

В. А. Денисов, В. Е. Шатерников

## НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ГЕОМЕТРИИ ТЕЛ ПРЕРЫВИСТОЙ ФОРМЫ ЛОКАЛЬНЫМИ ВИХРЕТОКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В промышленности имеются в значительном количестве машины вращательного движения с поверхностями роторов, представляющими собой тела прерывистой формы (ТПФ).

Высокие скорости вращения роторов, воздействие на машины внешних механических факторов и работа машин при критических параметрах ставят задачу измерения перемещений и геометрии металлических тел прерывистой формы. Эти измерения необходимо производить в динамических режимах работы машин.

Источником перемещений вращающихся тел являются возмущения, вызванные неточностью балансировки, неуравновешенностью магнитных сил, действующих между ротором и статором, зазоры в подшипниках, необходимые для свободного вращения.

Воздействие внешних механических сил приводит ротор в состояние квазислучайного движения в пределах возможных перемещений.

Источником изменения геометрии вращающихся тел являются центробежные силы, возникающие при вращении. Так, например, центробежные силы вызывают упругий прогиб и растяжение коллекторных пластин, что приводит к необратимым искажениям геометрии контактной поверхности коллектора и к резкому ухудшению коммутации электрической машины [1].

Обычно относительные величины нарушения геометрии вращающихся ТПФ малы, но они могут оказаться достаточными для серьезных нарушений нормального режима работы машины [2].

Особо актуальна задача измерения перемещений и геометрии ТПФ при исследовании, доводке и контроле авиационных газотурбинных двигателей, турбонагнетателей, осевых вентиляторов и компрессоров, коллекторных электрических машин.

Анализируя требования, предъявляемые к измерениям этих машин, можно отметить, что они могут быть удовлетворены в

совокупности только при использовании бесконтактных преобразователей перемещений.

В последнее время для таких измерений все чаще применяется вихретоковый преобразователь перемещений (ВТПП) [3, 4].

В рассматриваемом случае измерения ВТПП удовлетворяет следующим требованиям:

а) в заданном диапазоне измерения функция преобразования перемещения близка к линейной с принятой точностью измерения;

б) обладает высокой динамической точностью;

в) геометрические размеры первичного преобразователя могут быть выбраны так, чтобы они не оказывали существенного влияния на характер рабочего процесса исследуемой машины;

г) позволяет четко локализовать поверхность ТПФ, взаимодействующую с преобразователем;

д) обладает наибольшей чувствительностью к измеряемым перемещениям и наименьшей — к дестабилизирующим факторам, обусловленным спецификой измерения (вариации температуры в зоне установки преобразователя, химического состава газа, электрофизических свойств измеряемого ТПФ и проч.).

При измерении перемещений и геометрии ТПФ с помощью ВТПП дестабилизирующие факторы (в основном температура) приводят к появлению систематических погрешностей [5]. Но поскольку цикл измерения значительно меньше существенного изменения дестабилизирующих факторов, можно с достаточной степенью точности считать их величиной, постоянной за цикл измерения. Практически за цикл измерения выбирается время, равное одному-двум оборотам ротора ТПФ.

С целью повышения точности измерения градуировка ВТПП производится в процессе самого измерения (в динамическом режиме работы машины). Это оказывается возможным благодаря тому, что на роторе ТПФ может быть выполнен или уже есть фиксированный перепад его геометрии. В ряде случаев для градуировки имеется возможность перемещения преобразователя с помощью микрометрического устройства.

Процесс измерения перемещения и геометрии ТПФ с помощью ВТПП можно представить как преобразование координатного перемещения поверхности ТПФ в амплитудно-временное или частотно-временное соотношения.

Для удобства рассмотрения областей применения различных типов первичных ВТПП, по аналогии с [6], условно разделим ТПФ на две группы:

ТПФ с большим шагом доминирующих размеров (ДР),

ТПФ с малым шагом ДР.

К первой группе отнесем ТПФ, у которых ширина каждого из ДР больше расстояния между ними, например, облопаченные диски газотурбинных двигателей, роторы осевых вентиляторов и компрессоров.

№№ д/п	Типы тахоимпульсных преобразователей	Выходной сигнал	Примеры применения. Измерение радиальных перемещений, геометрии
а			<p>роторов газотурбинных двигателей, турбокомпрессоров, осевых вентиляторов</p>
б			<p>— — —</p>
в			<p>и амплитуд колебания лопаток осевых турбомашин</p>
г			<p>коллекторов электрических машин</p>
д			<p>— — —</p>
е			<p>— — —</p>
ж			<p>— — —</p>
з			<p>и микрорельефа поверхности вращающихся тел, коллекторов электрических машин</p>

Рис. 1.

Ко второй группе отнесем ТПФ, у которых расстояния между ДР меньше их ширины, например, коллекторы электрических машин.

Следует подчеркнуть, что при условном разделении ТПФ мы исходим из практически встречающихся случаев измерения.

В дальнейшем будем рассматривать вращающиеся ТПФ с одинаковым шагом по ДР и измерение их радиальных перемещений

и геометрии, как относительное расположение ДР. Очевидно, что при измерении ТПФ второй группы взаимодействующая с первичным преобразователем поверхность должна быть меньше поверхности каждого измеряемого ДР.

В этом случае вариации по ширине ДР или по расстоянию между ними внутри измеряемого ТПФ не скажутся на точности измерения.

Следовательно, для повышения точности измерения ТПФ второй группы, а при малых размерах — и ТПФ первой группы необходимо четко локализовать поверхность, взаимодействующую с ВТПП, т. е. использовать локальный преобразователь. Существует несколько конструкций локальных вихретоковых преобразователей (рис. 1), которые могут быть использованы в качестве преобразователей перемещений в рассматриваемом случае измерения.

На рис. 1а приведен эскиз конструкции трансформаторного преобразователя «накладного типа» [5].

Генераторная  $W_T$  и измерительная  $W_n$  катушки обычно выполняются круглыми, но при достаточной протяженности ДР вдоль оси ротора ТПФ, с целью повышения чувствительности, могут быть выполнены эллиптической конфигурации.

Повышение локальности такого преобразователя осуществляется путем уменьшения диаметров его катушек. Приблизительно считается, что зона локальности (взаимодействующая с ВТПП поверхность) ограничивается по кругу с радиусом 1,5 радиуса генераторной катушки.

Однако этот путь повышения ограничивается тем, что при уменьшении диаметров катушек (менее  $2 \div 3$  мм) вносимый в преобразователь относительный импеданс, а следовательно, и его чувствительность резко уменьшаются.

Увеличение частоты питания с целью улучшения чувствительности к перемещениям ограничивается частотами  $25 \div 30$  мГц, выше которых из-за существенной емкости связи с ТПФ преобразователь работает неудовлетворительно.

На рис. 1б приведен эскиз конструкции дифференциального двухкатушечного преобразователя «накладного типа».

Генераторная  $W_T$  и измерительная  $W_n$  катушки расположены взаимно-перпендикулярно и могут быть круглой или прямоугольной конфигурации.

Величина перемещения  $x$  характеризуется амплитудами  $E_1$  и  $E_2$  импульсов, которые наводятся в измерительной катушке  $W_n$  за счет изменения конфигурации магнитного поля генераторной катушки  $W_T$  при ее вихретоковом взаимодействии с ДР.

Повышение локальности дифференциального преобразователя осуществляется, как и трансформаторного, путем уменьшения диаметра генераторной катушки и ограничивается теми же факторами.

На рис. 1в приведен пример использования дифференциального преобразователя для измерения угла перекоса  $\alpha$  ДР. При постоянстве скорости вращения ТПФ и при неизменном зазоре  $x$ ,

или при их коррекции, интервал времени между максимумами амплитуд  $E_1$  и  $E_2$  импульсов характеризует величину угла перекося  $\alpha$ .

Достоинством трансформаторного и дифференциального типов преобразователей является их низкая температурная погрешность измерения по сравнению с другими типами преобразователей. Рассматриваемые преобразователи целесообразно использовать при измерениях ТПФ первой группы.

На рис. 1г приведен эскиз конструкции преобразователя накладного типа, локализация в котором достигается с помощью диафрагмирования магнитного поля катушки  $W$  [7]. Диафрагма представляет собой металлический кольцевой экран. Локальность определяется внутренним диаметром экрана и диаметром катушки  $W$ . Вихретоковая связь катушки  $W$  с экраном уменьшает чувствительность такого преобразователя. Практически нецелесообразно выполнять эти преобразователи с внутренним диаметром экрана менее 3 мм. Зона локальности, как показали эксперименты при малых зазорах  $x$ , ограничивается по кругу с радиусом 1,5–1,9 внутреннего радиуса экрана. Такое расширение локальной зоны объясняется добавочным взаимодействием вихревых токов, наведенных по внутреннему диаметру экрана, с ТПФ.

На рис. 1д и 1е приведены эскизы конструкции преобразователей накладного типа с ферритовыми концентраторами [8, 9]. Локализация достигается за счет применения в качестве магнитопровода ферритов, которые благодаря высокой магнитной проницаемости «направляют» магнитное поле преобразователя строго по его оси. Однако потоки рассеяния, взаимодействующие с ТПФ, снижают локальность. Дальнейший ее путь — надежное экранирование этих потоков. Наименьшая достижимая зона локальности при удовлетворительной чувствительности представляет собой круг радиусом 2–3 мм на поверхности ТПФ.

На рис. 1ж приведен эскиз конструкции проводникового преобразователя. Катушка индуктивности  $W$  намотана на тороидальный ферритовый магнитопровод. Внешние проводники ее взаимодействуют с ТПФ. Применение ферритового магнитопровода улучшает локальность и чувствительность преобразователя. Зона локальности определяется сечением внешней стороны катушки  $W$ , которое может быть сделано практически весьма малого размера, а также величиной  $x$ . Показано [10], что поверхность, взаимодействующая с преобразователем, ограничивается полосой, ширина которой более чем в пять раз превышает расстояние  $x$  до измеряемого ДР.

На рис. 1з приведен эскиз конструкции щелевого преобразователя [4]. Ферритовый магнитопровод имеет разрез в виде щели. Поток катушки замыкается через магнитопровод и щель. С поверхностью ТПФ взаимодействует магнитное поле, вытесненное из щели, что приводит к изменению импеданса катушки  $W$  преобразователя. Ширина зоны контроля определяется шириной щели и величиной  $x$ . Щель преобразователя может быть выполнена

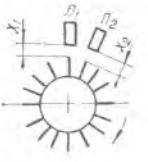
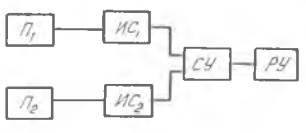
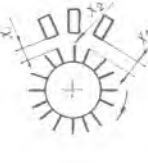
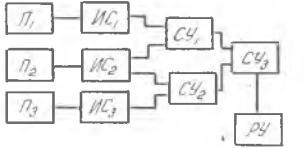
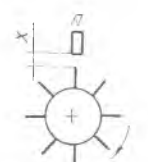
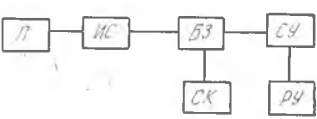
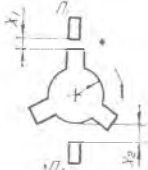
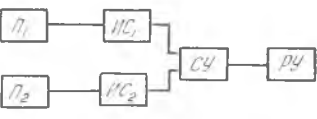
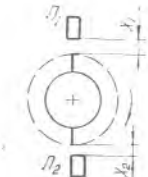
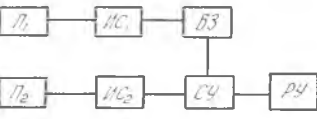
№№ п/п	Способы измерения геометрии вращающихся тел прерывистой формы	Блок-схемы реализации способов
а		
б		
в		
г		
д		

Рис. 2.

микронных размеров. Следует отметить, что при увеличении локальности проводникового и щелевого датчиков за счет уменьшения сечения катушки или ширины щели соответственно уменьшается и диапазон контролируемых перемещений.

На рис. 1 показаны также и формы выходных амплитудно-временных сигналов, получаемых с различных типов ВТПП. Крутизна фронтов этих сигналов позволяет судить о локальности преобра-

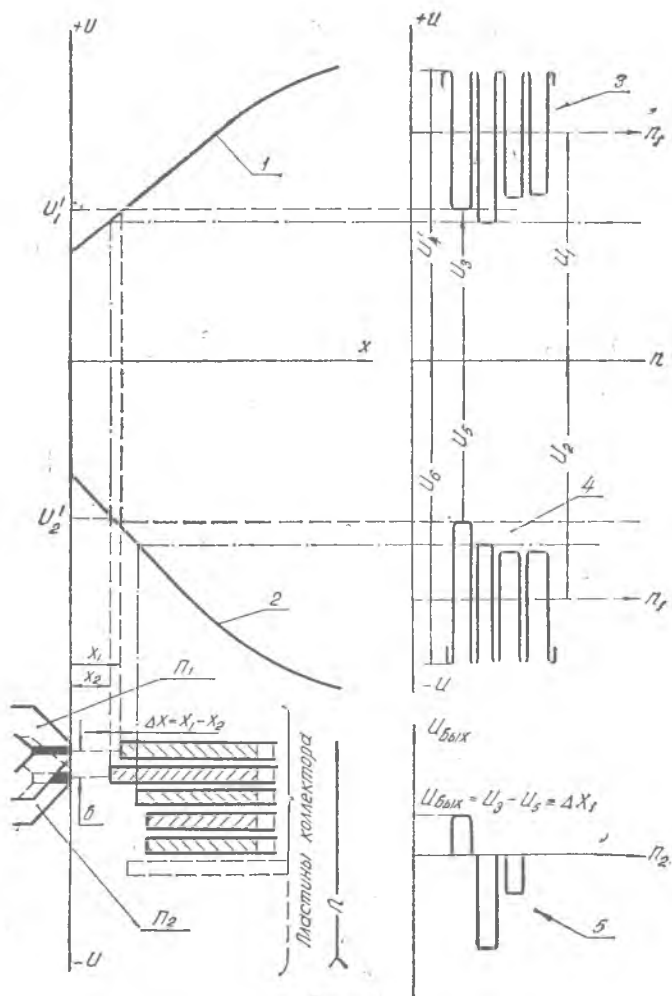


Рис. 3.

зователей при измерении радиальных перемещений ТПФ. Очевидно, что из рассмотренных типов наибольшей локальностью обладает щелевой преобразователь.

Описанные выше типы ВТПП позволяют применить для измерения геометрии вращающихся ТПФ некоторые способы с подавлением мешающего фактора — перемещения их в радиальном направлении за счет эксцентриситета и «всплытия» валов.

На рис. 2а приведен дифференциальный способ измерения геометрии и блок-схема его реализации.

На рис. 3 приведены графики, поясняющие на примере способ

измерения геометрии контактной поверхности коллектора электрической машины.

Этот способ был реализован в приборе для комплексных измерений механических факторов коммутации электрических машин, разработанном авторами.

На рис. 3 показаны:

1, 2 — характеристики преобразования измеряемых перемещений;

$x_1$  — зазор между преобразователем  $\Pi_1$  и расположенной под ним коллекторной пластиной;

$x_2$  — зазор между преобразователем  $\Pi_2$  и соответствующей пластиной;

$\Delta x = x_1 - x_2$  — относительное изменение геометрии поверхности коллектора;

$b$  — расстояние между щелями ВТПП, равное шагу коллекторных пластин.

При вращении коллектора относительно преобразователей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  на выходах измерительных схем ИС<sub>1</sub>, ИС<sub>2</sub> (рис. 2а) образуются разнополярные импульсы 3, 4. Их амплитуды для позиции, показанной на рис. 3, определяются:

$U_3$  — зазором  $x_1$ ;

$U_{4,6}$  — зазором, равным «бесконечности», поскольку локальная зона каждого преобразователя по ширине меньше расстояния между коллекторными пластинами;

$U_5$  — зазором  $x_2$ .

Импульсы 3 и 4 находятся на уровнях  $U_1$  и  $U_2$ , величины которых обусловлены средней величиной зазора «безопасности» установленных преобразователей, отфильтровываются от этих уровней и подаются на вход суммирующего устройства СУ (рис. 2а). Результатом суммирования являются импульсы 5, амплитуда первого из которых равна  $U_{\text{вых}} = U_3 - U_5$  и при идентичности преобразователей определяется разностью зазоров

$$\Delta x = x_1 - x_2,$$

т. е. относительным единичным изменением геометрии коллектора.

Очевидно, что при вращении коллектора будет аналогичным образом измерена его геометрия по поверхностям всех коллекторных пластин.

Радиальное перемещение коллектора относительно преобразователей (например, за счет биения ротора машины) ввиду малого смещения по окружности коллектора двух соседних пластин приведет к одинаковому изменению амплитуд импульсов 3 и 4.

В этом случае при линейности и идентичности характеристик преобразования 1, 2 в диапазоне возможных радиальных перемещений коллектора на выходе СУ будет прежнее напряжение.

Таким образом, измерение геометрии коллектора с помощью описываемого метода позволяет устранить мешающий измерению фактор — его перемещение.



При отключении одного из преобразователей ( $P_1$  или  $P_2$ ) производится измерение общего биения поверхности коллектора.

При исследовании механики скользящего контакта [11] часто необходимо без промежуточных вычислений измерять так называемое «ускорение формы поверхности», которое представляет собой вторую производную от геометрии вращающегося ТПФ. При этом должен быть, естественно, подавлен мешающий измерениям фактор — радиальное перемещение ТПФ.

На рис. 2 б приведены способ, позволяющий производить такие измерения, и блок-схема реализации способа.

Преобразователи  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  установлены над тремя соседними ДР.

Суммирующие устройства  $SU_1$ ,  $SU_2$ ,  $SU_3$  осуществляют алгебраическое сложение сигналов, поступающих с выходов измерительных схем  $ИС_1$ ,  $ИС_2$ ,  $ИС_3$ . С выхода  $SU_3$  снимается сигнал, пропорциональный  $x_1 - x_2 - x_3$  и характеризующий «ускорение формы поверхности» измеряемого ТПФ.

При малом шаге ДР по окружности ТПФ изменение зазоров  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  за счет радиального перемещения вращающегося ТПФ практически одинаково с принятой точностью. Таким образом, как и в предыдущем случае, устраняется мешающий фактор — перемещение ТПФ.

В ряде случаев по конструктивным соображениям не представляется возможным применение преобразователей больше одного.

На рис. 2в приведен способ измерения геометрии вращающегося ТПФ с помощью одного ВТПП и блок-схема реализации способа.

Сигналы, характеризующие зазоры ДР за первый оборот ТПФ, без задержки запоминаются в суммирующем устройстве СУ. С началом второго оборота синхронизированный ключ СК включает блок задержки БЗ, осуществляющий задержку сигналов на единственный шаг по доминирующим размерам.

В СУ осуществляется алгебраическое сложение этих сигналов, а их разница, как было показано выше, характеризует геометрию измеряемого ТПФ с подавлением мешающего фактора — его перемещения.

В ряде случаев для измерения геометрии ТПФ можно использовать специфику конфигурации его поверхности. На рис. 2г приведен пример такого измерения. При постоянстве радиуса  $R_0$  и при измерении геометрии по трем ДР производится алгебраическое суммирование сигналов, характеризующих зазоры  $x_1$  и  $x_2$ . Сигналы, поступающие с выхода СУ, характеризуют только геометрию ТПФ по его ДР.

При измерении геометрии ТПФ, ДР которого изменяются в пределах одного оборота, может быть рекомендован способ, представленный на рис. 2д.

Пара диаметрально расположенных преобразователей  $P_1$  и  $P_2$

