

УДК 621.224

П.С. ЗАВЬЯЛОВ, канд. техн. наук, Ю.М. КУХТЕНКОВ,  
Л.И. КРАСНОПОЛЬСКАЯ, И.В. ГОНЧАР

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ПУЛЬСАЦИЯМИ ДАВЛЕНИЯ И ОСЕВОЙ СИЛЫ В ГИДРОТУРБИНЕ РО230

В статті наведено аналіз результатів експериментального визначення пульсацій тиску у проточній частині і осьової сили на валу, що визначені у радіально-осьової гідротурбіні РО230. Отримані результати дозволяють встановити кореляційні залежності процесів пульсацій тиску і пульсації осьової сили у гідротурбіні цього типу.

Пульсация осевой силы (о.с.), действующей на рабочее колесо и вал гидротурбины, существенно влияет на вибрационное состояние гидроагрегата. Она в значительной степени зависит от пульсаций давления (п.д.) в отсасывающей трубе (о.т.), которые вызваны вращением вихревых жгутов. Цель данной работы – определение уровней (амплитуд) жгутовых п.д. в о.т. за рабочим колесом и пульсаций о.с. на валу в процессе исследований проточной части натурной и модельной гидротурбины РО230 и установление корреляционной связи между ними.

**Исследование пульсаций давлений и пульсации осевой силы в модельной гидротурбине с рабочим колесом РО230.** Пульсации о.с. и п.д. в модельной гидротурбине РО230 (для условий Ирганайской ГЭС) исследовались в поле универсальной характеристики при  $n'_1 = 60-80 \text{ мин}^{-1}$ ,  $Q'_1 = 0,3-0,8 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$  и  $H = 16-16,5 \text{ м}$ . В модельной гидротурбине датчик давления располагался на расстоянии  $0,5D_1$  от выходной кромки за рабочим колесом в о.т. Исследования о.с. на валу проводилось с помощью специального тензометрического приспособления. Запись процессов п.д. и пульсаций о.с. ( $P_{oc.d}$ ) проводилась одновременно с использованием осциллографирования. При обработке пульсаций о.с. не учитывались составляющие с оборотной частотой, так как они обусловлены особенностью конструкции приспособления для измерения о.с. Тарировка осевого усилия проводилась при помощи динамометра, датчика давлений- при помощи грузопоршневого пресса МП-60.

Графики амплитуд п.д. со жгутовыми частотами (в процентах от напора) и пульсации о.с. (в приведенных величинах  $P'_{oc.d} = P_{oc.d} / HD_1^2$ ) представлены на рис.1а. Из графиков следует, что минимум п.д. и о.с. соответствует оптимуму характеристики гидротурбины. В целом, уровень пульсаций в зоне исследованных режимов невелик. Сравнительный анализ изолиний амплитуд пульсаций о.с. и п.д. за рабочим колесом в о.т. показывает, что оба вида пульсаций имеют в зоне исследованных режимов одинаковые тенденции к увеличению, либо понижению, что свидетельствует о наличии связи между этими двумя явлениями. Подтверждение существования такой связи следует из рассмотрения частотных спектров п.д. и о.с. Анализ частотных спектров показывает, что в частотном спектре преобладают пульсации со жгутовыми и кратными им частотами. Причем, в области с малыми расходами преобладают жгутовые пульсации.

**Исследование пульсаций давлений и вибрации в натурной гидротурбине с рабочим колесом РО230.** Замеры вибрационного состояния гидроагрегата (вертикальная вибрация крестовины генератора) и п.д. в проточной части (в том числе п.д. в о.т.) проводились при испытании натурной гидротурбины РО230 Ирганайской ГЭС. Измерения осуществлялись при действующем напоре нетто 120 м ( $n_1 \approx 78 - 80 \text{ мин}^{-1}$ ) в диапазоне нагрузок, соответствующих  $Q'_1 = 0,12 - 0,5 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ .

Динамические нагрузки, воспринимаемые ротором агрегата от воздействия о.с. на валу, передавались на подпятник генератора. Датчик вибрации располагался вертикально на верхней крестовине генератора (у направляющего подшипника). П.д. в о.т. измерялись датчиком давления, который был установлен на щите манометров в шахте турбины. Измерение величин вибраций и п.д. осуществлялось при помощи усилителя фирмы «Брюль и Кьер» и анализатора спектра частот «Вибропорт-41» фирмы Шенк (Дания).

Из графиков, приведенных на рис. 1б, видно, что п.д. в о.т. достигают 6,5 % при нагрузках, соответствующих  $Q'_1 = 0,3 - 0,4 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ , и уменьшаются до 1,5-1,7 % при нагрузках, соответствующих  $Q'_1 = 0,45 - 0,5 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ , что свидетельствует о хорошем согласовании с модельными испытаниями.

При сопоставлении характеристик п.д. и вибраций видно, что в зоне  $Q'_1 = 0,12 - 0,4 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$  преобладающей составляющей в частотном спектре вибрации является низкочастотная составляющая (0,9-1,2 Гц) с максимальной амплитудой до 18 мкм, что соответствует максимуму п.д. в районе  $Q'_1 = 0,3 - 0,4 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ .

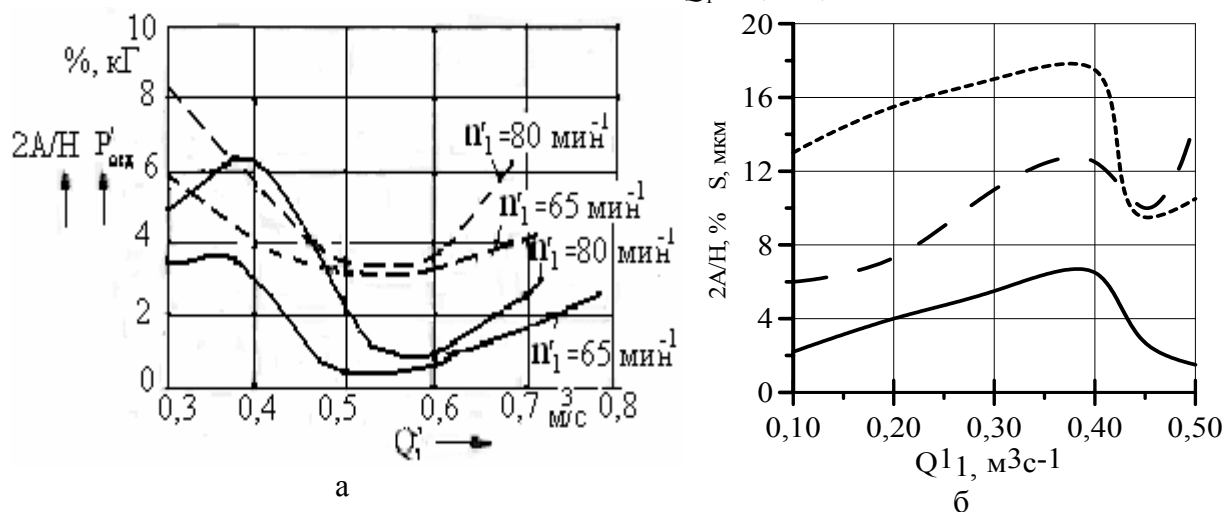


Рис. 1. Пульсации давлений в о.т. ( $2\Delta H$ , % от напора), пульсация осевой силы на валу ( $P'_{ос.д.}$ , кГ) и вибрация на верхней крестовине генератора ( $S$ , мкм) в гидротурбине РО230: а). п.д. в о.т. (\_\_\_\_) и пульсация о.с. (\_\_\_\_) в модельной гидротурбине; б). п.д. в о.т. (\_\_\_\_) и вертикальная вибрация на верхней крестовине генератора с низкой частотой (0,9-1,2 Гц - \_\_\_\_ ) и с оборотной частотой (3,6 Гц - \_\_\_\_ ) в натурной гидротурбине.

**Исследование корреляционных зависимостей между пульсацией давлений и пульсацией осевой силы.** Для выяснения вопроса о корреляционной зависимости и ее виде между п.д. и пульсацией о.с. в модельной гидротурбине РО230 рассчитывался ряд статистических характеристик и критериев [1, 2]. В таблице 1 представлены режимы, для которых обрабатывались данные осциллограмм п.д. и о.с.

Таблица 1 – Режимные параметры обрабатываемых данных

№,режима	а <sub>о</sub> , мм	Н, м	n <sub>1</sub> ', мин <sup>-1</sup>	Q <sub>1</sub> ', м <sup>3</sup> с <sup>-1</sup>
1	20	11,68	65	0,2968
2	25	11,81	65	0,3875
3	20	11,74	80	0,2897

Так как заранее не известен вид уравнения регрессии и нет никаких априорных предположений об их виде, мы ищем уравнения связи в виде линейных или квадратичных (полином 2-го порядка) путем расчета коэффициентов корреляции  $k_{xy}$  и корреляционного отношения  $\eta_{xy}$ .

Значение коэффициента корреляции и корреляционного отношения (1) находится в пределах между 0 и 1, как для линейной, так и для нелинейной зависимостей. Для оценки тесноты связи были рассчитаны  $k_{xy}$  и  $\eta_{xy}$

$$k_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - (\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i) / N}{N \sigma_x \sigma_y}, \quad \eta_{xy} = \sigma_{\bar{y}x} / \bar{\sigma}_y, \quad (1)$$

где  $k_{xy}$  – коэффициент корреляции для оценки линейной связи;

$\eta_{xy}$  – корреляционное отношение для оценки нелинейной связи.

$$\sigma_{\bar{y}x} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^n n_{x_j} (\bar{y}_{x_j} - \bar{y})^2}, \quad \bar{\sigma}_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^n n_{y_j} (y_j - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

где  $N$  – объем выборки;  $x_i$  – массив, описывающий пульсации о.с.;  $y_i$  – массив, описывающий п.д.;  $\sigma_x$  – среднее квадратичное отклонение для выборки  $X$ ;  $\sigma_y$  – среднее квадратичное отклонение для выборки  $Y$ ;  $\sigma_{\bar{y}x}$  – межгрупповое среднее квадратичное отклонение (2);  $\bar{\sigma}_y$  – общее среднее квадратичное отклонение признака  $Y$  (2);  $n_{x_j}$  – частота значения  $x_j$  признака  $X$ ;  $n_{y_j}$  – частота значения  $y_j$

признака  $Y$ ;  $\bar{y}_{x_j}$  – условная средняя признака  $Y$ ;  $\bar{Y}$  – среднее значение величины  $y_i$  в выборке  $Y$ ;  $n$  – число групп частичных интервалов.

Для проверки достоверности линейной связи используется статистика  $\gamma = \eta^2_{xy} - k^2_{xy}$ , где  $\gamma \geq 0$  – показатель линейной связи. Критерий достоверности показателя линейности связи  $t_\gamma = \gamma / m_\gamma$ , где  $m_\gamma = \frac{2}{\sqrt{n}} \sqrt{\gamma - \gamma^2 (2 - \eta^2_{xy} - k^2_{xy})}$ .

Для выбранного уровня значимости  $\alpha$  (т.е. не будет отвергнута гипотеза о линейной связи) и числа степеней свободы  $k = n - 2$  по таблице критических точек распределения Стьюдента определяем значение  $t_{кр}(\alpha, k)$ . Если  $t_\gamma \leq t_{кр}(\alpha, k)$ , то подтверждается гипотеза о линейной связи; если же  $t_\gamma \geq t_{кр}(\alpha, k)$ , то связь можно считать нелинейной. Если  $k \leq 60$ , то можно принять  $t_{кр} \approx 2$  [2] и в таком случае при  $t_\gamma < 2$  – принимается гипотеза о линейной связи, при  $t_\gamma > 2$  – о нелинейной связи. В первом случае берется линейное уравнение регрессии, во втором – нелинейное. Результаты расчета при заданных режимах приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета статистики и критериев

№ реж	$k_{xy}$	$\eta_{xy}$	$\gamma$	$t_\gamma$	Вид уравнения регрессии	Коэффициенты уравнения регрессии		
						A	B	C
1	0,043	0,384	0,1456	3,89	$Ax^2+Bx+C$	-0,00586	1,5	-32
2	-0,162	0,539	0,2643	3,47	$Ax^2+Bx+C$	0,0301	-0,5	-24
3	-0,047	0,322	0,1015	1,94	$Ax+B$	-0,072	23,85	-

По результатам расчета, представленным в таблице 2 можно говорить о нелинейной корреляционной связи на режимах 1 и 2 и о линейной зависимости на режиме 3. Из корреляционного анализа следует, что теснота связи между п.д. и пульсацией о.с. на режиме 2 более сильная, чем на режимах 1 и 3. Таким образом, характер и сила корреляционной связи между п.д. и пульсацией о.с. определяется режимом работы гидротурбины. На основании модельных и натуральных испытаний можно сделать вывод, что увеличение п.д. со жгутовой частотой приводит к росту пульсаций о.с. с той же частотой.

### Литература

1. Верлань А.Ф. и др. Языки персональных компьютеров. Справочное пособие. – Киев, «Наукова думка». – 1989. – 240 с.
2. Крутов В.И., Попов В.В. Основы научных исследований. – М.: ”Высшая школа”. – 1989. – 400 с.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика. – М.: ”Высшая школа”. – 1977. – 285 с.