

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 681.518.2

С. Ю. Боровик, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев, В. В. Тулупова,
А. А. Хритин

(Самара)

МЕТОД И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

Предлагается метод измерения радиальных зазоров между статором и торцами лопаток, расположенных на роторе компрессора или турбины, который обеспечивает адаптацию к изменяющейся скорости вращения вала при постоянном шаге квантования сигнала датчика по углу поворота ротора и фиксацию соответствующих цифровых отсчетов за один период вращения ротора. Приводится структура компьютерной системы измерения, реализующей предложенный метод, и дается описание ее компонентов.

Введение. Известно, что в процессе экспериментальных исследований компрессора или турбины измерения радиальных зазоров (РЗ) между статором и лопатками ротора позволяют получить важную информацию о надежности, экономичности и ресурсе газотурбинного двигателя (ГТД).

В последних публикациях описан мультитробоскопический метод [1], реализуемый с помощью вихретоковых датчиков (ВД) РЗ, включенных в измерительные цепи (ИЦ) с импульсным питанием для повышения помехозащищенности [2], а также дано описание микропроцессорной и компьютерной систем измерения РЗ на их основе [1, 3]. Фиксация цифровых отсчетов, соответствующих РЗ, составляет несколько периодов вращения ротора, что гарантирует надежность мультитробоскопического метода лишь при стационарном или квазистационарном режиме работы ГТД, когда изменения скорости и периода вращения ротора незначительны и не вызывают потери информации о РЗ ни на одной из контролируемых лопаток. Отрицательное влияние на метод оказывают колебания лопаток и вибрации статора в зоне закрепления ВД.

При нестационарных режимах работы ГТД с резкими изменениями скорости вращения ротора (приемистость, сброс газа), а также при режимах, сопровождающихся высоким уровнем колебаний лопаток и вибрациями статора (например, в предпомпажном состоянии и срывах потока), мультитробоскопический метод теряет работоспособность.

Поэтому при нестационарных режимах и при повышенных вибрациях необходимо применение более быстродействующего метода, обеспечивающего фиксацию цифровых отсчетов, соответствующих РЗ, на всех лопатках не более чем за один период вращения ротора. Основным ограничивающим фактором при этом является длительность восстановления ИЦ с импульсным питанием. Согласно [2, 3], она сравнительно велика и составляет около 30 мкс, но тем не менее позволяет осуществлять измерения за один оборот при малых скоростях вращения ротора (не более 1000 об./мин). Чтобы измерения РЗ стали возможны во всем диапазоне скоростей вращения ротора, необходимо значительное уменьшение длительности восстановления ИЦ, которая определяется временем рассеяния энергии после импульсного возбуждения и в основном зависит от длины линии связи между датчиком и преобразователем его выходного параметра в напряжение. Сокращение длины линии приводит к уменьшению времени рассеяния и длительности восстановления ИЦ, а это означает, что преобразователь, включающий ИЦ, должен размещаться как можно ближе к датчику при минимальной длине линии связи.

В данной работе предлагается метод измерения РЗ, обеспечивающий более высокое быстродействие по сравнению с мультитростобоскопическим и сохраняющий преемственность в использовании тех же датчиков и принципов построения ИЦ и преобразователей их сигналов. Приводится также описание системы измерения, в состав которой входит импульсный преобразователь, «встроенный в линию» и расположенный на коротком расстоянии от ВТД, что позволяет сократить длительность восстановления ИЦ почти на два порядка и играет решающую роль в реализации предлагаемого метода.

Метод измерения. Предлагаемый метод измерения РЗ поясняет структурная схема, приведенная на рис. 1, где ДПВ – датчик положения вала индукционного типа. Временные диаграммы представлены на рис. 2.

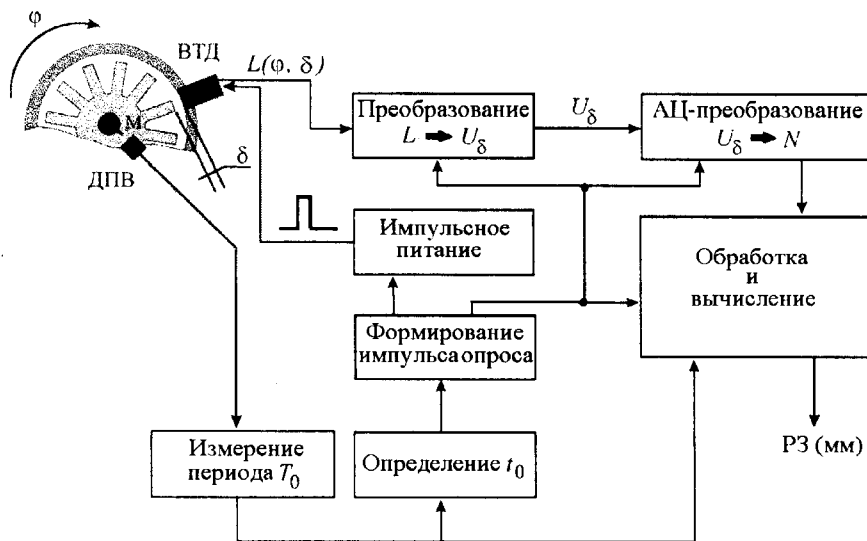


Рис. 1

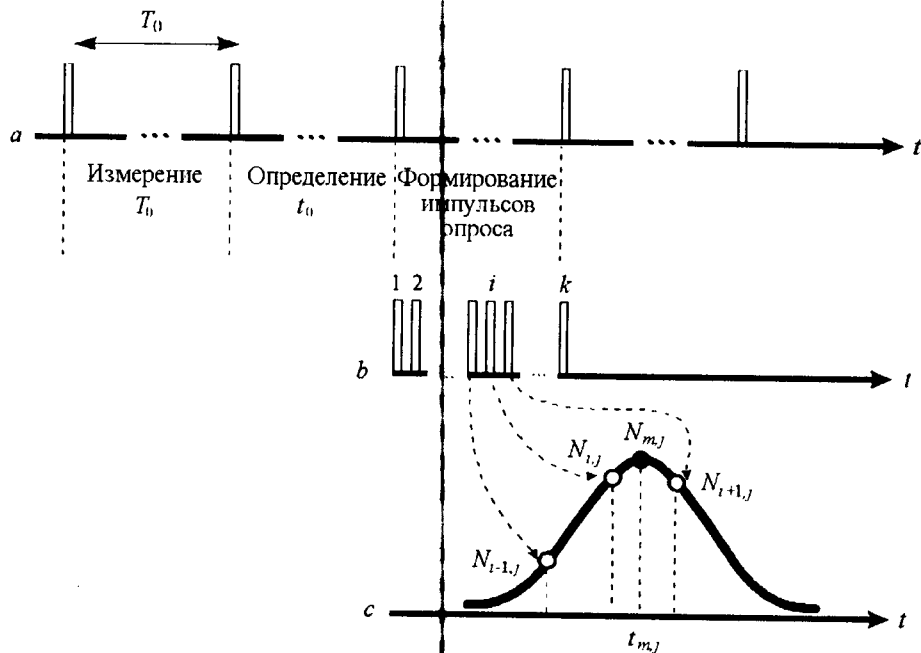


рис. 2

При прохождении лопатки в непосредственной близости от чувствительного элемента ВТД его индуктивность уменьшается, и минимальное значение индуктивности характеризует РЗ.

Прохождение метки (М) вызывает появление импульсов на выходе ДПВ, причем период между соседними импульсами (T_0) характеризует скорость вращения ротора.

Процедуре измерения РЗ предшествуют два подготовительных этапа (рис. 2, а). На первом – измеряется период T_0 , на втором – определяется период импульсов опроса t_0 , которые формируются на третьем этапе и осуществляют дискретизацию естественного выходного параметра ВТД – индуктивности $L(\varphi, \delta)$, где φ – угловое перемещение; δ – измеряемый РЗ.

Период импульсов опроса t_0 , т. е. шаг дискретизации по времени, зависит от периода вращения и определяется по формуле $t_0 = T_0/k$, где k – число импульсов опроса за период.

Число k характеризует шаг квантования функции $\varphi(t)$ – углового перемещения ротора относительно ВТД. Шаг квантования $\varphi_0 = 2\pi/k$ остается постоянным при скоростях вращения ротора, изменяющихся в широких пределах (от сотен до единиц миллисекунд за период вращения T_0).

Каждый импульс опроса обеспечивает кратковременную подачу напряжения питания в ИЦ датчика и запускает процесс преобразования его выходного параметра $L(\varphi, \delta)$ в напряжение U_δ и далее в цифровой код N . На рис. 2, б представлена последовательность импульсов опроса с порядковыми номерами $1, 2, \dots, i-1, i, i+1, \dots, k$.

Каждому импульсу опроса соответствует один цифровой отсчет. С приближением лопатки к зоне чувствительности ВТД происходит увеличение

значений N до максимума с последующим уменьшением до минимума, причем число таких периодических изменений равно числу лопаток n . На рис. 2, с изображены три отсчета при прохождении в зоне чувствительности ВТД j -й лопатки (номера лопаток $1, 2, \dots, j, \dots, n$), где $N_{i-1, j} < N_{i, j} > N_{i+1, j}$.

После завершения третьего этапа (по истечении времени $3T_0$) все k значений цифровых отсчетов запоминаются и определяются наибольшие значения, которые приблизительно характеризуют РЗ по каждой из n лопаток. Для более точного определения РЗ осуществляется интерполяционная обработка заданного числа отсчетов для каждой лопатки в зоне чувствительности ВТД и вычисляются максимальные значения кодов $N_{m1}, N_{m2}, \dots, N_{mj}, \dots, N_{mn}$. Эта процедура для j -й лопатки изображена на рис. 2, с и аналогична той, что описана в [1]. Для найденных максимумов определяются соответствующие моменты времени $t_{m1}, t_{m2}, \dots, t_{mj}, \dots, t_{mn}$, которые могут быть использованы для вычисления скоростей и ускорений в пределах одного оборота ротора.

Возвращаясь к числу k , характеризующему дискретизацию по времени (t_0) и квантование по углу (φ_0), следует отметить, что ограничения числа k сверху связаны, во-первых, с объемом оперативной памяти в устройствах, реализующих предлагаемый метод, и, во-вторых, с длительностью цикла импульсного преобразования, который в настоящее время не может быть меньше 1 мкс. Например, при выборе $k = 3600$ шаг квантования $\varphi_0 = 0,1^\circ$, что обеспечивает около 10 отсчетов при прохождении лопатки в зоне чувствительности ВТД. При максимальной скорости вращения ротора порядка 18000 об./мин период импульсов опроса t_0 (шаг дискретизации) составит примерно 1 мкс, а длительность импульса питания ИЦ ВТД – приблизительно 0,1, ..., 0,2 мкс. Разумеется, изменения скорости вращения ротора за период T_0 приведут к реальным изменениям шага квантования. Поэтому выбор числа k должен гарантировать сохранение точности определения N_m и соответствующих РЗ.

Процедуру обработки завершает определение физических значений РЗ по сквозной градуировочной характеристике измерительного канала, полученной при его метрологической аттестации.

Система измерения РЗ. Предлагаемый метод реализован в системе измерений (СИ), представленной на рис. 3, которая была апробирована на стендовых испытаниях компрессора ГТД.

В состав СИ входит ПЭВМ IBM PC/AT и устройство связи с объектом (УСО) в виде Еврокрейта ЗУ с измерительными и микропроцессорными модулями, объединенными системной магистралью и связанными с ПЭВМ через крейт-контроллер (СС). УСО включает процессорный модуль CPU-85 и модуль синхронизации SYNC, описания которых приведены в [1]. СИ содержит также встроенный в линию импульсный преобразователь (ИП), включающий ИЦ (мост Блумлейна) и усилитель выборки-хранения, преобразующий амплитуду импульса в напряжение 0, ..., 1 В. ИП соединен коротким кабелем (менее 1 м) с ВТД и длинным согласованным коаксиальным кабелем (до 50 м) с аналого-цифровым преобразователем (модуль ADC- δ). Модуль ADC- δ содержит схему сопряжения с магистралью и устройство прямого доступа в ОЗУ модуля CPU-85.

Кроме того, в состав УСО входит дополнительный аналого-цифровой преобразователь (ADC- θ) сигналов термопар (ТП), расположенных в ВТД, для температурной коррекции.

Операции «Измерение периода T_0 », «Определение t_0 », «Формирование импульсов опроса», показанные на структурной схеме (см. рис. 1), реализу-

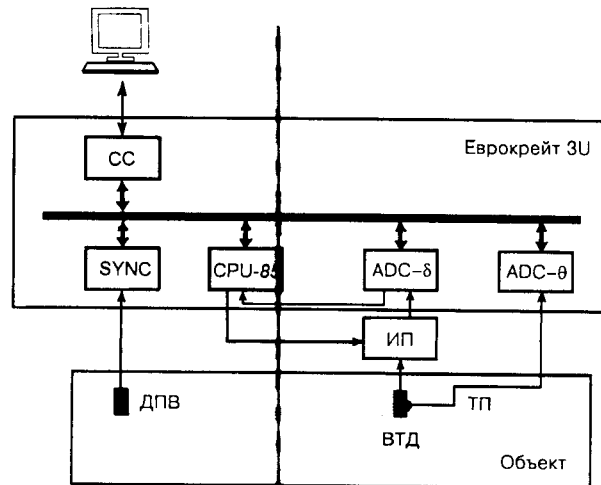


Рис. 3

ются в модулях SYNC и CPU-85 (см. рис. 3), «Импульсное питание», «Преобразование $L \rightarrow U_\delta$ », «АЦ-преобразование $U_\delta \rightarrow N$ » – в блоке ИП и модуле ADC- δ , а «Обработка и вычисление» – в ПЭВМ, причем массивы исходных данных, полученные с ADC- δ , фиксируются в ОЗУ модуля CPU-85.

На рис. 4 представлен график изменений P_3 от времени для одной из лопаток, полученный в переходном режиме компрессора ГТД с помощью рассмотренной СИ (после предварительной фильтрации результатов аналого-цифрового преобразования). Характер изменений P_3 зависит от величины изменений скорости вращения ротора и связанных с ними упругими и термическими деформациями элементов конструкции.

В заключение необходимо отметить, что найденные значения P_3 могут быть использованы для определения осевых и угловых смещений лопаток, биений вала и других параметров многомерного движения элементов конструкции ротора ГТД. Для решения подобного рода задач образуются

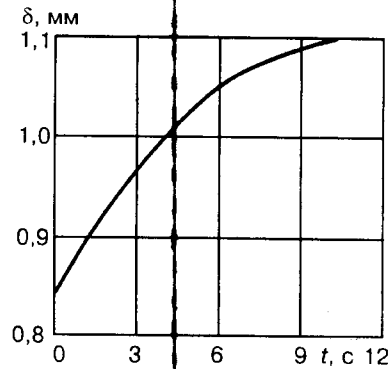


Рис. 4

группы (кластеры) датчиков, определенным образом расположенных на статоре, и организуются совокупные измерения [4], которые предусматривают решение системы независимых уравнений, число которых зависит от числа измеряемых параметров и датчиков в кластере. Непременным условием при этом является одномоментность опроса датчиков в кластере и одновременность аналого-цифрового преобразования их сигналов. В рассмотренной СИ предусматривается расширение канальности в соответствии с необходимым числом ВТД в кластере. При этом каждый дополнительный канал содержит блок ИП и модуль АДС-8, которые синхронно управляются от CPU-85 и функционируют параллельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Хритин А. А. Компьютерная мультистробоскопия в измерениях радиальных зазоров газотурбинных двигателей // Автометрия. 1996. № 5. С. 108.
2. Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Хритин А. А. Вихретоковые датчики зазоров с чувствительными элементами в виде отрезка проводника // Приборы и системы управления. 1996. № 8. С. 27.
3. Секисов Ю. Н., Хритин А. А., Скобелев О. П. Микропроцессорная система измерения зазоров между элементами конструкций машин и механизмов // Там же. № 9. С. 37.
4. Вострокнутов Н. Г., Евтихий Н. Н. Информационно-измерительная техника (теоретические основы). М.: Высш. шк., 1997.

Поступила в редакцию 12 февраля 1998 г.