

УДК 621.165

**К.Н. БОРИШАНСКИЙ***ОАО «Силловые машины» «ЛМЗ», Санкт-Петербургский филиал, Россия***ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО МЕТОДА КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК И ВАЛОПРОВОДА ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ТУРБОАГРЕГАТА**

Рассмотрено влияние нестабильности угловой скорости ротора мощной паровой турбины на точность регистрации колебаний рабочих лопаток с помощью дискретно-фазового метода. Рекомендовано изменение методики измерений, позволяющее повысить их точность. Показано, что с помощью датчиков, контролирующих вибрационное состояние лопаток, можно одновременно получить ценную информацию о некротных крутильных колебаниях валопровода. Изложенная методика может быть эффективно использована при определении с помощью дискретно-фазового метода вибрационного состояния лопаток и роторов мощных паровых турбин, например, при сбросе нагрузки.

**колебания, турбина, лопатка, ротор, датчик, контроль, дискретно-фазовый метод**

Одним из наиболее перспективных методов контроля вибрационного состояния рабочих лопаток турбин в эксплуатационных условиях является так называемый дискретно-фазовый (ДФМ), при котором о колебаниях судят по показаниям неподвижных датчиков, расположенных против торцов вращающихся лопаток [1]. При использовании ДФМ для контроля вибрационного состояния лопаток последних ступеней мощных паровых турбин необходимо учитывать, что лопатки в большинстве случаев соединяются замкнутыми на круг связями и поэтому наибольший интерес представляют совместные колебания лопаточного венца с различными числами узловых диаметров, но без узловых окружностей. При этих колебаниях периферийные сечения лопаток перемещаются практически строго в аксиальном направлении, что учитывается при разработке методики измерений [2]. При испытаниях бандажированных лопаток в пределах полук устанавливаются магниты малого диаметра, а поперечные сечения сердечников индукционных датчиков выполняют в виде вытянутых прямоугольников, минимальная ось инерции которых составляет определённый угол с осью турбины. Для повышения точности измерительная пара составляется из двух датчиков, распо-

ложенных на небольшом, порядка 50 мм, расстоянии друг от друга (база пары  $S$ ), причём поперечные сечения сердечников датчиков расположены под углами  $\pm \beta$  к оси турбины. Для более полной информации о колебаниях устанавливается несколько, обычно 3 пары датчиков по окружности колеса. Колебания небандажированных лопаток, соединённых замкнутыми на круг связями, регистрируются индукционными датчиками с круглыми сердечниками, а база датчиков  $S$  выбирается значительно большей. Это вызвано тем, что для получения максимального сигнала необходимо, чтобы фаза колебаний за время перемещения лопатки на расстояние  $S$  изменилась на  $180^\circ$ .

При проведении вибрационных испытаний в эксплуатационных условиях на ЛМЗ используется аппаратура НПП «Мера», в которой интервалы времени измеряются с помощью частоты 40 МГц. Это позволяет измерять амплитуды колебаний даже самых длинных лопаток с точностью до 0,0165 мм, а обороты – с точностью до 0,00375 об/мин. Обороты определяются как с помощью «обычного» оборотного датчика, расположенного в районе полумуфты ротора, так и с помощью одного из «лопаточных» датчиков при условии учёта сигнала только от од-

ной лопатки. Так как при использовании ДФМ регистрируется не весь процесс, а только его дискретные значения, то при обработке результатов считается, что угловая скорость  $\omega$  на протяжении  $i$ -го оборота сохраняется неизменной и может получить небольшое приращение  $\Delta\omega$  на протяжении  $I + 1$ -го оборота. Пример записи оборотов при нагрузке турбины около 10% приведён на рис. 1.

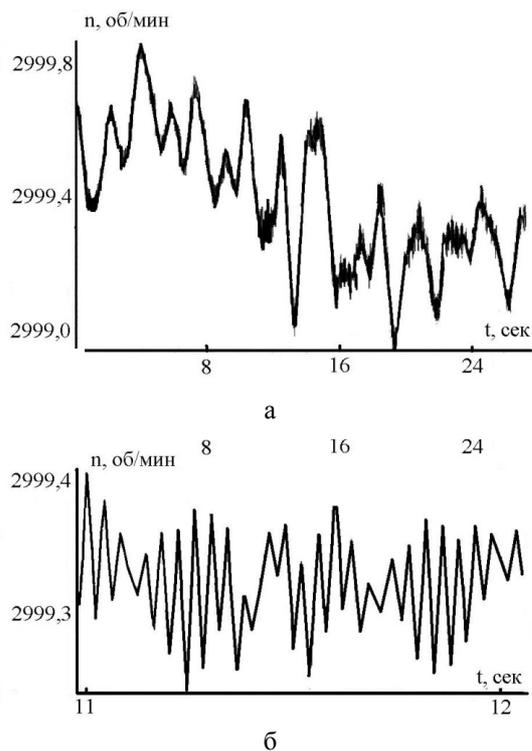


Рис. 1. Зависимость от времени числа оборотов в течение 27 секунд (а) и 1 секунды (б)

Как видно, имели место низкочастотные изменения оборотов, определяемые нестабильностью сети, и сравнительно высокочастотные, с «измеренной» частотой ( $f_{изм}$ ) около 20 Гц, определяемые некротными колебаниями ротора. Гармонический анализ сигнала оборотного датчика позволил установить, что имелись 2 частоты:  $f_{1изм} \approx 6$  Гц и  $f_{2изм} \approx 23,5$  Гц, причём величина второй гармоники была больше.

При использовании ДФМ между истинной частотой  $f$  и величиной  $f_{изм}$  имеет место соотношение:

$$f = k \cdot n \pm f_{изм}, \quad (1)$$

где  $k = 0; 1; 2; 3; \dots, n$  – число оборотов в секунду.

Для перехода к частоте  $f$  необходимо использовать результаты дополнительных измерений. Кроме того, необходимо оценить возможные погрешности измерения колебаний лопаток, вызванные изменением угловой скорости ротора на протяжении оборота. Сопоставление показаний оборотного датчика и лопаточного, используемого в качестве оборотного, позволило установить, что имели место некротные крутильные колебания ротора, а не его несинхронная прецессия.

Оценим погрешности измерения колебаний лопаток при условии, что угловая скорость ротора изменяется по закону

$$\omega(t) = \omega_0 + b \sin(\omega_1 t + \alpha), \quad (2)$$

где  $b \ll \omega_0$ ,  $\omega_1$  .

Если какая-либо  $j$ -ая лопатка расположена под углом  $\varphi$  от точки, определяющей начало оборота, то при условии, что угловая скорость ротора выражается формулой (2), будет меняться отношение  $t_i / T_i$ , где  $t_i$  и  $T_i$  – время поворота ротора на угол  $\varphi$  и  $2\pi$  при  $i$ -м замере. Так как времени  $T_i$  соответствует длина окружности  $2\pi R$  (где  $R$  – радиус установки лопаточных датчиков ДФМ), то, при изменении угловой скорости за оборот, расстояние  $S_i$ , соответствующее повороту ротора на угол  $\varphi$ , будет зависеть от номера замера. Различия в величинах  $S_i$  при последующих замерах рассматриваются как колебания лопатки.

Погрешность при определении расстояния  $S_i$  ( $\delta S_i$ ) будет равняться следующей величине:

$$\delta S_i = \frac{Rb}{\omega_1} \left[ \frac{\varphi}{\pi} \sin \frac{\pi \omega_1}{\omega_0} \cos \left( \frac{\pi \omega_1}{\omega_0} + \alpha_i \right) - 2 \sin \frac{\varphi \omega_1}{2 \omega_0} \cos \left( \frac{\varphi \omega_1}{2 \omega_0} + \alpha_i \right) \right]. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что, независимо от отношения  $\omega_1 / \omega_0$  и начальной фазы  $\alpha_i$ , погрешность измерений стремится к нулю в двух случаях: при  $\varphi \rightarrow 0$ , т.е. при малых  $S = R\varphi$ , а также при  $\varphi \rightarrow 2\pi$ .

Для некротных колебаний максимальная за оборот величина погрешности  $\delta S_{\max}$  будет равна:

$$\delta S_{\max} = \frac{Rb}{\omega_1} \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (4)$$

$$A = \left( \frac{\phi}{2\pi} \sin \frac{2\pi\omega_1}{\omega_0} - \sin \frac{\phi\omega_1}{\omega_0} \right),$$

$$B = \left( \frac{\phi}{\pi} \sin^2 \frac{\pi\omega_1}{\omega_0} - 2 \sin^2 \frac{\phi\omega_1}{2\omega_0} \right).$$

Так как величины  $\delta S_i$  при последующих оборотах могут геометрически суммироваться, то максимально возможная погрешность  $\delta S_{1\max}$  будет связана с величиной  $\delta S_{\max}$  приближённым соотношением:

$$\frac{\delta S_{\max}}{\delta S_{1\max}} \approx 2 \sin \frac{\pi\omega_1}{\omega_0}. \quad (5)$$

Если определяются расстояния между  $j$ -й и  $k$ -й лопатками, расположенными под углами  $\phi_1$  и  $\phi_2$  к точке, определяющей начало оборота, то максимальная погрешность за оборот будет равна:

$$\delta S_{\max}(kj) = RbC/\omega_1, \quad (6)$$

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2};$$

$$C_1 = \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{2\pi} \sin \frac{2\pi\omega_1}{\omega_0} - \sin \frac{\phi_2\omega_1}{\omega_0} + \sin \frac{\phi_1\omega_1}{\omega_0};$$

$$C_2 = \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{\pi} \sin^2 \frac{\pi\omega_1}{\omega_0} - 2 \sin^2 \frac{\phi_2\omega_1}{2\omega_0} + 2 \sin^2 \frac{\phi_1\omega_1}{2\omega_0}$$

При выполнении условия (2) максимальные отклонения от среднего значения за оборот угловой скорости ( $\Delta\omega_{\max}$ ) и числа оборотов ротора в секунду ( $\Delta n_{\max}$ ) будут определяться формулами:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{\max} &\approx \frac{b\omega_0}{\pi\omega_1} \sin \frac{\pi\omega_1}{\omega_0}; \\ \Delta n_{\max} &\approx \frac{30b\omega_0}{\pi^2\omega_1} \sin \frac{\pi\omega_1}{\omega_0}. \end{aligned} \quad (7)$$

Связь между величинами  $\Delta\omega_{\max}$  и  $\Delta n_{\max}$  и максимальными отклонениями от средних значений за всё время измерений –  $\Delta\omega_{1\max}$  и  $\Delta n_{1\max}$  – будут определяться приближённой формулой (5).

Используя формулы (5) – (7), найдём связь между максимальными отклонениями оборотов от сред-

него и максимальными погрешностями измерений при определении расстояния между лопатками.

$$\begin{aligned} \frac{\delta S_{1\max}}{\Delta n_{1\max}} &= \frac{\delta S_{\max}}{\Delta n_{\max}} = \frac{\pi^2 RC}{30\omega_0 \sin \frac{\pi\omega_1}{\omega_0}} = \\ &= \frac{\pi^2 R}{30\omega_0} \left( \frac{\delta S}{\Delta n} \right)_{отн}, \end{aligned} \quad (8)$$

где величина  $C$  входит в формулу (6).

Соотношение (8) можно использовать при решении двух задач: оценки погрешностей при определении колебаний лопаток и определения истинной частоты крутильных колебаний ротора. В качестве примера рассмотрим данные о вибрации лопаток в период времени, для которого на рис.1, б показано изменение оборотов. Зависимость отклонений показаний от среднего –  $\Delta S$  – приведены на рис. 2.

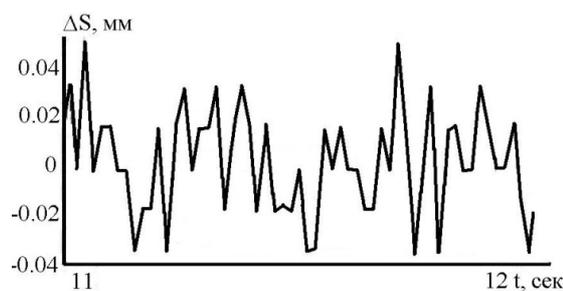


Рис. 2. Зависимость  $\Delta S$  от времени

Как видно, величины  $\Delta S_i$  оказались весьма малы. Из 6 датчиков ДФМ, составляющих 3 «обычные» пары, можно составить 15 различных пар, отличающихся как базами, так и углами установки сердечников по отношению к оси турбины. Например, можно составить пары с базами более 1000 мм и одинаковыми углами установки сердечников датчиков. Особенности измерений с помощью подобных пар совпадают с особенностями измерений колебаний небандажированных лопаток. Программа обработки результатов измерений позволяет использовать 1 датчик ДФМ в качестве оборотного и лопаточных и с его помощью определять взаимные смещения лопаток, расположенных на различных угловых расстояниях друг от друга. Так как колебания лопаток почти полностью отсутствовали (рис. 2), то

изменение величин «измеренных взаимных смещений» для различных пар лопаток будет означать изменение погрешности измерений и её зависимость от величин  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\omega_1/\omega_0$  в соответствии с формулой (6). Величины  $\varphi_1$  и  $\varphi_2 - \varphi_1$  в формуле (6) могут изменяться в диапазоне от 0 до  $2\pi$ , что соответствует изменению номеров лопаток и углового расстояния между лопатками, для которых определяются взаимные смещения. Так как «измеренные» частоты колебаний ротора составляли примерно 6 и 23,5 Гц, то, в соответствии с формулой (1), необходимо при различных  $\varphi_1$  и  $\varphi_2 - \varphi_1$  определить зависимость величины  $(\delta S/\Delta n)_{отн}$  для  $\omega_1/\omega_0 = 0,12; 0,47; 0,53; 0,88; 1,12; 1,47$  и т.д. Результаты вычислений величин  $(\delta S/\Delta n)_{отн}$  приведены на рис. 3.

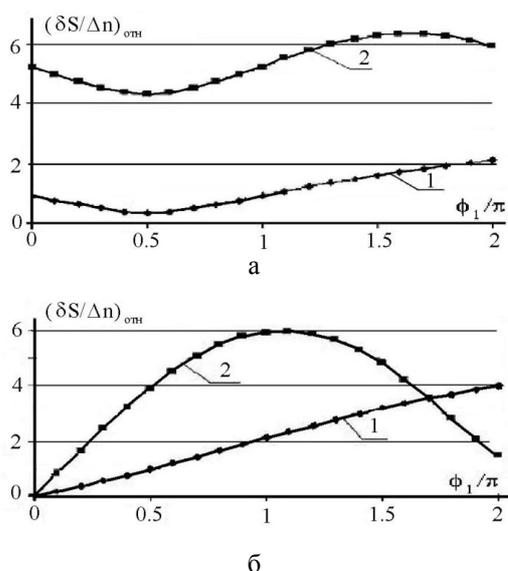


Рис. 3. Расчётная зависимость величин  $(\delta S/\Delta n)_{отн}$  от  $\omega_1/\omega_0$  при различных значениях  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ :  
а –  $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$ ; б –  $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi$ ;  
1 и 2 соответствуют значениям  $\omega_1/\omega_0 = 0,47$  и  $0,88$ .

Определив экспериментальную зависимость  $\Delta S$  и  $\Delta S/\Delta n$  от  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и сопоставив её с расчётными данными, подобными изображённым на рис.3, можно найти отношение  $\omega_1/\omega_0$ , обеспечивающее наилучшее согласование экспериментальных и расчётных величин, т.е. определить истинную частоту колебаний. Сопоставление экспериментальных и рас-

чётных результатов позволило установить, что фактически имело место отношение  $\omega_1/\omega_0 = 0,88$ , т.е. колебания ротора происходили с частотой 44 Гц. Как следует из рис.3, при  $\varphi_1 = 0,5\pi$ ,  $\varphi_2 = 2,5\pi$  на показания лопаточных датчиков должны сказаться колебания ротора с частотой 44 Гц, а при  $\varphi_1 = 2\pi$ ,  $\varphi_2 = 4\pi$  – с частотой 23,5 Гц. Экспериментальная зависимость изменения показаний лопаточного датчика от времени представлена на рис. 4.

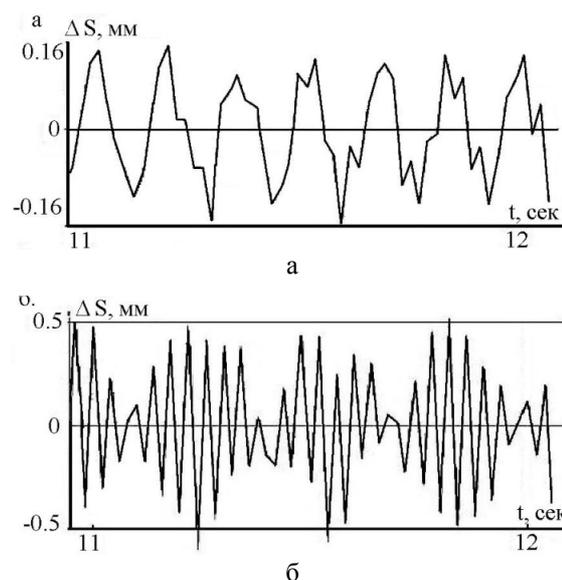


Рис. 4. Экспериментальная зависимость показаний от времени:  
а –  $\varphi_1 \approx 0,5\pi$ ,  $\varphi_2 \approx 1,5\pi$ ;  
б –  $\varphi_1 \approx 2\pi$ ,  $\varphi_2 \approx 4\pi$

Расчётные результаты рис. 3 полностью подтвердились: на рис.4, а «взаимные смещения» лопаток происходили в основном с  $f_{изм} = 6$  Гц ( $f = 44$  Гц), на рис.4, б – с частотой 23,5 Гц и определялись нестабильностью угловой скорости ротора.

Учитывая, что при изменении угловой скорости ротора по закону (2) амплитуда крутильных колебаний в месте установки лопаточных датчиков равняется  $A = Rb/\omega_1$  и используя соотношения (5), (7) и (8), получим следующую формулу:

$$A = \frac{2\delta S_{1max}}{(\delta S / \Delta n)_{отн}}. \quad (9)$$

Определив экспериментально  $\delta S_{1max}$  для конкретных значений  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и вычислив для этого

случая по формулам (6) и (8) величину  $(\delta S/\Delta n)_{\text{отн}}$ , можно найти амплитуды крутильных колебаний ротора. Таким образом, показания лопаточных датчиков ДФМ можно использовать в качестве усилителя и анализатора сигналов колеблющегося ротора. Ценность подобной информации определяется тем, что стандартная виброаппаратура вообще не регистрирует крутильные колебания ротора. Сопоставление данных рис.2 и 4 свидетельствует о том, что при больших базах пар датчиков нестабильность угловой скорости ротора может привести к значительным погрешностям. При некоторых режимах работы возможно появление угловых ускорений  $\varepsilon$ , постоянных на протяжении оборота. В этом случае при определении расстояния между лопатками с координатами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  возникнет погрешность:

$$\delta S(kj) = \frac{R\varepsilon}{\omega_0^2} \left( \pi\varphi_2 - \frac{\varphi_2^2}{2} - \pi\varphi_1 + \frac{\varphi_1^2}{2} \right). \quad (10)$$

Для устранения погрешностей, определяемых формулами (6) и (10), необходимо изменить методику измерений. Многократного уменьшения погрешностей можно достичь, если измерять не амплитуды, а взаимные смещения лопаток, практически одновременно проходящих мимо датчиков пары. Окружное расстояние между датчиками следует выбирать так, чтобы лопатки, одновременно проходящие мимо датчиков, колебались в противофазе. Погрешности измерений, определяемые формулами (3) или (4), при  $\varphi \approx 0$  будут весьма малы даже при больших величинах  $b$  и  $\varepsilon$ . В качестве примера на рис.5 представлены результаты измерения взаимных смещений лопаток с помощью пары, база которой в 22 раза превышала базу датчиков на рис. 2.

Как видно, результаты измерений на рис. 2 и 5 оказались значительно меньшими, чем на рис. 4.

Частота некрatных крутильных колебаний ротора  $f$  может быть определена с помощью двух оборотных датчиков, расположенных на угловом расстоянии  $\varphi$  друг от друга.

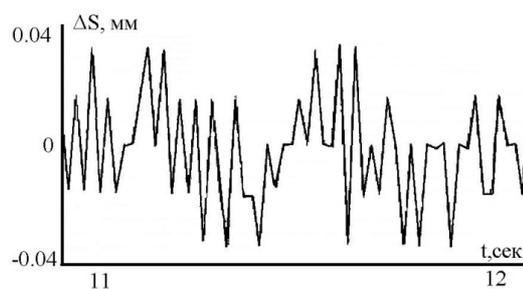


Рис. 5. Зависимость  $\Delta S$  от времени при измерениях с помощью пары датчиков с большой базой

Если погрешности при измерениях с помощью каждого датчика являются случайными некоррелированными величинами, то погрешность при определении частоты ( $\delta f$ ) будет пропорциональна следующей величине:

$$\delta f \sim \frac{1}{\phi} \text{ctg} \frac{\phi f}{n}. \quad (11)$$

Величины  $\delta f$  могут оказаться чрезмерно большими при регистрации низких частот или одновременном возникновении двух частот. Анализ информации, полученной от лопаточных датчиков ДФМ, позволит не только отказаться от установки дополнительных оборотных датчиков, но и обеспечит значительно более высокую точность измерений.

## Литература

1. Заблоцкий И.Е., Коростелёв Ю.А., Шипов Р.А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с.
2. Боришанский К.Н. Методика контроля вибрационного состояния рабочих лопаток турбомашин. – МО РФ, 2003. – 111 с.
3. Устройство для замера амплитуд колебаний бандажированных лопаток турбины дискретно-фазовым методом / К.Н. Боришанский, С.Ю. Григорьев и др. // Патент РФ №2143103, 1999г.

Поступила в редакцию 22.05.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.М. Вохмянин, Санкт-Петербургский институт машиностроения, Санкт-Петербург.