
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА,
ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.822:62-251

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОБКАТКИ
ВЕРТИКАЛЬНЫМ ГИБКИМ ВАЛОМ ЖЕСТКОГО СТАТОРА**© 2020 г. А. Н. Никифоров^{1,*}, А. Е. Шохин¹, О. В. Бармина¹¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: n.andre@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Представляются амплитудно-частотные характеристики четырех экспериментальных валов при обкатке сравнительно жесткого статора. Эмпирически найдены начальные условия существования или устойчивости обкатки в изотропной системе “ротор-статор”, сводящиеся к вращению с частотой порядка первой собственной ротора на подшипниках и трению скольжения с коэффициентом 0.1 и выше в месте роторного контакта со статором. Верхняя граница устойчивости обкатки по частоте вращения не обнаружена.

Ключевые слова: вал, ротор, статор, обкатка, качение, проскальзывание, обратная прецессия, частота колебаний

DOI: 10.31857/S0235711920040112

Вращающийся и вибрирующий вал в неподвижной втулке без смазки и с зазором, несмотря на внешнюю простоту, представляет собой сложную механическую систему с типично нелинейными явлениями, такими как скачок, множественность и гистерезис (в виде затягивания-захвата) колебательных режимов.

Вклад Банах [1] в развитие контактной теории роторов является одним из первых фундаментальных и значительных. Опытным путем выяснено, что даже при малых угловых скоростях ω гибкого, неуравновешенного, вертикального или горизонтального вала, опирающегося на два жестких подшипника, один из которых имеет зазор, устанавливается режим с ударами. Но при дальнейшем увеличении ω , причем задолго до критической скорости, возникает режим безотрывного движения – либо синхронного с ω скольжения (при обильной смазке), либо асинхронного обкатывания (при недостаточной смазке) ротора по опоре с зазором. При еще больших скоростях может снова возникнуть режим с систематическими ударами вала о подшипник.

В работе [2] показано при каких условиях в системе не существуют стационарные ударные и безотрывные движения, в том числе скольжение, чистое качение и качение с проскальзыванием ротора по статору. В результате анализа бифуркационных переходов можно выбрать такую жесткость крепления статора, что режим устойчивого скольжения или обкатки не будет существовать, т.е. при любых возмущениях ротор будет находиться в состоянии либо бесконтактного движения, либо движения с ударами.

Экспериментально-аналитическому исследованию влияния длины дуги контакта между ротором и статором на вибрацию системы посвящена работа Битти [3]. Он показал, что по мере расширения пятна контакта происходит снижение амплитуды синхронных колебаний с частотой вращения и рост амплитуд высших гармоник. Но если длина дуги контакта на роторе достигает 180° , высшие гармоники исчезают. В услови-

яч этого и вращения на закритической скорости рано или поздно (с увеличением контактного трения) возникает разрушительная обратная прецессия ротора с частотой близкой к критической, вычисленной с учетом повышения жесткости ротора за счет “опоры” на статор. При этом задевание ротора за статор прогнозируется неопасным, если вышеупомянутая дуга составляет менее 110° .

По большей части экспериментальная работа Лингенера [4] раскрывает условия возникновения обкатки, в частности потенциальные диапазоны скоростей ротора. В случае приближения частоты обкатки, подчиняющейся известному геометрическому отношению $\Omega = fr/\delta$, к собственным частотам связанной системы “ротор-статор” дальнейшее увеличение частоты вращения f приводит к комбинации (суперпозиции) качения и скольжения такой, что Ω остается постоянной, несмотря на нарастание скорости ротора. Наряду с этим эффектом происходит резонансный рост отклонений ротора и статора. Используя простую аналитическую модель с двумя степенями свободы и структуру диаграммы Кэмпбелла с линиями $\Omega = f$ и $\Omega = fr/\delta$, автор систематизировал опытные данные. Наименьшая частота обкатывания всегда выше, чем наименьшая (основная) собственная частота ротора f_1 . Верхняя предельная Ω всегда ниже, чем наименьшая собственная частота сцепленной системы “ротор-статор”. Анализ влияния конструкционного демпфирования и контактного трения подтвердил реализуемость обкатки в указанных частотных диапазонах. Однако он отмечает “несущественность” коэффициента трения в поведении системы.

Улбрих с соавтором [5] анализировали возникновение обкатки с проскальзыванием в роторных системах с дисбалансом. Они заключили, что ротор находится в резонансном состоянии вблизи собственной частоты связанной системы, и это есть физическая причина обкатки со скольжением неуравновешенного ротора по статору. Наряду с этим они обнаружили, что обкатка с проскальзыванием начинается по-разному. Если движение ротора происходит в форме обкатки без скольжения, возбужденной внешним импульсом, и при относительно низкой скорости вращения, то после нее возникает обкатка со скольжением, как и предсказано в работе [4]. Если движение ротора проходит в условиях присутствия дисбаланса и увеличения скорости вращения, сначала возникает виброударное движение, а потом сразу обкатка со скольжением.

Исследование, прямо связанное с явлением обкатки, провел Шатохин в работе [6]. Он разработал многомассовую модель ротора и установил, что время быстрого действия разрабатываемых автоматических систем защиты от обкатки весьма “велико” по сравнению с временем ее установления, которое обычно составляет доли секунды.

В настоящей статье развивается собственная теория обкатки гибким ротором жесткого статора [7, 8]. Конечно, она связана с неизбежными упрощениями реальной системы и требует экспериментального контроля.

Такая верификация осуществлена на установке (рис. 1) с длинным тонким валом 1, который вращается в трех рабочих опорах и в одной страхующей. При рассмотрении сверху вниз первая из жесткозакрепленных опор 2 на фактически неподатливой станине имеет выбираемый при упругих колебаниях вала зазор ($r/\delta = 2.65, 3.5, 4, 5.25$ или 7); страхующая¹ опора 3 – с невыбираемым зазором ($r/\delta = 1/2$), а две оставшиеся прецизионные шарикоподшипниковые закрытого типа без зазора. Кроме того, в части экспериментов вал на своем верхнем конце несет цилиндрический светодиодный индикатор прецессии массой 65 г (не показан).

Вал приводится во вращение электродвигателем 4 посредством зубчато-ременной передачи. Несущая вал, опоры и двигатель станина в виде де-факто недеформируемых плиты 5 и кронштейна 6 для жесткости и вертикальности установки прикрепляется к бетонной стене с помощью шпилечных соединений 7.

¹ Страхующая опора с большим радиальным зазором предназначалась исключительно для безопасности испытаний и работала лишь в случае потери упругой устойчивости вала.

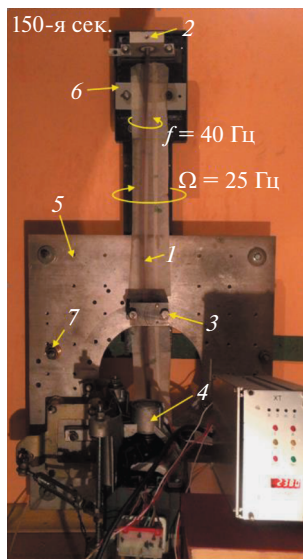


Рис. 1. Экспериментальная установка в случае обкатки текстолитовым валом статора с изгибом по 1-й собственной форме: 1 – вал (диаметр/длина консольного вылета 8 мм/645 мм), 2 – имитатор статорной поверхности в виде жесткой опоры с малым радиальным зазором, 3 – страхующая опора с большим зазором, 4 – электродвигатель, 5 – плита станины, 6 – кронштейн станины, 7 – стягивающее шпильчатое соединение с фундаментом.

Регистрируются поперечные колебания вала двумя бесконтактными токовихревыми датчиками во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 2), а также частота вращения вала датчиком аналогового типа.

Искомые экспериментальные динамические характеристики – это скорости и амплитуды прецессии вала при обкатке втулки-статора в зависимости от скорости вращения, а также пороговые частоты вращения, на которых возникает и исчезает обкатка.

Все пуски системно сгруппированы в 4 серии: 1-я и 2-я серии посвящены исследованию обратного безотрывного движения стального вала без и с добавлением индикатора; в 3-й и 4-й сериях оценивается влияние на движение в форме обкатки увеличения внутреннего трения на примере медного и текстолитового вала.

После каждой оригинальной серии испытаний “обкаткой” механические параметры вала и статорной втулки измерены полуэмпирическими способами и затабулированы. В табл. 1–4 указаны геометрия, материалы, в том числе коэффициент трения при скольжении одного из них по-другому, критические скорости вращающегося вала как опертого (свободным концом на втулку-статор), а также низшие частоты собственных колебаний невращающегося вала и коэффициент потерь (упругой энергии) внутри него. Натурные эксперименты позволили многосторонне наблюдать реальное колебательное поведение вала при обкатке им статора.

Другими словами, возможные не только в теории, но и на практике: изгибные формы/амплитуды/траектории оси вала, диапазоны самовозбуждения и частоты его обратной прецессии; причем в зависимости от скорости вращения, зазора и трения в системе.

Одним из образцовых, если исходить из характера и числа различных контактных колебаний, произошедших за время одного разгона-останова гибкого вала в жесткой опоре с зазором, оказался пуск № 14.

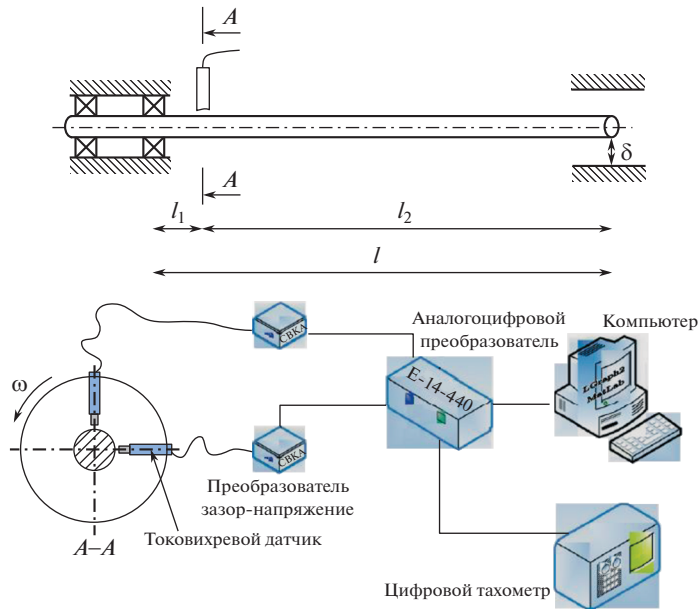


Рис. 2. Схема экспериментальной системы, в том числе место расположения измерения частоты и амплитуды прецессии ротора (сечение А–А), а также технические и программные средства, использованные при испытаниях.

Интересной особенностью экспериментов № 11, 13–18, 20, 23, 24, 27–30 (табл. 1–4) стало достижение системой частоты обкатки порядка третьей собственной опертого вала. Соответствующая многорежимность прекрасно просматривается как раз на оцифрованных записях с опыта № 14 (рис. 3).

Как видно из рис. 3а, вначале разгона происходит синхронное движение $\Omega = f$, т.е. кривая Ω совпадает с кривой f . При достижении частоты вращения $f = 8$ Гц или с момента времени $t = 113$ с устанавливается второй режим движения ($\Omega \neq f$): начинается обкатка, качественным признаком которой, а именно по типу чистого качения ротора по статору, является соотношение $\Omega = 5.25f$, т.е. совпадение кривых Ω и $5.25f$. Однако чистое качение продолжается недолго. Примерно с 115 секунды обкатка совершается по типу качения с проскальзыванием и с частотой, достигающей первой собственной частоты опертого вала ($\Omega = 60$ Гц, табл. 2). Третий со 128 секунды ($f = 53$ Гц) и четвертый со 132 секунды ($f = 78$ Гц) режимы представляют собой обкатку с проскальзыванием и с частотой, близкой соответственно ко второй ($\Omega = 190 \approx 192$ Гц) и третьей ($\Omega = 382 \approx 400$ Гц) частотам собственных колебаний опертого вала.

В фазе останова отмеченные скоростные режимы качественно повторяются с небольшими количественными расхождениями из-за явления гистерезиса (затягивания захваченных режимов обкатки). Диапазоны частот вращения с одинаковым прецессионным движением после их объединения имеют границы: $f = 8–47$ Гц – для 1-й, $f = 29–73$ Гц – для 2-й и $f = 78–108$ Гц – для 3-й формы обкатки. Из рис. 3б следует, что амплитуда прецессии увеличивается каждый раз при переходе вала на более высокочастотное безотрывное движение по статору.

Оставим за скобками визуального анализа краевые (начальную на 113 секунде) и (конечную на 150 секунде) бифуркации системы, очевидно связанные с границей существования (устойчивости) обкатки. Согласно теории [8, 9], обкатка неустойчива

Таблица 1

1-я серия испытаний (система вида*)		Стальной, круглый ($r = 4$ мм) вал с индикатором (на конце)						
Контактные характеристики системы в 1-й серии испытаний "обкаткой"	№ разгона-останова	Отношение r/δ	Материалы		Наибольшая частота вращения f_{\max} , Гц	Диапазоны R частот вращения с устойчивой обкаткой, наибольшие частоты Ω_{\max} и относительные амплитуды A_{\max} обратной прецессии в соответствующих скоростных диапазонах		
			вала в месте контакта – втулки статора	коэффициент трения скольжения (μ)		R, Гц	Ω_{\max} , Гц	A_{\max}
7	7	7	сталь – бронза	0.16	151	7–151	60 и 69 [∅]	1.38
						22–34	184	1.45
8	4	4	сталь – алюминий	0.20	91	9–45	62	1.41
						45–87	179	1.44
9	4	4	сталь – Ф4р*	0.08	110	–	–	–
10	4	4	сталь – Ф4к*	0.10	80	10–48	57	1.40
						34–57	170	1.43
Динамические характеристики (осредненные) системы** после 1-й серии испытаний	Критические частоты опертого вращающегося вала (Гц) ^Δ		Нижние собственные частоты невращающегося вала (Гц) ^{ΔΔ}		Коэффициент потерь внутри невращающегося вала (η)			
			как неопертого	как опертого				
	63		9, 66, 190	60, 191, 385	0.002 [!]		0.004 ^{!!}	

*Здесь и ниже по табл. 1–4 особенности экспериментальной установки и пусков, пронумерованных начиная с "7", ввиду проведения еще шести предварительных испытаний;

** без и в случае опирания вала на опору-статор;

R расширенные со сдвигом нижней или/и верхней границы, вследствие гистерезиса (захвата) самовозбуждающейся обкатки (обратной прецессии) при разгоне и останове;

A_{\max} отношение амплитуд максимальной к стартовой (вначале пуска при 50–100 об/мин);

Δ округленные значения по результатам двух разгонных испытаний вала – до и после серии его испытаний "обкаткой";

$\Delta\Delta$ округленные значения по результатам пяти ударов по станине;

[!] округленное значение по результатам 2×2 (4-х) одноударных тестов, т.е. двух ударно-динамических испытаний для каждой из двух систем с консольным стальным валом;

^{!!} округленное значение по результатам 2×2 (4-х) одноударных тестов, т.е. двух ударно-динамических испытаний для каждой из двух систем со стальным валом, соединенным с жесткой опорой-статором;

[§] округленное значение по результатам двух ударно-динамических испытаний системы с медным валом;

^a то же с текстолитовым валом;

[∅] частоты обратной прецессии, зафиксированные при значительном ошибочном или умышленном, или возникшем в процессе испытания несоосном закреплении опоры-имитатора статора относительно вала;

* Ф4р – фторопласт-4 экструзионный российский (в соответствии с ТУ 6-05-041-535-74, содержание первичного сырья 100%) и Ф4к – фторопласт-4 экструзионный китайский (содержание первичного сырья 30–50%).

пока $f r/\delta < f_1$, где f_1 – первая частота собственных колебаний вала, неопертого на статор. Можно заметить, что перемена режима движения на частоте вращения $f = 47$ Гц – это результат сближения f с Ω , т.е. наступления резонанса опертого вала. Выход в эксперименте № 14 на самую высокочастотную обкатку при $f = 73–78$ Гц, а также сход

Таблица 2

2-я серия испытаний		Стальной, круглый ($r = 4$ мм) вал						
Контактные характеристики системы во 2-й серии испытаний "обкаткой"	№ разгона-останова	Отношение r/δ	Материалы		Наибольшая частота вращения f_{\max} , Гц	Диапазоны R частот вращения с устойчивой обкаткой, наибольшие частоты Ω_{\max} и относительные амплитуды A_{\max} обратной прецессии в соответствующих скоростных диапазонах		
			вала в месте контакта – втулки статора	коэффициент трения скольжения (μ)		R, Гц	Ω_{\max} , Гц	A_{\max}
	11	2.65	сталь – дюраль	0.22	218	12–120	63	1.39
						114–218	320	1.43
	12	2.65	сталь – Ф4р	0.08	162	–	–	–
	13	2.65	сталь – дюраль	0.22	258	12–111	70 [⊙]	1.38
						114–182	188 [⊙]	1.40
						148–258	332 [⊙]	1.51
	14	5.25	сталь – алюминий	0.20	108	8–47	60	1.37
						29–73	190	1.42
						78–108	382	1.52
	15	5.25	сталь – бронза	0.16	115	8–96	62	1.31
						37–59	187	1.38
69–115						386	1.52	
16	4.00	сталь – капролон графитонаполненный	0.20	149	9–145	62	1.33	
					121–124	188	1.38	
					125–149	371	1.45	
17	4.00	сталь – сталь	0.18	143	9–140	60	1.33	
					104–106	191	1.51	
					99–143	366	1.54	
18	4.00	сталь – алюминий	0.20	145	10–127	63	1.33	
					129–136	191	1.36	
					124–145	361	1.51	
19	4.00	сталь – Ф4к	0.10	144	8–133	63 [⊙]	1.39	
20	5.25	сталь – бронза	0.16	145	10–132	65 [⊙]	1.36	
					132–136	188 [⊙]	1.40	
					87–140	375 [⊙]	1.29	
21	2.65	сталь – сталь	0.18	121	11–75	63	1.39	
Динамические характеристики (осредненные) системы после 2-й серии испытаний	Критические частоты опертого вращающегося вала (Гц)		Низшие собственные частоты невращающегося вала (Гц)		Коэффициент потерь внутри невращающегося вала (η)			
			как неопертого	как опертого				как неопертого
	62		13, 81, 229	60, 192, 400	0.002 [!]		0.004 ^{!!}	

Таблица 3

3-я серия испытаний		Медный, круглый ($r = 4$ мм) вал						
Контактные характеристики системы в 3-й серии испытаний "обкаткой"	№ разгона-останова	Отношение r/δ	Материалы		Наибольшая частота вращения f_{\max} , Гц	Диапазоны R частот вращения с устойчивой обкаткой, наибольшие частоты Ω_{\max} и относительные амплитуды A_{\max} обратной прецессии в соответствующих скоростных диапазонах		
			вала в месте контакта – втулки статора	коэффициент трения скольжения (μ)		R , Гц	Ω_{\max} , Гц	A_{\max}
	22	5.25	медь – бронза	0.30	108	7–54	46	1.61
	23	4.00	медь – сталь	0.20	102	10–30	46	1.54
						99–102	282	1.33
	24	4.00	медь – сталь	0.20	106	11–22	45	1.53
						88–106	284	1.35
	25	4.00	медь – Ф4р	0.08	152	–	–	–
	26	4.00	медь – Ф4к	0.10	62	9–62	44	1.52
	Динамические характеристики (осредненные) системы после 3-й серии испытаний	Критические частоты опертого вращающегося вала (Гц)	Низшие собственные частоты невращающегося вала (Гц)			Коэффициент потерь внутри невращающегося вала (η)		
как неопертого			как опертого	как неопертого	как опертого			
	47, 142	10, 60, 171	45, 140, 292	0.004 [§]	0.005 [§]			

с нее при $f = 78–65$ Гц, обусловлены приближением $f_k f_2 = 81$ Гц, т.е. ко 2-й собственной частоте невращающегося неопертого вала, а точнее к его 2-й критической частоте, которая априори несколько ниже при обратной прецессии. Сход с промежуточной (со 2-й) формы обкатки при $f = 29–22$ Гц вызван супергармоническим резонансом второго порядка на первой собственной частоте опертого вала (60 Гц).

Разные формы обкатывания не обязательно устанавливаются “по порядку” и вследствие изменения частоты вращения f , что в некоторой степени подтверждает возможность случайного возникновения этого явления и произошло, например, с текстолитовым валом при разгоне-останове № 30 (рис. 4). Согласно записанным сигналам в диапазоне частот вращения $f = 50–58$ Гц или в промежутке времени с 26 по 70 секунду самовозбуждается обкатка с частотой $\Omega_2 = 77$ Гц, близкой к 89 Гц – 2-й собственной опертого текстолитового вала (табл. 4). Далее при $f = 58$ Гц или на отрезке времени с 70 по 84 секунду происходит обкатка с частотой $\Omega_3 = 166$ Гц, почти равной его третьей собственной (185 Гц). Затем после переходного движения с ударами (кривая Ω нестабильна и “скачет”), синхронного скольжения ($\Omega = f$) и неудавшегося скачка-перехода к прецессии с частотой $\approx \Omega_2$ в диапазоне частот вращения $f = 45–29$ Гц или на временном интервале со 134 по 174 секунду совершается обкатка с частотой $\Omega_1 = 25$ Гц и формой (рис. 1) в соответствии с 1-й изгибной формой рассматриваемого вала (28 Гц). Таким образом, в системе непоследовательно самовозбуждаются три формы обкатки, и одна из них сменяет другую при $f = \text{const}$ (на 70-й секунде).

Таблица 4

4-я серия испытаний		Текстолитовый, круглый ($r = 4$ мм) вал						
Контактные характеристики системы в 4-й серии испытаний "обкаткой"	№ разгона-останова	Отношение r/δ	Материалы		Наибольшая частота вращения f_{max} , Гц	Диапазоны R частот вращения с устойчивой обкаткой, наибольшие частоты Ω_{max} и относительные амплитуды A_{max} обратной прецессии в соответствующих скоростных диапазонах		
			вала в месте контакта – втулки статора	коэффициент трения скольжения (μ)		R, Гц	Ω_{max} , Гц	A_{max}
	27	5.25	сталь – сталь	0.18	62	6–22	26	1.34
						16–37	80	1.37
						30–51	172	1.42
	28	4.00	сталь – сталь	0.18	64	10–25	26	1.35
						32–43	80	1.40
						40–64	172	1.46
	29	5.25	сталь – Ф4к	0.10	53	10–49	25	1.33
						33–40	76	1.36
40–53						167	1.40	
30	4.00	сталь – Ф4к	0.10	58	29–45	25	1.34	
					50–58	77	1.36	
					58	166	1.40	
Динамические характеристики (осредненные) системы после 4-й серии испытаний	Критические частоты опертого вращающегося вала (Гц)	Низшие собственные частоты невращающегося вала (Гц)			Коэффициент потерь внутри невращающегося вала (η)			
		как неопертого	как опертого	как неопертого	как опертого			
	31, 91	7, 37, 102	28, 89, 185	0.025 ^a	0.027 ^a			

Вдобавок частота вращения $f = 58$ Гц примечательна тем, что она сравнительно высока, а также достаточно отстроена и не кратна двум или трем относительно каждой из ряда собственных частот текстолитового вала, как неопертого (7, 37, 102 Гц), так и опертого (28, 89, 185 Гц) на статор. На этом основании бифуркацию системы на 70 секунде действительно можно считать случайной. Кроме того, текстолитовый вал – очень гибкий, и логично, что велико влияние даже малых возмущений на возбуждение обкатки им статора. Все остальные бифуркации в 30-м испытании – резонансные.

Переход с синхронного скольжения к обкатке (рис. 4) со 2-й изгибной формой на частоте вращения $f = 50$ Гц (на 26-й секунде) увязывается с супергармоническим резонансом 2-го порядка на 3-й собственной частоте неопертого текстолитового вала (102 Гц); выход с виброударного движения на обкатку с 1-й изгибной формой при $f = 45$ Гц (на 134-й секунде) согласуется с супергармоническим резонансом 2-го порядка на 2-й собственной частоте опертого текстолитового вала (89 Гц); переход от 1-й изгибной формы обкатывания к синхронному скольжению при $f = 29$ Гц (на 174-й секунде) совпадает с обычным резонансом порядка 1:1 на 1-й собственной частоте опертого текстолитового вала (28 Гц).

Вместе с подробно описанными двумя из всех проведенных тридцати изотропных испытаний, обзор остальных позволил: 1) увидеть, что в них так или иначе повторяются

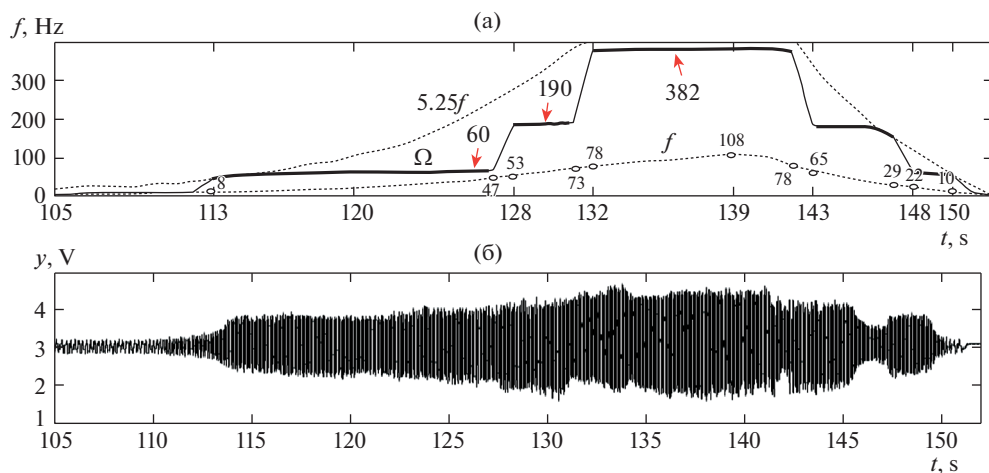


Рис. 3. Частота вращения f , ей кратная $5.25f$ и частота обкатки Ω , а также y -перемещения вертикального консольного экспериментального вала, задающего концом опоры с зазором при разгоне-останове № 14.

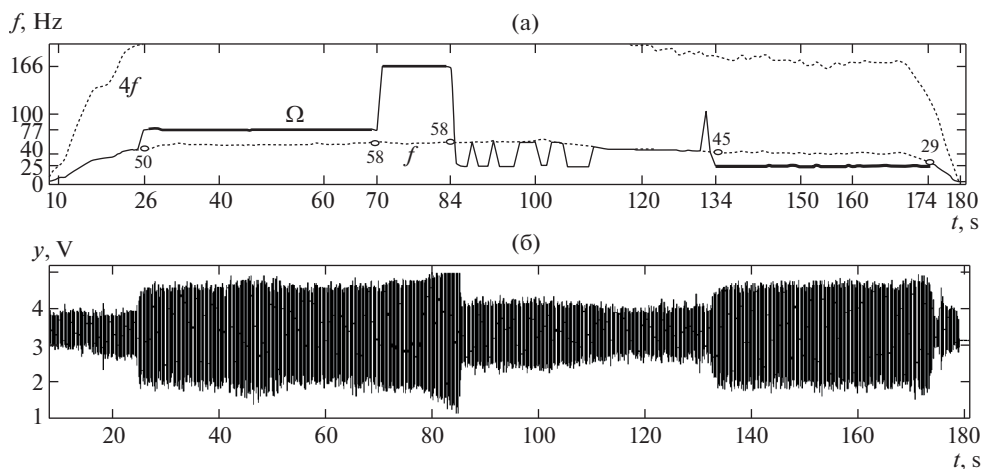


Рис. 4. Частота вращения f , ей кратная $4f$ и частота обкатки Ω , а также y -перемещения вертикального консольного экспериментального вала, задающего концом опоры с зазором при разгоне-останове № 30.

те же самые явления; 2) выявить не только локальные (для каждого испытания), но и некоторые общие закономерности (для ряда испытаний); 3) собрать достаточное количество данных по диапазонам, частотам и амплитудам прецессий, сопряженных с различными формами обкатывания, для оценки их зависимости от собственных частот и внутреннего трения (коэффициента η) ротора, а также от коэффициента трения скольжения (μ) и относительной величины зазора (r/δ) в месте их контакта.

В табл. 1–4 приведены диапазоны частот вращения с устойчивой обкаткой разных форм (с первой по третью). По ним видно, что независимо от серии испытаний (исходной системы) нижняя граница расположена в окрестности в основном ниже и ре-

же выше (пуски № 10, 24, 28÷30) первой собственной частоты неопертого ротора, а верхняя — находится на уровне его максимальных (за исключением всего трех пусков № 10, 21, 22) и очень высоких оборотов (при испытании № 13 $f_{\max} = 258$ Гц и $R_3 = 148-258$ Гц). При максимальных оборотах может иметь место и первая форма обкатывания (при испытании № 7 $f_{\max} = 151$ Гц и $R_1 = 7\div 151$ Гц). Как правило, диапазоны различных форм обкатывания следуют друг за другом без разрывов. Разрывы между диапазонами получились при разгонах-остановах № 11, 14, 23, 24, 28 и 30, т.е. лишь в 30% испытаний.

Вывод. На основании всех четырех серий испытаний или четырех систем с отличными между собой инерционными, диссипативными и упругими параметрами, можно утверждать следующее: совокупный частотный диапазон с устойчивой обкаткой на нижней границе определяется приближением скорости вращения к первой критической неопертого ротора, а сверху не ограничен. Вместе с тем трение между ним и статором явно влияет на устойчивость обкатки. Так, особенностью испытаний № 9, 12 и 25, т.е. в случае “скользящей” контактной пары, а именно с применением высококачественного фторопласта-4, является абсолютное отсутствие обкатки в системе.

Эксперименты № 27–30 с голым валом из текстолита, т.е. с повышенным внутренним демпфированием, выделяются отчетливой тенденцией снижения (на 7–14%) частоты обкатки относительно собственных частот при уменьшении коэффициента трения скольжения в системе. Такая же только менее выраженная тенденция (со снижением на 5–11%) прослеживается при сравнении результатов экспериментов № 7, 8 и 10, № 13 и 19, а также № 22–24 и 26, т.е. в системе “металлический вал — металлический или неметаллический (из низкокачественного фторопласта-4) статор” с низким внутренним трением.

Для всех тридцати испытаний характерна независимость частот обкатки со скольжением ротора по статору от безразмерной величины зазора r/δ в месте их контакта.

Из амплитудно-частотных характеристик ротора, обкатывающего статор, в том числе из вышерассмотренных (рис. 3, 4), следует, что амплитуда прецессии при чистом качении значительно меньше той, которая достигается при обкатке с проскальзыванием. При этом существуют две явные тенденции, во-первых, (согласно пускам № 7–16 и 22–30), чем ближе частота обкатки с проскальзыванием к собственной опертого ротора, тем больше амплитуда обратной прецессии, во-вторых, (согласно пускам № 7–21 и 27–30), чем меньше отношение r/δ , т.е. чем больше зазор между ротором и статором в месте их контакта, тем больше амплитуда прецессии при обкатке.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-08-00171.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Банах Л.Я.* Некоторые явления, возникающие при движении вала в подшипнике с зазором // *Машиноведение*. 1965. № 1. С. 70.
2. *Денисов Г.Г., Неймарк Ю.И., Сандалов В.М., Цветков Ю.В.* О взаимодействии ротора с подшипником скольжения при учете податливости опоры // *Динамика систем. Математические методы теории колебаний*. Межвузовский сборник. Горький, Издание ГГУ им. Н.И. Лобачевского. 1979. С. 131.
3. *Beatty R.F.* Differentiating Rotor Response Due to Radial Rubbing // *Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*. 1985. V. 107. № 2. P. 151.

4. *Lingener A.* Investigation of Reverse Whirl of a Flexible Rotor. *Rakenteiden Mekaniikka*. 1991. V. 24. № 2. P. 3.
5. *Jiang J., Ulbrich H.* The Physical Reason and the Analytical Condition for the Onset of Dry Whip in Rotor-to-Stator Contact Systems // *Journal of Vibration and Acoustics*. Transactions of the ASME. 2005. V. 127. P. 594.
6. *Шатохин В.Ф.* Исследование развития обката ротора по статору в условиях разного быстрого действия систем защиты турбоагрегата // *Теплоэнергетика*. 2014. № 7. С. 53.
7. *Крестниковский К.В., Никифоров А.Н., Шохин А.Е.* Частота обкатки ротором статора в зависимости от величины зазоров между ними // *Справочник. Инженерный журнал*. 2018. № 8. С. 24.
8. *Никифоров А.Н.* Об обкатке статора ротором со многими степенями свободы вследствие трения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 10. С. 4.
9. *Бармина О.В., Никифоров А.Н.* Динамические характеристики ротора при непрерывном трении о статор // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019. № 3. С. 73.