива также при  $T_T = 1$  с.

Таким образом, предложенная схема измерителя лучше по качеству переходных процессов (нет статических ошибок), отсутствует второй дифференциатор и более помехоустойчива.

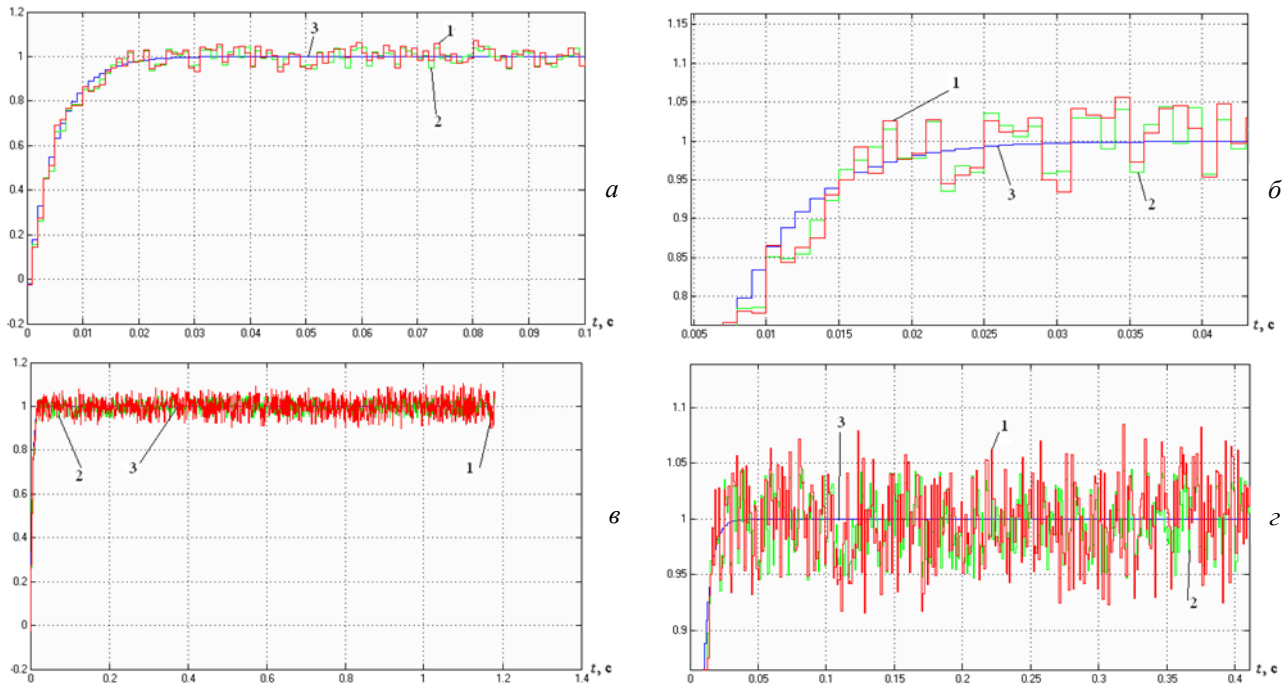


Рис. 9. Переходные процессы измерителей температуры газа при  $T_T = 5$  с и при наличии шумов за время 0,1 с (а) ; 0,1 с, увеличенный масштаб (б); 5 с (в); 5 с, увеличенный масштаб (г)

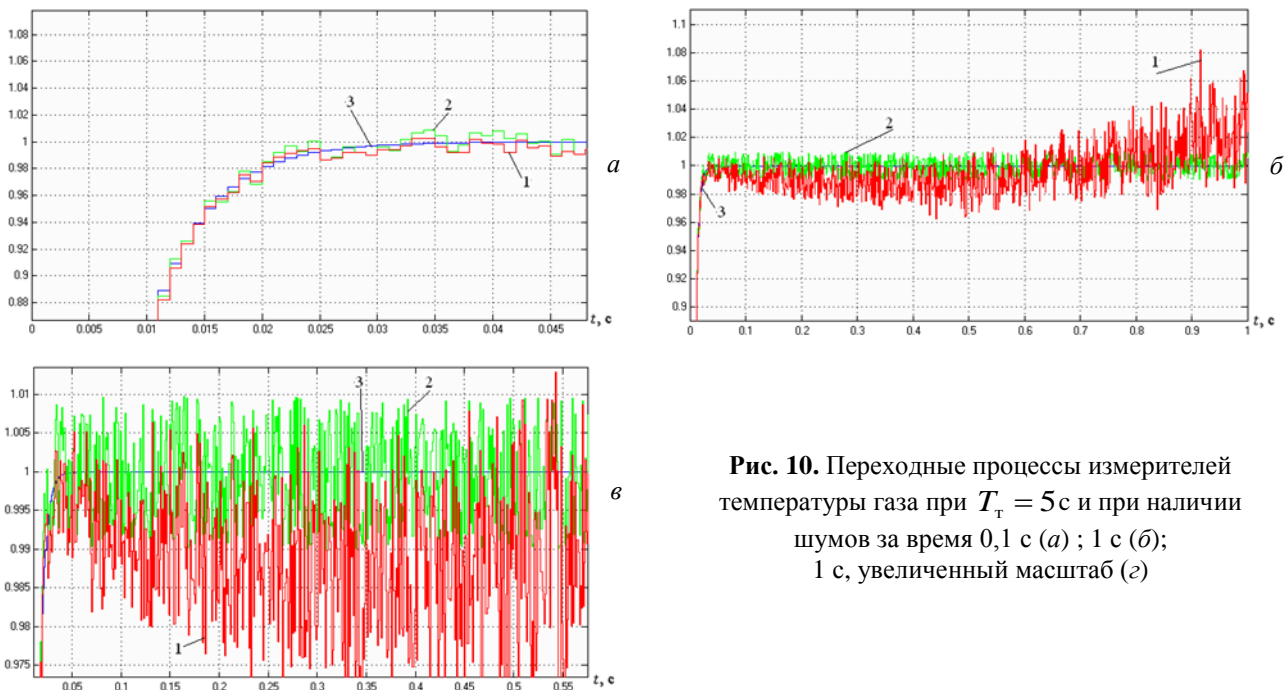


Рис. 10. Переходные процессы измерителей температуры газа при  $T_T = 5$  с и при наличии шумов за время 0,1 с (а) ; 1 с (б); 1 с, увеличенный масштаб (в)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ аналогов самонастраивающихся измерителей температуры газа ГТД. Предложена схема самонастраивающегося измерителя температуры газа ГТД, обладающая высокими показателями качества переходных процессов и повышенной помехоустойчивостью. Приведены результаты моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич О. С., Гольберг Ф. Д., Селиванов О. Д. Интегрированное управление силовой установкой много-режимного самолета / Под общ. ред. О. С. Гуревича. М.: Машиностроение, 1993. 304 с. [[ О. С. Gurevich, F. D. Golberg, O. D. Selivanov, *Integrated automatic control system aircraft propulsion systems*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1993. ]]



2. **Петунин В. И.** Определение температуры газа ГТД с помощью косвенных измерений // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. № 1. С. 51–55. [[ V. I. Petunin, "Determination of the temperature of gas turbine engine using indirect measurements," (in Russian), in *Izvestiya Vuzov. Aircraft equipment*, no. 1, pp. 51-55, 2008. ]]

3. **Гуревич О. С.** Системы автоматического управления авиационными ГТД. Энциклопедический справочник / Под ред. О. С. Гуревича. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. 208 с. [[ O. S. Gurevich, *Automatic control system of aviation gas turbine engines*, (in Russian). Moscow: TORUS PRESS, 2011. ]]

4. **Кудрявцев А. В., Шаймарданов Ф. А., Фрид А. И.** Самонастраивающееся устройство для измерения быстроизменяющихся температур: авт. свид. СССР № 1122904. [[ A. V. Kudravec, F. A. Naumardanov, F. A. Frid, *Self-tuning device for measuring rapidly changing temperatures*, (in Russian): author certificate USSR no. 1122904. ]]

5. **Агалакова Л. М., Домрачева Л. С., Фрид А. И.** Об одном методе идентификации динамических характеристик термодатчиков при испытаниях авиационных двигателей // Авиационная промышленность. 1981. № 10. С. 21–23. [[ L. M. Agalakova, L. S. Domracheva, F. A. Frid, "About one method for identification of dynamic characteristics of thermocouples in the tests of aircraft engines," (in Russian), in *Aircraft industry*, no. 10, pp. 21-23, 1981. ]]

6. **Агалакова Л. М., Фрид А. И., Шаймарданов Ф. А.** Самонастраивающееся корректирующее устройство постоянной времени термопреобразователя // Контрольно-измерительная техника. 1983. № 33. С. 93–98. [[ L. M. Agalakova, F. A. Frid, F. A. Shaumardanov, "Device self-tuning correcting the time constant of thermocouple," (in Russian), no. 33, pp. 93-98, 1983. ]]

7. **Черкасов Б. А.** Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1988. 360 с. [[ B. A. Cherkasov, *Automation and control of air-breathing jet engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1988. ]]

8. **Шевяков А. А.** Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1983. 283 с. [[ A. A. Shevakov, *Integral automatic control system aircraft propulsion*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1983. ]]

9. **Шукшунув В. Е.** Корректирующие звенья в устройствах измерения нестационарных температур. М.: Энергия, 1970. [[ V. E. Shukshunov, *Corrective links in devices measuring transient temperature*, (in Russian). Moscow, Mashinostroenie, 1970. ]]

10. **Подкучаев В. А.** Теория автоматического управления (аналитические методы): учебник для вузов. М.: 2011. 392 с. [[ V. A. Podkuchaev, *Automatic Control Theory (analytical methods)*, (in Russian). Moscow, 2011. ]]

## ОБ АВТОРАХ

**ПЕТУНИН Валерий Иванович**, проф. каф информационно-измерительной техники. Дипл. инж. (УГАТУ, 1975). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. синтеза логико динамических систем автоматического управления двигателем.

**СИБАГАТУЛЛИН Радмир Раилевич**, асп. каф. вычислительной техники и защиты информации. Дипл. инж. (УГАТУ, 2012). Готовит дис. об интеллектуальных системах автоматического управления газотурбинным двигателем.

**ФРИД Аркадий Исаакович**, проф. каф. вычислительной техники и защиты информации. Дипл. инж.-э/мех. (УГАТУ, 1968). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. разработки и исследовании интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами.

## METADATA

**Title:** Immunity to interference self-adjusting measurer temperature of the gas turbine engine.

**Authors:** V. I. Petunin<sup>1</sup>, R. R. Sibagatullin<sup>2</sup>, A. I. Frid<sup>3</sup>.

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>petunin\_vi@mail.ru, <sup>2</sup>radk2@mail.ru, <sup>3</sup>frid46@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 2 (68), pp. 147-155, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper discusses the principles of building measurer of temperature of gas turbine engine based adaptive systems. Held the analysis of analogs measurer of the gas temperature gas GTE. A simplified diagram of the measurer is offered. The shows the simulation results reflecting the quality of calculating temperature gas on transients. Comparison of noise immunity.

**Key words:** Measurer; noise immunity; SAU; GTE; STM; CIT.

**About authors:**

**PETUNIN, Valeriy Ivanovich**, Prof., Dept. of Information measurement technology.

**SIBAGATULLIN, Radmir Railevich**, Graduate student., Dept. of Computing equipment and information protection.

**FRID, Arkadii Isaakovich**, Prof., Dept. of computing equipment and information protection.