### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518

#### С. Ю. Боровик

# СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК В ГАЗОТУРБИННОМ ДВИГАТЕЛЕ С КОРРЕКЦИЕЙ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ 1

#### S. Yu. Borovik

## THE STRUCTURE AND OPERATION ALGORITHMS OF THE SYSTEM FOR MEASURING OF BLADES TIPS RADIAL AND AXIAL DISPLACEMENTS IN GAS-TURBINE ENGINE WITH STATIC AND DYNAMIC ERRORS CORRECTION

**А и и о т а ц и я.** Предложена обобщенная структура системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в компрессоре и турбине газотурбинного двигателя, реализующей методы измерения на основе применения кластеров одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительными элементами в виде отрезка проводника. Рассмотрены алгоритмы функционирования системы, позволяющие уменьшить составляющие статической и динамической погрешности измерения, связанные с изменениями скорости вращения лопаточного колеса и температуры в зоне установки ЧЭ ОВТД.

A b s t r a c t. The generalized structure of the system for measuring of blades tips radial and axial displacements in gas-turbine engine based on using of clusters of single-coil eddy-current sensor (SCECS) with sensitive elements (SE) made as a conductor piece is offered. System operation algorithms are considered too. Algorithms are permits to reduce static and dynamic error components related to variation of blade wheel revolutions as well as to variation of the temperature in SE SCESC zone.

**Ключевые** с **лова**: одновитковый вихретоковый датчик, радиальные зазоры, осевые смещения, газотурбинный двигатель, лопатки, статическая и динамическая составляющие погрешности, коррекция погрешностей.

*Keywords*: single-coil eddy-current sensor, radial clearance, axial displacement, gasturbine engine, blades, static and dynamic errors fraction, errors correction.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-08-01032а).

#### Введение

Известно, что от величины радиального зазора между торцами лопаток и статором компрессора или турбины газотурбинного двигателя (ГТД) зависят его надежность и экономичность: с уменьшением РЗ возрастает экономичность ГТД, но надежность уменьшается из-за возможного касания торцами лопаток статора [1]. Поэтому одной из ключевых особенностей разрабатываемых в настоящее время перспективных конструкций авиационных ГТД нового поколения является наличие у них системы активного регулирования зазоров по результатам прямых измерений радиальных зазоров в газовоздушном тракте компрессора и турбины [2]. Это предъявляет особые требования к получению достоверной информации о РЗ как в стационарном, так и в нестационарном режимах работы двигателя.

Известны кластерные методы измерения координат смещений торцов лопаток, включая смещения в радиальном направлении, формирующие радиальные зазоры [3]. Такие методы предполагают использование сосредоточенных или распределенных кластеров одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника, способных работать в тяжелых условиях газовоздушного тракта при температурах до 1400 °С [4]. Кластерные методы реализованы в системах, технические средства которых, помимо ОВТД, включают нестандартные индивидуальные или групповые преобразователи сигналов, а также устройства ввода аналоговых сигналов промышленного изготовления, сопряженные с ПЭВМ [3, 5].

В течение ряда лет, включая и последние годы, была проведена серия теоретических и экспериментальных исследований методических и инструментальных погрешностей методов, результаты которых нашли отражение в публикациях [6–10]. Кроме того, были предложены методы уменьшения некоторых статических и динамических составляющих погрешностей, связанных, в частности, с изменениями скорости вращения лопаточного колеса [11] и температуры в зоне установки ОВТД на переходных режимах работы ГТД [9, 12]. В настоящей статье рассматривается обобщенная структура системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в компрессоре и турбине ГТД с коррекцией указанных составляющих погрешности, а также приводятся основные алгоритмы ее функционирования.

#### Структурно-функциональная схема системы

Обобщенная структурно-функциональная схема системы измерения представлена на рис. 1. Ее отличительной особенностью является наличие блоков, связанных с измерением ускорений лопаточного колеса, коррекцией моментов опроса ОВТД и вычислением температуры ЧЭ датчика.

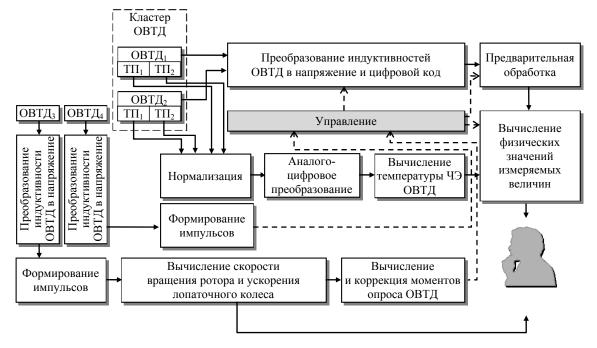


Рис. 1. Структурно-функциональная схема системы измерения

#### Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

Для измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток компрессора и турбины ГТД в системе используются распределенные или сосредоточенные кластеры из двух рабочих ОВТД (ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub>) [3]. При подаче импульсов питания на датчики изменения индуктивностей ОВТД, соответствующих искомым координатам смещений, преобразуются в напряжения и осуществляется аналого-цифровое преобразование их амплитудных значений. Полученные коды подвергаются предварительной цифровой обработке, и на основе экспериментально снятых градуировочных характеристик ( $\Gamma$ X) осуществляется вычисление искомых координат.

Известно, что для уменьшения погрешностей, связанных с температурными изменениями геометрических и электрофизических параметров элементов конструкций ОВТД (прежде всего ЧЭ) и лопатки, в современных конструкциях датчиков предусмотрена встроенная термопара (ТП, на рис.  $1 - \text{ТП}_1$ ), горячий спай которой расположен в непосредственной близости к ЧЭ [3, 5]. Однако по технологическим и конструктивным особенностям ОВТД горячий спай  $\Pi_1$  располагается не на самом ЧЭ, а на удалении ~5 мм от него внутри тоководов, соединяющих ЧЭ с объемным витком согласующего трансформатора, который размещен с внешней стороны статора в зоне низких температур [5]. Очевидно, что большой температурный перепад между средой в газовоздушном тракте ГТД и внешней по отношению к статору воздушной средой создает тепловой поток в тоководах ОВТД и, как следствие, температурный перепад на участке между ЧЭ и горячим спаем ТП<sub>1</sub>, что определяет погрешность измерения температуры. Следует подчеркнуть, что указанные погрешности наблюдаются как в стационарном, так и в нестационарном режимах работы ГТД, т.е. при постоянных и переменных во времени температурах, а потому связанные с ними погрешности можно классифицировать как статические и динамические. Для их коррекции в [9] было предложено использовать дополнительную ТП ( $T\Pi_2$ , см. рис. 1), устанавливаемую в хвостовой части ОВТД. Тогда после нормализации и аналого-цифрового преобразования сигналов ТП1 и ТП2 производится вычисление физических значений температур в зоне установки термопар и на их основе, с помощью моделей передачи тепла в элементах конструкции ОВТД [9, 12] определяется температура ЧЭ, которая далее используется в традиционных алгоритмах термокоррекции [5] при вычислении физических значений измеряемых величин.

Известно также, что подавляющее большинство существующих методов измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток предусматривает жесткую привязку моментов опроса ОВТД к угловому положению лопаточного колеса [3]. Традиционно эта задача решается путем предварительного измерения скорости вращения лопаточного колеса, последующего вычисления моментов прохождения замками лопаток определенных точек кластера датчиков – геометрического центра (г.ц.) сосредоточенного кластера, г.ц. и виртуального г.ц. (в.г.ц.) распределенного кластера ОВТД [13–15], синхронизации начала опроса с заданным угловым положением лопаточного колеса, собственно, формирования импульсов опроса ОВТД в расчетные моменты времени. Очевидно, что на переходных режимах работы ГТД при изменяющейся скорости вращения лопаточного колеса будет наблюдаться опережение или запаздывание фактических моментов прохождения торцами лопаток г.ц. (г.ц. и в.г.ц.) кластера ОВТД от расчетных. Это и является причиной возникновения погрешности [7].

Для коррекции указанной динамической составляющей погрешности в [11] предлагается использовать два идентичных канала измерения частоты вращения и синхронизации с ОВТД<sub>3</sub> и ОВТД<sub>4</sub>. При этом применяемый для измерения скорости вращения и угловых ускорений лопаточного колеса ОВТД<sub>3</sub> размещается на статоре в том же сечении, что и ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub>. Изменения индуктивности ОВТД<sub>3</sub>, связанные с прохождением лопаток, преобразуются в напряжения, и далее производится формирование импульсов, соответствующих прохождению каждой лопаткой ЧЭ датчика. Скорость вращения лопаточного колеса определяется путем подсчета заданного числа сформированных импульсов и соответствующего ему интервала времени. Необходимые для коррекции моментов опроса ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub> угловые ускорения лопаточного колеса определяются по результатам измерений его скоростей вращения на примыкающих временных интервалах [7].

Используемый для синхронизации ОВТД<sub>4</sub> размещается вблизи вала ротора, на котором установлена одиночная «метка» начала оборота. Изменения индуктивности ОВТД<sub>4</sub> в момент прохождения «меткой» зоны чувствительности датчика преобразуются в напряжение, и формируются прямоугольные импульсы, являющиеся сигналами кадровой синхронизации. При этом применение для синхронизации ОВТД вместо традиционно используемых для этих целей датчиков частоты вращения (ДЧВ) промышленного изготовления имеет существенное

преимущество – в отличие от ДЧВ фронт нарастания сигнала на выходе ОВТД не зависит от скорости вращения вала и не меняется с ее изменением.

#### Алгоритмы функционирования системы

В соответствии со структурой рис. 1 для получения информации об искомых параметрах необходимо выполнение следующих операций: преобразование и формирование синхроимпульсов; преобразование и вычисление скорости вращения и ускорения лопаточного колеса; вычисление моментов опроса  $OBTД_1$  и  $OBTД_2$  с учетом возможного ускорения лопаточного колеса; преобразование в код сигналов  $OBTД_1$ ,  $OBTД_2$  и TII; расчет температуры ЧЭ OBTД, вычисление физических значений искомых радиальных и осевых смещений торцов лопаток.

На рис. 2 представлена временная диаграмма, поясняющая алгоритм управления сбором, преобразованиями и вычислениями на примере реализации системы с распределенным кластером из двух ОВТД. Для достижения большей наглядности операции предварительной обработки кодов в каналах ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub> на временной диаграмме опущены. Предполагается, что они осуществляются в реальном времени по известным алгоритмам цифровой фильтрации [16–18]. Также предполагается, что операции, связанные с измерениями, преобразованиями и вычислениями, выполняются в три этапа, при этом длительность каждого из этапов составляет порядка одного периода вращения лопаточного колеса.

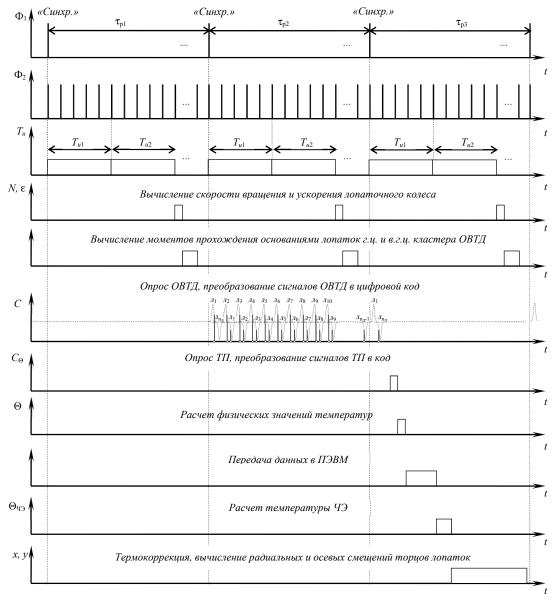


Рис. 2. Временная диаграмма, поясняющая сбор, преобразование и обработку измерительной информации

#### Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

На первом этапе осуществляются формирование импульсов синхронизации, определение скорости вращения и ускорения лопаточного колеса, а также вычисление моментов опроса ОВТД в составе распределенного кластера датчиков с учетом найденного ускорения. Предполагается, что указанные операции выполняются на нижнем уровне с помощью соответствующих технических средств, в состав которых включены микроконтроллеры [11, 19].

При прохождении «меткой» на валу ротора зоны чувствительности ОВТД<sub>4</sub> на выходе измерительного преобразователя формируется аналоговое напряжение, которое после формирователя импульсов преобразуется в прямоугольные импульсы  $\Phi_1$ , являющиеся сигналами кадровой синхронизации («*Синхр*.»).

С приходом импульса «Cunxp.» запускается процесс определения скорости и ускорения лопаточного колеса. Прохождение торцами лопаток в процессе вращения ротора зоны чувствительности ОВТД3 сопровождается формированием напряжения на выходе измерительного преобразователя, представляющего собой логическую последовательность импульсов колоколообразной формы. Формирователь импульсов на каждый колоколообразный импульс вырабатывает одиночный прямоугольный импульс  $\Phi_2$ .

Алгоритм определения скорости вращения лопаточного колеса предусматривает формирование интервала времени ( $T_u$ ), определяемого заданным числом импульсов из указанной последовательности (на рис. 2 интервал измерения задан последовательностью из шести импульсов), представление этого интервала времени в цифровом виде путем его заполнения высокочастотными импульсами стандартной частоты и последующий расчет скорости вращения (N), представленной в общепринятых единицах — об/мин [19]. Для определения текущего углового ускорения ( $\epsilon$ ) осуществляется измерение скоростей вращения лопаточного колеса на примыкающих измерительных интервалах  $T_{u1}$  и  $T_{u2}$ , которые будут равны между собой при постоянной скорости вращения лопаточного колеса и не равны, если скорость вращения изменяется во времени [11]. Найденные значения скорости и ускорения лопаточного колеса позволяют определить величину опережения или запаздывания реальных моментов прохождения замками лопаток г.ц. и в.г.ц. кластера ОВТД относительно расчетных и скорректировать последние.

Блок-схема алгоритма коррекции динамической составляющей погрешности, связанной с изменением скорости вращения лопаточного колеса для рассматриваемого варианта реализации системы, представлена на рис. 3. Исходными данными для алгоритма являются значения числа лопаток контролируемого колеса компрессора или турбины  $(n_{ij})$ , а также найденные ранее скорость вращения лопаточного колеса (N) и его угловое ускорение  $(\varepsilon)$ . На первом шаге работы алгоритма, по известной N, вычисляется период вращения лопаточного колеса  $T_{nk}$  (блок 3), а затем в цикле по всем  $n_n$  лопаткам (блоки 4–9) осуществляются расчет и коррекция моментов опроса  $OBTД_1$  и  $OBTД_2$ . С этой целью для каждой i-той лопатки сначала вычисляется гипотетический момент прохождения ее замком г.ц.  $(T_{0i}^{(1)})$  и в.г.ц.  $(T_{0i}^{(2)})$ распределенного кластера из двух ОВТД (блок 5). Расчет выполняется для постоянной скорости вращения *N*. Далее, если были обнаружены изменения скорости вращения лопаточного колеса (блок 6), для каждой і-той лопатки в предположении о постоянстве углового ускорения производится расчет опережения или запаздывания реального момента прохождения ее замком г.ц.  $(\Delta T_{0i}^{(1)})$  и в.г.ц.  $(\Delta T_{0i}^{(2)})$  относительно гипотетического (блок 7). Полученные значения временных интервалов затем используются при вычислении скорректированных моментов опроса ОВТД<sub>1</sub> ( $T_{0i}^{(1)(\kappa)}$ ) и ОВТД<sub>2</sub> ( $T_{0i}^{(2)(\kappa)}$ ) (блок 8). Результаты расчета сохраняются в памяти системы.

Коррекцией моментов опроса  $OBTД_1$  и  $OBTД_2$  завершается первый этап работы алгоритма сбора, преобразования и обработки измерительной информации. При этом следует отметить, что вышеперечисленные вычисления осуществляются в оставшемся резерве времени первого оборота за вычетом  $T_{u1}$ ,  $T_{u2}$  и времени, требующегося на расчет скорости вращения и ускорения лопаточного колеса.

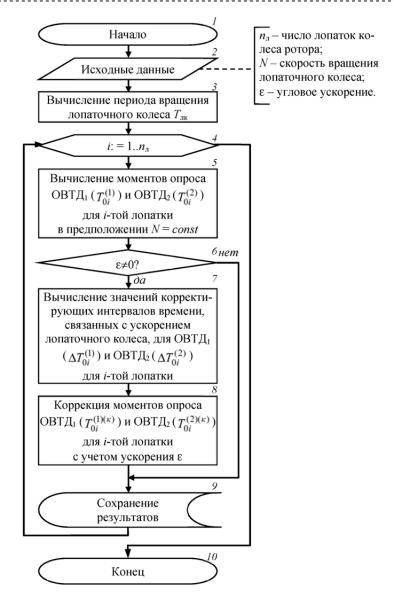


Рис. 3. Алгоритм коррекции динамической составляющей погрешности, связанной с изменением скорости вращения лопаточного колеса

На втором этапе осуществляются опрос, преобразование естественных выходных параметров ОВТД (индуктивностей) в напряжение и далее в цифровой код (C) [15, 20]. Как уже отмечалось, опрос ОВТД синхронизирован с периодом вращения лопаточного колеса и начинается с приходом очередного импульса «Cunxp.» По завершении опроса ОВТД $_1$  и ОВТД $_2$  производятся опрос каналов измерения температуры, последующее аналого-цифровое преобразование сигналов ТП и расчет физических значений температур. Второй этап работы алгоритма завершается передачей данных (кодов в каналах ОВТД $_1$ , ОВТД $_2$ , рассчитанных значений скоростей вращения и ускорений лопаточного колеса, температур в зонах установки ТП в тоководе и хвостовой части ОВТД) на верхний уровень в ПЭВМ.

На третьем, заключительном, этапе осуществляются вычисление температуры ЧЭ ОВТД ( $\theta_{\rm ЧЭ}$ ) по показаниям встроенных в датчик ТП, термокоррекция результатов преобразования ОВТЛ и расчет физических значений искомых радиальных и осевых смешений.

Алгоритм вычисления температуры ЧЭ ОВТД, обеспечивающий коррекцию статической и динамической температурных погрешностей, основан на использовании моделей передачи тепла в элементах конструкции ОВТД (подробные описания моделей приведены в работах [9, 10]). В указанных моделях расчет температуры ЧЭ ( $\theta_{\rm ч}$ ) осуществляется по измеренным с помощью  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  температурам  $\theta_1$  и  $\theta_2$  и вычисленным заранее тепловым сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$  участков токовода ОВТД от ЧЭ до горячего спая  $\Pi_1$  и от горячего спая  $\Pi_1$  до го-

#### Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

рячего спая  $T\Pi_2$  (в динамической модели также учитывается постоянная времени  $\tau_1$  прогрева участка токовода от ЧЭ до горячего спая  $T\Pi_1$ ). Тепловые сопротивления вычисляются через геометрические размеры соответствующих участков токовода для заданных значений теплопроводности материала датчика, а постоянная времени  $\tau_1$  определяется как произведение теплового сопротивления  $R_1$  на теплоемкость участка токовода от ЧЭ до горячего спая  $T\Pi_1$ .

Найденная  $\theta_{\rm ЧЭ}$  используется далее в *алгоритме температурной коррекции* [5], являющемся одной из процедур при расчете искомых координат смещений торцов лопаток. Алгоритм предполагает пересчет для вычисленной температуры ЧЭ загруженных заранее в память ПЭВМ семейств ГХ, связывающих коды, соответствующие выходным параметрам (индуктивностям) ОВТД в составе кластера, с искомыми координатами с учетом возможного диапазона измерения рабочих температур.

Алгоритм вычисления искомых координат смещений торцов лопаток предполагает их определение путем решения систем уравнений, составленных на основе результатов преобразований в каналах ОВТД и семейств ГХ. Для аппроксимации семейств ГХ обычно используются полиномиальные функции нескольких переменных и кусочно-линейные интерполяционные таблицы [3, 5, 21]. Решение системы уравнений осуществляется методом Ньютона [22], в котором предусмотрены итерационные процедуры, отличающиеся квадратичной сходимостью и сравнительно малыми вычислительными затратами.

Следует отметить, что при очевидных достоинствах традиционного поиска решения на основе метода Ньютона имеется и существенный недостаток, связанный с необходимым условием монотонности семейства ГХ для разрешения систем уравнений. Учитывая, что у реальных ОВТД на ГХ есть локальные экстремумы, использование метода Ньютона приводит к значительному ограничению рабочего диапазона измерений координат. В работе [23] предлагается модифицированный алгоритм вычисления двух координат смещений торцов лопаток, в котором расширение рабочих диапазонов осуществляется за счет использования немонотонных участков семейств ГХ ОВТД.

#### Заключение

Предложена структура и рассмотрены основные алгоритмы функционирования системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток компрессора и турбины ГТД на основе применения кластеров ОВТД. Приведенные в статье решения обеспечивают возможность коррекции составляющих погрешности измерения смещений торцов лопаток, связанных с изменениями скорости вращения лопаточного колеса и температуры газовоздушной среды в зоне установки ОВТД.

#### Список литературы

- 1. Прокопец, А. Необходимость диагностирования радиальных зазоров в проточной части газотурбинных двигателей / А. Прокопец, Б. Ревзин, А. Рожков // Газотурбинные технологии. 2004. № 4. С. 5–7.
- 2. Боровик, С. Ю. Активное регулирование радиальных зазоров в проточной части ГТД (обзор зарубежных публикаций) / С. Ю. Боровик, В. П. Данильченко, Ю. Н. Секисов // Газотурбинные технологии. − 2011. − № 2. − С. 36–40.
- 3. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. О. П. Скобелева. М.: Машиностроение, 2011. 298 с.
- 4. Одновитковые вихретоковые датчики: от кластерных композиций к кластерным конструкциям / Л. Б. Беленький, Б. К. Райков, Ю. Н. Секисов [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. VI Междунар. конф. Самара: Самарский научный центр РАН, 2004. С. 437–443.
- 5. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Ю. Н. Секисова, О. П. Скобелева. Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2001. 188 с.
- 6. Боровик, С. Ю. Оценка влияния на точность преобразования температурных воздействий среды в месте установки одновитковых вихретоковых датчиков радиальных зазоров / С. Ю. Боровик // Материалы 4-й Всерос. мультиконф. по проблемам управления. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. Т. 2. С. 301–303.

- 7. Боровик, С. Ю. Методические погрешности систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток / С. Ю. Боровик, О. П. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 4. С. 31–35.
- 8. Беленький, Л. Б. Влияние ненулевых начальных условий на погрешности импульсной измерительной цепи с кластером одновитковых вихретоковых датчиков / Л. Б. Беленький, С. Ю. Боровик, О. П. Скобелев // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2012. № 1 (33). С. 46—50.
- Погрешность измерения температуры чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика в каналах термокоррекции системы сбора информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и метод ее уменьшения / С. Ю. Боровик, М. М. Кутейникова, Ю. Н. Секисов [и др.] // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2012. № 3 (35). С. 43–48.
- 10. Боровик, С. Ю. Динамические температурные погрешности в каналах термокоррекции семейств градуировочных характеристик системы измерения с кластерами одновитковых вихретоковых датчиков / С. Ю. Боровик, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. С. 62–64.
- 11. Белопухов, В. Н. Система измерения ускорений лопаточного колеса компрессора и турбины с использованием одновиткового вихретокового датчика и микроконтроллера / В. Н. Белопухов, С. Ю. Боровик // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XIV Междунар. конф. Самара: СамНЦ РАН, 2012. С. 607–611.
- 12. Боровик, С. Ю. Об использовании тепловой модели одновиткового вихретокового датчика для коррекции температурных погрешностей / С. Ю. Боровик, Ю. Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. VII Междунар. конф. Самара : СамНЦ РАН, 2005. С. 175—180.
- 13. Боровик, С. Ю. Методы получения информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / С. Ю. Боровик, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. VIII Междунар. конф. Самара : СамНЦ РАН, 2006. С. 232–239.
- 14. Метод получения измерительной информации о многокоординатных смещениях торцов лопастей винтовентилятора с разновременным преобразованием сигналов кластерных датчиков. Ч. 1. Обоснование предлагаемого метода и его описание / Л. Б. Беленький, С. Ю. Боровик, Б. К. Райков [и др.] // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2009. № 1 (23). С. 89–94.
- 15. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Ч. 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание / Л. Б. Беленький, С. Ю. Боровик, Б. К. Райков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 16–19.
- 16. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. СПб. : Питер, 2002. 608 с.
- 17. Хемминг, Р. В. Цифровые фильтры / Р. В. Хемминг. М.: Недра, 1987. 221 с.
- 18. Олсон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олсон, Дж. Пиани. СПб. : Невский Диалект, 2001. 557 с.
- 19. Белопухов, В. Н. Система измерения скорости вращения ротора ГТД на основе одновитковых вихретоковых датчиков / В. Н. Белопухов, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XIII Междунар. конф. Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2011. С. 311–315.
- 20. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Ч. 2. Реализуемость методов / Л. Б. Беленький, С. Ю. Боровик, А. В. Логвинов А. В. [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 5. С. 21–30.
- 21. Тулупова, В. В. Алгоритмические и программные средства аппроксимации градуировочных характеристик систем измерения полиномиальными функциями нескольких переменных / В. В. Тулупова, Р. В. Филимонов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. III Междунар. конф. Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2001. С. 573—577.
- 22. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. М.: Наука, 1978. 512 с.
- 23. Кутейникова, М. М. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток / М. М. Кутейникова, Ю. Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XII Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2010. С. 323—327.

#### Боровик Сергей Юрьевич,

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, заместитель директора по научной работе, Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук E-mail: borovik@iccs.ru

#### Borovik Sergey Yur'evich

doctor of technical sciences, leading researcher, deputy director for scientific work, Institute of problems of management of complex systems The Russian Academy of Sciences

УДК 681.518

Боровик, С. Ю.

Структура и алгоритмы функционирования системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в газотурбинном двигателе с коррекцией статических и динамических погрешностей / С. Ю. Боровик // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. –  $N \ge 1$  (7). – С. 74–82.