

УДК 621.165:621.438:621.65.03

В.Ф. ШАТОХИН, С.Д. ЦИММЕРМАН**ОАО «Калужский турбинный завод», Россия****ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ В МЕСТЕ КОНТАКТА РОТОРА СО СТАТОРОМ
НА РАЗВИТИЕ ОБКАТА ПОСЛЕ МГНОВЕННОЙ РАЗБАЛАНСИРОВКИ РОТОРА**

Приведены результаты численного моделирования движения однодискового ротора на опорах в зазоре с контактом со статором (задеванием о статор или обкатом по статору) после мгновенной разбалансировки ротора. Рассматривается разная частотная отстройка ротора от оборотной частоты в момент мгновенной разбалансировки (жесткий, гибкий ротор, разбалансировка в зоне резонанса, ротор на неравножестких опорах). Приведена классификация траекторий развития нестационарного процесса колебаний после мгновенной разбалансировки, показано влияние величины зазора, коэффициента трения скольжения в месте контакта, демпфирования в статоре на развитие опасной формы обката с нарастающими амплитудами (неустановившийся процесс колебаний). Анализ траекторий движения показывает, что обкат с нарастающими амплитудами возможен для любого типа ротора при превышении некоторого допустимого уровня разбалансировки. Например, для жесткого ротора допустимый уровень выше (в 2 – 2,5 раза), чем для гибкого ротора; при разбалансировке в зоне резонанса допустимый уровень снижается в несколько раз по сравнению с гибким ротором при сохранении характеристик контакта. Допустимый уровень разбалансировки зависит и от величины зазора (уменьшается пропорционально зазору). Увеличение коэффициента трения скольжения в месте контакта ротора со статором способствует возникновению обката. При отсутствии силы трения ($f = 0$) между ротором и статором опасная форма обката не возникает; при любой отстройке от резонанса обкат имеет установившуюся форму независимо от величины мгновенной разбалансировки. Демпфирование в статоре стабилизирует амплитуды нестационарных колебаний и нарушает развитие опасной формы обката. Численное моделирование процесса переходных колебаний позволяет, в условиях принятой расчетной схемы, оценить опасность возникновения обката после мгновенной разбалансировки.

Ключевые слова: обкат, мгновенная разбалансировка, жесткость и демпфирование статора в месте контакта ротора со статором.

Введение

Ряд аварий турбоагрегатов (ТА), описанных в периодической печати, сопровождался значительными силами со стороны вращающегося ротора на статор, что заканчивалось в лучшем случае вытяжкой крепежа, соединяющего верхний и нижний части корпуса турбины, с раскрытием неопорных связей (трубопроводов и т.п.), с характерными для развития явления обката [3] смятиями усов уплотнений и натирами на внутренней поверхности корпуса, на поверхности ротора, а в худшем случае - разрушением турбоагрегата [2 – 4].

Причиной таких последствий может быть контакт вращающегося ротора со статором вследствие какого либо воздействия на ротор (мгновенная разбалансировка ротора, внешнее воздействие на турбоагрегат в виде взрыва, землетрясения, повышенная вибрация ротора при вынужденных или самовозбуждающихся колебаниях).

Характер нестационарных колебаний ротора после указанных воздействий будет зависеть как от динамических характеристик ротора, величины раз-

балансировки, так и от параметров статора в точке контакта.

Выполненные в [1, 4] оценки по соотношениям скоростей для упрощенной кинематической схемы касания вращающегося ротора с жестким статором, действительно указывают на возможные значительные по величине силы давления на статор и угловые скорости обката, во много раз превышающие угловую скорость собственного вращения. Поэтому версия объяснения причин катастрофических разрушений турбоагрегатов, случившихся, в том числе и в последнее время, обкатом ротора по статору существует уже с конца 70-х годов прошлого века. Но, что действительно происходит в случае усложнения схемы контакта вращающегося ротора, например, с учетом сопротивления движению ротора со стороны элементов уплотнения и со стороны не абсолютно жесткого статора, пока не ясно? Ограничивается ли переходный процесс только периодическими контактами ротора со статором (отскоками), как утверждает ряд исследователей, и как влияют отстройка ротора от резонанса, параметры статора в точке контакта на характер траекторий движения ротора с контактом со

статором, а, следовательно, и на силы в точке контакта? Действительно ли силы в точке контакта столь опасны с точки зрения целостности турбоагрегата? В конце концов, могут ли они привести к катастрофическим последствиям? А последствия разрушения турбоагрегата - это пожар, разрушение прочного корпуса, если силовая установка транспортная, или фундамента (здания) стационарного турбоагрегата. Примеры последствий таких разрушений приведены в периодической печати для ряда турбоагрегатов отечественного и зарубежного изготовления.

В [7] приведены результаты исследования нестационарных колебаний ротора на трёх опорах при импульсном кинематическом воздействии без учёта касаний ротора со статором, показывающие, что зазоры, принимаемые в реальных конструкциях, могут выбираться, а касание вращающегося ротора со статором возможно и при умеренных величинах воздействий. В [6] рассмотрен алгоритм нестационарных колебаний ротора, как одномассовой системы, на опорах с контактом (периодическим или непрерывным) со статором в случае мгновенной разбалансировки ротора. При численном моделировании развивающегося процесса обката получены траектории движения, силы в точке контакта для двух случаев: ротор совершает свободный выбег и его скорость уменьшается в моменты контакта со статором за счёт трения в месте контакта; генератор не отключен от сети и угловая скорость ротора сохраняется в процессе нестационарных колебаний.

Обкат ротора по статору, как результат предшествующего воздействия, будем определять безотрывным движением с амплитудами, превышающими величину зазора, определяемого расстоянием между жёсткими элементами подвижной и неподвижной частей конструкции, а также движением, когда амплитуды колебаний и сила нормального давления ротора на статор возрастают (неустановившийся процесс колебаний).

1. Постановка задачи

Для модели ротора, приведенной на рис. 1, необходимо рассмотреть влияние типа ротора и параметров статора в местах контакта с ротором на развитие нестационарных колебаний и возможного перехода ротора в обкат по статору. Принятые обозначения в тексте соответствуют [6]. Некоторые обозначения из [6]: ε – величина разбалансировки; α_1, α_2 – отношение рабочей частоты вращения к собственной частоте колебаний ротора (характеризует отстройку от резонанса для ротора на изотропных или анизотропных опорах); $\theta, \dot{\theta}$ – положение центра ротора, угловая скорость прецессии; $T = f N$;

N – сила трения, сила нормального давления в точке контакта; p_1, p_2 – собственные частоты колебаний ротора в горизонтальном (1) направлении и в вертикальном (2) направлении; $Q = f(w)$ – жёсткость статора, зависящая, в общем случае, от его деформации и направления скорости движения ротора; r – радиус диска; δ_0 – минимальный радиальный зазор между ротором и уплотнением; δ – зазор между относительно жёсткими элементами ротора и статора; t – время исследования переходного процесса; w, w_1, w_2 – перемещение ротора и составляющие перемещения по направлениям 1 и 2; f – коэффициент трения скольжения между ротором и статором в месте контакта; G – вес ротора.

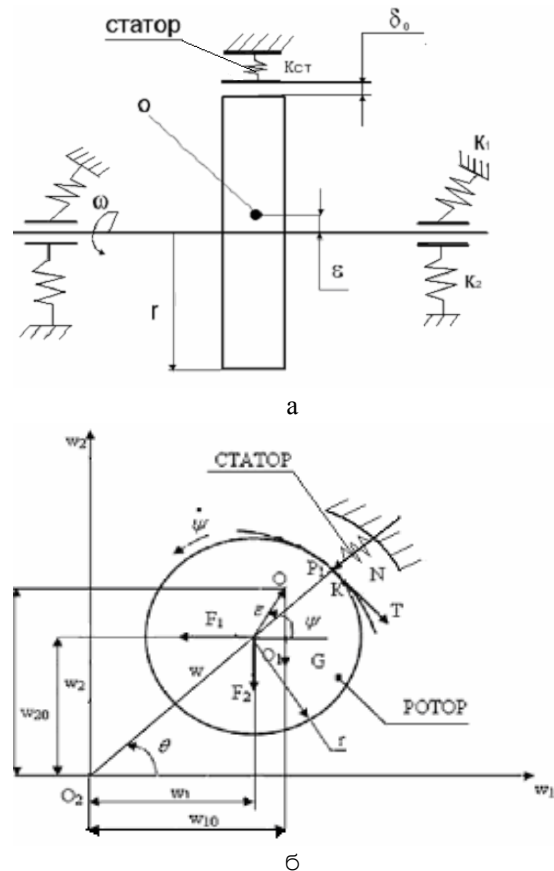


Рис. 1. Расчетная схема:

а – ротор; б – схема контакта ротора со статором

Алгоритм исследования: математический аппарат и программы [6] для ПК, доработанные на учёт нелинейной жёсткости статора и потерь энергии при деформировании статора.

Нелинейная характеристика статорных элементов представляется кусочно-линейной зависимостью в координатах «сила-перемещение» и учитывает сам зазор с отсутствием сопротивления движению (жёсткость нулевая), нелинейную жёсткость уплотнительного устройства (жёсткость услов уплотнений, жёсткость пружин сегмента уплотнения) и жёст-

кость самого корпуса, как правило, на несколько порядков большую жёсткости элементов уплотнительного устройства). Демпфирование статора в месте контакта задаётся петлёй гистерезиса в координатах «сила-перемещение». Учёт характеристик петли гистерезиса (нагрузочная или разгрузочная её участки) определяется расчётом направления скорости деформирования статора на каждом шаге интегрирования системы уравнений движения ротора, как это отмечено в [7].

Выбор шага t_1 интегрирования выполнен с учётом существующих рекомендаций [7] по частотным характеристикам ротора при контакте с жёстким элементом статора ($t_1 < 0,1 T_1$, где T_1 – период колебаний) и проверен вариантами расчётами.

Величина мгновенной разбалансировки – порядка $(0,01 - 0,45)\% \cdot G$ на радиусе 1 м для обеспечения контакта ротора со статором и гарантированно обката ротора по статору.

Как показал анализ [2 – 5] развития аварийных ситуаций, обкат ротора по статору развивается в течение короткого промежутка времени. Ниже рассматривается один из вариантов алгоритма [6], когда после мгновенной разбалансировки угловая скорость $\dot{\psi}$ ротора сохраняется постоянной независимо от трения в местах контакта (генератор не отключен от сети). Относительная опасность двух рассмотренных в [6] случаев разбалансировки здесь не рассматривается.

Условие контакта вращающегося ротора со статором:

$$w = \sqrt{w_1^2 + w_2^2} = \delta_0. \quad (1)$$

При $w = \delta$ контакт ротора происходит уже с относительно жёстким элементом статора. На рисунках траекторий переходных колебаний ротора после мгновенной разбалансировки, для условной ориентировки положения ротора и относительно жёсткого элемента статора, указывается окружность радиусом $r = \delta$. В относительных единицах $r = 1$. Перемещения ротора $\bar{w}$ также определяются в относительных единицах [6]. Жёсткость элементов уплотнительного устройства, хотя и создаёт слабое сопротивление движению ротора, учитывается после перемещений ротора, превышающих зазор δ_0 (1).

2. Результаты исследований

Для исследования движения ротора при различных значениях веса оторвавшегося груза и различной отстройке ротора от резонанса приняты данные, аналогичные [6]:

$G = 10$ тс; $g = 9,81$ м/с²; $\omega = 314$ рад/с; $r = 0,22$ м; $\delta = 2,8$ мм; $\psi_0 = 0$; $\varepsilon = (0,01 - 0,45) \cdot 10^{-2}$ м; $t \leq 0,325$ с.

Жёсткостная характеристика статора в координатах «сила-перемещение» приведена в табл. 1.

Таблица 1

Жёсткостная характеристика статора в координатах «сила-перемещение»

w, мм	0,0	0,3	2,8	5,3	10,3	12,8
Q_1 , тс	0,0	0,0	0,05	905	2714	3618
Q_2 , тс *	0,0	0,0	0,05	0,3 (905)	271,7 (2714)	1216,7 (3618)

*) в скобках указаны значения сил разгрузочной части петли гистерезиса в случае отсутствия потерь в статоре.

Задание соответствующей $w = 5,3; 10,3; 12,8$ мм силы (значения приведены в скобках) позволяет перейти от характеристики (рис. 2) к кусочно-линейной характеристике жёсткости с совпадающими значениями силы по нагрузочной и разгрузочной участкам петли гистерезиса. Эти два варианта задания характеристик статора рассматривались в процессе расчётов для исследования влияния потерь в статоре на развитие обката. Малые сопротивления движению ротора со стороны усов уплотнений, пружин обойм уплотнений учитываются, но они не оказывают существенного влияния на движение ротора и не могут вызывать обкат ротора по статору. Расчёты выполнены с учётом действия веса G ротора.

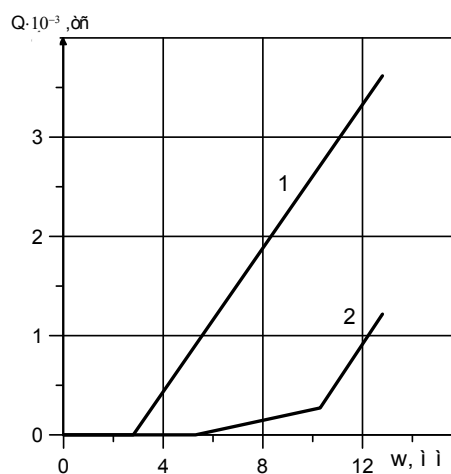
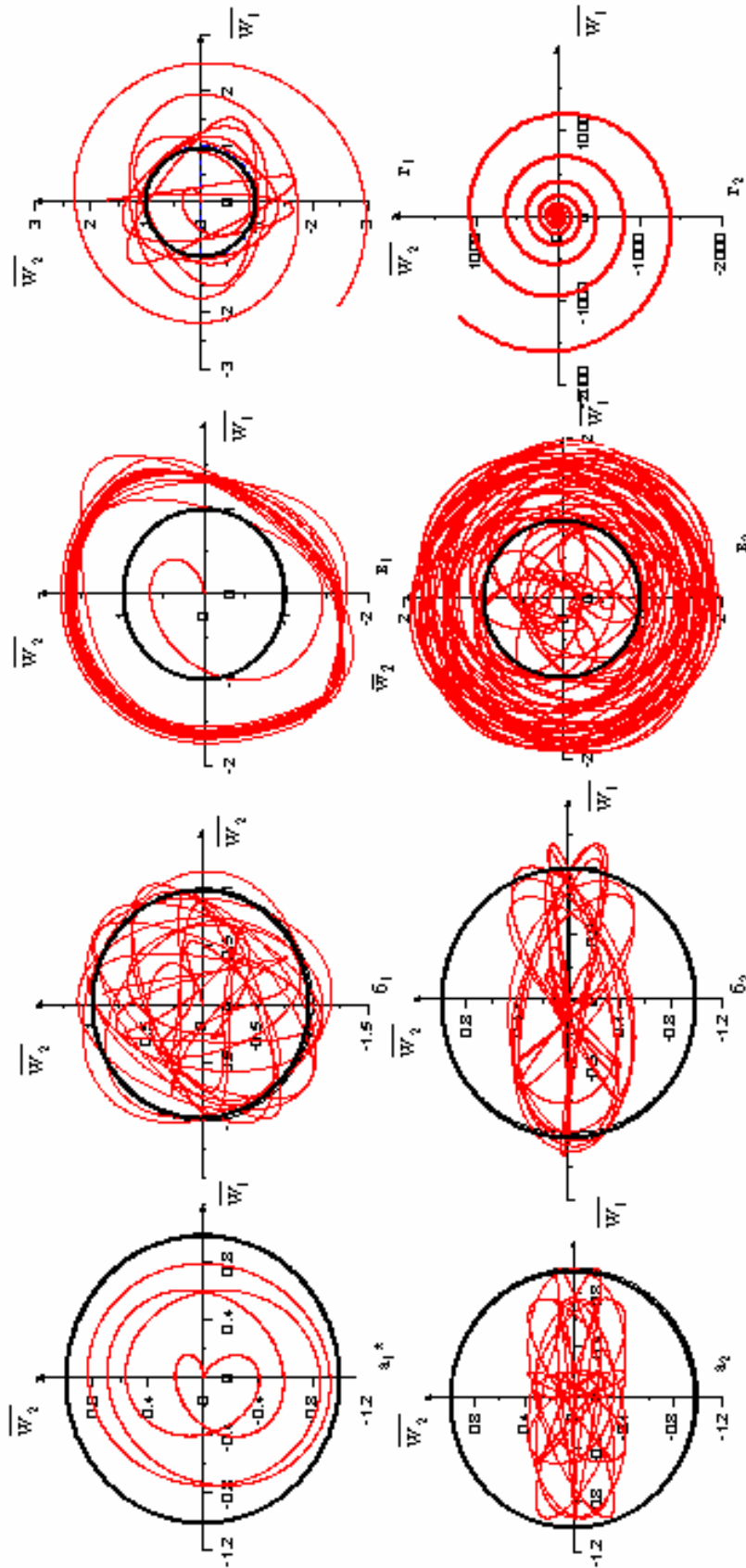


Рис. 2. Жёсткостная характеристика статора с учётом потерь: 1 – нагрузочная часть петли гистерезиса; 2 – разгрузочная часть

В пределах принятой расчётной схемы (рис. 1) выявлено несколько характерных видов (форм) траекторий движения ротора (рис. 3):

– установившаяся траектория движения ротора внутри зазора [8] (без задеваний о статор, рис. 3, а) при отсутствии сопротивления движению будет следствием наложения незатухающих колебаний с собственной частотой p вместе с центром вала и вынужденных колебаний с частотой ω от приобретенной в процессе мгновенной разбалансировки



Несимметричные (a_1) траектории связаны с учётом веса ротора

Рис. 3. Классификация характерных видов (форм) траекторий нестационарных колебаний ротора после мгновенной разбалансировки:

a_1, a_2 – движение внутри зазора δ ротора на равножестких (a_1) и неравножестких (a_2) в направлении 1 и 2 опорах;

b_1, b_2 – движение с периодическими контактами со статором;

v – установившийся процесс обката (с демпфированием в статоре (v_1) и без демпфирования в статоре и $f=0$ (v_2);

Γ_1, Γ_2 – обкат с возрастающими амплитудами колебаний (неустановившийся процесс обката);

Γ_1 – момент изменения направления движения по траектории; Γ_2 – дальнейшее развитие опасной формы обката

неуравновешенности. Поэтому вид траектории движения будет зависеть от $\alpha = \omega/p$. На рис. 3, а₁; 3, а₂ траектории движения показаны для $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,25$ и $\alpha_1 = 1,25$, $\alpha_2 = 0,75$, соответственно. При других значениях α траектории имеют большее число петель и узлов. Наличие сопротивления движению ротора приводит к постепенному затуханию колебаний с частотой p и вид установившейся траектории будет определяться только вынужденными колебаниями с частотой ω . В общем случае можно говорить о допустимом уровне ϵ_d мгновенной разбалансировки ротора, который ещё не приводит к контакту вращающегося ротора с жёстким элементом статора. Уменьшение зазора δ во столько же раз уменьшает допустимый уровень разбалансировки ϵ_d ротора. Для жёсткого ротора допустимый уровень ϵ_d больше, чем для гибкого ротора в 2 – 2,5 раза. В случае ротора на неравножестких опорах нестационарные колебания происходят, в основном, в плоскости наименьшей жёсткости (рис. 3, а₂).

– движение с периодическим контактом со статором (рис. 3, б). Периодический контакт ротора со статором характерен для всех типов роторов на начальном временном интервале движения ротора с контактом и может рассматриваться как вид траектории движения при незначительном $(1,1 - 1,2) \cdot \epsilon_d$ превышении допустимого уровня разбалансировки. В этом случае контакты ротора могут быть по всей окружности статора или в плоскости минимальной жёсткости (рис. 3, б₂) в случае неравножестких в направлении 1 и 2 опор. Последнее не исключает переход в обкат в случае дальнейшего превышения ϵ_d . Если статор податливый, то периодические контакты переходят в безотрывное движение;

– безотрывное движение ротора по статору (рис. 3, в), как установившийся процесс обката, после переходных колебаний ротора от приобретенной неуравновешенности. Такая траектория движения характерна для любого типа ротора при превышении ϵ_d (в 1,2 и более раз), относительно податливого статора или достаточном демпфировании в статоре (рис. 3, в₁). Силы, возникающие в месте контакта, будут зависеть от уровня разбалансировки, жёсткости статора. Такой вид обката и характерные дефекты после выхода из него описаны в [5];

– обкат с возрастающими амплитудами (рис. 3, г₁) деформации статора и силами в точке контакта, превышающими в сотни раз вес ротора. Этот наиболее опасный вид обката (неустановившийся процесс) возникает при больших коэффициентах трения ($f > 0,1$) скольжения в месте контакта, незначительном демпфировании в статоре; особенно характерен он при разбалансировках в районе резонанса, прохождении через резонанс. Для жёсткого ротора, кроме отмеченного, необходима значительная (в 2 –

2,5 раза больше) разбалансировка по сравнению с гибким ротором. Характерная особенность неустановившегося процесса обката: после начальных контактов (контакта) со статором в процессе переходных колебаний направление скорости прецессии $\dot{\theta}$ меняется на обратное (траектория движения меняет направление обычно после достаточно острого угла входа и выхода из контакта, рис. 3, г₁). После этого процесс движения становится необратимым. В [5] такое развитие процесса обката названо ликвидационным процессом. Примером развития обката в такой форме и его последствий являются катастрофические разрушения турбоагрегатов, описание которых приведены в [2 – 5].

Интересно, что в случае установившегося процесса обката наблюдалось несколько изменений направления скорости прецессии $\dot{\theta}$, но, в конце концов, дальнейшее движение продолжалось с прямой прецессией и естественными уменьшениями величины $\dot{\theta}$ в моменты контакта. $t \leq 0,325$ с – выбрано из условия, что переходные колебания ротора даже при уровнях разбалансировки, незначительно превышающих допустимый уровень ϵ_d , заканчиваются, и процесс колебаний приобретает либо установившийся характер, либо амплитуды колебаний возрастают (неустановившийся процесс). В некоторых случаях t увеличивалось в несколько раз для уточнения характера обката (установившийся или неустановившийся).

Исключить полностью причины развития обката ротора по статору, по-видимому, невозможно. Задача заключается в разработке способов смягчения его последствий, например, ограничением амплитуд колебаний, как это показано для установившегося процесса обката (рис. 3, в). Ниже, для иллюстрации, приведены примеры развития наиболее опасного вида (рис. 3, г) обката и результаты стабилизации процесса обката за счёт уменьшения коэффициента трения скольжения в месте контакта и демпфирования в статоре.

Влияние зазора на развитие обката. При увеличении зазора δ между ротором и относительно жёстким элементом статора возрастает и допустимый уровень ϵ_d разбалансировки, необходимый для обеспечения касания ротора со статором. Зависимость прямо пропорциональная. Приведенная на рис. 3 классификация траекторий движения ротора с контактом со статором, если контакт произошёл, сохраняется при увеличенном зазоре и, лишь в деталях, зависит от величины зазора.

Влияние коэффициента трения скольжения f на развитие обката. Для последующих сравнений выбран гибкий ротор ($\alpha_1 = \alpha_2 = 1,25$), отстроенный от резонанса на 25% с зазором $\delta = 2,8$ мм. Демпфиро-

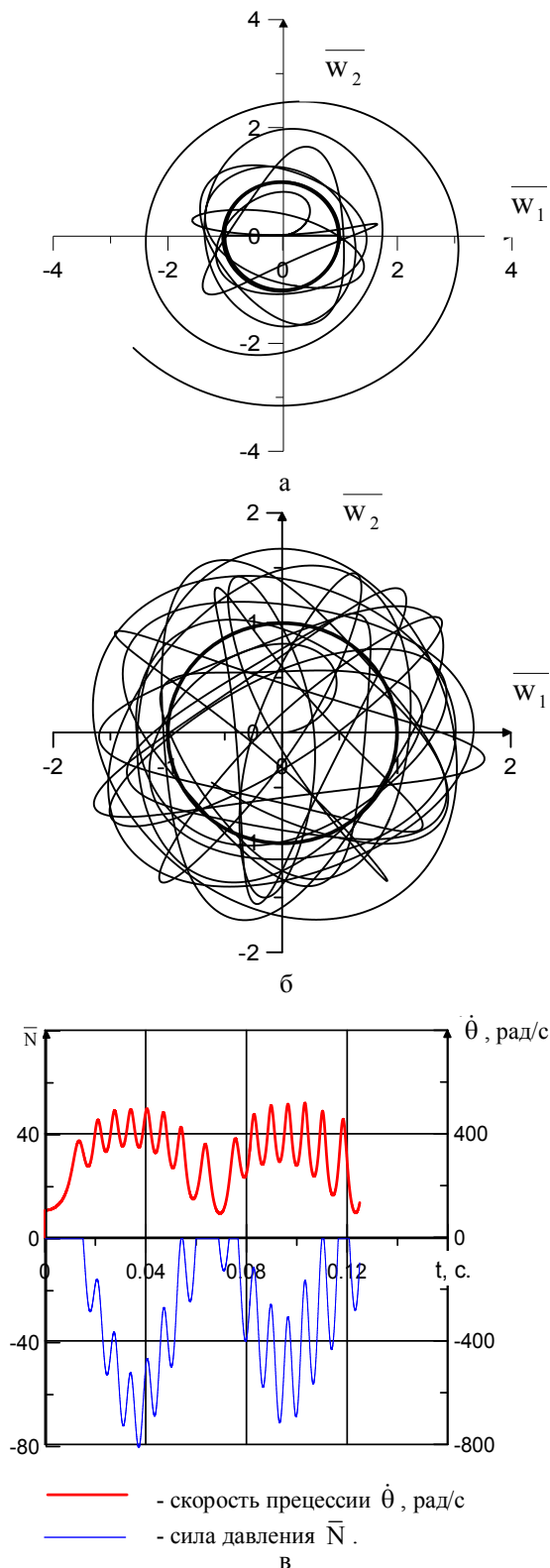


Рис. 4. Развитие обката гибкого ротора с

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1,25; \quad \varepsilon = 0,12 \cdot 10^{-2} \text{ м } (0,12\%G$$

на радиусе 1 м) после мгновенной разбалансировки при изменении коэффициента трения скольжения f :

а – $f = 0,2$ в интервале $t = 0 \div 0,125$ с; б – $f = 0,05$

в интервале $t = 0 \div 0,325$ с; в – изменение $\bar{N}$ и $\dot{\theta}$ на начальном участке интервала времени t при $f = 0,2$

вание в статоре отсутствует. Величина разбалансировки принята заведомо выше (в 2 раза) допустимого уровня ε_d , как и коэффициент трения скольжения $f = 0,2$, чтобы обеспечить обкат, соответствующий рис. 3, г. На рис. 4, а приведены траектория движения ротора после мгновенной разбалансировки, а также изменение скорости прецессии $\dot{\theta}$ и реакции статора $\bar{N}$ ($N = \bar{N} \cdot G$) в процессе переходных колебаний на начальном участке интервала времени t .

На рис. 4, б те же параметры нестационарного процесса показаны для случая $f = 0,05$. Процесс колебаний установившийся (аналогично рис. 3, б₁) с периодическими ударами по всей окружности расточки статора. В случае $f = 0$ опасная форма обката не возбуждается при любой отстройке ротора от резонанса. Независимо от величины мгновенной разбалансировки возникает только установившаяся форма обката. Таким образом, за развитие опасной формы обката ответственна сила трения (точнее её величина) между ротором и статором. При превышении некоторого предельного (для данных условий контакта) значения силы трения характер обката меняется от установившейся траектории движения ротора с контактом со статором (рис. 7, а) к неустановившейся форме обката (рис. 7, б) с возрастающими амплитудами колебаний.

Влияние жёсткости статора на развитие обката. Податливость статора уменьшает влияние силы трения на развитие опасной формы обката, и при большой податливости статора обкат стремится к установившейся форме колебаний свободного ротора на опорах. С увеличением жёсткости статора переход к опасной форме обката происходит в более короткий промежуток времени. Поэтому контакт с жёстким элементом статора несёт большую угрозу, чем с податливым элементом.

Влияние демпфирования в статоре на развитие обката. Дополнительно к исходным данным (рис. 4, а) учитывается демпфирование в статоре в соответствии с табл. 1 (рис. 2). Результаты, приведенные на рис. 5, показывают, что наиболее радикальным способом стабилизации амплитуд колебаний при развитии обката является увеличение демпфирования в статоре. Сравнение результатов (рис. 5) необходимо выполнять с результатами рис. 4а. Положительным в этом случае является следующее: силы, всё-таки, ограничены по величине, а время для срабатывания системы защиты увеличивается и это, по-видимому, главный выигрыш в смягчении последствий развития обката ротора по статору. Например, для рассматриваемого ротора с учётом демпфирования в статоре периодическая сила давления на статор $N \leq 80 \cdot G$ в случае значительной по величине разбалансировки $\varepsilon = 2,5 \varepsilon_d$.

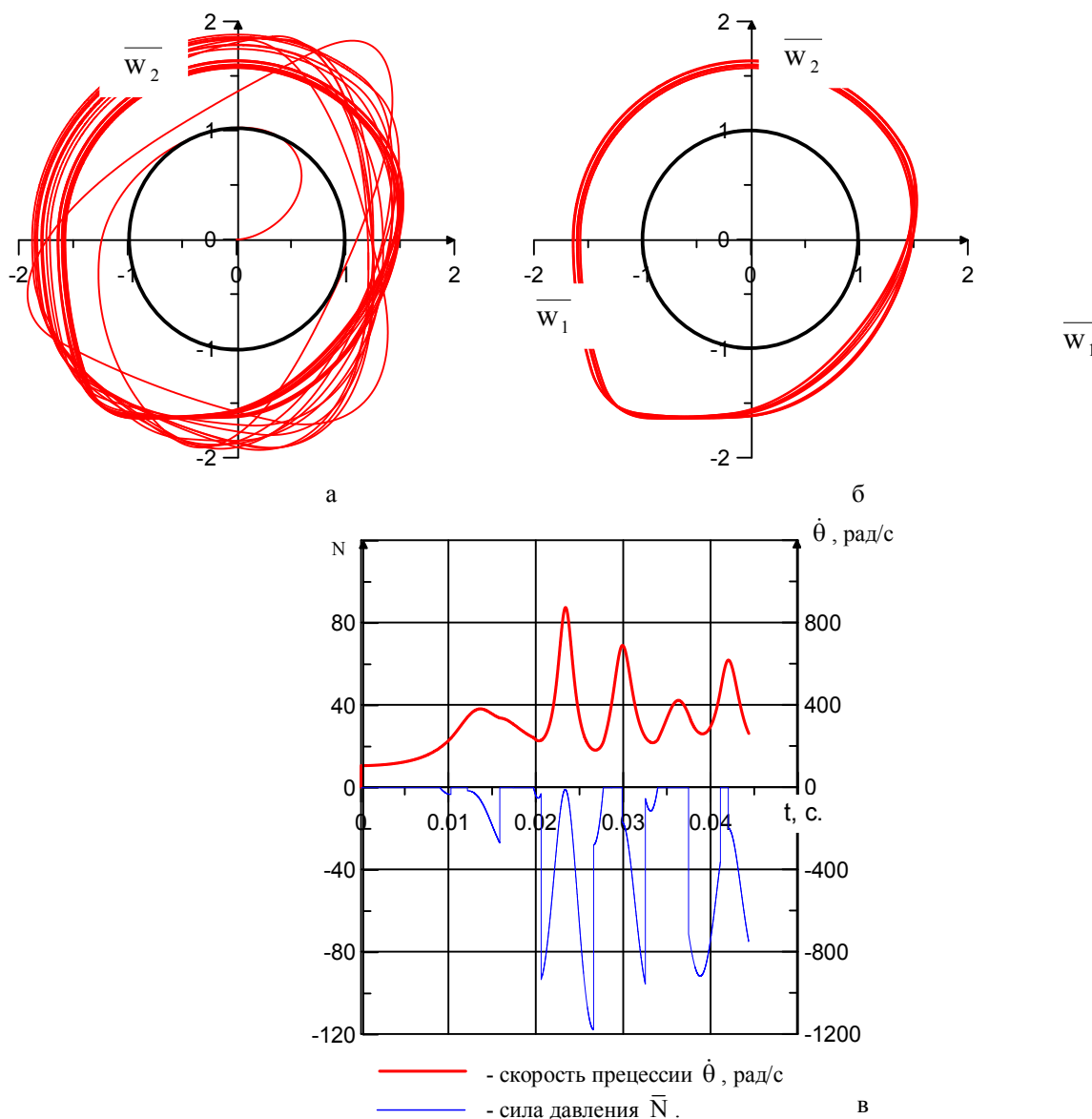


Рис. 5. Развитие обката гибкого ротора $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,25$; $\varepsilon = 0,15 \cdot 10^{-2}$ м (0,15%G на радиусе 1 м), $f = 0,2$ при наличии демпфирования в статоре:

а – траектория движения ротора в интервале $t = 0 \div 0,625$ с; б – траектория движения ротора в конце интервала t ; в – изменение $\overline{N}$ и $\dot{\theta}$ на начальном участке интервала времени t

Особенно опасна мгновенная разбалансировка в зоне резонанса ротора, так как допустимый уровень разбалансировки ε_d заметно снижается. Например, разбалансировка ротора вблизи резонанса ($\alpha_1 = 1,025$, $\alpha_2 = 0,975$) с $\varepsilon = 0,02 \cdot 10^{-2}$ м уже приводит к обкату с нарастающими амплитудами (рис. 6, а). На рис. 6, б показаны результаты стабилизации амплитуд нестационарных колебаний при значительной по величине разбалансировке (в 6 раз больше принятой для получения результатов рис. 6, а). Таким образом, введение демпфирования в конструкцию статора стабилизирует переходные колебания и нарушает опасное развитие обката. Опасность уста-

новившегося обката (рис. 3, в) для целостности турбоагрегата будет зависеть от величины приобретенного в процессе мгновенной разбалансировки небаланса.

Демпфирование в статоре не обязательно связано с деформацией самого тела статора. Достаточно введения дополнительных устройств, обеспечивающих значительные потери при движении статора совместно с ротором, что предполагает, например, установку турбины на амортизаторы с ограничением амплитуд нестационарных колебаний демпферными устройствами, по крайней мере, в поперечном оси турбины направлении.

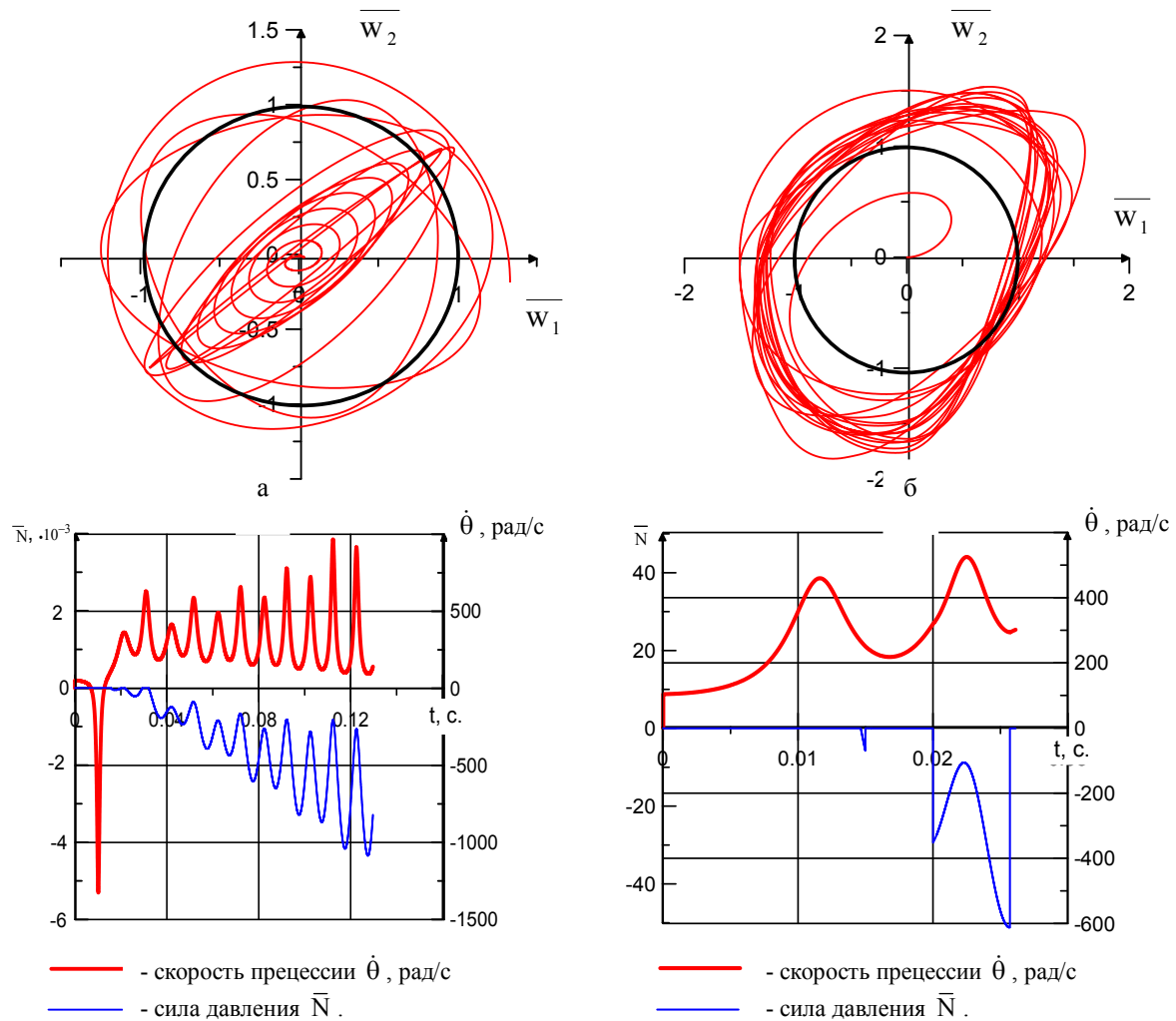


Рис. 6. Развитие обката после мгновенной разбалансировки ротора в резонансной зоне ($\alpha_1 = 1,025$; $\alpha_2 = 0,975$):
 а – $\varepsilon = 0,02 \cdot 10^{-2}$ м (0,02% G на радиусе 1 м); $f = 0,2$; без демпфирования в статоре в интервале $t = 0 \div 0,275$ с;
 б – $\varepsilon = 0,12 \cdot 10^{-2}$ м (0,12% G на радиусе 1 м); $f = 0,2$ с учётом демпфирования в статоре в интервале $t = 0 \div 0,325$ с

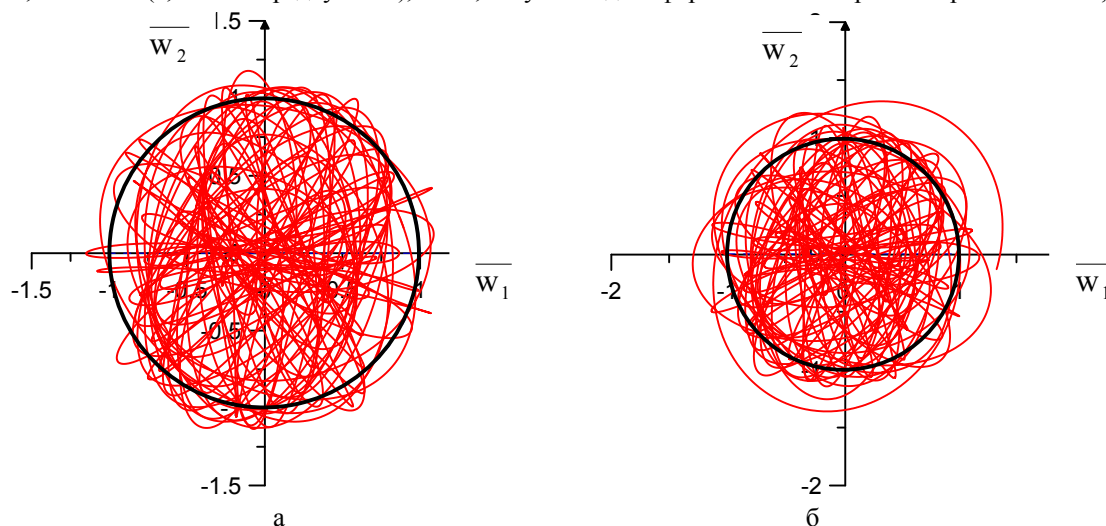


Рис. 7. Пример перехода от установившейся траектории движения ротора с контактом со статором к неустойчивой форме при незначительном изменении величины мгновенной разбалансировки ε ротора

$\alpha_1 = \alpha_2 = 0,75$, $f = 0,2$: $\varepsilon = 0,13 \cdot 10^{-2}$ м (0,13% G на радиусе 1 м) – рис. а; $\varepsilon = 0,135 \cdot 10^{-2}$ м (0,135% G на радиусе 1 м) – рис. б; $t = 0 \div 0,885$ с

Выводы

1. Результаты исследования показывают, что мгновенная разбалансировка меньше допустимого уровня ε_d не приводит к развитию опасной формы обката. Принятые величины зазоров между жёсткими элементами ротора и статора допускают $\varepsilon_d = (0,02 - 0,13)\% G$ в зависимости от отстройки ротора от резонанса и параметров в месте контакта.

При отсутствии сопротивления движению ротора внутри зазора (без контакта со статором) вид установившейся траектории движения ротора будет зависеть от $\alpha = \omega/r$.

2. Наиболее опасная форма обката (рис. 4, в) с нарастающими амплитудами развивается при любой отстройке ротора от резонанса в случае мгновенной разбалансировки, превышающей допустимый уровень разбалансировки ε_d , и отсутствии достаточного демпфирования. Например, для жёсткого ротора допустимый уровень разбалансировки в 2 – 2,5 раза выше, чем для гибкого ротора и относительно незначителен для случая разбалансировки ротора в зоне резонанса.

3. При уменьшении зазора между ротором и статором (их относительно жёсткими элементами) допустимый уровень ε_d пропорционально уменьшается, т.е. контакт ротора и последующий переход в обкат возможен при потере пропорционально меньшей массы.

4. Уменьшение коэффициента трения скольжения в месте контакта вращающегося ротора со статором снижает вероятность развития опасной формы обката. Например, при отсутствии силы трения между ротором и статором ($f = 0$) опасная форма обката не возбуждается при любой отстройке ротора от резонанса. Независимо от величины мгновенной разбалансировки возникает только установившаяся форма обката.

5. Увеличение демпфирования в статоре является самым радикальным способом стабилизации амплитуд переходных колебаний в случае мгновенной разбалансировки даже в зоне резонанса и приводит к нарушению развития опасной формы обката. Время стабилизации амплитуд колебаний при обкате зависит от величины демпфирования, но в

любом случае воздействие на конструкцию возрастающих по величине сил со стороны ротора исключается. Опыт эксплуатации [5] показывает, что наличие демпферных устройств в системе амортизации рамы турбоагрегата ограничило опасное развитие обката и сохранило, по крайней мере, целостность турбоагрегата.

6. Переход к установившейся форме обката не исключает действие переменных сил, зависящих от величины приобретенного в процессе разбалансировки небаланса, что может оказаться небезопасным для прочности элементов турбоагрегата.

Литература

1. Олимпиев В.И. Об обкате неуравновешенного гибкого ротора по статору / В.И. Олимпиев // *Машиноведение*. – 1976. – № 1. – С. 52-56.
2. Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и выводы / И.Ш. Загретдинов, А.Г. Костюк, А.Д. Трухний, П.Р. Должанский // *Теплоэнергетика*. – 2004. – № 5. – С. 5-15.
3. Щегляев А.В. Действие внезапной разбалансировки на ротор турбогенератора / А.В. Щегляев, А.Г. Костюк // *Теплоэнергетика*. – 1969. – № 8. – С. 5-10.
4. Шатохин В.Ф. Некоторые предложения по предотвращению катастроф, связанных с разрушением турбоагрегатов / В.Ф. Шатохин // *Вестник машиностроения*. – 2007. – № 6. – С. 25-31.
5. Шатохин В.Ф. Предопределённость развития ликвидационного процесса турбоагрегата и примеры его последствий / В.Ф. Шатохин, С.Д. Циммерман // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 8 (44). – С. 95-102.
6. Костюк А.Г. Исследование движения ротора в зазоре с контактом о статор после мгновенной разбалансировки / А.Г. Костюк, В.Ф. Шатохин, С.Д. Циммерман // ISSN 1727-0219 *Вестник двигателестроения*. – 2009. – № 3. – С. 113-121.
7. Шатохин В.Ф. Численный анализ колебаний турбоагрегата в случае импульсного кинематического воздействия / В.Ф. Шатохин // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 8. – С. 14-20.
8. Банах Л.Я. Некоторые явления, возникающие при движении вала в подшипнике с зазором / Л.Я. Банах // *Машиноведение*. – 1965. – № 1. – С. 70-77.

Поступила в редакцию 1.06.2010

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

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ В МІСЦІ КОНТАКТУ РОТОРА ІЗ СТАТОРОМ НА РОЗВИТОК ОБКАТУ ПІСЛЯ МИТТЄВОГО РОЗБАЛАНСУВАННЯ РОТОРА

В.Ф. Шатохін, С.Д. Циммерман

Приведено результати чисельного моделювання руху однодискового ротора на опорах в зазорі з контактом із статором (зачіпанням об статор або обкатом по статору) після миттєвого розбалансування ротора. Розглядається різна частотна відбудова ротора від оборотної частоти у момент миттєвого розбалансування (жорсткий, гнучкий ротор, розбалансування в зоні резонансу, ротор на нерівножорстких опорах). Приведена класифікація траєкторій розвитку нестационарного процесу коливань після миттєвого розбалансування, показано вплив величини зазору, коефіцієнта тертя ковзання в місці контакту, демпфування в статорі на розвиток небезпечної форми обкату з наростаючими амплітудами (несталий процес коливань). Аналіз траєкторій руху показує, що обкат з наростаючими амплітудами можливий для будь-якого типу ротора при перевищенні деякого допустимого рівня розбалансування. Наприклад, для жорсткого ротора допустимий рівень вищий (у 2 – 2,5 рази), ніж для гнучкого ротора; при розбалансуванні в зоні резонансу допустимий рівень знижується у декілька разів в порівнянні з гнучким ротором при збереженні характеристик контакту. Допустимий рівень розбалансування залежить і від величини зазору (зменшується пропорційно зазору). Збільшення коефіцієнта тертя ковзання в місці контакту ротора із статором сприяє виникненню обкату. За відсутності сили тертя ($f = 0$) між ротором і статором небезпечна форма обкату не виникає; при будь-якій відбудові від резонансу обкат має сталу форму незалежно від величини миттєвого розбалансування. Демпфування в статорі стабілізує амплітуди нестационарних коливань і порушує розвиток небезпечної форми обкату. Чисельне моделювання процесу перехідних коливань дозволяє, в умовах прийнятої розрахункової схеми, оцінити небезпеку виникнення обкату після миттєвого розбалансування.

Ключові слова: обкат, миттєве розбалансування, жорсткість і демпфування статора в місці контакту ротора із статором.

INFLUENCE OF ROTOR-STATOR CONTACT PARAMETERS ON THE RUNNING-IN DEVELOPMENT AFTER THE ROTOR INSTANT UNBALANCE

V.F. Shatokhin, S.D. Tsimmerman

Given in the study are the results of numerical simulation of the single-disc rotor movement on the supports in the clearance with the stator contact (brushing against stator or stator running-in) after instant unbalance of the rotor. The various rotor frequency adjustment from the reversing frequency is considered at the moment of the instantaneous unbalance (rigid, flexible rotor, unbalance in the resonance area, rotor on the unequally-rigid supports). Presented in the study is the classification of the paths of the non-stationary oscillations development after instantaneous unbalance; influence of the clearance value, the coefficient of kinetic friction in the contact place and stator damping on the development of the dangerous form of running-in with increasing amplitudes (unsteady process of oscillations) are presented as well. The path movements analysis shows that the running-in with increased amplitudes is possible for any rotor type when the admissible unbalance level is exceeded. For example, the admissible level for the rigid rotor is higher (2 – 2.5 times more) than that for the flexible rotor; when unbalancing in the resonance area, the admissible level is reduced several times compared to that of the flexible rotor, with contact characteristics kept. The admissible level of the unbalance depends on the clearance value as well (it decreases proportionally to the clearance). The increase in the coefficient of kinetic friction in the contact place between the rotor and the stator results in appearance of running-in. When there is no friction ($f = 0$) between the rotor and the stator, the dangerous form of running-in does not appear; at any adjusting from the resonance the running-in has a steady form independently of the instant unbalance value. The stator damping stabilizes the transient oscillation amplitudes and disturbs the development of the dangerous form of running-in. The numerical simulation of the process of transient oscillations enables, considering the accepted calculation model, to evaluate the risk of running-in initiation after the instant unbalance.

Key words: running-in, instant unbalance, rigidity and damping of the stator in the rotor-stator contact place.

Шатохін Віктор Фёдорович – канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор-разработчик ОАО «Калужский турбинный завод», Калуга, Россия, e-mail: Chebotarev@ktz.planetatelecom.ru.

Циммерман Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, главный инженер ОАО «Калужский турбинный завод», Калуга, Россия, e-mail: Chebotarev@ktz.planetatelecom.ru.