

УДК 621.165:621.438:621.65.03

**В.Ф. ШАТОХИН, С.Д. ЦИММЕРМАН***ОАО «Калужский турбинный завод», Россия***ВЛИЯНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТУРБООАГРЕГАТА  
НА РАЗВИТИЕ ОБКАТА РОТОРА ПО СТАТОРУ**

*В случае контакта вращающегося ротора со статором возможно (при определённых условиях) развитие асинхронного обката ротором статора. Опасность асинхронного обката связана с практически мгновенным развитием самовозбуждающихся колебаний ротора и опасными для целостности турбоагрегата (ТА) амплитудами колебаний ротора, силами давления на статор. На основе математического моделирования нестационарных колебаний одномассового ротора вследствие внезапной разбалансировки рассмотрена возможность стабилизации развивающегося обката с помощью средств защиты ТА разного быстрого действия. Предполагается, что средства защиты срабатывают после подачи сигнала о превышении допустимого уровня вибрации в течение некоторого времени  $\Delta t_{\text{время}}$  и приводят к отключению генератора от сети, прекращению подачи рабочего тела в проточную часть, прекращению действия момента на валу ТА. Приведены изменения основных параметров обката в зависимости от времени  $\Delta t_{\text{время}}$ . Показано, что быстрое действие существующих средств защиты не обеспечивает эффективную возможность погашения явления обката, хотя использование электрической системы защиты (с быстрым действием 0,4–0,45 сек) может положительно сказаться на определённой стабилизации амплитуд колебаний при обкате и сглаживании его опасных последствий. Увеличение потерь энергии в системе ротор–статор (особенно в статоре), соблюдение рекомендаций системы предотвращения катастроф агрегатов (СПКА) является эффективной мерой смягчения последствий обката ротора по статору.*

**Ключевые слова:** ротор, статор, внезапная разбалансировка ротора, обкат ротора по статору (синхронный или асинхронный), коэффициенты контактной жёсткости, система защиты турбоагрегата.

**Введение**

Кинематическое воздействие в виде взрыва, землетрясения, вынужденные колебания от неуравновешенности ротора, например, при пуске плохо прогретого ротора и его теплового небаланса, внезапная разбалансировка ротора, высокий уровень низкочастотной вибрации из-за действия неконсервативных сил в системе ротор–опоры–уплотнения и другие нарушения нормальной эксплуатации турбоагрегата (ТА) могут вызвать колебания ротора с задеваниями о статорные элементы ТА. Например, в проточной части турбины, насоса, к таким элементам могут быть отнесены уплотнения различных типов, а также подшипники и сам корпус конструкции. Сопротивление, которое испытывает ротор в процессе движения и контакта с такими элементами, носит явно нелинейный характер. Возникающие в процессе контактов ротора со статором силы трения скольжения, с одной стороны, тормозят вращение ротора [14,16], а с другой стороны, способствуют возбуждению асинхронного обката ротора по статору (движению ротора вокруг центра расточки статора, обратному собственному вращению ротора – обратная прецессия, знак "-"). В зарубежной техни-

ческой литературе этому соответствует термин "full annular rotor rub", «backward rolling with slipping» или обратное скольжение ротора по статору.

Начальное движение ротора, например, после внезапной разбалансировки, соответствует прямой прецессии и первый контакт ротора со статором, за некоторым исключением [6], происходит при прямой прецессии ротора. В процессе взаимодействия (контакта) ротора со статором угловая скорость прецессии уменьшается за счёт сил трения, восстанавливая, в какой-то мере, своё значение в моменты движения в зазоре (без контакта), до тех пор, пока силы трения не приведут к изменению знака прецессии на обратный (знак "-"). При некоторых условиях, в связи с действием, например, сил сопротивления движению в системе ротор–статор, этого может и не произойти, и движение ротора будет осуществляться с прямой прецессией (знак "+").

По классификации [2] к явлению обката относят движение ротора с постоянным (безотрывное движение) и периодическим контактом ротора со статором, сменяющимся движением в зазоре между ротором и статором, и понятие развитие «синхронного» или «асинхронного» обката являются определяющими. При этом режим с постоянным контак-

том, по-видимому, имеет большее основание на существование в системе с податливым статором, а в случае жёсткого статора, по крайней мере, на установившемся этапе развития обката.

Предварительный анализ показывает многообразие форм проявления развивающегося 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. В связи с этим термин «reverse whirl» – «реверсивное вихревое движение» – в определённой степени объясняет сложный характер развития обката. Колебания значений основных параметров обката около средних значений при установившемся обкате объясняется вращением неуравновешенного ротора. Дальнейшее развитие обката зависит от условий, в которых развивается процесс колебаний ротора (динамических свойств системы ротор–статор, сил сопротивления, сохранения или отсутствия момента на валу и т.п.).

При малых коэффициентах трения скольжения между ротором и статором возможен режим обката с прямой синхронной прецессией, когда вращающийся ротор касается статора всё время одной стороной. Тогда натирки на роторе располагаются по дуге 90–140°, что подтверждено практикой эксплуатации ТА [13]. В английской технической литературе этому режиму соответствует термин «forward synchronous slipping» – прямое синхронное скольжение ротора.

Периодические контакты ротора со статором приводят к интенсивному истиранию поверхностей ротора и статора. В более опасных случаях (значительная разбалансировка, большие коэффициенты трения скольжения) происходит переход к обкату ротора по статору с постоянным контактом и значительными силами взаимодействия между ними. Даже начальные проявления обката при задеваниях ротора о статор, наблюдавшиеся при статочных испытаниях турбин, особенно с сотовыми уплотнениями, приводили к необходимости доработок уплотнительных устройств ротора и статора.

В [11] разработана общая математическая модель переходных колебаний, пригодная для исследования различных режимов движения одномассового ротора после внезапной разбалансировки при контакте с абсолютно жёстким статором.

В [6–10] разработаны общие математические модели переходных колебаний, после внезапной разбалансировки как симметричного ротора на двух анизотропных опорах, так и многомассовой модели ротора на нескольких опорах [9, 10] с задеваниями (контактом) о податливый статор. Характеристика статора в этих моделях представляется либо в форме зависимости “сила–деформация”

$$Q = f(u), \quad (1)$$

т.е. статор имеет нелинейную жёсткостную характеристику, либо в форме обобщённой характеристики – гистерезисной петли, когда учитываются не только деформация статора, но и направление скорости деформации статора [9, 10]. Тогда

$$Q = f\left(u, \dot{u}\right), \quad (2)$$

и характеристика статора представляется в виде петли гистерезиса (рис. 2, в), что позволяет дополнительно учесть потери энергии в статоре при его деформировании (или перемещении на упруго-демпферных связях). Последнее весьма существенно, т.к. уже несколько десятков лет в эксплуатации находятся силовые установки, упруго-демпферные связи корпусных конструкций которых не препятствуют определённым значениям перемещений статора. Здесь  $u, \dot{u}$  – проекции векторов смещений и скоростей ротора в момент контакта на направление радиуса в месте контакта. Поэтому под “деформированием” статора следует понимать, в том числе, и перемещения статора на податливых или демпферных устройствах. Инерционные характеристики элементов статора, включающие, например, усики уплотнений, подпружиненные элементы уплотнительного устройства, корпус турбины, приведенные к месту взаимного контакта ротора и статора, в принятой модели не учитываются. В учёт принимается лишь нелинейная жёсткость элементов статора, участвующих в процессе контакта с ротором (рис. 2, а и в), зависящая, в общем случае, и от направления скорости деформации. На рис. 1, 2 показана схема контакта ротора с податливым статором, статорные элементы (рис. 2, а), вносящие вклад в нелинейную жёсткостную характеристику статора в месте контакта ротора со статором.

Исследования [9, 10, 14, 16] показывают, что в процессе контакта вращающегося ротора со статором трение скольжения, при взаимном их перемещении (относительно друг друга), способствует появлению позиционных неконсервативных сил обката, возбуждающих прецессионные движения ротора в направлении, обратном вращению ротора (асинхронный обкат). К позиционным эти силы относят, потому что зависят они от положения ротора (от отношения  $\delta/u$  – зазора к перемещению ротора) при взаимодействии со статором и пропорциональны смещениям ротора. Неконсервативные позиционные силы обката действуют на ротор только в моменты времени, пока продолжается взаимодействие ротора со статором, т.е. пока действуют силы трения скольжения между поверхностями ротора и статора. При разрыве контакта эти силы перестают действовать на ротор до следующего задевания ротором

статора. Средняя угловая скорость  $\dot{\theta}$  прецессии при установившемся обкате с постоянным контактом со статором равна частоте  $p_c$  собственных колебаний системы ротор–статор [14, 16].

Опасность асинхронного обката связана с практически мгновенным развитием самовозбуждающихся колебаний ротора при контакте со статором и опасными для целостности ТА амплитудами колебаний ротора, силами давления на статор. Режим, когда генератор после внезапной разбалансировки не отключён от сети и на валу действует постоянный момент ( $\omega = \text{const}$ ), больше способствует возбуждению асинхронного обката [14, 16]. Обкат ротора на неравножёстких опорах по статору несет больше опасности, чем в случае равножёстких опор [14]. Характеристика неконсервативных сил, возбуждающих асинхронный обкат ротора по статору, приведена в [9, 10, 14, 16]. Катастрофические разрушения ТА, описание которых приведено в [2, 4, 14, 15], многие авторы считают следствием развития обката ротора по статору.

При появлении опасности развития аварийной ситуации турбоагрегат должен быть незамедлительно отключён от сети с прекращением подачи рабочего тела (например, пара) в проточную часть турбины. Эту роль выполняет система защиты ТА, которая должна иметь высокую степень надёжности, т.е. быть практически безотказной, действовать автоматически и, самое главное, обладать достаточным быстродействием с момента возникновения сигнала, например, по предельному уровню вибрации, и до прекращения подачи пара в турбину быстрозапорными устройствами, чтобы исключить действие момента на валу турбины. В современных турбинах цепочка срабатывания различных элементов системы защиты с закрытием стопорных, обратных клапанов, вплоть до регулирующих клапанов и поворотных диафрагм, выполняет свою функцию в течение некоторого промежутка времени, определяемого временем  $t = \text{AVtime}$ . Время  $\text{AVtime} = t_1 + t_2$  зависит от типа исполнения системы защиты: электрическая или электрогидравлическая. Прохождение электрического сигнала до исполнительного механизма (например, до механизма закрытия стопорных клапанов)  $t_1 = 0,05$  сек. Ход стопорного клапана от поступления сигнала и до закрытия клапана с прекращением подачи пара в турбину  $t_2 \approx 0,35-0,4$  сек. В электрогидравлической системе защиты это время, по оценкам, удваивается и  $\text{AVtime} \approx 0,8-0,9$  сек. К этому необходимо добавить время задержки (затягивания) подачи сигнала, вводимое иногда в алгоритм для защиты системы от срабатывания ложными сигналами. Например, в [19] указано, что при превышении установленного пре-

дела (по виброскорости) происходит срабатывание реле системы защиты с запаздыванием 3 секунды. Поэтому весьма закономерен вопрос, основной смысл которого просматривается в следующем. Каким должно быть время  $\text{AVtime}$  (время срабатывания системы защиты) в случае развития аварийной ситуации с обкатом ротора по статору? Насколько сопоставимы время выхода на обкат с угрожающими величинами амплитуд колебаний и время  $\text{AVtime}$ ? Как будут меняться основные параметры, характеризующие обкат ротора по статору, в случае использования систем защиты с разным быстродействием?

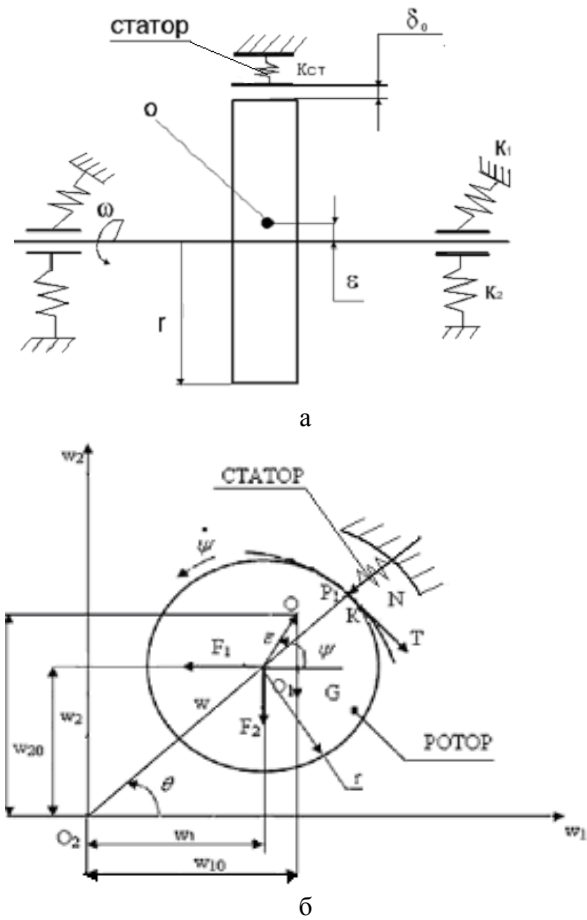


Рис. 1. Расчетная схема:

а – ротор на анизотропных опорах;

б – схема контакта ротора со статором.

На рисунке  $P$  – точка контакта ротора со статором;  $O$  – положение центра масс ротора;  $G$  – вес ротора;  $O_2$  – центр расточки статора;  $O_1$  – центр сечения ротора;  $w = u$  – смещение ротора;  $K_{ст} = k$  жёсткость статора;  $k_1, k_2$  – жёсткость опор, соответственно, в горизонтальном и вертикальном направлениях;  $\psi$  – угол поворота ротора в момент внезапной разбалансировки;  $\dot{\psi} = \omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $\dot{\theta}$  – угловая скорость прецессионного движения ротора;  $N$  – реакция статора;  $T$  – сила трения скольжения;  $F_1, F_2$  – силы со стороны опор ротора;

$R = M\omega^2\epsilon$  – сила от небаланса ротора

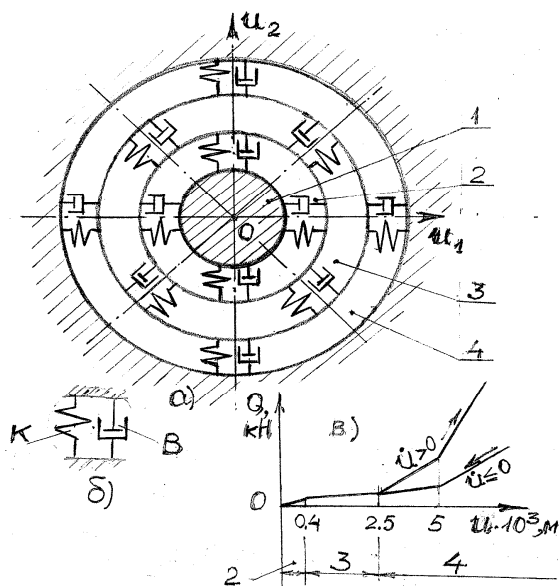


Рис. 2. Взаимодействие (а) ротора с элементами статора:

- 1 – ротор; 2 – зазор  $\delta_0$  между ротором и усиками уплотнений; 3 – рабочий ход пружины уплотнительного устройства и само уплотнительное устройство; 4 – тело статора или его упругие связи.  
 б – элементы: К – жёсткость, В – демпфирование;  
 в – жёсткостная характеристика статора  $Q=f(u, \dot{u})$ ;  
 Q – сила;  $u = w$  – смещение ротора;

После внезапной разбалансировки в рамках разработанной обобщённой модели [6–8] возможны три разных сценария развития процесса переходных колебаний. Первый – процесс развивается при постоянной угловой скорости  $\dot{\psi} = \omega = \text{const}$  ротора. Он реализуется, когда электрический генератор не отключен от сети и на валу действует постоянный момент. Второй сценарий соответствует отключению электрического генератора от сети, отсутствию момента на валу, и тогда рассматривается процесс с изменением (уменьшением) угловой скорости  $n\dot{\psi}$  ротора за счёт торможения ротора с возможностью погашения развивающегося обката. Но, в этой ситуации с большой вероятностью могут развиваться и самовозбуждающиеся колебания в форме асинхронного обката ротора от действия неконсервативных сил обката [14, 16]. Определяющим в поведении ротора будут динамические характеристики системы ротор–статор, уровень возбуждающих и демпфирующих сил.

Третий сценарий учитывает время  $t$  срабатывания системы защиты турбоагрегата, когда непосредственно после внезапной разбалансировки момент на валу сохраняется ( $\omega = \text{const}$ ), а по прошествии некоторого времени, необходимого для срабатывания цепочки элементов системы защиты, в некоторый момент времени  $t = \Delta \text{Вtime}$  процесс переходных

колебаний начинает развиваться по второму сценарию. Важно оценить ту временную точку «невозврата», когда запоздалое срабатывание системы защиты будет уже бесполезным, потому что действие возбуждающих обкат сил окажется определяющим. Конечно, в конце концов, установившееся равновесие сил в системе приведёт к стабилизации амплитуд колебаний или полному их погашению, но в реальности «пережить» процесс обката ротором статора по условию прочности элементов ТА может оказаться невозможным.

## 1. Постановка задачи

Однодисковый ротор на двух анизотропных опорах после внезапной разбалансировки (потеря массы  $m'$ ) при нестационарных колебаниях касается статора. Интенсивность взаимодействия ротора со статором будет зависеть от ряда параметров (от зазора  $\delta$  между ротором и статором, величины разбалансировки  $\epsilon$  (или  $e = \epsilon/\delta$ ), угловой скорости  $\omega$  вращения ротора в момент разбалансировки, коэффициента  $\chi$  трения скольжения между ротором и статором, сопротивления  $C_1, C_2$  движению в системе ротор–статор, 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 в промежутке времени  $t$  исследования переходного процесса;

– скорость  $\dot{\theta}$  прецессионного движения ротора в рад/с;

– относительная сила  $N$  давления ротора на статор (по отношению к весу ротора);

– относительное (по отношению к зазору  $\delta$ ) радиальное перемещение  $u$  ротора;

– скорость  $v_{от} = \delta \cdot \dot{\theta} + r \cdot \dot{\psi}$  в м/сек ротора относительно статора в моменты их контакта (в моменты отсутствия контакта знание величины и знака  $v_{от}$  несущественно и в эти моменты  $v_{от}$  условно присваивается нулевое значение с целью фиксирования на графике изменения  $v_{от}$  времени контакта и времени отсутствия контакта в процессе нестационарных колебаний ротора); контроль величины и знака  $v_{от}$  важен при решении задачи нестационарных колебаний с отключением генератора от сети (момент на валу турбины отсутствует) и уменьшением угловой скорости  $\omega$  ротора силами трения в моменты контактов ротора со статором;

– коэффициенты контактной жёсткости  $a_{ij}$  ( $i \neq j$ ), способствующие развитию асинхронного обката;

– скорость  $\omega$  собственного вращения ротора в рад/с и характер её уменьшения в зависимости от  $AVtime$ .

Предполагается исследовать:

– изменение основных параметров обката в процессе его развития в условиях разной продолжительности  $AVtime$  срабатывания системы защиты ТА;

– дать качественную оценку системам защиты разного быстрогодействия с точки зрения погашающей способности развития обката.

## 2. Результаты исследований

Для исследования движения ротора на анизотропных опорах ( $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ) после внезапной его разбалансировки с контактом со статором приняты следующие данные:

$M = 10\text{т}$  – масса ротора;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\omega = 314 \text{ рад/с}$  (3000 об/мин);  $r = 0,22 \text{ м}$  – радиус вала в месте контакта;  $\delta = 2,8 \text{ мм}$ ;  $\alpha_1 = 1,9$ ;  $\alpha_2 = 0,95$ ;  $\varepsilon = 0,09 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  – эксцентриситет (соответствует потере массы 9 кг на 1 м или 0,09% от массы ротора на 1 м);  $\chi = 0,2$ ;  $\psi_0 = 0$  – начальный угол поворота ротора в момент разбалансировки. Внешнее трение при движении ротора определяется коэффициентами внешнего сопротивления:  $C_1 = 200 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$  – для горизонтального направления колебаний и  $C_2 = 300 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$  – для вертикального направления колебаний.  $t$  – время исследования нестационарного процесса. Нелинейная жёсткостная характеристика типа упора для статора в координатах «сила–перемещение» соответствует [9, 10 рис.1, б]. При перемещениях ротора более 2,8 мм жёсткость статора  $k = 3,62 \cdot 10^6 \text{ кН/м}$  сохраняется неизменной (табл. 1).

Таблица 1

Жёсткостная характеристика  
типа упора для статора

$u \cdot 10^3, \text{ м}$	0	0,3	2,8	5,3	10,3	12,8
$Q \cdot 10^{-4}, \text{ кН}$	0	0	0	0,9	2,7	3,62

Потери энергии в рассматриваемой конструкции статора не учитываются.

**Алгоритм исследования:** математический аппарат и программы [6–8, 16] для ПК, с учётом нелинейной жёсткости статора.

На рис. 3–5 представлены изменения основных параметров обката для времени срабатывания системы защиты  $AVtime = 1; 0,5 \text{ и } 0,2 \text{ сек}$ . На рис. 3 и 5 результаты с индексом (2) приведены для пояснения характера изменения параметров в конце временного интервала исследования нестационарного процесса колебаний.  $p_c$  – собственная частота колебаний системы ротор–статор. Характер изменения параметров асинхронного обката с течением време-

ни исследования переходного процесса меняется с изменением  $AVtime$ . Параметры асинхронного обката, уменьшаются в случае более быстрогодействующей системы защиты турбоагрегата.

$AVtime = 1 \text{ сек}$ . Амплитуды асинхронного обката достигают огромных значений (рис. 3). Сила давления на статор  $N > 6000 \text{ Г}$  (в 6000 раз превышает вес ротора) к моменту времени 0,6 сек (рис. 3, в). Коэффициенты контактной жёсткости  $a_{ij} (i \neq j)$ , характеризующие возбуждающие обкат силы, к этому моменту достигают максимальных значений (рис. 3, е). Угловая скорость  $\omega = 314 \text{ рад/с}$  собственного вращения ротора сохраняется постоянной в течение первой секунды (рис. 3 ж) в соответствии с заданным временем быстрогодействия системы защиты.

$AVtime = 0,5 \text{ сек}$ . Срабатывание системы защиты через 0,5 сек после начала события (внезапной разбалансировки) сопровождается совместным влиянием двух факторов: исключение момента на валу через 0,5 сек после внезапной разбалансировки (т.е. развитие переходных колебаний начиная с  $t > 0,5 \text{ сек}$  идёт по второму сценарию) и влияния тормозящего момента сил трения на собственное вращение ротора при каждом контакте ротора со статором. Относительная скорость  $v_{от}$  ротора (рис. 4, д) быстро уменьшается после срабатывания системы защиты и приближается к нулю (при  $t = 0,54 \text{ сек}$ ), начинает колебаться около нуля из-за действия неуравновешенных сил ротора. Возбуждающие обкат неконсервативные силы при колебаниях  $v_{от}$  около нуля периодически меняют знак (рис. 4, е), т.е. попеременно стремятся возбудить синхронный и асинхронный обкат. После этого асинхронный обкат постепенно затухает. Преобладающее влияние момента сил трения скольжения и быстрое торможение вала ограничивает величину силы давления на статор ( $N < 1000 \text{ Г}$ ). Положительный фактор системы с быстрым действием 0,5 сек заключается в ограничении в какой-то мере параметров асинхронного обката внутренними силами. На рис. 4, з и 4, и фазовые траектории показывают, что асинхронный обкат под действием сил сопротивления заканчивается периодическими колебаниями внутри зазора (в пределах времени исследования процесса). Но, «переживёт ли» система ротор–статор воздействие от всплеска нагрузок ( $N < 1000 \text{ Г}$ ) асинхронного обката, зависит от её конструктивных особенностей?

$AVtime = 0,2 \text{ сек}$ . Систем с таким быстрым действием пока не существует. Но, показательно (рис. 5), что более раннее отключение подачи рабочего тела в проточную часть и исключение, таким образом, момента на валу, заметно уменьшает значения основных параметров ( $N, U, \dots$ ) асинхронного обката. Угловая скорость собственного вращения ротора

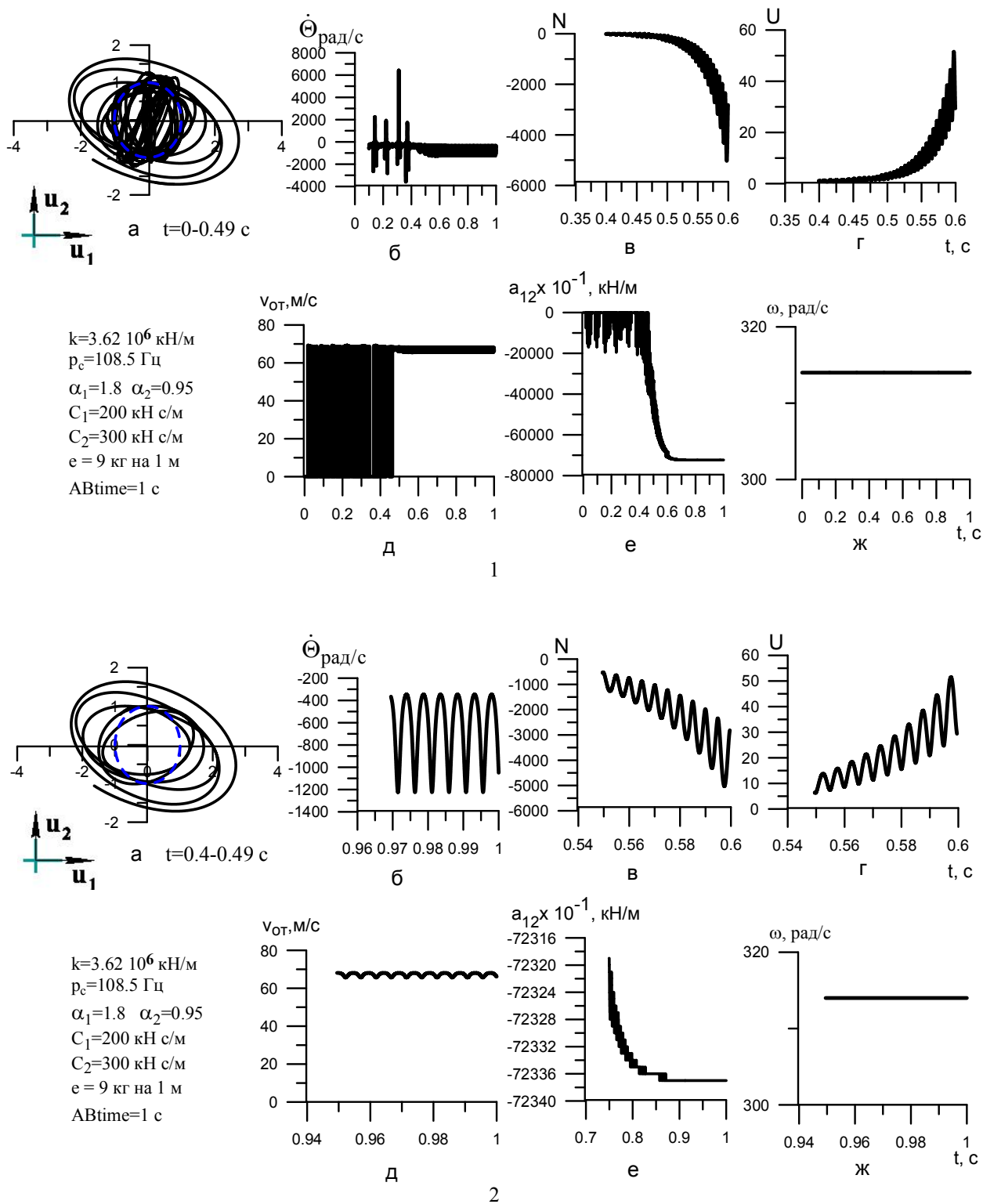


Рис. 3. Изменение во времени основных характеристик движения ротора на анизотропных ( $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ) опорах после внезапной разбалансировки с задеванием ротора о статор ( $\omega = \text{const}$  при  $t \leq 1$  с;  $\omega \neq \text{const}$  при  $t > 1$  с)  
 а – траектория движения 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 контактной жесткости; ж – угловая скорость вращения ротора

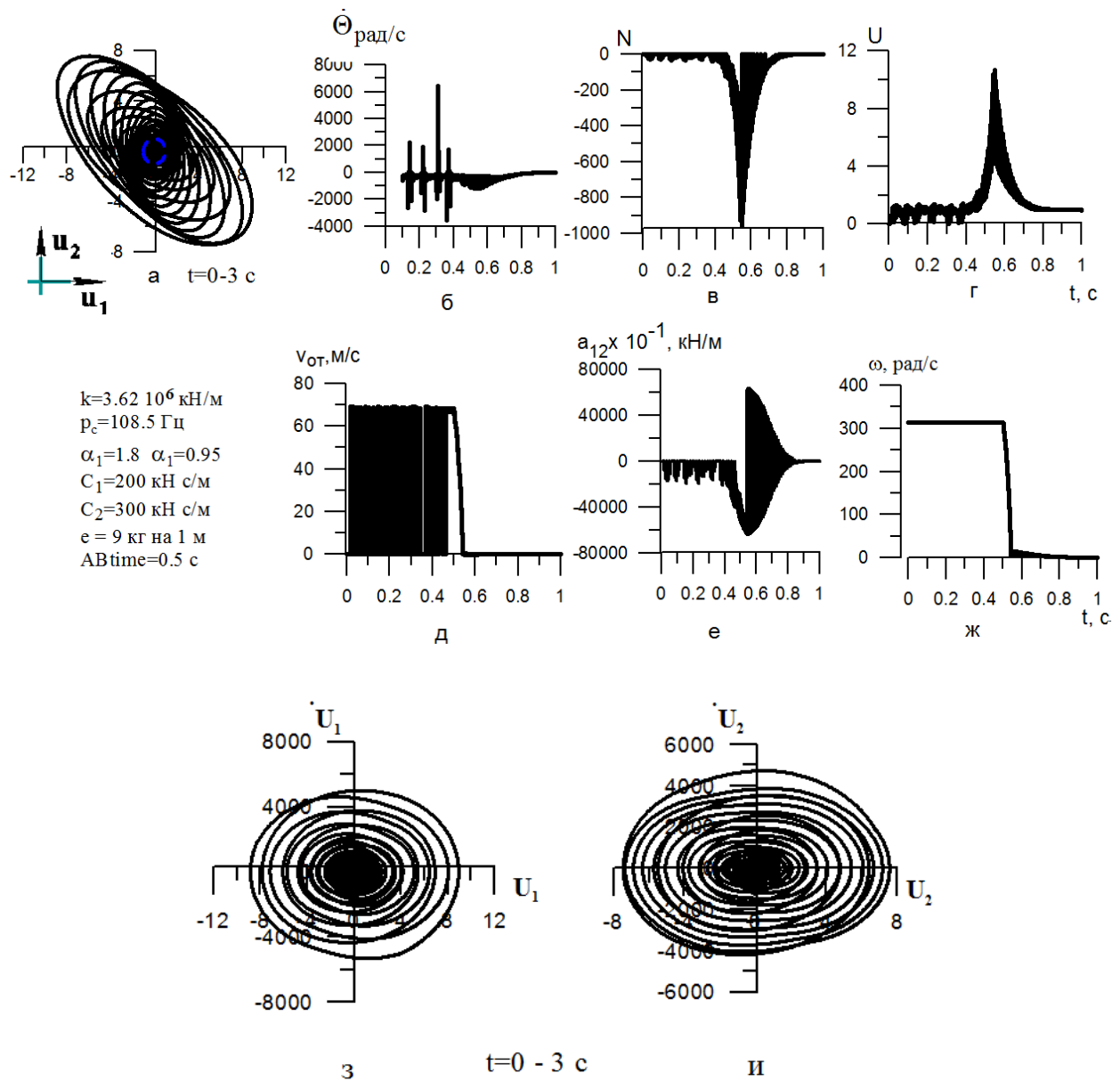


Рис.4. Изменение во времени основных характеристик движения ротора на анизотропных ( $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ) опорах после внезапной разбалансировки с задеванием ротора о статор ( $\omega = \text{const}$  при  $t \leq 0,5$  с;  $\omega \neq \text{const}$  при  $t > 0,5$  с)  
 а – траектория движения 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 контактной жесткости; ж – угловая скорость вращения ротора; з, и – фазовые траектории

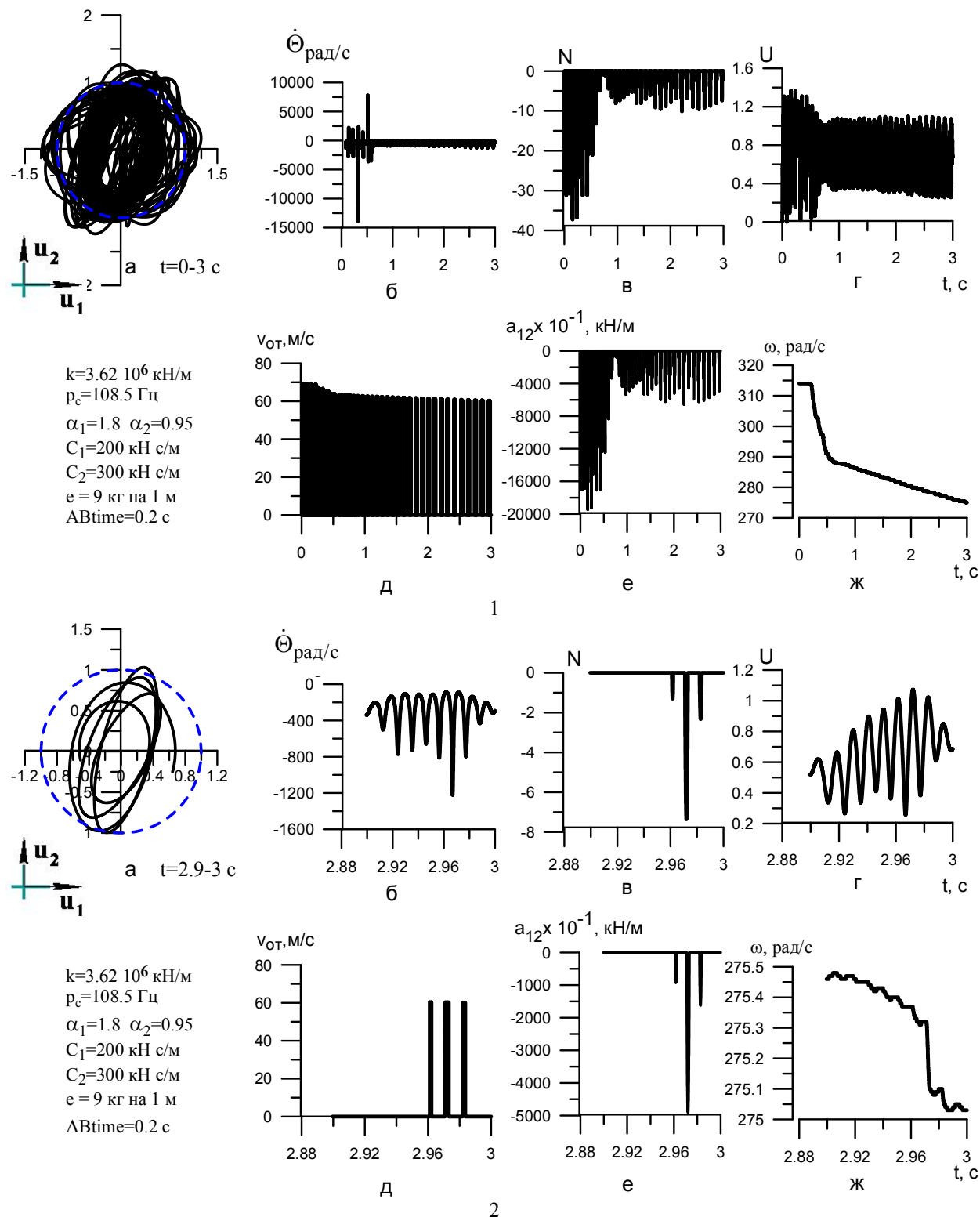


Рис. 5. Изменение во времени основных характеристик движения ротора на анизотропных ( $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ) опорах после внезапной разбалансировки с задеванием ротора о статор ( $\omega = const$  при  $t \leq 0,2$  с;  $\omega \neq const$  при  $t > 0,2$  с).  
 а – траектория движения ротора; б – 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 контактной жесткости; ж – угловая скорость вращения ротора



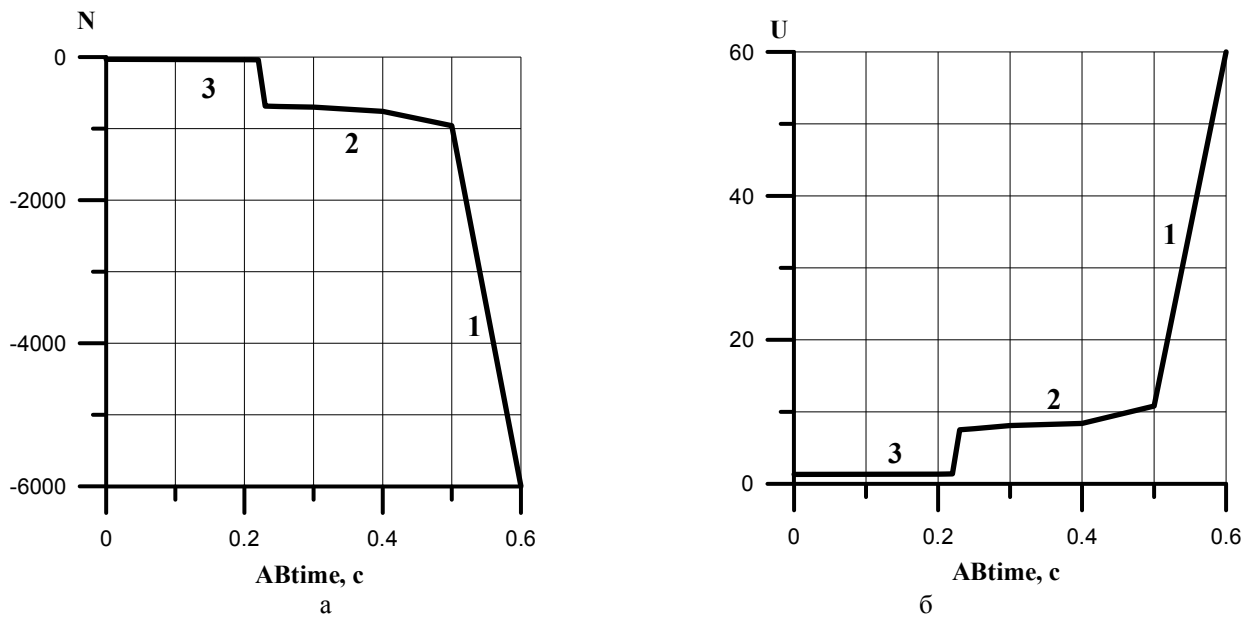


Рис. 6. Зависимость относительной силы  $N$  давления на статор и относительных перемещений  $U$  ротора от времени  $ABtime$  срабатывания системы защиты турбоагрегата (жесткость статора  $k = 3,62 \cdot 10^6$  кН/м):  
 1 –  $ABtime > 0,5$  с,  $N \gg 1000$  G – развитие асинхронного обката; значительный рост амплитуд  $U$  и сил  $N$ ;  
 2 –  $ABtime = (0,2 \div 0,5)$  с,  $N = (600 - 1000)$  G – стабилизация асинхронного обката;  
 3 –  $ABtime < 0,2$  с,  $N < (30 \div 40)$  G – стабилизация асинхронного обката

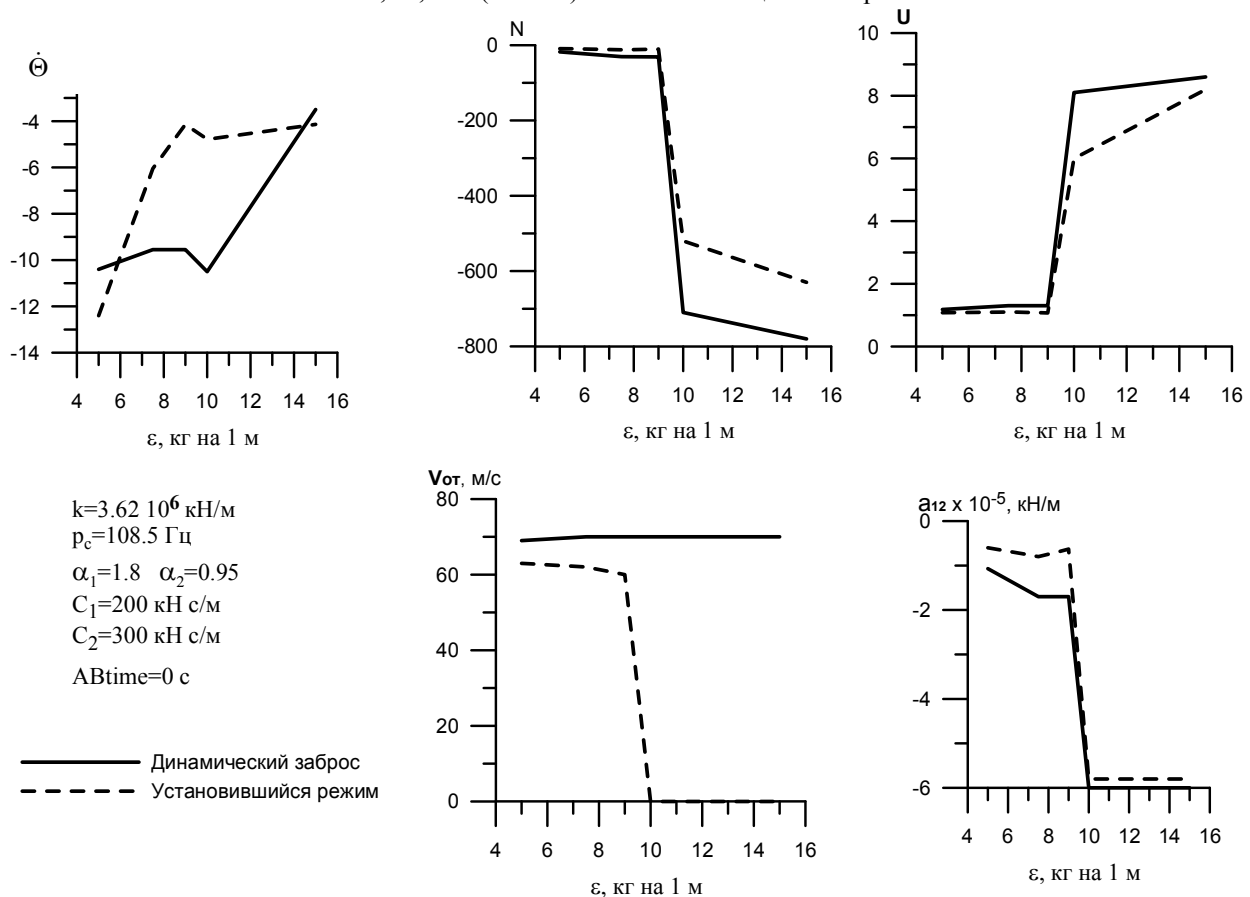


Рис. 7. Зависимость основных характеристик обката от величины разбалансировки  $\epsilon$  ротора ( $\omega \neq \text{const}$ )

вследствие торможения силами трения скольжения уменьшается с 314 рад/с до 275 рад/с (рис. 5, ж) в течение 3 сек от начала разбалансировки.

На рис. 6 приведены зависимости относительной силы давления  $N$  на статор и относительного перемещения ротора  $U$  от времени  $ABtime$  (быстродействия системы защиты турбоагрегата). Явно выделяются три зоны (1, 2, 3), характеристика которых показана выше на примерах изменения параметров асинхронного обката при системах защиты разного быстродействия ( $ABtime = 1; 0,5; 0,2$  сек). Для смягчения последствий развития явления обката необходимо иметь систему защиты турбоагрегата с быстродействием менее 0,22 сек, что в настоящее время нереально.

Если говорить о точке «невозврата», то запоздалое срабатывание системы защиты ( $ABtime > (0,55-0,6)$  сек) будет бесполезным, т.к. развитие асинхронного обката может перейти в катастрофическую фазу с нарушением не только работоспособности, но и целостности установки.

Результаты исследований показывают, что время быстродействия существующих средств защиты не обеспечивает эффективную возможность погашения явления обката, хотя использование электрической системы защиты (с быстродействием 0,4–0,5 сек) может положительно сказаться на определённой стабилизации амплитуд колебаний при обкате и сглаживании его опасных последствий. Многофакторная зависимость процесса переходных колебаний с развитием асинхронного обката показывает, что использование систем защиты типа электрогидравлической (с быстродействием 0,8–0,9 сек) обосновано при более мягких условиях возбуждения, например, при меньшей величине оторвавшегося груза.

Определённая корреляция опасности асинхронного обката от величины оторвавшегося груза действительно существует. На рис. 7 показано, как меняются основные параметры обката при разной величине внезапной разбалансировки. По горизонтальной оси задана разбалансировка  $\epsilon$  в кг оторвавшегося груза на радиусе 1 м. Для ротора на неравножёстких опорах ( $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ) при наличии сил внешнего сопротивления  $C_1, C_2$  допустимый уровень внезапной разбалансировки составляет 9 кг на радиусе 1 м ( $\epsilon_d = 0,09\%$  от веса ротора на радиусе 1 м). Допустимым уровнем  $\epsilon_d$  внезапной разбалансировки ротора будем считать отсутствие развития обката со значительным нарастанием параметров обката и, в частности, сил взаимодействия между ротором и статором, как это показано на рис. 6 и 7.

Наряду с совершенствованием систем защиты ТА, достаточно эффективной мерой смягчения последствий развития обката ротора по статору счита-

ется увеличение потерь энергии в системе ротор–статор (особенно в статоре [8]), соблюдение рекомендаций системы предотвращения катастроф агрегатов (СПКА) [4].

## Выводы

1. Неконсервативные позиционные силы контактного взаимодействия при взаимном контакте ротора со статором вызывают самовозбуждающие колебания ротора в форме развивающегося асинхронного обката ротора по статору. Возникающие при этом нагрузки на элементы ТА могут достигать критических значений по условиям прочности элементов ТА.

2. Время быстродействия существующих средств защиты не обеспечивает эффективную возможность погашения явления обката. Для смягчения последствий развития явления обката необходимо иметь систему защиты турбоагрегата с быстродействием менее 0,22 сек, что в настоящее время нереально. Использование электрической системы защиты (с быстродействием 0,4–0,5 сек) может положительно сказаться на определённой стабилизации амплитуд колебаний при обкате и сглаживании его опасных последствий.

3. Достаточно эффективной мерой погашения развития обката ротора по статору считается увеличение потерь энергии в системе ротор–статор (особенно в статоре), соблюдение рекомендаций системы предотвращения катастроф агрегатов (СПКА).

## 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 жёсткому подшипнику [Текст] / Г.Г. Денисов, Ю.И. Неймарк, Ю.В. Цветков // *Механика твёрдого 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]: учеб. для вузов / А.Г. Костюк. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 476 с.
6. Костюк, А.Г. Движение неуравновешенного ротора при задеваниях о статор [Текст] / А.Г. Костюк, В.Ф. Шатохин, О.А. Волоховская // *Теплоэнергетика*. – 2012. – №2. – С. 3–11.

7. 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 // Вестник двигателестроения. - 2009. - № 3. - С. 113–121.

8. 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.

9. 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.

10. Костюк, А.Г. Численное моделирование нестационарных колебаний многоопорного ротора с задеванием о статор [Текст] / А.Г. Костюк, В.Ф. Шатохин, С.Д. Циммерман // Электрические станции. - 2012. - № 9. - С. 3–11.

11. Никифоров, А.Н. Обобщённая математическая модель ротора Джеффо-Лавала с учётом его проскальзывания при контакте и несоосности со статором [Текст] / А.Н. Никифоров // Вестник научно-технического развития. - 2012. - № 5(57). - С. 41–54.

12. Muszynska, A. Partial lateral rotor to stator rubs, Proceedings of the 3 international conference on vibrations in rotating machinery [Text] / A. Muszynska // Institute of Mechanical Engineering. - York, UK, 1984. - P. 327–335.

13. Шатохин, В.Ф. Предопределённость развития ликвидационного процесса турбоагрегата и примеры его последствий [Текст] / В.Ф. Шатохин, С.Д. Циммерман // Авиационно-космическая техника и технология. - 2007. - № 8 (44). - С. 95–102.

14. Шатохин, В.Ф. Особенности развития обката неуравновешенного ротора по статору [Текст] / В.Ф. Шатохин, С.Д. Циммерман // Вестник двигателестроения. - 2012. - № 2. - С. 105–112.

15. Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и выводы [Текст] / И.Ш. Загретдинов, А.Г. Костюк, А.Д. Трухний, П.Р. Должанский // Теплоэнергетика. - 2004. - № 5. - С. 5–15.

16. Шатохин, В.Ф. Исследование особенностей развития обката и сил, возбуждающих асинхронный обкат ротора по статору [Текст] / В.Ф. Шатохин // Электрические станции. - 2013. - С. 5-12.

17. Ольфорд. Защита турбомашин от самовозбуждающихся прецессионных движений ротора [Текст] / Ольфорд // Тр. америк. общества инж.-механиков: Энергетические машины и установки. - 1965. - Т. 87, Сер. А, № 2. - С. 7-18.

18. Костюк, А.Г. Теоретический анализ аэродинамических сил в лабиринтных уплотнениях турбомашин [Текст] / А.Г. Костюк // Теплоэнергетика. - 1972. - № 11. - С. 29–33.

19. Система управления, защиты и диагностики: Руководство по защитам и блокировкам ИТ14Т-50-8,8/0.12 [Текст] // Измерительные технологии. - Саров. - 2012. - 87 с.

20. Костюк, А.Г. Особенности движения ротора с задеванием о статор [Текст] / А.Г. Костюк, В.Ф. Шатохин, О.А. Волоховская // Теплоэнергетика. - 2013. - № 2. - С. 10-18.

Поступила в редакцию 10.04.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственной премии России в области науки и техники, лауреат премии им. И.И. Ползунова Олег Ошеревич Мильман, Калужский государственный педагогический университет им. К.Э. Циолковского, директор по науке ЗАО «Турбокон», Калуга.

## ВПЛИВ ШВИДКОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ТУРБОАГРЕГАТА НА РОЗВИТОК ОБКАТУ РОТОРА ПО СТАТОРУ

**В.Ф. Шатохін, С.Д. Циммерман**

У випадку контакту ротора, що обертається, зі статором можливий (за певних умов) розвиток асинхронного обкату ротором статора. Небезпека асинхронного обкату пов'язана із практично миттєвим розвитком самозбуджуваних коливань ротора і небезпечними для цілісності турбоагрегату (ТА) амплітудами коливань ротора, силами тиску на статор. На основі математичного моделювання нестационарних коливань однодискового ротора внаслідок миттєвого розбалансування розглянуто можливість стабілізації обкату, що розвивається, за допомогою засобів захисту ТА різної швидкодії. Передбачається, що засоби захисту спрацьовують після подавання сигналу про перевищення припустимого рівня вібрації на протязі деякого часу АВtime і приводять до відключення генератора від мережі, припинення подавання робочого тіла в проточну частину, припиненню дії моменту на валу ТА. Наведено зміни основних параметрів обкату в залежності від часу АВtime. Показано, що швидкодія існуючих засобів захисту не забезпечує ефективну можливість погашення явища обкату, хоч використання електричної системи захисту (із швидкодією 0.4–0.45 с) може позитивно вплинути на певну стабілізацію амплітуд коливань при обкаті та згладжуванні його небезпечних наслідків. Зростання

втрат енергії в системі ротор–статор (особливо в статорі), дотримання рекомендацій системи запобігання катастроф агрегатів (СЗКА) є ефективною мірою пом'якшення наслідків обкату ротора по статору.

**Ключові слова:** ротор, статор, миттєве розбалансування ротора, обкат ротора по статору (синхронний або асинхронний), коефіцієнти жорсткості обкату, система захисту турбоагрегату.

## EFFECTS OF TURBOGENERATOR PROTECTION SYSTEM SPEED CAPABILITIES ON THE DEVELOPMENT OF THE ROTOR ROLL OVER THE STATOR

*V.F. Shatokhin, S.D. Tsimmerman*

In the case of the rotating rotor contact with the stator (under certain conditions), the development of the rotor asynchronous roll over the stator may take place. The threat of the asynchronous roll is related to the practically instantaneous development of rotor self-exciting vibrations and vibration amplitudes dangerous for the turbogenerator (TG) integrity and pressure forces acting on the stator. Discussed is the possibility of the developing roll stabilization with TG safeguards of the various speed capabilities on the basis of the mathematical simulation of one-mass rotor non-stationary vibrations arising from the sudden rotor unbalance. It is assumed that the safeguards operate upon a signal of vibration exceeding admissible level is sent within certain ABtime and switch off the generator from the mains, stop the working medium admission to the flowpath, stop the initiation of the torque on the TG shaft. Given are changes in the roll main parameters versus ABtime. It is shown that the speed capability rate (period) of the present safeguards doesn't ensure the effective possibility to extinguish the roll phenomena, though the use of the electrical protection system (with the speed capability 0.4 – 0.5 s) may positively affect a certain stabilization of the vibration amplitude at the roll and make hazard effects less essential. An increase in the energy loss in the rotor–stator system (especially in the stator), compliance with the recommendations of the set breakdown preventive system (SBPS) is an effective step to neutralize the effects of the rotor rolling over the stator.

**Key words:** rotor, stator, abrupt rotor unbalance, rotor roll over the stator (asynchronous or synchronous), roll rigidity factors, turbogenerator protection systems.

**Шатохин Виктор Фёдорович** – канд. техн. наук, ведущий инженер–конструктор–разработчик ОАО «Калужский турбинный завод», Калуга, Россия, e-mail: Shatokhin\_vf@oaoktz.ru.

**Циммерман Сергей Дмитриевич** – канд. техн. наук, главный инженер ОАО «Калужский турбинный завод», Калуга, Россия, e-mail: Shatokhin\_vf@oaoktz.ru.