

УДК 621.224.24

П.С. ЗАВЬЯЛОВ, Ю.М. КУХТЕНКОВ**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ НА ЛОПАТКАХ НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ОБРАТИМОЙ ГИДРОМАШИНЫ**

Представлены результаты исследований статической и динамической составляющих крутящего момента на лопатках направляющего аппарата модельной обратной гидромашини ОРО170 в поле четырехквadrантной характеристики для условий Днестровской ГАЭС, проведенные в ГТЛ ВАТ «Турбоатом». Проведен анализ уровней амплитуд составляющих крутящего момента, частот динамической составляющей, определены направления действия момента, даны рекомендации по выбору левой линии ограничения по мощности в турбинном режиме для исследуемой гидромашини с целью уменьшения возможных вибраций лопаток направляющего аппарата.

Ключевые слова: модельная обратимая гидромашини, лопатки направляющего аппарата, насосный режим, турбинный режим, гидродинамический крутящий момент, тензометрический способ, универсальная четырехквadrантная характеристика.

Введение. Надежность обратимых гидромашин в значительной степени зависит от интенсивности гидродинамических нагрузок, действующих на лопатки направляющего аппарата [1–6]. Экспериментальное определение крутящих моментов на лопатке позволяет получить достоверную информацию для широкого диапазона режимов работы гидромашини, что необходимо при разработке и проектировании лопаток направляющего аппарата и механизма поворота, а также для уточнения расчетных методов их определения [5].

Гидродинамическую нагрузку, действующую на лопатки направляющего аппарата обратной гидромашини, условно можно разделить на составляющие – статическую (среднеинтегральную) и динамическую (пульсирующую), что вызвано соответственно, стационарной P_C и пульсирующей $P_d(t)$ составляющими гидродинамического давления. Эта нагрузка создает на лопатке направляющего аппарата гидродинамический крутящий момент, определяемый по зависимости [4]:

$$M_{\Gamma} = M_C \pm \frac{M_d}{2}, \quad (1)$$

где M_{Γ} – крутящий момент от гидродинамической силы; M_C – статический момент; M_d – динамический момент (полный размах пульсации момента, т.е. двойная амплитуда).

Цель данной работы заключалась в экспериментальном определении и анализе статических и динамических составляющих крутящих моментов на лопатках направляющего аппарата от гидродинамических сил в гидромашине с рабочим колесом ОРО 170/5217-50 с проточной частью для условий Днестровской ГАЭС, в которой верхнее и нижнее кольца статора – плоские конические. Исследования проводились в ГТЛ ВАТ «Турбоатом» на модельном блоке обратной гидромашини. Полученные экспериментальные данные использовались в СКБ гидротурбин при расчетах и проектировании обратной гидромашини.

Измерительные устройства и методика определения составляющих гидродинамического крутящего момента. Измерение моментов M_C и M_d

на лопатках направляющего аппарата проведено тензометрическим способом. Чувствительным элементом измерительной лопатки является тонкостенный цилиндр, выполненный путем расточки верхней цапфы лопатки направляющего аппарата с учетом [6]. Две пары тензорезисторов типа 2ПКБ-5-100 наклеены под углом 45° к оси лопатки направляющего аппарата и включены в два соседних плеча полумоста усилителя рис. 1, что позволяет обеспечить максимальную чувствительность при замере момента и не воспринимать действие силы, вызывающей этот момент. Гидроизоляция тензорезисторов произведена составом на основе эпоксидной смолы, армированной стеклотканью. Жесткость тензоцилиндра измерительной лопатки подобрана так, чтобы сопротивление тензорезисторов под действием момента менялось заметным образом, а собственная частота колебаний измерительного приспособления была намного больше частоты возмущающих сил.

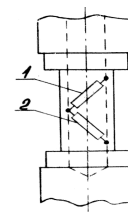


Рис. 1 – Схема наклейки тензорезисторов для измерения крутящего момента на лопатке направляющего аппарата:

1, 2 – тензорезисторы

Направляющий аппарат имел 20-ть лопаток; отсчет лопаток направляющего аппарата начинался от лопатки, ближайшей к зубу спиральной камеры. Измерение моментов производилось на трех мерных лопатках: № 10, № 11, № 12 рис. 2.

Измерение статического M_C и динамического M_d моментов производилось последовательно, методом "опроса". Для измерения M_C в качестве вторичной аппаратуры использовался комплект многоканальной тензометрической фирмы "Брюль и Кьер" (Дания), а для измерения пульсирующей составляющей момента M_d – узкополосный частотный анализатор типа 2033 этой же фирмы, позволяющий получить амплитудно-частотные характеристики процесса пульсации момента.

© П. С. Завьялов, Ю. М. Кухтенков, 2015

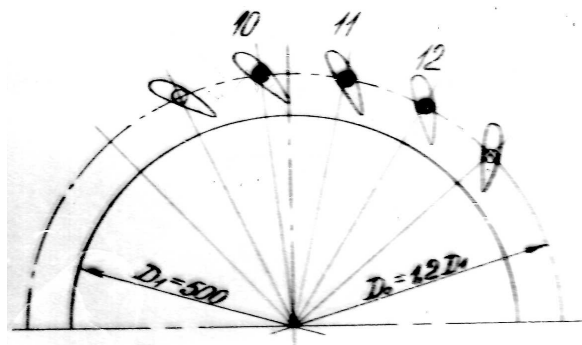


Рис. 2 – Схема расположения мерных лопаток направляющего аппарата для измерения крутящего момента

Мерные лопатки предварительно тарировались. При тарировке за положительное направление было принято действие момента на закрытие направляющего аппарата. Тарировочные зависимости всех мерных лопаток имели характер, близкий к линейному, что позволило применять для данной лопатки постоянный тарировочный коэффициент. Общая погрешность измерения момента на лопатках направляющего аппарата состоит из: погрешности измерения плеча тарировочного устройства; погрешности тарирования. Погрешность тарировки состоит из: погрешности измерительной аппаратуры; погрешности из-за наличия сил трения.

Оценка этих величин проведена на основании контрольной тарировки измерительных лопаток. Обработка результатов тарировки проведена методом наименьших квадратов. Относительная среднеквадратичная погрешность измерений крутящего момента на лопатке направляющего аппарата составляет $\pm 3\%$.

Значения полученных моментов пересчитывалось в приведенные величины:

$$M'_{i1} = \frac{M_i}{H_i \cdot D_1^3}, \quad (2)$$

где H – напор испытаний, м; D_1 – диаметр рабочего колеса, м; i – номер измерения.

Режимы испытаний и диапазоны изменения режимных параметров, на которых осуществлены измерения с помощью мерных лопаток, приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1 – Режимы экспериментальных исследований крутящих моментов на лопатках направляющего аппарата модели обратимой гидромашины ОРО 170/5217-50

Режимы испытаний	Параметры			
	a_0 , мм	H , м	Q'_1 , м ³ /с	n'_1 , мин ⁻¹
Турбинный	10;30;50	5–16 (5, 10, 16)	0,09–0,5	25–117
Насосный	10;30;50	8–20	0,16–0,81	83–130
Противоток	10;30;50	11–25	0,05–0,38	20–76
Обратный насос	10	4,8	0,05–0,19	108–148

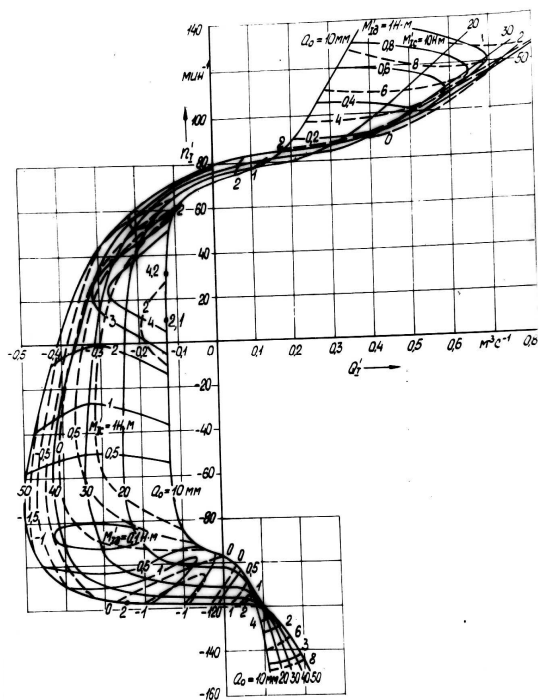


Рис. 3 – Четырехквadrантная характеристика гидравлических моментов на лопатке направляющего аппарата гидромашины с рабочим колесом ОРО 170/5217-50
 ——— $M'_{1д}$ – динамическая составляющая крутящего момента,
 - - - $M'_{1с}$ – статическая составляющая крутящего момента

В процессе обработки результатов испытаний по определению крутящих моментов на лопатках направляющего аппарата строились следующие зависимости:

- $M'_{с1} = f(n'_1)$, $M'_{д1} = f(n'_1)$ при $a_0 = \text{const}$ для турбинного режима, режимов противотока и обратного насоса;
- $M'_{с1} = f(Q'_1)$, $M'_{д1} = f(Q'_1)$ при $a_0 = \text{const}$ для насосного режима и режима торможения;
- $M'_{с1} = f(Q'_1, n'_1)$, $M'_{д1} = f(Q'_1, n'_1)$ в поле четырехквadrантной характеристики, приведенны на рис. 3.

Гидродинамические крутящие моменты на лопатках направляющего аппарата обратимой гидромашины с рабочим колесом ОРО 170/5217-50.

Анализ амплитуд статических и динамических составляющих крутящих моментов.

На рис. 3 приведена четырехквadrантная характеристика статических $M'_{1с}$ и динамических $M'_{1д}$ моментов. Характеристика построена по максимальным величинам моментов, измеренных на 3-х лопатках № 10, № 11, № 12. Из анализа этой характеристики следует, что в турбинном режиме статическая составляющая моментов $M'_{1с}$ на лопатках направляющего аппарата в диапазоне от $n'_1 = 0$ до $n'_1 = 50 \text{ мин}^{-1}$ практически не зависит от n'_1 . В то же время, открытие направляющего аппарата a_0

оказывает существенное влияние на величину M'_{IC} . Так с увеличением a_0 от 10 до 50 мм M'_{IC} изменяется от +1,5 до -1,5 Н·м. В зоне оптимальных режимов работы натурной гидромашини при $a_0 = 30$ мм также наблюдается изменение знака M'_{IC} с плюса на минус. Динамическая составляющая момента M'_{ID} в большей мере зависит от n'_I , чем от a_0 , и с уменьшением n'_I от 90 до 0 мин⁻¹ изменяется от 0,1 до 2 Н·м. При разгонной частоте вращения M'_{IC} меняет знак с плюса на минус, а M'_{ID} увеличивается с увеличением a_0 и достигает максимальных значений $M'_{ID} = 2$ Н·м при $a_0 = 50$ мм. В рабочей зоне турбинного режима $M'_{IC} < 0$, т.е. момент действует на открытие направляющего аппарата.

Натурные испытания на гидроагрегатах Киевской ГАЭС показали, что повышенные вибрации лопаток направляющего аппарата наблюдаются при $M'_{IC} = 0$ [2] и значительные M'_{ID} . В нашем случае правая линия ограничения мощности в турбинном режиме находится в области $M'_{IC} = -1$ Н·м. Однако при частичных нагрузках появляется зона с $M'_{IC} = 0$, которую необходимо учитывать при выборе левой границы ограничения мощности на эксплуатационной характеристике, чтобы избежать значительной вибрации лопаток.

В насосном режиме при открытиях направляющего аппарата $a_0 = 10-30$ мм величина M'_{IC} и M'_{ID} существенным образом зависит от n'_I . При этих открытиях направляющего аппарата M'_{IC} действует на закрытие, достигая в зоне работы натурной гидромашини 3 Н·м, а $M'_{ID} = 0,2$ Н·м. На открытии $a_0 = 30$ мм с уменьшением расхода от $Q'_I = 0,3$ м³с⁻¹ за зоной работы натурной гидромашини происходит изменение знака момента с плюса на минус. На больших открытиях направляющего аппарата ($a_0 = 50$ мм) в диапазоне приведенных расходов от 0 до $0,7$ м³с⁻¹ M'_{IC} имеет отрицательное значение, то есть действует на открытие. С увеличением n'_I при $a_0 = 10-30$ мм увеличивается значение M'_{IC} до 10 Н·м. Пульсирующая составляющая гидродинамического момента имеет максимальное значение на больших открытиях направляющего аппарата $a_0 = 50$ мм, $M'_{ID} = 2-3$ Н·м. Но эти режимы вне зоны работы натурной обратимой гидромашини. В насосном режиме $M'_{IC} > 0$, т.е. момент действует на закрытие лопаток направляющего аппарата.

В режиме противотока максимальное значение статической составляющей момента наблюдается при

$a_0 = 10$ мм и достигает $M'_{IC} = 2,1$ Н·м; в диапазоне $n'_I = 0-40$ мин⁻¹ M'_{IC} почти не зависит от приведенных оборотов, но изменяется с изменением открытия направляющего аппарата; общий уровень M'_{ID} превышает динамические моменты на всех остальных режимах и его максимальное значение достигает $M'_{ID} = 4,2$ Н·м. В режиме противотока при $a_0 = 10-40$ мм, $M'_{IC} > 0$, при $a_0 = 40$ мм, $M'_{IC} \approx 0$, а при $a_0 > 40$ мм, $M'_{IC} < 0$.

В режиме обратного насоса характерны повышенные величины статических и динамических составляющих момента на лопатке направляющего аппарата $M'_{IC} > 0$ и они достигают максимальных значений $M'_{IC} = 8$ Н·м, а $M'_{ID} = 3$ Н·м.

Анализ частот пульсации крутящих моментов. Анализатор "Брюль и Кьер" позволил провести спектральный анализ в реальном масштабе времени, и, следовательно, получить информацию о частотах пульсации крутящих моментов.

В турбинном режиме во всем исследуемом диапазоне основной является лопастная частота f_L , которой соответствует максимальная средне-квадратичная амплитуда. В спектре частот можно выделить также двойную лопастную $2f_L$ и двойную оборотную частоту $2f_{OB}$, но на этих частотах пульсации имеют меньшие амплитуды.

В насосном режиме процесс пульсации момента меняется с изменением открытия a_0 . Так при $a_0 = 10$ мм основной является частота, близкая к f_{OB} , одной из причин которой может быть вращающийся срыв с лопастей рабочего колеса; частота f_L присутствует, но с меньшей амплитудой. С увеличением открытия от $a_0 = 30$ мм до $a_0 = 50$ мм преобладающей частотой является лопастная f_L ; в спектре частот также можно выделить частоты $f = 2f_L$ и $f = 2f_{OB}$ с меньшими амплитудами.

При разгонной частоте вращения на всех открытиях направляющего аппарата основной в спектре частот является f_L . Помимо этого зафиксирована $f = 2f_L$ с меньшей амплитудой.

В режиме противотока и обратного насоса также основной является частота f_L ; имеются также кратные ей соответственно $(2-5)f_L$ и $(2-3)f_L$, но с меньшими амплитудами.

Выводы. Полученные результаты в турбинном и насосном режимах подтверждают:

1. Турбинный режим в зоне работы натурной гидромашини для условий Днестровской ГАЭС с рабочим колесом ОРО 170/5217-50 при $a_0 = 20-40$ мм характеризуется минимальными значениями в поле характеристики статических и динамических моментов на лопатках направляющего аппарата M'_{IC}

равен от -1 до $+0,6$ Н·м, $M'_{1д}$ равен от $0,1$ до $0,3$ Н·м.

2. Насосный режим в зоне работы натурной гидромашини на оптимальном открытии характеризуется следующими допустимыми значениями приведенных моментов $M'_{1с}$ равен от 0 до 1 Н·м, $M'_{1д}$ равен от $0,2$ до $0,3$ Н·м.

3. На всех режимах, за исключением насосного при $a_0 = 10$ мм, основными частотами являются лопастные; присутствуют также частоты кратные лопастной и оборотной, но с меньшими амплитудами пульсаций моментов.

4. В рабочей зоне насосного и турбинного режимов $M'_{1д} < M'_{1с}$; в режимах противотока, торможения и обратного насосного в отдельных зонах имеет место соотношение $M'_{1д} / M'_{1с} \approx 2-3$.

Список литературы: 1. Робук Н. Н. Исследования нестационарных явлений на модели обратимой гидромашини Киевской ГАЭС / Н. Н. Робук, И. С. Веремеенко, Н. Г. Трампольская // Гидротехн. стр-во. – 1974. – № 3. – С. 39–40. 2. Мищенко Б. И. Результаты натурных испытаний насос-турбин типа РОНТ-18 / Б. И. Мищенко, Л. Я. Моргулис, Э. Д. Серебренников // Энергомашиностроение. – 1975. – № 7. – С. 45–50. 3. Поташиник С. И. Особенности эксплуатации обратимых агрегатов Киевской ГАЭС / С. И. Поташиник // ВНИИГидропроект. Сб. научн. трудов. – 1984. – Вып. 92. – С. 93–101. 4. Завьялов П. С. Экспериментальные исследования пульсаций давлений в проточной части и моментов на лопатках направляющего аппарата обратимой гидромашини / П. С. Завьялов, Ю. И. Федулов, В. М. Дедков [и др.] //

Гидравлические машины. – 1985. – Вып. 19. – С. 27–34. 5. Завьялов П. С. О методике расчетно-экспериментальных исследований пульсаций момента на лопатке направляющего аппарата обратимой гидромашини в насосном режиме / П. С. Завьялов, В. Д. Жиленко // Гидравлические машины. – 1987. – Вып. 21. – С. 34–40. 6. Flodl G. Untersuchung der Leitschauflschwingungen einer reversiblen pumpturbine durch messungen an Model und Grosanlage / G. Flodl, F. Strohmeyer // Osterr. Ing – 1979. – Vol. 22, № 2. – P. 46–51.

Bibliography (transliterated): 1. Robuk, N. N., I. S. Veremeenko and N. G. Trampolskaya. "Issledovaniya nestatsionarnykh yavleniy na modeli obratimoy gidromashinyi Kievskoy GAES." *Gidrotehn. str-vo*. No. 3. 1974. 39–40. Print. 2. Mischenko, B. I., L. Y. Morgulis and E. D. Serebrennikov. "Rezultatyi naturnykh ispytaniy nasos-turbin tipa RONT-18." *Energomashinostroyeniye*. No. 7. 1975. 45–50. Print. 3. Potashnik, S. I. "Osobennosti ekspluatatsii obratimyykh agregatov Kievskoy GAES." *VNIIGidroproekt. Sb. nauchn. trudov*. No. 92. 1984. 93–101. Print. 4. Zavyalov, P. S., et al. "Eksperimentalnyye issledovaniya pulsatsiy davleniy v protochnoy chasti i momentov na lopatkah napravlyayushego apparata obratimoy gidromashinyi." *Gidravlicheskie mashinyi*. No. 19. 1985. 27–34. Print. 5. Zavyalov, P. S., and V. D. Zhilenko. "O metodike raschetno-eksperimentalnykh issledovaniy pulsatsiy momenta na lopatke napravlyayushego apparata obratimoy gidromashinyi v nasosnom rezhime." *Gidravlicheskie mashinyi*. No. 21. 1987. 34–40. Print. 6. Flodl, G., and F. Shtromer. "Issledovanie kolebaniy lopatki napravlyayushego apparata obratimoy gidromashinyi s pomoshchyu izmereniy na modeli i nature." *Osterr. Ing*. No. 22.2. 1979. 46–51. Print.

Поступила (received) 14.02.15

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Завьялов Павел Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Гидравлические машины», г. Харьков; тел.: (095) 156-44-59; e-mail: zavialov.ps@gmail.com.ua.

Zavialov Pavel Sergeevych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of "Hydraulic machines", Kharkov; tel.: (095) 156-44-59; e-mail: zavialov.ps@gmail.com.ua.

Кухтенков Юрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Гидравлические машины», г. Харьков; тел.: (050) 303-06-29; e-mail: kuhtenkov.um@gmail.com.ua.

Kukhtenkov Yuriy Michaylovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of "Hydraulic machines", Kharkov; tel.: (050) 303-06-29; e-mail: kuhtenkov.um@gmail.com.ua.