

УДК 621.165:621.438:621.65.03

В.Ф. ШАТОХИН, С.Д. ЦИММЕРМАН*ОАО «Калужский турбинный завод», Россия***ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ОБКАТА
ПОСЛЕ МГНОВЕННОЙ РАЗБАЛАНСИРОВКИ РОТОРА**

Предполагается, что для обката (качения) ротора по статору существенное значение имеют кинематические характеристики, которые ротор приобрёл при его движении в зазоре, после какого либо воздействия (внешнего импульсного воздействия, мгновенной разбалансировки и т.п.). На примере однодискового ротора рассмотрено движение ротора в зазоре при различных величинах разбалансировки и динамических характеристиках ротора. Показаны условия возникновения обката, силы, возникающие в точке контакта ротора и статора, и изменение кинематических характеристик за время ударного взаимодействия. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что после мгновенной разбалансировки к моменту соприкосновения ротора со статором угловая скорость вращения ротора вокруг центра расточки статора сопоставима с угловой скоростью вращения ротора. При больших коэффициентах трения $f > 0,2$ время выхода на обкат τ мало зависит от степени отстройки от резонанса. В эксплуатации отмечен случай выхода на обкат (см. предыдущий доклад авторов), ротора, когда скорость его вращения была значительно удалена от резонанса, а другие обстоятельства, способствующие развитию обката, были созданы в процессе неправильной эксплуатации установки

мгновенная разбалансировка, обкат, контакт ротора и статора, кинематические характеристики движения**Введение**

Исключить поломки вращающихся элементов валопровода турбоагрегата (ТА) по различным причинам не представляется возможным. Например, по оценкам исследовательского института США EPRI, причиной 73% случаев вынужденных остановов паровых турбин ЭС являлись поломки рабочих лопаток [1]. Мгновенная разбалансировка ротора, связанная с отрывом лопатки или участка диска, приводит к нестационарным колебаниям ротора, соприкосновению вращающегося ротора со статором, а возможно и дальнейшему развитию аварии. Нестационарные колебания ротора после различного рода воздействий, обкат (качение) ротора по статору рассматривались многими авторами при разных способах представления этого достаточно сложного явления (см. список литературы в [2 – 4]). Опыты с вращающимся диском показывают, что с момента контакта с неподвижной поверхностью диск успокаивается, прежде чем начинается качение. Очевидцы

аварий ТА с катастрофическими последствиями [3] утверждают, что после ощутимого удара, на какое то мгновение, ТА затихает с последующим развитием процесса обката, и в худшем случае, вплоть до разрушения ТА.

В [5] приведен алгоритм расчёта нестационарных колебаний ротора в пределах зазора для достаточно сложной схематизации ротора на упруго-инерционных опорах с демпфированием, представлены результаты расчётов кинематических и силовых факторов при отсутствии контакта ротора со статором. Здесь для оценки порядка сил, возникающих после контакта ротора со статором в случае мгновенной разбалансировки величиной ϵ , определены кинематические характеристики движения однодискового ротора в зазоре, условия возникновения качения (обката) при контакте со статором, силы в точке контакта, изменения основных характеристик движения за время τ ударного взаимодействия между ротором и статором.

Постановка задачи

Диск на упругом безинерционном валу (рис. 1, а, б) вращается с угловой скоростью ω . На рис. 1: G – вес диска; g – ускорение свободного падения; ω – рабочая частота вращения ротора; p – собственная частота колебаний ротора; k – жёсткость ротора; f – коэффициент трения скольжения; r – радиус диска (вала); δ – зазор между ротором и статором; t – время; ε – величина разбалансировки; α – отношение рабочей частоты вращения к собственной частоте ротора; $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ – положение точки контакта, угловая скорость (ускорение) при движении диска вокруг центра расточки статора; T, N – сила трения, сила нормального давления в точке контакта; τ – время ударного взаимодействия; $I = 1/2 \cdot m \cdot r^2$ – момент инерции диска относительно собственной оси; $I_0 = I + m \cdot \delta^2$ – момент инерции диска относительно оси расточки статора.

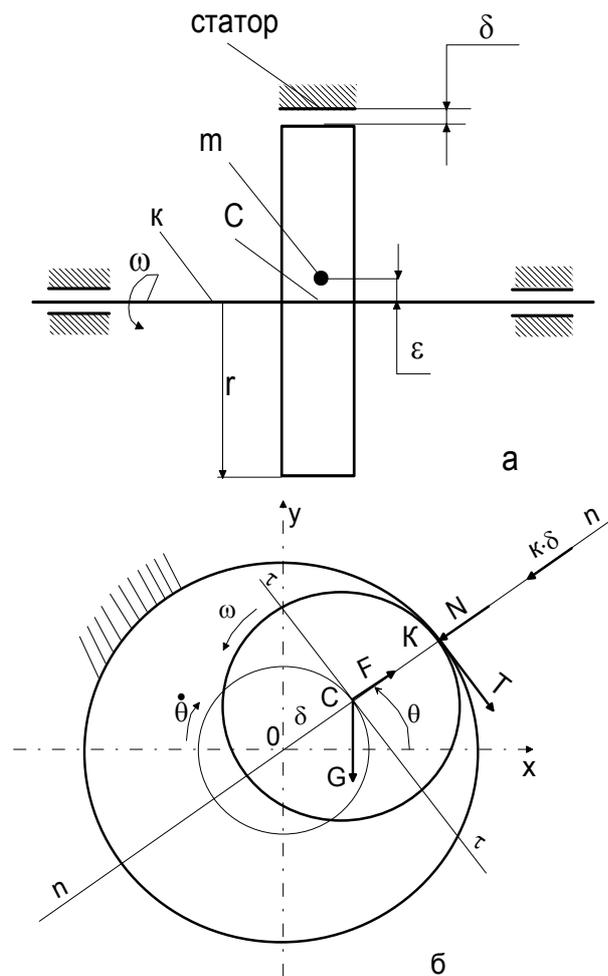


Рис. 1. Расчетная схема: а – ротор; б – схема контакта ротора со статором

Время торможения ротора в момент контакта принято за время τ ударного взаимодействия между ротором и статором, время выхода на обкат. Величина мгновенной разбалансировки – порядка 0.1% от веса ротора на радиусе 1 м.

Условия, необходимые для развития обката

После мгновенной разбалансировки движение центра масс диска описывается дифференциальными уравнениями (1):

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + kx &= m\omega^2\varepsilon \cos \omega t; \\ m\ddot{y} + ky &= m\omega^2\varepsilon \sin \omega t; \\ \ddot{x} + p^2x &= \omega^2\varepsilon \cos \omega t; \\ \ddot{y} + p^2y &= \omega^2\varepsilon \sin \omega t; \\ p^2 &= \frac{k}{m}; \quad \alpha = \frac{\omega}{p}. \end{aligned} \quad (1)$$

Решение уравнений (1) при начальных условиях: $t = 0; x = 0; y = 0; \dot{x} = 0; \dot{y} = 0$; позволяют получить кинематические характеристики движения ротора непосредственно в момент контакта со статором:

$$\begin{aligned} x &= -\frac{\alpha^2\varepsilon}{1-\alpha^2}(\cos pt - \cos \omega t); \\ y &= -\frac{\alpha^2\varepsilon}{1-\alpha^2}(\alpha \sin pt - \sin \omega t); \\ \dot{x} &= -p \cdot \frac{\alpha^2\varepsilon}{1-\alpha^2}(-\sin pt + \alpha \sin \omega t); \\ \dot{y} &= -p\alpha \frac{\alpha^2\varepsilon}{1-\alpha^2}(\cos pt - \cos \omega t). \end{aligned}$$

В момент контакта: $(\delta - \sqrt{x^2 + y^2} = 0)$ дополнительно определяется:

$$\begin{aligned} \theta &= \arctg \frac{x}{y}; \quad \dot{\theta} = \frac{y\dot{x} - \dot{y}x}{x^2 + y^2}; \\ r_C &= \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \dot{r}_C = \frac{x\dot{x} + y\dot{y}}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \end{aligned}$$

При контакте ротора со статором (рис. 1, б) ротор совершает плоское движение (2):

$$m\ddot{x} = -kx + F \cos \theta - N \cos \theta + T \sin \theta$$

$$m\ddot{y} = -ky + F \sin \theta - N \sin \theta - T \cos \theta - G$$

$$J_0 \ddot{\theta} = -T(r + \delta); \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = -T \cdot r; \quad x = \delta \cos \theta;$$

$$y = \delta \sin \theta; \quad F = \dot{\theta}^2 \cdot m \cdot \delta.$$

Учитывая, что:

$$\ddot{x} = \delta(-\cos \theta \cdot (\dot{\theta})^2 - \sin \theta \cdot \ddot{\theta});$$

$$\ddot{y} = \delta(-\sin \theta \cdot (\dot{\theta})^2 + \cos \theta \cdot \ddot{\theta}).^1$$

Из первых двух уравнений системы (2) получим:

$$\ddot{\theta} = -\frac{T}{m \cdot \delta} - \frac{g}{\delta} \cos \theta. \quad (3)$$

Из уравнения равновесия сил на нормаль $n-n$ в точке контакта ротора и статора (рис. 1, б):

$$-N + F - k \cdot \delta - G \cdot \sin \theta = 0;$$

$$N = \dot{\theta}^2 m \delta - k \delta - G \cdot \sin \theta;$$

$$N = G \left(\frac{\delta}{g} \dot{\theta}^2 - \sin \theta \right) - m \delta \cdot p^2. \quad (4)$$

Из третьего уравнения системы (2) и уравнения (3):

$$\ddot{\theta} = -\frac{r + \delta}{J_0} T;$$

$$-\frac{r + \delta}{J_0} T = -\frac{T}{m \delta} - \frac{g}{\delta} \cos \theta;$$

$$T = -\frac{J_0 \cdot m \delta}{J_0 - m \delta (r + \delta)} \cdot \frac{g}{\delta} \cos \theta, \quad (5)$$

где T – сила трения, необходимая для качения диска по статору.

Сила трения T может иметь значение: $0 \leq T \leq f \cdot N$ в зависимости от условий в точке контакта (т.к). Если $T \geq f \cdot N$ – контакт будет с проскальзыванием.

В общем случае качение возможно при:

$$Nf \geq \frac{J_0 \cdot m \delta}{J_0 - m \delta (r + \delta)} \cdot \frac{g}{\delta} \cos \theta. \quad (6)$$

В предположении: $T = T_{\max} = f \cdot N$ в начальный

момент контакта из уравнений 3, 4 системы (2) и уравнения (3):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{J_0}{m \delta} - (2r + \delta) \right) \cdot T + \frac{J_0 g}{J \delta} \cos \theta.$$

В момент контакта $t = t_n$; $\omega_n = 314$ рад/с.

$\dot{\theta}_n = \dot{\theta}$, $\theta_n = \theta$ – определяются решением уравнений (1) для момента выборки зазора.

По истечении времени ударного взаимодействия ротора и статора (времени выхода на обкат):

$$t = t_k; \quad \omega_k = 0;$$

$$\int_{\omega_n}^{\omega_k} d\omega = \int_{t_n}^{t_k} S dt; \quad \omega_k - \omega_n = S(t_k - t_n);$$

$$\tau = (\omega_k - \omega_n) / S, \quad (7)$$

где $S = \frac{1}{J} \left(\frac{J_0}{m \delta} - (2r + \delta) \right) \cdot T + \frac{J_0 \cdot g}{J \cdot \delta} \cos \theta;$

$\tau = t_k - t_n$ – время ударного взаимодействия (время выхода на обкат);

$$\kappa_t = \frac{N \cdot f}{T} \text{ – коэффициент запаса трения;}$$

$$\kappa_G = \frac{N}{G} \text{ – коэффициент нагрузки на статор в}$$

момент контакта.

В момент контакта ударный импульс определяется силой $T = f \cdot N$, силой N и временем ударного взаимодействия (τ).

Для тела, совершающего плоское движение, по теореме об изменении движения центра масс при ударе [7]:

$$m(\dot{x}_k - \dot{x}_n) = \sum S_{kx}^{(e)} = \int_0^{\tau} T_x d\tau + \int_0^{\tau} N_x d\tau;$$

$$m(\dot{y}_k - \dot{y}_n) = \sum S_{ky}^{(e)} = \int_0^{\tau} T_y d\tau + \int_0^{\tau} N_y d\tau;$$

$$J(\omega_k - \omega_n) + J_0(\dot{\theta}_k - \dot{\theta}_n) = -\int_0^{\tau} T(r + \delta) d\tau;$$

где $T_x = T \sin \theta = f \cdot N \sin \theta;$

$$T_y = -T \cos \theta = -f \cdot N \cos \theta;$$

¹ Уравнения (2) в момент контакта записаны для $\varepsilon = 0$ ротора.

$$\begin{aligned} N_x &= -N \cdot \cos \theta; \\ N_y &= -N \cdot \sin \theta; \\ \omega_n &= 314 \text{ рад/с}; \\ \omega_k &= 0, \end{aligned}$$

тогда

$$\begin{aligned} \dot{x}_k - \dot{x}_n &= \frac{1}{m} \left[\int_0^\tau f \cdot N \sin \theta \cdot d\tau - \int_0^\tau N \cos \theta \cdot d\tau \right]; \\ \dot{y}_k - \dot{y}_n &= \frac{1}{m} \left[-\int_0^\tau f \cdot N \cos \theta \cdot d\tau - \int_0^\tau N \sin \theta \cdot d\tau \right]; \\ \dot{\theta}_k - \dot{\theta}_n &= \frac{1}{J_0} \left[-J(\omega_k - \omega_H) - \int_0^\tau T \cdot d\tau \cdot (r + \delta) \right]; \\ \dot{x}_k - \dot{x}_n &= \Delta \dot{x}; \dot{y}_k - \dot{y}_n = \Delta \dot{y}; \dot{\theta}_k - \dot{\theta}_n = \Delta \dot{\theta}; \end{aligned}$$

$\Delta \dot{x}$, $\Delta \dot{y}$, $\Delta \dot{\theta}$ – изменение линейных скоростей и угловой скорости обката за время удара.

По приведённому алгоритму составлена программа расчёта для П.К., позволяющая выполнить оценку условий, возникающих после мгновенной разбалансировки ротора.

Пример: Для ротора $G = 10$ т, вращающегося с угловой скоростью:

$$\begin{aligned} \omega &= 314 \text{ рад/с}; \\ \alpha &= 0,75 \div 1,25; \\ f &= 0,25 \div 0,05; \\ r &= 0,22 \text{ м}; \\ \varepsilon &= (0,7 \div 1,5) 10^{-3} \text{ м}; \\ \delta &= 0,0025 \text{ м} \end{aligned}$$

при условии контакта по диафрагменным уплотнениям получены (таблица) основные кинематические и силовые характеристики в момент контакта. Варианты с $\kappa_t < 1$ указывают на контакт с проскальзыванием.

Время движения в зазоре Δt , как и время выхода на обкат τ считаются важным качественным фактором развития нестационарных колебаний ротора, так как эти показатели будут определять время дей-

ствия сил сопротивления, препятствующих развитию колебаний.

Основные результаты расчётов представлены ниже в таблице и на рис. 2, 3.

За короткий промежуток времени ударного взаимодействия ротора со статором (доли секунды) угловая скорость вращения ротора вокруг центра расточки статора возрастает более чем в 2 раза. Значения Δt , τ зависят как от величины разбалансировки ротора, так и от близости рабочей скорости к собственной частоте колебаний ротора (табл. 1, рис. 2, 3).

При больших коэффициентах трения $f > 0,2$ время выхода на обкат τ мало зависит от степени отстройки от резонанса.

Полученные результаты показывают возможность развития явления обката при разбалансировках более 0,1% G на радиусе 1 м и коэффициентах трения стали по стали.

Выводы

1. Время развития процесса нестационарных колебаний ротора в зазоре до соприкосновения со статором уменьшается с увеличением разбалансировки. Например, при относительно малой величине разбалансировки 0,07% G и отстройке от резонанса действие веса ротора приводит к хаотической траектории движения.

2. В момент соприкосновения ротора со статором угловая скорость вращения ротора вокруг центра расточки статора сопоставима с угловой скоростью вращения ротора.

3. В доли секунды за время ударного взаимодействия ротора и статора (до начала обката) угловая скорость движения ротора вокруг центра расточки статора возрастает более чем в 2 раза.

4. Время выхода на обкат после соприкосновения ротора и статора уменьшается с увеличением коэффициента трения скольжения в месте контакта,

Таблица 1
 Результаты расчёта основных кинематических характеристик движения ротора в момент контакта со статором и за время ударного взаимодействия

Зазор, δ	Кoeffициент трения, f	$\alpha = \omega / p$	Мгновенная разбалансировка, ε	Угол контакта, θ	Угловая скорость, $\dot{\theta}$	Кoeffициенты		Время ударного взаимодействия, τ	$\Delta \dot{x}$	$\Delta \dot{y}$	Угловая скорость в конце удара, $\dot{\theta}$	
						Запас трения, κT	Нагрузка, κG					
$r = 220 \text{ мм}$ – радиус контакта; $\omega = 314 \text{ рад/с}$ (ротор жесткий $\alpha < 1$)												
мм	–	–	% от G	рад	рад/с	–	–	с	м/с	м/с	рад/с	
2,5	0,15	0,75	0,07	1,465	399,6	4,84	3,47	0,217	-6,5	3,6	712	
		0,15	0,15	1,351	291,8	3,92	23,95	0,025	1,14	5,74	606	
		0,07	0,07	1,465	328,5	2,9	2,07	0,024	0,68	-3,4	643	
	0,05	0,15	0,15	0,897	0,897	396,6	3,03	14,4	0,012	2,7	-3,2	711
		0,07	0,07	-1,083	399,6	1,62	3,47	7,95	0,114	3,4	1,9	713
		0,15	0,15	1,351	291,8	1,31	23,95	0,073	4,4	19,8	606	
$\alpha > 1$ (ротор гибкий)												
2,5	0,15	1,025	0,07	1,465	343,9	9,97	7,13	0,0236	1,66	-3,56	658,5	
		0,15	0,15	0,474	383,2	2,61	14,01	0,0117	3,35	-1,86	702,1	
		0,07	0,07	1,465	236	3,64	2,6	0,0189	-4,2	-4,4	548,6	
	0,05	0,15	0,15	0,735	143,6	2,18	11,5	0,0072	7,26	6,86	459,6	
		0,07	0,07	0,1465	343,9	3,32	7,13	0,0236	3,05	-6,9	657,9	
		0,15	0,15	-0,5307	383,2	0,87	←	0,0189	-2,5	-2,47	549,8	
← контакт с проскальзыванием												

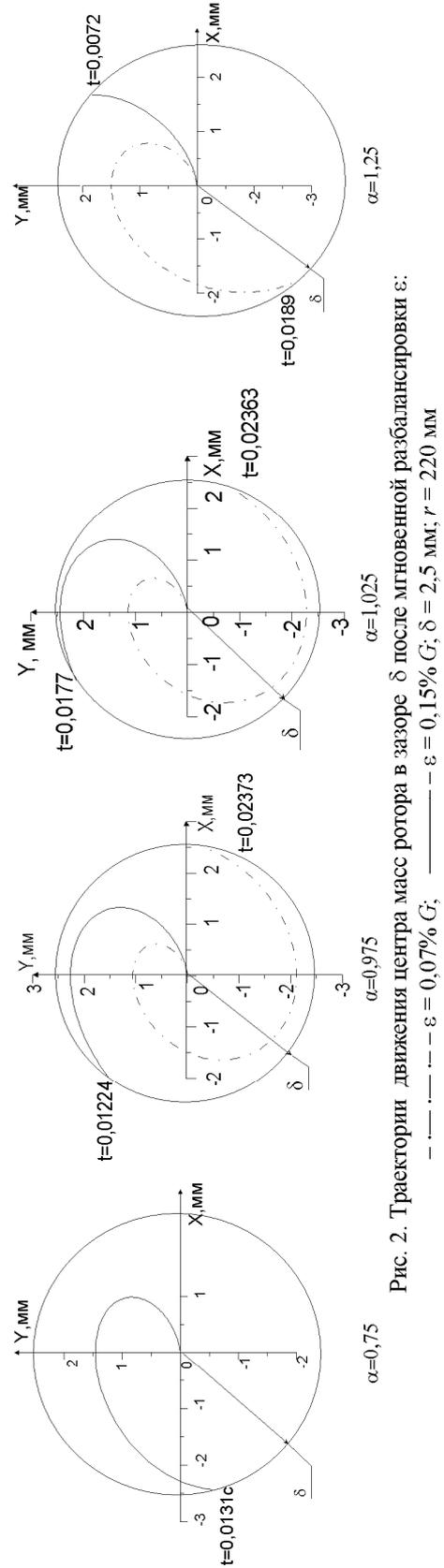


Рис. 2. Траектории движения центра масс ротора в зазоре δ после мгновенной разбалансировки ε :
 - - - - $\varepsilon = 0,07\% G$; — — — — $\varepsilon = 0,15\% G$; $\delta = 2,5 \text{ мм}$; $r = 220 \text{ мм}$

приближением к резонансу, увеличением разбалансировки и имеет порядок десятых и сотых долей секунды, что составляет $\sim(5 - 0,5)$ оборотов ротора. При больших коэффициентах трения $f > 0,2$ время выхода на обкат τ мало зависит от степени отстройки от резонанса.

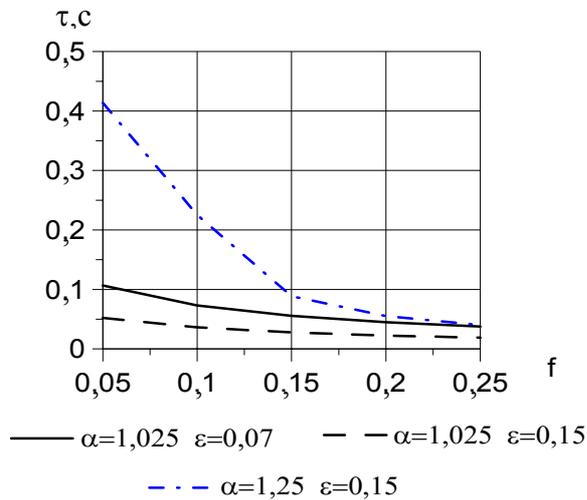


Рис. 3. Зависимость времени выхода на обкат τ от коэффициента трения скольжения f

Литература

1. Коррозионная усталость рабочих лопаток / М.А. Вирченко, Е.Б. Левченко, Б.А. Аркадьев и др. // Энергетика. – 1997. – № 6. – С. 32-36.
2. Щегляев А. В., Костюк А.Г. Действие внезапной разбалансировки на ротор турбогенератора // Теплоэнергетика. – 1969. – № 8. – С. 5-10.

3. Шатохин В.Ф. Циммерман С.Д. Разработка системы предотвращения катастроф агрегатов. Часть 1. Анализ катастрофических аварий и постановка задачи // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2005. – 10/26. – С. 19-31.

4. Шатохин В.Ф. Некоторые предложения по предотвращению катастроф, связанных с разрушением турбоагрегатов // Вестник машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 25-31.

5. Шатохин В.Ф. Циммерман С.Д. Колебания ротора турбоагрегата при нестационарном кинематическом воздействии. Метод расчёта // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2006. – 8/34. – С. 57-68.

6. Артоболевский И.И., Костицин В.Т., Раевский Н.П. Об одном состоянии вала, вращающегося в подшипнике без смазки с зазором // Изв. Академии наук СССР, отделение технических наук. – 1949. – № 2. – С. 168-173.

7. Курс теоретической механики / В.В. Добродрагов и др. – М.: Высш. шк., 1966. – 624 с.

Поступила в редакцию 6. 05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.Л. Лукашенко, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия.