

УДК 621.165:621.438:621.65.03

к.т.н. В.Ф. Шатохин, к.т.н. С.Д. Циммерман

ОАО «Калужский турбинный завод», Россия

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ОБКАТА НЕУРАВНОВЕШЕННОГО РОТОРА ПО СТАТОРУ

На основе математического моделирования нестационарных колебаний одномассового ротора вследствие внезапной разбалансировки с задеванием ротора о статор рассмотрено развитие явления обката. Изменение основных параметров обката ротора по статору показано во времени. Дана характеристика позиционных сил (в форме коэффициентов жесткости обката), ответственных за возбуждение и поддержание асинхронного обката, развитие которого способно привести к опасным последствиям, вплоть до разрушения турбоагрегата.

Ключевые слова: ротор, статор, внезапная разбалансировка ротора, обкат ротора по статору (синхронный или асинхронный), коэффициенты жесткости обката.

Обкат ротора по статору может, по мнению ряда авторов [1-4], стать причиной чрезвычайно опасных последствий для турбоагрегата (ТА). Если считать внезапную разбалансировку ротора первопричиной опасной аварийной ситуации, то трение скольжения ротора о статор вследствие их взаимного контакта является фактором возбуждения асинхронного обката ротора по статору с ростом амплитуд колебаний и значительными силами давления на статор. К подобным последствиям могут привести начальные воздействия любого другого рода, сопровождающиеся соприкосновением вращающегося ротора с неподвижным статором.

На рис. 1 показано, что сила трения T в месте контакта неуравновешенного ротора со статором, кроме тормозящего момента, создает силу, приложенную к центру C сечения ротора, перпендикулярную смещению OC ротора. Сила T способствует, таким образом, возбуждению обратной прецессии и развитию асинхронного обката. О величинах и характере изменения сил, возбуждающих асинхронный обкат при контакте ротора со статором, пока имеются чисто интуитивные представления. Кроме того, сам процесс развития обката и, особенно момент перехода синхронного обката (движение ротора с прямой прецессией) в асинхронный (движение ротора с обратной прецессией), пока недостаточно представлены предыдущими исследованиями [7].

Предварительный анализ показывает многообразие форм обката ротора по статору. Обкат может быть не только синхронным или асинхронным, но, в зависимости от условий контакта, синхронный обкат переходит в асинхронный и обратно - своего рода неустойчивое состояние системы ротор-статор. По классификации [2] к явлению обката относят движение ротора с по-

стоянным (безотрывное движение) и периодическим контактом ротора со статором, сменяющимся движением в зазоре между ротором и статором. При этом первая форма обката имеет большее основание на существование в системе с относительно податливым статором.

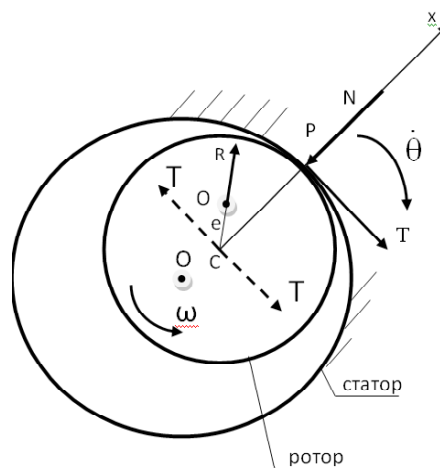


Рис. 1. Силы, действующие на ротор при радиальном контакте ротора со статором.

P – точка контакта ротора со статором;
 $t. O$ – центр расточки статора;
 $t. C$ – центр сечения ротора;
 ω – угловая скорость вращения ротора;

$\dot{\theta}$ – угловая скорость прецессионного движения ротора; N – реакция статора; T – сила трения скольжения; $R = M\omega^2e$ – сила от небаланса ротора

1. Постановка задачи

Однодисковый ротор на двух опорах после внезапной разбалансировки (потеря массы m') при нестационарных колебаниях касается ротора. Интенсивность взаимодействия ротора со статором будет зависеть от ряда параметров (величи-

ны разбалансировки e , угловой скорости вращения ротора ω в момент разбалансировки, коэффициента χ трения скольжения между ротором и статором, степени отстройки ротора от резонанса $\alpha = \omega/p$; ($p = p_1 = p_2$ – собственная частота колебаний ротора в случае равножестких опор).

К основным параметрам, характеризующим обкат ротора по статору относятся:

- траектория нестационарных колебаний ротора (фазовый портрет);

- скорость $\dot{\theta}$ прецессионного движения ротора и скорость ω собственного вращения ротора в рад/с;

- относительная сила давления ротора на статор (по отношению к весу ротора);

- относительное (по отношению к зазору δ) радиальное перемещение u ротора;

- скорость $v_{от}$ ротора относительно статора в моменты контакта в рад/с;

- побочные коэффициенты жесткости $a_{12} = -a_{21}$, способствующие развитию обката;

- счетчик jz , отмечающий время движения в зазоре и время контакта ротора со статором.

Предполагается исследовать:

- изменение основных параметров обката в процессе его развития;

- коэффициенты жесткости a_{ij} , ответственные за развитие асинхронного обката.

2. Результаты исследований

Для исследования движения ротора после внезапной разбалансировки с контактом со статором приняты данные, аналогичные [6,7]:

$M = 10$ т- масса ротора; $g = 9.81$ м/с²; $\omega = 314$ рад/с (3000 об/мин); $r = 0.22$ м - радиус вала в месте контакта; $\delta = 2.8$ мм; $alf = 0.95$; $e = 0.15 \cdot 10^{-2}$ м – эксцентриситет (соответствует потере массы 15 кг на 1 м или 0.15% от массы ротора); $\chi = 0.2$; $\psi_0 = 0$ – начальный угол поворота ротора в момент разбалансировки. Внешнее трение при движении ротора определяется коэффициентами внешнего трения: $C_1 = 200$ т/с – для горизонтального направления колебаний и $C_2 = 300$ т/с – для вертикального направления колебаний. t - время исследования нестационарного процесса. Нелинейная жесткостная характеристика статора в координатах «сила-перемещение» соответствует [6]. Рассматриваются три конструкции статора с постоянной (по нагрузочной части петли гистерезиса) жесткостью $k = 10^6, 3.62 \cdot 10^6$ и 10^7 кН/м. Если отсутствуют потери энергии в статоре при его деформировании (перемещении), то разгрузочная часть петли гистерезиса совпадает с нагрузочной.

Алгоритм исследования: математический аппарат и программы [6,7] для ПК, с учетом нелинейной жесткости статора.

В процессе контакта ротора со статором возникают позиционные неконсервативные силы обката, способствующие возбуждению прецессионного движения ротора. К позиционным эти силы относят, потому что зависят они от положения ротора при взаимодействии со статором и пропорциональны смещениям ротора. В работе [8] получены выражения для позиционных сил обката в виде:

$$-\bar{q}^{(k)} = A^{(k)}\bar{u} \quad (1)$$

$$-\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

где: $A^{(k)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{(k)}$ - матрица коэффициентов жесткости обката (аналогично коэффициентам жесткости масляной пленки подшипников скольжения); u_1, u_2 - проекции радиального смещения ротора на горизонтальное (1) и вертикальное (2) направление колебаний;

k - жесткость статора; χ - коэффициент трения скольжения при контакте ротора со статором; δ - зазор между ротором и статором в равновесном положении, при отсутствии колебаний; u - перемещение ротора в радиальном направлении при нестационарных колебаниях.

$$a_{11} = a_{22} = k \cdot \left(1 - \frac{\delta}{u}\right);$$

$$a_{12} = -k \cdot \chi \left(1 - \frac{\delta}{u}\right); a_{21} = k \cdot \chi \left(1 - \frac{\delta}{u}\right)$$

Отношение между побочными и главными (a_{ij}/a_{ii}) коэффициентами жесткости обката равно коэффициенту трения скольжения между поверхностями ротора и статора. Максимальных значений коэффициенты жесткости обката ($a_{11} = a_{22} = k; a_{12} = -\chi k; a_{21} = \chi k$), а, следовательно, и позиционные силы обката достигают при развитии асинхронного обката, когда отношение δ/u стремится к нулю. Позиционные силы обката с момента разрыва контакта ротора со статором равны нулю, так как в пределах движения ротора в зазоре действие статора на ротор отсутствует. Неконсервативная составляющая $q_H = 0.5(a_{12} - a_{21})u$ позиционной силы обката формально аналогична силе, действующей на ротор со стороны масляной пленки подшипников скольжения или силе аэродинамического потока в проточной части и уплотнениях турбины [5].

Природа ее – в появлении трения скольжения в процессе контакта ротора со статором. Знаки побочных коэффициентов жесткости a_{12} и a_{21} определяют направление действия на ротор неконсервативной составляющей сил обката, обратное (возбуждение обратной прецессии ротора) по сравнению с действием на ротор сил масляной пленки подшипников скольжения. Жесткость неконсервативной составляющей сил обката $a_{ii} = 0.5(a_{12} - a_{21})$. Таким образом, силы, возбуж-

дающие асинхронный обкат ротора по статору, зависят от жесткости статора, коэффициента трения скольжения при взаимодействии ротора со статором и перемещений ротора.

На рис. 2, 3 приведены изменения во времени основных параметров нестационарных колебаний ротора с контактом ротора со статором при жесткости $k = 10^7$ и 10^6 кН/м для двух случаев:

- генератор не отключен от сети, на валу действует постоянный момент ($\omega = \text{const}$, рис. 2);

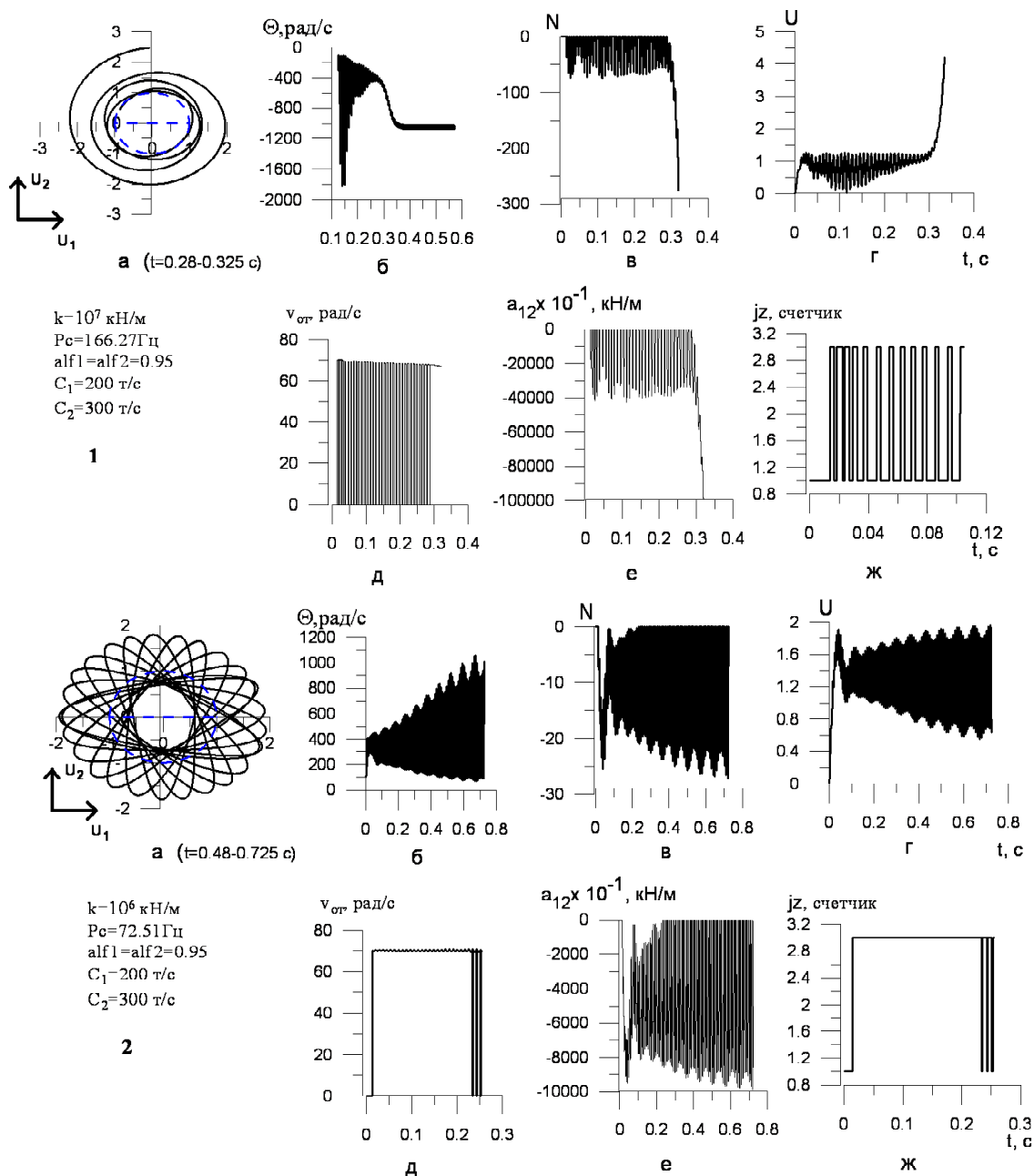


Рис. 2. Изменение во времени основных характеристик движения ротора после внезапной разбалансировки с задеванием ротора о статор и переходом в обкат ($\omega = \text{const}$)
а - траектория движения ротора; **б** - угловая скорость прецессионного движения ротора;
в - сила нормального давления на статор; **г** - перемещения ротора с учетом деформации статора;
д - скорость ротора относительно статора в точке контакта, **е** - побочный коэффициент жесткости обката;
ж - счетчик, отмечающий время контакта и время движения в зазоре

-генератор отключен от сети с момента разбалансировки и угловая скорость вращения ротора уменьшается за счет трения в моменты контакта ($\omega = \text{const}$, рис.3). Результаты исследований показывают, что при более податливом статоре ($k = 10^6$ кН/м) развивается только синхронный обкат (рис. 2.2, 3.2), что подтверждают характер изменения траекторий движения (а), положительная скорость прецессии ротора (б) и уменьшение значений основных параметров (относительной силы

давления N на статор и относительного перемещения u ротора) в течение развития процесса. Увеличение жесткости (рис. 2.1, 3.1) статора, при сохранении остальных условий, приводит к развитию асинхронного обката. При $\omega = \text{const}$ асинхронный обкат характеризуется значительным ростом N и u , практически постоянной скоростью $v_{\text{от}}$ (д) относительного движения в точке P в моменты контакта ротора со статором. В моменты отсутствия контакта $v_{\text{от}}$ присваивается нулевое значение. При $\omega = \text{const}$

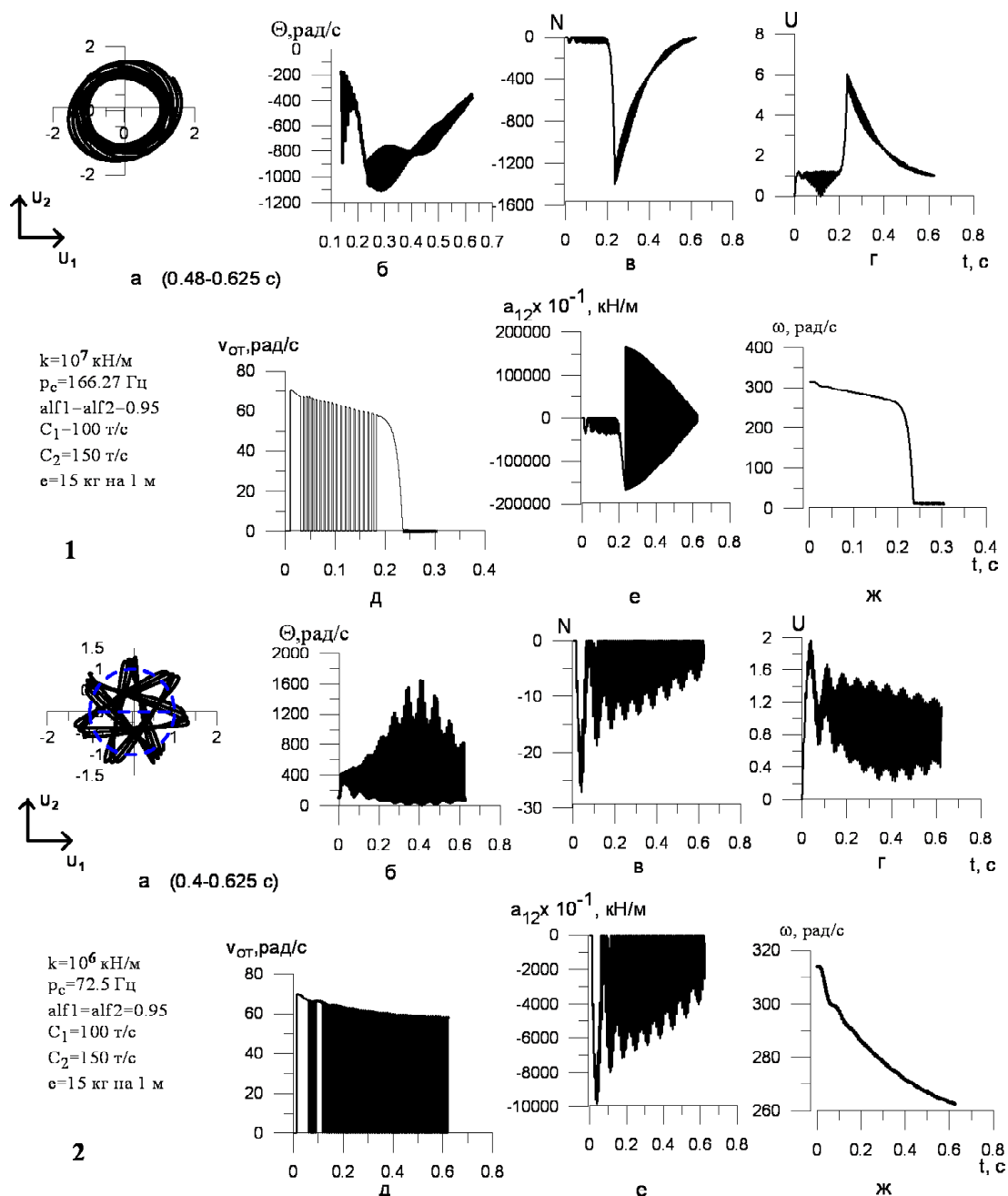


Рис. 3. Изменение во времени основных характеристик движения ротора после внезапной разбалансировки с задеванием ротора о статор ($\omega = \text{const}$)

а - траектория движения ротора; **б** - угловая скорость прецессионного движения ротора; **в** - сила нормального давления на статор; **г** - перемещения ротора с учетом деформации статора; **д** - скорость ротора относительно статора в точке контакта; **е** - побочный коэффициент жесткости обката; **ж** - угловая скорость вращения ротора

(рис. 3) угловая скорость ω (ж) вращения ротора и $v_{от}$ уменьшаются и значения их далее колеблются около нуля, что приводит к периодическому изменению знака коэффициентов жесткости a_{ij} , их уменьшению, ограничивая дальнейшее увеличение N , u и стабилизируя процесс колебаний.

Средняя угловая скорость $\dot{\theta}$ (б) прецессии при установившемся обкате с постоянным контактом со статором не превышает частоту p_c собственных колебаний (рис. 2.1) системы ротор-статор:

$$p_c = \sqrt{(k + k^{(n)}) / M},$$

где: $k^{(n)} = M(\omega / \alpha)^2$ - жесткость опор и концевиков ротора. При обкате $\dot{\theta}$ в моменты контакта резко уменьшается, а при последующем движении в зазоре восстанавливает свое значение. Воздействие неуравновешенного ротора приводит к возбуждению колебаний системы ротор-статор с частотой p_c .

В сравнительном отношении побочные коэффициенты a_{ij} жесткости (рис. 2-4) на начальном этапе развития асинхронного обката имеют тот же порядок, что и побочные коэффициенты же-

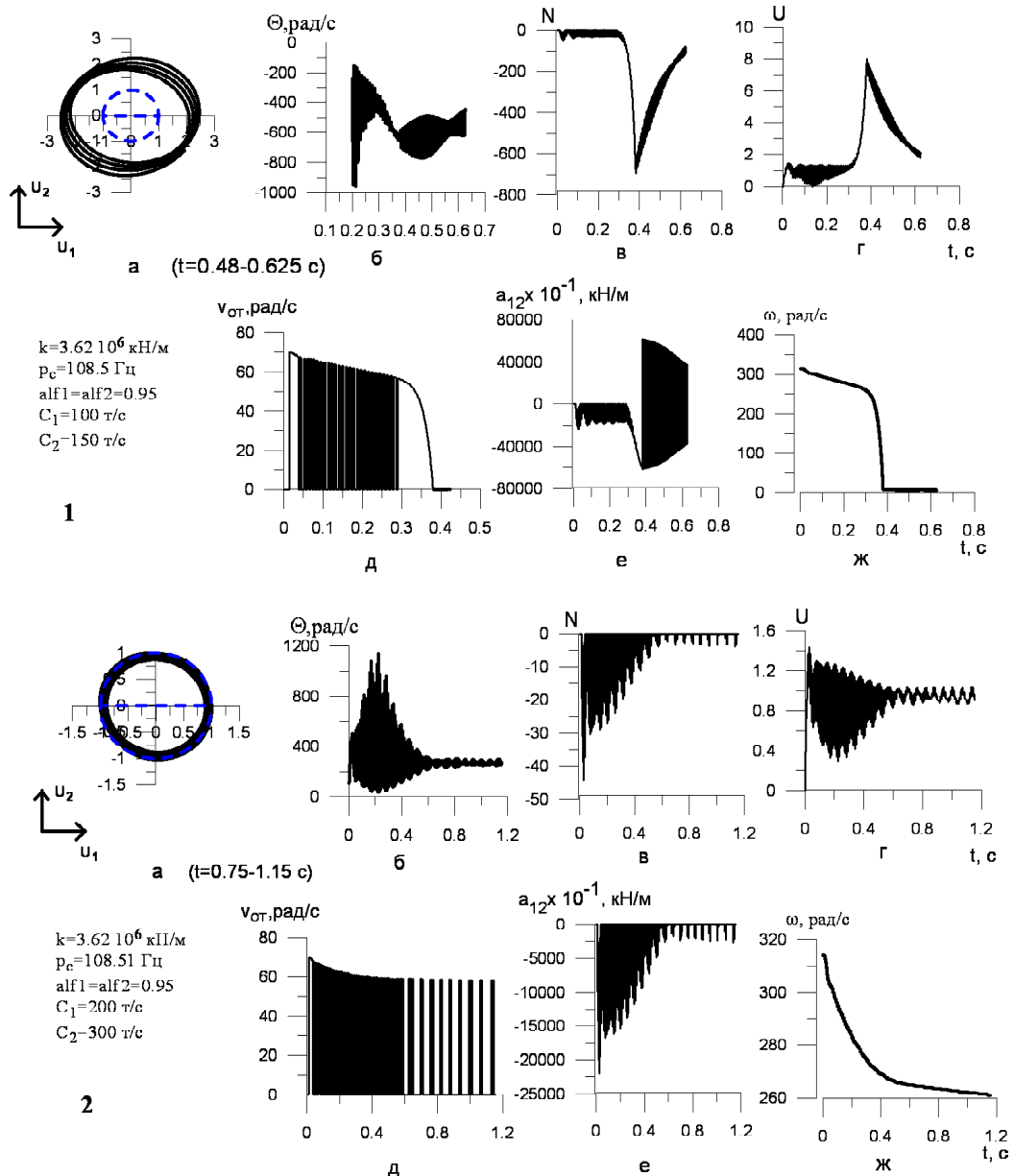


Рис. 4. Изменение во времени основных характеристик движения ротора после внезапной разбалансировки с задеванием ротора о статор ($\omega = const$)
а - траектория движения ротора; **б** - угловая скорость прецессионного движения ротора; **в** - сила нормального давления на статор; **г** - перемещения ротора с учетом деформации статора; **д** - скорость ротора относительно статора в точке контакта; **е** - побочный коэффициент жесткости обката; **ж** - угловая скорость вращения ротора

сткости масляной пленки подшипников скольжения, но опасность a_{ij} заключается в возрастании их значений на последующих этапах развития асинхронного обката. Возбуждающая асинхронная составляющая q_H позиционной силы обката минимум на порядок больше силы в масляной пленке подшипников скольжения из-за разницы в перемещениях u ротора при нестационарных колебаниях с обкатом и стационарных колебаниях в зазоре от неуравновешенности ротора.

Счетчик jz на рис. 2 ж отмечает моменты времени, в которые происходит контакт ротора со статором ($jz = 3$), и моменты времени отсутствия контакта ($jz = 1$). Увеличение внешнего трения (коэффициенты C_1, C_2 , рис. 4.2), как и демпфирование в статоре способствует стабилизации движения ротора (асинхронный обкат не развивается).

На рис. 5 представлены результаты для ротора с неравножесткими ($alf1 = 1.9; alf2 = 0.95$) опорами при сохранении тех же условий, что и в случае рис.3.1. Влияние неравножесткости опор

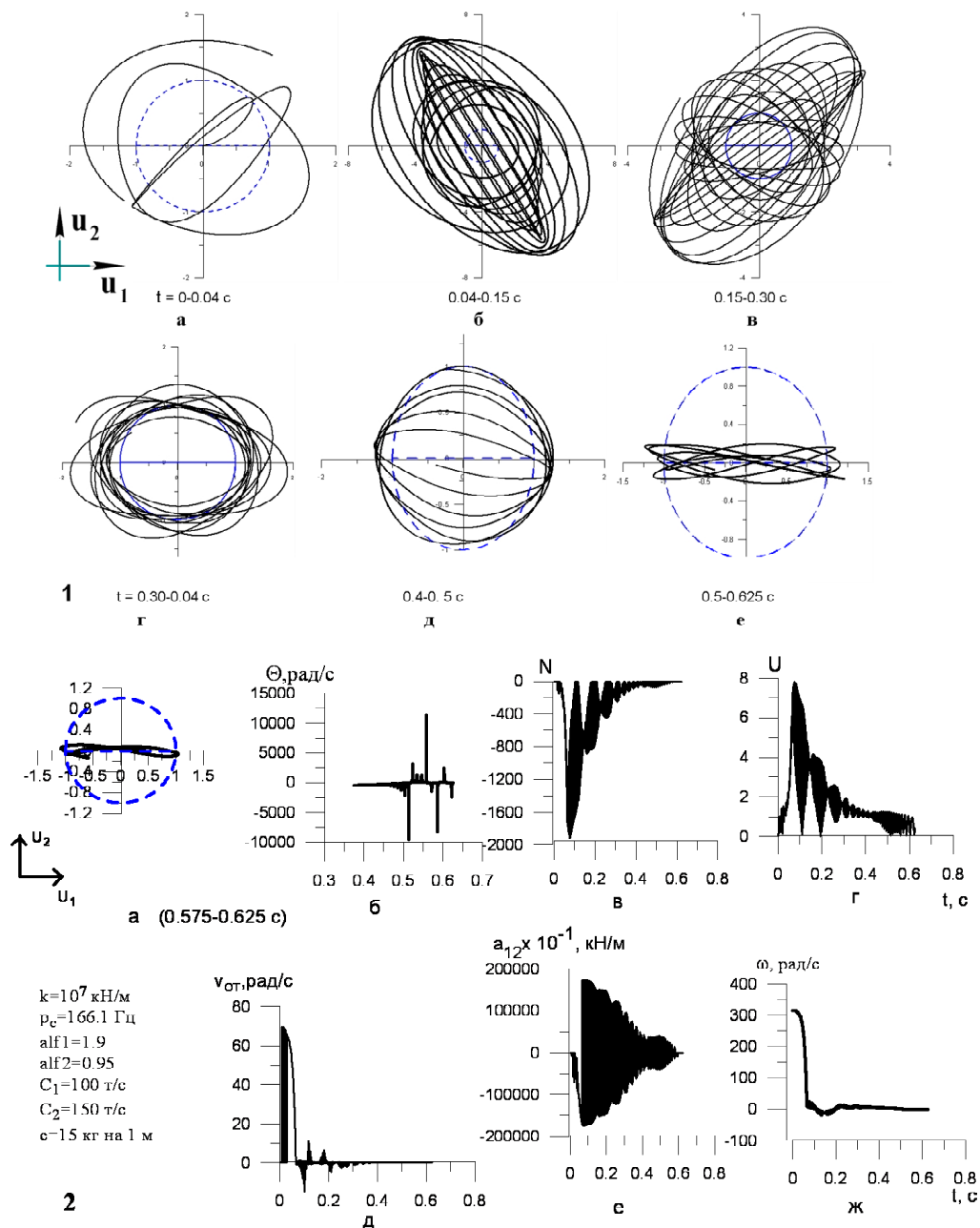


Рис. 5. Изменение во времени основных характеристик движения ротора на неравножестких опорах после внезапной разбалансировки с задеванием ротора о статор ($\omega = const$)
а - траектория движения ротора; **б** - угловая скорость прецессионного движения ротора; **в** - сила нормального давления на статор; **г** - перемещения ротора с учетом деформации статора; **д** - скорость ротора относительно статора в точке контакта; **е** - побочный коэффициент жесткости обката; **ж** - угловая скорость вращения ротора

сказывается как на траектории движения (рис. 5.1 а-е), так и на параметрах обката (рис. 5.2). Время выхода на максимальные значения параметров сокращается в 3 раза, а величины N и u возрастают в 1.5 раза. Таким образом, обкат ротора на неравножестких опорах несет больше опасности, чем в случае равножестких опор. Процесс нестационарных колебаний заканчивается преимущественными колебаниями в горизонтальной плоскости (рис. 5.2 а), как плоскости с наименьшей жесткостью опор.

Сравнение результатов (рис. 2, рис. 3) показывает, что уменьшение жесткости статора делает систему ротор-статор более устойчивой к возбуждению асинхронного обката. Радикальным способом сведения развивающегося асинхронного обката к более устойчивому синхронному обкату и стабилизации амплитуд обката остается демпфирование при перемещениях статора. Но в любом случае контакт ротора с жестким элементом статора сопровождается появлением сил взаимодействия, связанных с силами трения в месте контакта, и угрозой развития аварийной ситуации.

Режим $\omega = \text{const}$ относительно более опасен, так как больше способствует возбуждению асинхронного обката.

Так как смена направления прецессии ротора и торможение ротора при развитии асинхронного обката происходят в короткий промежуток времени (рис. а, б; $t \approx 0.2 - 0.3$ с), для ротора это означает не что иное, как крутильный удар в сечениях, смежных с сечением, где произошел контакт.

4. Выводы

1. Причиной возбуждения наиболее опасной формы обката (асинхронного обката) являются неконсервативные позиционные силы обката. Уровень сил, возбуждающих асинхронный обкат, минимум на порядок больше сил в масляной пленке подшипников скольжения.

2. Позиционные силы обката имеют следующие особенности:

- при разрыве контакта ротора со статором позиционные силы обката перестают действовать на ротор ($a_{ij} = 0$);

- неконсервативная составляющая сил обката пропорциональна жесткости статора, коэффициенту трения скольжения между поверхностями ротора и статора, перемещениям ротора в процессе контакта;

- максимальных значений коэффициенты жесткости обката ($a_{11} = a_{22} = k$; $a_{12} = -\chi k$; $a_{21} = \chi k$), а, следовательно, и позиционные силы обката достигают при развитии асинхронного обката.

3. Обкат ротора на неравножестких опорах несет больше опасности, чем в случае равножестких опор.

4. Смена направления прецессии ротора и быстрое торможение ротора силами трения при обкате способствует крутильному удару в сечениях, смежных с сечением, где произошел контакт.

5. Режим, когда генератор после внезапной разбалансировки не отключен от сети ($\omega = \text{const}$), больше способствует возбуждению асинхронного обката.

6. Уменьшение жесткости статора, торможение ротора, наличие демпфирования при перемещениях статора делает систему ротор-статор более устойчивой к возбуждению асинхронного обката.

Литература

1. Олимпиев В.И. Об обкате неуравновешенного гибкого ротора по статору [Текст]/ В.И. Олимпиев // Машиноведение, 1976. - №1. - С. 52-56.

2. Позняк Э.Л. Крутильный удар в валопроводе при внезапной и сильной разбалансировке [Текст]/ Э.Л. Позняк // Машиноведение, 1987. - №5. - С. 66-74.

3. Денисов Г.Г. Об обкате ротора по жесткому подшипнику [Текст]/ Г.Г. Денисов, Ю.И. Неймарк, Ю.В. Цветков // Механика твердого тела. -1973. - №6 -С. 4-13.

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

5. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин [Текст]: учебник для вузов 3-е изд. / А.Г. Костюк. - М.: Издательский дом МЭИ. - 2007. -476 с.

6. Костюк А.Г. Исследование движения ротора в зазоре с контактом о статор после мгновенной разбалансировки [Текст] / А.Г. Костюк, В.Ф. Шатохин, С.Д. Циммерман // ISSN 1727-0219 Вестник двигателестроения. -2009. - № 3. - С. 113-121.

7. Шатохин В.Ф. Влияние параметров в месте контакта ротора со статором на развитие обката после мгновенной разбалансировки ротора [Текст] / В.Ф. Шатохин, С.Д. Циммерман // Авиационно-космическая техника и технология.- 2010.-9 (76).- С.87-96.

8. Костюк А.Г. Численное моделирование нестационарных колебаний после внезапной разбалансировки многоопорного ротора с обкатом неуравновешенного ротора по статору [Текст] / А.Г. Костюк, В.Ф. Шатохин, С.Д. Циммерман // Авиационно-космическая техника и технология. - 2011.-8 (85).- С. 81-93.

Поступила в редакцию 01.04.2012

V.F.Shatokhin, S.D.Tsimmerman. Development Features of the Unbalanced Rotor Generating Roll over the Stator

Discussed is the development of the generating roll phenomenon on the basis of the mathematical simulation of one-mass rotor non-stationary vibrations resulting from the sudden rotor unbalance involving rotor brushing against the stator. Change of the main parameters of the rotor generating roll over the stator is given with time. Presented is a characteristic of the positional forces (in the form of rigidity factors of the generating roll) causing the excitation of the asynchronous forms of the generating roll the development of which could result in hazard effects till the turbogenerator breakdown.

Key words: rotor, stator, sudden rotor unbalance, rotor generating roll (asynchronous or synchronous), rigidity factors of the generating roll.