

Ф. Б. ГРИНЕВИЧ, Е. Е. ДОБРОВ, В. И. НИКУЛИН

(Новосибирск)

МОСТОВОЙ АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ РОТОРОМ И СТАТОРОМ ТУРБОМАШИН

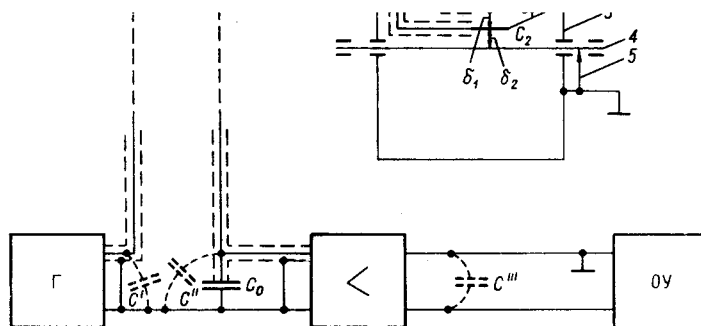
Описывается прибор для измерения радиальных зазоров между ротором и статором тепловых турбин, в основу которого положен емкостный автокомпенсационный мост переменного тока.

Задача бесконтактного измерения зазоров и перемещений при высокой температуре, возникающая во многих практических случаях, до сих пор не имеет удовлетворительного решения. Особенно актуальна эта задача при контроле радиальных зазоров между неподвижными и вращающимися частями тепловых турбин большой мощности. Практика показывает, что большинство крупных аварий, связанных с необратимым изгибом вала турбины, вызывается недопустимым соприкосновением ротора и статора во время вращения.

Известны устройства для измерения зазоров между ротором и статором тепловых турбин, в которых используются индуктивные преобразователи перемещения [1]. Однако применение индуктивных датчиков затрудняется рядом их серьезных недостатков. В самом деле, наиболее термостойкие стали, применяемые в турбостроении, не обладают ферромагнитными свойствами; невысокая термостойкость изоляции обмоточных проводов ограничивает предельную рабочую температуру датчиков 400—500°С, тогда как рабочая температура современных турбин достигает 800°С; близость точки Кюри магнитного материала сердечника к предельной рабочей температуре турбины снижает чувствительность датчиков и приводит к появлению значительной температурной погрешности; нелинейность характеристики датчика затрудняет отдельные и независимые измерения статического зазора и параметров вибраций; для большинства систем индуктивных датчиков чувствительность уменьшается с увеличением частоты питания, что создает дополнительные трудности при измерении быстропеременных зазоров.

Использование емкостных датчиков для измерения перемещений при высокой температуре в принципе позволяет исключить указанные недостатки. Однако сложность динамических измерений сравнительно малой емкости датчика на фоне значительно больших по величине паразитных емкостей и емкости соединительного кабеля долгое время ограничивала практические работы в этом направлении.

В последнее время описан ряд автокомпенсационных мостов переменного тока, уравнивание которых осуществляется с помощью регулировки напряжений в плечах мостовой цепи без каких-либо изменений пассивных параметров моста [2, 3]. Сравнительно высокая точность, большое быстродействие и возможность практически полного устранения влияния паразитных емкостей позволяют создать на основе автокомпенсационных мостовых цепей весьма совершенные приборы.



Ниже описывается прибор для измерения радиальных зазоров между ротором и статором турбомашин, в основу которого положена мостовая автокомпенсационная цепь, исследованная в [3].

Электрическая схема устройства представлена на рисунке. Устройство состоит из рабочего конденсатора C_2 , компенсационного конденсатора C_1 , генератора звуковых колебаний Γ , усилителя с большим коэффициентом усиления и отсчетного устройства $ОУ$. Плоские конденсаторы C_2 и C_1 образуются специальными электродами 1 и 2, помещенными внутрь цилиндра машины 3 в непосредственной близости от ротора 4. При этом обкладками рабочего конденсатора являются поверхность ротора 4 и пластина 2, обкладками компенсационного конденсатора — пластины 1 и 2. Специальное экранирование исключает емкостную связь ротора 4 с пластиной 1. Цилиндр электрически соединен с ротором при помощи скользящего контакта 5 и заземлен. Выход усилителя также заземлен.

Схема работает по принципу статической компенсации, которая достигается с помощью автоматического уравнивания токов в ветвях, содержащих емкости C_1 и C_2 . На конденсатор C_1 подается напряжение от генератора питания, а на конденсатор C_2 — напряжение с выхода усилителя. Сравнение токов в ветвях осуществляется на конденсаторе C_0 , откуда напряжение, пропорциональное разности токов, подается на вход усилителя. Если коэффициент усиления усилителя достаточно велик, то эта разность и соответственно напряжение на входе усилителя близки к нулю. При этом C_1 к C_2 так относится, как напряжение на выходе усилителя U_y к напряжению на выходе генератора U_r . Поскольку емкость C_2 является функцией измеряемого зазора, мерой последнего может быть величина выходного напряжения усилителя. Без учета краевых эффектов в системе измерительных электродов эта величина определяется выражениями [3]:

$$U_y = U_r \frac{\delta_2}{\delta_1} \frac{1}{\sqrt{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^2}}; \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{K} \left(1 + \frac{C_0 \delta_2}{\varepsilon S} + \frac{\delta_2}{\delta_1} \right),$$

где δ_2 и δ_1 — зазоры между пластинами рабочего и компенсационного конденсаторов;

β — безразмерный коэффициент;

K и φ — коэффициент усиления и угол сдвига фаз усилителя;

ε — диэлектрическая проницаемость среды, окружающей датчик;

S — площадь пластин датчика.

При достаточно большом коэффициенте усиления величина β стремится к нулю и выражение (1) упрощается:

$$U_y = U_r \frac{\delta_2}{\delta_1}. \quad (2)$$

При постоянстве U_r и δ_1 шкала прибора, измеряющего величину зазора δ_2 , получается линейной и градуируется от нуля до некоторого номинального значения зазора. Практически в целях безопасности датчик всегда удален от ротора на некоторое расстояние. При этом начальная часть шкалы не используется. Указанный недостаток можно ликвидировать, если в качестве выходной величины $U_{\text{вых}}$ использовать разность $k_y U_y - U_r$:

$$U_{\text{вых}} = k_y U_y - U_r = U_r k_y \frac{\Delta}{\delta_1},$$

где k_y — коэффициент передачи напряжения U_y к вычитающей схеме;

Δ — отклонение зазора δ_2 от некоторого опорного значения δ_0 ;

$\delta_0 = \frac{\delta_1}{k_y}$ — опорное значение зазора.

Варьируя коэффициент k_y , можно обеспечить выбор желаемого значения δ_0 без изменения зазора δ_1 компенсационного конденсатора.

Выражение (2) справедливо, строго говоря, для статического режима измерения. Быстрые колебания зазора δ_2 , вызываемые биениями ротора, приводят к амплитудной модуляции выходного напряжения U_y и могут быть измерены по амплитуде огибающей. Если частота модуляции значительно меньше частоты генератора питания, схема находится в квазистационарном режиме и связь между амплитудой огибающей напряжения U_y и амплитудой колебаний зазора определяется выражением вида (2).

Важным свойством рассматриваемого устройства является пониженная чувствительность к изменению паразитных емкостей и емкости соединительного кабеля. При помощи простого экранирования (см. рисунок) паразитные емкости C' , C'' и C''' сводятся к трем характерным участкам измерительной цепи: выход генератора, вход и выход усилителя. Если выходные сопротивления усилителя и генератора малы, а напряжение в измерительной диагонали (на входе усилителя) близко к нулю, то значительные колебания емкостей C' , C'' и C''' не влияют на величину напряжения U_y .

Как следует из (2), основная погрешность прибора определяется главным образом стабильностью напряжения генератора U_g , постоянством зазора компенсационного конденсатора δ_1 и точностью отсчетного устройства, осуществляющего измерение усредненного значения напряжения U_y и амплитуды его огибающей. Влияние изменений других параметров схемы (C_0 , ϵ , S , K и φ) значительно ослаблено, так как коэффициент усиления K достаточно велик [3].

Путем лабораторной поверки установлено, что прибор обладает следующими техническими данными: диапазон измерения по каналу усредненного значения зазора 0,3—2 мм, по каналу амплитуды вибраций с частотой 10—50 гц — 0—0,25 мм; основная погрешность измерения по обоим каналам не превышает $\pm 2\%$; рабочая частота 5 кГц; изменение диэлектрической проницаемости среды не влияет на показания прибора; изменение емкости соединительного кабеля длиной 100 м на $\pm 50\%$ вносит дополнительную погрешность $\pm 1\%$; изменение температуры в месте установки датчика в диапазоне 0—500°С вносит дополнительную погрешность, не превышающую $\pm 5\%$.

Прибор собран полностью на полупроводниковых элементах. В конструкции датчика использованы жаропрочная сталь и керамика.

Хорошие метрологические характеристики и повышенное быстродействие устройства позволяют надеяться, что оно найдет широкое применение для контроля радиальных зазоров между статором и ротором теплоэнергетических турбин, а также во всех других случаях, когда требуется раздельное и независимое измерение статических и динамических перемещений в условиях высокой температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Корсунский, А. С. Лагунов, Л. П. Байвель. Применение индукционных датчиков для измерения перемещений при высокой температуре.— Измерительная техника, 1963, № 8.
2. Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, К. Б. Карандеев. Автокомпенсационные мостовые цепи.— Автометрия, 1965, № 5.
3. Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, В. И. Никулин. Об одной автокомпенсационной схеме для измерения емкости.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды VI Всесоюзной конференции, 1964 г.), т. II. Новосибирск, «Наука», 1966.

Поступила в редакцию
31 марта 1966 г.