
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 5

1996

УДК 681.518.2

Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев, А. А. Хритин
(Самара)

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МУЛЬТИСТРОБОСКОПИЯ В ИЗМЕРЕНИЯХ
РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Приводится описание мультистробоскопического метода измерения радиальных зазоров между статором и лопатками ротора компрессора и турбины, который отличается от классического стробоскопического многократным (по числу лопаток) стробированием датчика в пределах каждого оборота ротора. Рассматривается структура многопроцессорной системы параллельного измерения радиальных зазоров на нескольких ступенях компрессора и турбины, реализующая мультистробоскопический метод. Приводятся также технические характеристики и результаты метрологических исследований 16-канальной системы измерения зазоров, построенной в конструктиве Евромеханика на базе микропроцессорных модулей и персонального компьютера.

Введение. Повышение экономичности, надежности и ресурса газотурбинных двигателей (ГТД) вызывает необходимость экспериментальных исследований процессов упругой и термической деформации элементов конструкции, и в частности изменений радиальных зазоров (РЗ) между статором и лопатками ротора компрессора и турбины.

Из существующих средств первичного преобразования наиболее приемлемы вихретоковые (ВТ) датчики РЗ с чувствительным элементом (ЧЭ) простейшей формы в виде отрезка проводника [1]. Такой ЧЭ обеспечивает работоспособность и наилучшую повторяемость характеристик датчика при изменении температуры окружающей среды в диапазоне до 1200 °С. Но при этом он не реагирует на загрязнения воздушного пространства в зазорах, изменения давления, влажности, химического состава и ионизации газов, т. е. на все внешние воздействия, к которым чувствительны оптические и емкостные датчики РЗ. В то же время девиация выходного параметра ВТ-датчика РЗ невелика и не превышает 1%. Поэтому для увеличения уровня полезного сигнала его измерительной цепи (ИЦ) целесообразно использование режима питания датчика короткими импульсами напряжения повышенной амплитуды, что благоприятно сказывается на помехозащищенности ИЦ при интенсивных воздействиях помех энергетического стендового оборудования [2].

При использовании импульсного питания динамические возможности ИЦ с ВТ-датчиком РЗ ограничиваются временем рассеяния в ней электромагнитной энергии после действия импульса. Поэтому на высоких скоростях вращения ротора не удастся получить достаточное количество отсчетов для восстановления огибающей сигнала датчика за время движения вблизи него лопатки. В то же время циклический характер движения лопаток относительно датчика и высокая стабильность скорости вращения ротора, определяемая его большой инерционностью, позволяют для получения отсчетов сигнала применить стробоскопический метод. Сканирование каждой лопатки при этом производится за несколько оборотов ротора путем дискретного фазового сдвига строб-импульса питания датчика на каждом обороте на величину шага дискретизации огибающей сигнала.

Для сокращения времени получения информации о РЗ по всем лопаткам предложен вариант стробоскопического метода, в котором на каждом обороте

ротора осуществляется многократное стробирование ВТ-датчика пакетами импульсов по числу лопаток [3]. Пакеты смещаются на каждом обороте относительно опорного импульса на заданную величину шага дискретизации, осуществляя параллельное сканирование всей поверхности колеса ротора. Величина шага дискретизации определяется выбранной математической моделью огибающей сигнала датчика и требуемой точностью ее последующего восстановления. Величины зазоров для каждой лопатки вычисляются после завершения цикла стробирования по значениям максимумов огибающей выходного сигнала датчика, полученным путем интерполяционной обработки поступающих от датчика дискретных отсчетов. Чтобы подчеркнуть главную отличительную особенность предложенного метода от классического стробоскопического, авторы назвали его мультистробоскопическим.

В [4] приводится описание 4-канальной микропроцессорной системы, реализующей мультистробоскопический метод (ММ) при измерении РЗ на одной ступени компрессора ГТД. В то же время разработчиков ГТД в наибольшей степени интересуют изменения зазоров одновременно на всех или, по крайней мере, на нескольких наиболее ответственных ступенях всего газоздушного тракта, причем на каждой ступени зазоры должны контролироваться в трех—четырёх точках по окружности статора. Таким образом, общее число точек измерения зазора в ГТД может достигать нескольких десятков. Получаемое при этом пространственное представление «жизни зазоров», разворачиваемое к тому же и во времени, требует применения нескольких (по числу ступеней) микропроцессоров, управляющих процессом измерения и производящих первичную обработку, а для дополнительной обработки и отображения полученных результатов необходим компьютер, имеющий достаточно высокую производительность и широкие графические возможности.

Мультистробоскопический метод, микропроцессорные и компьютерные средства его реализации, ориентированные на задачи измерения РЗ в сечениях ГТД и других видов лопаточных машин, можно обозначить общим термином «компьютерная мультистробоскопия», которая, по-видимому, является новой и малоизученной ветвью в измерениях. Действительно, в имеющихся, в том числе и в перечисленных выше, публикациях доминируют сообщения на уровне описаний изобретений и реализационной направленности. В то же время практически отсутствуют достаточно полные описания ММ, составляющего основу компьютерной мультистробоскопии. Настоящая работа призвана восполнить существующий пробел в отношении ММ. Кроме того, в статье приводится описание системы параллельного измерения РЗ на четырех ступенях компрессора и турбины ГТД, построенной на основе ММ.

Мультистробоскопический метод. Структурная схема, поясняющая ММ, приведена на рис. 1. Она содержит датчик положения вала (ДПВ), формирователь строб-импульсов (ФСИ), импульсный преобразователь (ИП) выходного сигнала ВТ-датчика зазора, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и вычислительное устройство (ВУ).

Естественный выходной сигнал датчика зазора представлен функцией изменения его индуктивности, зависящей от углового положения движущейся лопатки, и величины радиального зазора (δ) между ЧЭ и торцевой частью лопатки. При известной величине угловой скорости вращения ротора изменение индуктивности датчика задается функцией времени $L(t, \delta)$, в качестве которой может быть использовано выражение

$$L(t, \delta) = L_m(\delta) \exp(-\alpha t^2), \quad (1)$$

где $L_m(\delta)$ — максимальное значение огибающей выходного сигнала ВТ-датчика в момент совмещения лопатки с ЧЭ; α — коэффициент, зависящий от формы ЧЭ.

Процесс формирования отсчетов сигнала датчика РЗ поясняет временная диаграмма, представленная на рис. 2. Цикл преобразования РЗ начинается импульс синхронизации, который формирует ДПВ в момент прохождения вблизи него выступа на валу ротора (метка М на рис. 1). Для положения ротора,

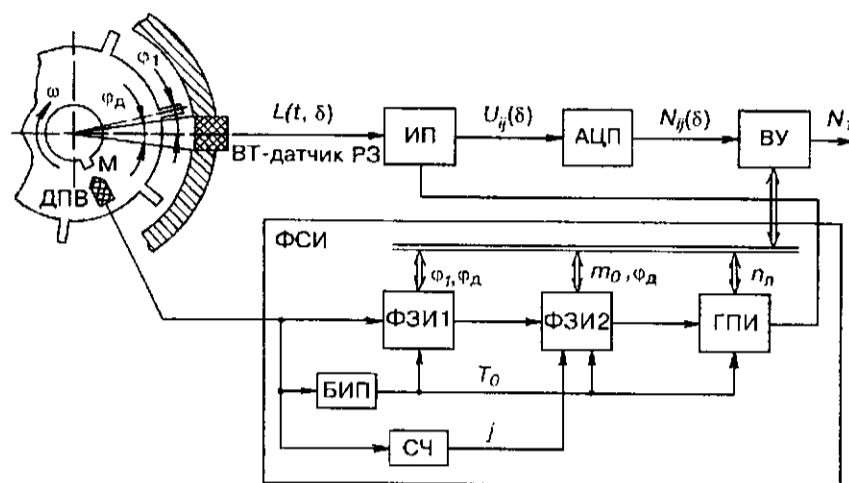


Рис. 1

соответствующего этому моменту, считаются заданными величины: φ_1 — угловое смещение лопадки, условно принятой за первую, относительно ЧЭ-датчика РЗ; φ_d — угловая зона чувствительности датчика РЗ; n_p — число лопадок на колесе ротора; m_0 — число оборотов ротора, необходимое для осуществления цикла мультистробоскопического преобразования.

По временному интервалу между двумя соседними импульсами ДПВ в блоке измерения периода (БИП) определяется период вращения ротора T_0 (рис. 2, а). Далее в предположении постоянства T_0 находятся параметры строб-импульсов: $t_n = T_0/n_p$ — интервал между импульсами в пакете; $t_1 = T_0[(\varphi_1 - \varphi_d/2)/2\pi]$ — начальное смещение пакетов импульсов относительно импульсов ДПВ; $t_2 = T_0[\varphi_d/2\pi(m_0 - 1)]$ — интервал дискретизации. Полученные значения параметров используются в ФСИ (см. рис. 1) для настройки генератора пакетов импульсов (ГПИ) и двух формирователей задержек импульсов (ФЗИ1, ФЗИ2). Последующие m_0 импульсов ДПВ запускают ГПИ, который в ответ на каждый входной импульс формирует пакеты строб-импуль-

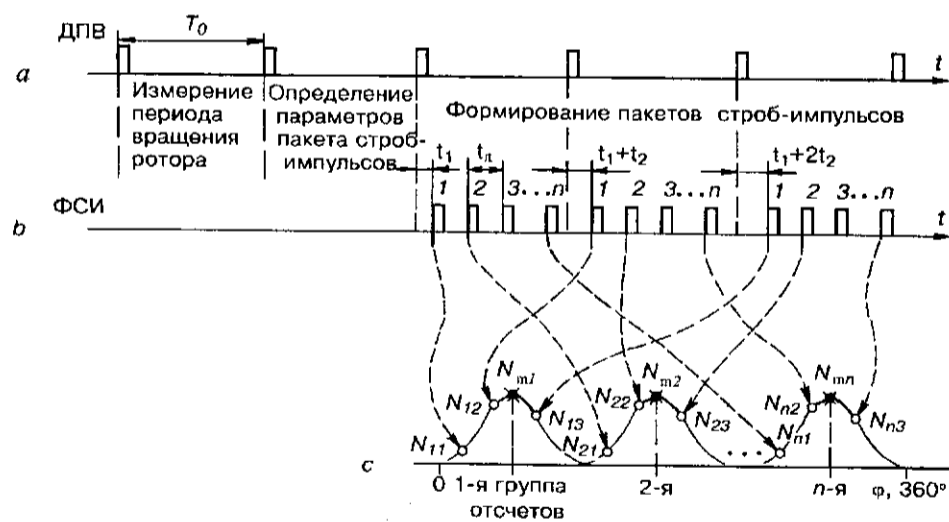


Рис. 2

сов с интервалами t_n между импульсами, равными периоду следования лопаток. В ФЗИ1 начало формирования пакетов задерживается относительно импульсов ДПВ на величину t_1 , а в ФЗИ2 на каждом обороте эта задержка увеличивается на величину t_2 (рис. 2, б). Таким образом, строб-импульсы формируются в моменты

$$t_j = t_1 + (j - 1)t_2 + (i - 1)t_n, \quad (2)$$

где i, j — порядковые номера лопаток и оборотов соответственно.

Преобразование индуктивности датчика РЗ в амплитуду выходного импульса выполняется в ИП, где с приходом каждого строб-импульса осуществляются тест по питанию ИЦ и фиксация мгновенных значений ее импульсного выходного напряжения (U_{ij}), пропорционального измеряемому зазору. В АЦП производится преобразование U_{ij} в цифровой код N_{ij} . Таким образом, на выходе АЦП в моменты t_{ij} формируются цифровые отсчеты огибающей сигнала, полученные в равноотстоящих угловых положениях лопаток относительно датчика РЗ:

$$N_{ij} = k_{ИП} k_{АЦП} L(t_{ij}, \delta) = N_m(\delta) \exp\{-\alpha [t_1 + (j - 1)t_2]^2\}, \quad (3)$$

где $k_{ИП}, k_{АЦП}$ — коэффициенты преобразования ИП и АЦП; $N_m = k_{ИП} k_{АЦП} \times L_m(\delta)$ — цифровой эквивалент максимального значения выходного сигнала датчика, характеризующий зазор i -й лопатки.

Отсчеты N_{ij} запоминаются в оперативной памяти ВУ в хронологическом порядке их поступления из АЦП. После группировки отсчетов по лопаткам (рис. 2, с) в пределах каждой группы производятся интерполяция отсчетов и определение цифровых эквивалентов максимумов огибающей выходного сигнала.

Пусть необходимо определить максимумы огибающей сигнала датчика РЗ заданной моделью (1). Для этого за три оборота ротора ($j = 1, 2, 3$) следует сформировать три пакета строб-импульсов и получить для каждой i -й лопатки по три отсчета огибающей:

$$\begin{aligned} N_{i1} &= N_m \exp\{-\alpha t_1^2\}, \\ N_{i2} &= N_m \exp\{-\alpha [t_1 + t_2]^2\}, \\ N_{i3} &= N_m \exp\{-\alpha [t_1 + 2t_2]^2\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Решение системы (4) дает расчетную формулу, которая используется в ВУ для вычисления максимумов огибающей:

$$N_{mi} = \exp\left\{\ln N_{i1} + \frac{(3\ln N_{i1} - 4\ln N_{i2} + \ln N_{i3})^2}{8(\ln N_{i1} - 2\ln N_{i2} + \ln N_{i3})}\right\}. \quad (5)$$

Выражение (5) может быть использовано для определения N_m при постоянной частоте вращения ротора. При этом результат вычисления не зависит от значений параметров α, t_1, t_2 , а определяется только величинами полученных дискретных отсчетов сигнала.

Микропроцессорная система измерения РЗ. ММ реализован в 16-канальной многопроцессорной системе измерения радиальных зазоров (СИРЗ), предназначенной для стендовых испытаний ГТД. СИРЗ имеет двухуровневую структуру (рис. 3). На верхнем уровне находится ПЭВМ IBM PC/AT, на нижнем — интеллектуальное устройство связи с объектом в виде Еврокрейта 3У с измерительными и микропроцессорными модулями. Модули в крейте объединены в четыре измерительные процессорные станции (ИПС), каждая из которых обслуживает четыре датчика зазора, установленные на одной из ступеней компрессора или турбины. В состав ИПС входят три модуля,

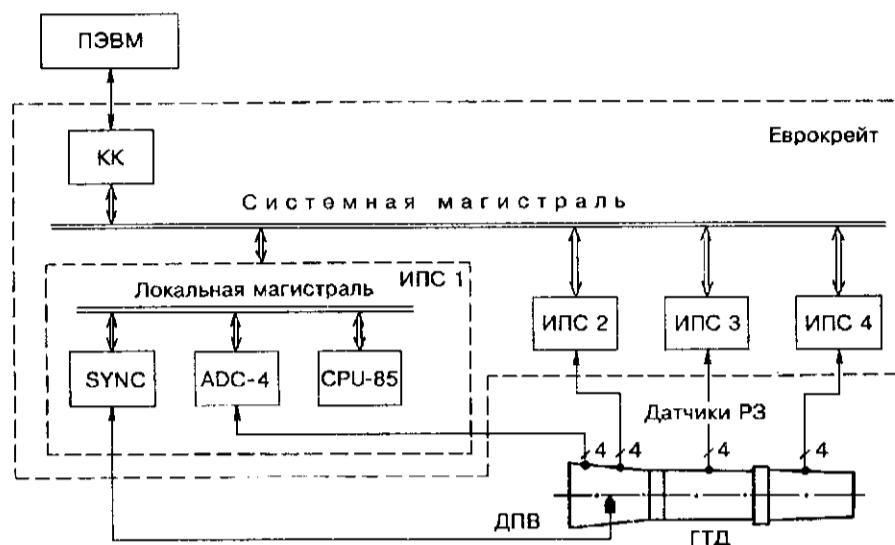


Рис. 3

объединенные локальной магистралью: процессорный (CPU-85), измерительный (ADC-4) и синхронизации (SYNC).

Процессорный модуль CPU-85 выполняет функции ВУ на структурной схеме рис. 1, поясняющей ММ. В его состав входит микропроцессор 1821BM85, ПЗУ — 16 Кбайт, ОЗУ — 16 Кбайт (в том числе энергонезависимое ОЗУ 8 Кбайт), энергонезависимый таймер-счетчик текущего времени, контроллер системной магистрали и буферные схемы локальной магистрали.

Модуль ADC-4 выполняет функции ИП и АЦП (см. рис. 1). В его состав входит 4-канальный импульсный преобразователь сигналов ВТ-датчиков зазора, реализующий метод первой производной [5]. Метод преобразования заключается в формировании импульсов напряжения питания мостовой измерительной цепи и фиксации производной тока в датчике в начальной области переходного процесса. Значение производной тока определяется величиной индуктивности датчика и, следовательно, измеряемым зазором. Модуль обеспечивает также аналого-цифровое преобразование милливольтных напряжений четырех термопар, предназначенных для контроля температуры датчиков зазора, а также сопротивления терморезистора холодных спаев термопар. В состав модуля входят измерительные преобразователи сигналов указанных датчиков в постоянное напряжение 0—10 В, аналоговый мультиплексор, АЦП и схема сопряжения с локальной магистралью.

Модуль SYNC выполняет функции ФСИ, изображенного на структурной схеме рис. 1. В его состав входят: усилитель-формирователь сигнала индукционного ДПВ, высокочастотный генератор тактовых импульсов с кварцевой стабилизацией частоты и три 16-разрядных программно-управляемых счетчика. Два из них включены последовательно и используются для измерения периода оборотов ротора, третий — в качестве генератора строб-импульсов.

Взаимодействие между ИПС и ПЭВМ верхнего уровня осуществляется по системной магистрали крейта через крейт-контроллер (КК). Данные, поступающие от ИПС, содержат информацию о величинах зазоров по каждой лопатке, измеренных в четырех точках по сечению ступени, значения температур в местах измерения зазора и оборотов ротора. ЭВМ верхнего уровня производит регистрацию всей поступающей от модулей информации на магнитном диске и осуществляет расчет физических значений измеряемых параметров в соответствии с введенными градуировочными характеристиками датчиков. Ввиду большого объема поступающих от модулей данных вывод результатов на экран пользователя производится в сжатой форме: в виде таблицы,

отражающей в наиболее общем виде состояние измеряемых параметров в контролируемых ступенях — средний, минимальный, максимальный зазоры, обороты ротора, температура. Дополнительной функцией таблицы является аварийная индикация выхода контролируемых параметров за границы зоны допуска. Перемещением курсора по клеткам таблицы пользователь может выбрать нужный параметр для отображения информации в более развернутой форме, например в виде графика изменения зазора по конкретной лопатке в заданной точке ступени компрессора или турбины. При этом система производит «подкачку» из базы данных всей накопленной за время испытания информации по этому параметру. Более сложная обработка и анализ результатов измерений, а также вывод на печать протоколов испытаний и графиков могут быть проведены после завершения испытаний на основе информации, хранящейся в базе данных эксперимента.

Проведенные метрологические исследования СИРЗ включают градуировку измерительных каналов с последующей оценкой систематической и случайной составляющих погрешности. Учитывая исключительную трудоемкость процедуры градуировки, проводимой по всем 16 каналам в диапазонах температур от нормальной до 450 °С (для компрессорных датчиков РЗ) и до 1000 °С (для турбинных датчиков), мы использовали специально разработанные технические и программные средства метрологической аттестации (МА). Они обеспечивают полную автоматизацию МА от установки величины зазоров и температуры до печати протокола с вычисленными значениями составляющих погрешностей во всем диапазоне зазоров и температур [6]. Полученные в процессе градуировки отсчеты аппроксимировались функцией двух переменных — зазоров и температуры [7]. В процессе метрологической аттестации исследовались восемь каналов измерения РЗ в компрессорах и восемь каналов в турбинах. Степень аппроксимирующего полинома по зазорам была выбрана равной четырем. Зависимость коэффициентов полинома от температуры аппроксимировалась полиномом третьей степени. Систематические составляющие погрешностей первой группы каналов, обслуживающих компрессор, не превышали 3 % при изменениях зазоров в диапазоне 0—2,5 мм и температуры от 20 до 450 °С. Систематические составляющие погрешностей второй группы каналов, обслуживающих турбину, в том же диапазоне изменения зазоров не превышали 5 % при изменении температуры до 1000 °С. Случайная составляющая погрешности по обжим группам каналов не превышала 0,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 1394912 Россия. Высокотемпературный проводниковый вихретоковый преобразователь / О. П. Скобелев, Ю. Н. Секисов, А. А. Хритин. Оpubл. 1995, Бюл. № 24.
2. Передельский Г. И. Мостовые цепи с импульсным питанием. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. А. с. 1779908 СССР. Способ измерения радиальных зазоров в турбомашине / В. М. Белкин, В. Н. Пинес, Ю. П. Секисов и др. Оpubл. 1992, Бюл. № 45.
4. Белкин В. М., Пинес В. Н., Скобелев О. П. и др. Компьютерная система измерения радиальных зазоров в турбокомпрессорах ГТД // Авиационная пром-сть. 1991. № 4. С. 11.
5. Скобелев О. П. Методы преобразования на основе тестовых переходных процессов // Измерения, контроль, автоматизация. 1980. № 1. С. 11.
6. Хритин А. А., Ковалева М. А. Микропроцессорная система для испытаний высокотемпературных датчиков перемещений // Метрологическое обеспечение машиностроительных отраслей промышленности: Тез. докл. Междунар. конф. Минск, 1992. С. 49.
7. Хритин А. А., Ковалева М. А. Аппроксимация градуировочных и температурных характеристик бесконтактных преобразователей перемещений в микропроцессорной измерительной системе // Метрология в прецизионном машиностроении: Тез. докл. Всесоюз. сем. Саратов, 1990. С. 27.

Поступила в редакцию 17 января 1996 г.