

УДК 62-755

А.Н. ГОРБЕНКО

*Керченский государственный морской технологический университет, Украина*

## ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНИЦЫ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОБАЛАНСИРОВКИ РОТОРА ШАРАМИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В работе изучается взаимосвязь между наибольшей критической скоростью вращения роторной системы с автобалансиром и текущим дисбалансом ротора, изменяющимся во время эксплуатации. Установлены закономерности и диапазоны возможных значений геометрических параметров, характеризующих автобалансирующие положения шаров. Показано, что при неизменном дисбалансе граница устойчивости может быть различной в зависимости от геометрии расположения шаров. Кроме того, возможно аномальное повышение остаточной вибрации и снижение эффективности автобалансировки при относительно невысоком дисбалансе ротора.

**ротор, вибрация, автобалансир, дисбаланс, устойчивость автобалансировки, граница устойчивости**

### 1. Постановка проблемы. Анализ существующих публикаций. Цель работы.

Для снижения вибрации роторных машин находят применение автобалансирующие устройства (АБУ) пассивного типа (см. например [1-5]). Одним из их достоинств является возможность автоматического устранения дисбаланса ротора, изменяющегося в процессе эксплуатации. Согласно инженерной теории АБУ [1, 2] для однодискового ротора в зоне устойчивости реализуется идеальная автобалансировка, при которой компенсирующие массы (КМ) – шары или маятники – занимают неподвижные положения относительно диска и поперечные колебания ротора отсутствуют. При этом получается, что эффективность автобалансировки и граница ее устойчивости не зависят от величины текущего дисбаланса ротора (в пределах емкости АБУ).

В действительности в режиме автобалансировки всегда имеется некоторая ненулевая остаточная вибрация ротора, уровень которой в существенной мере зависит от текущего дисбаланса [3, 4]. Известно, что в процессе эксплуатации происходит постоянный рост неуравновешенности ротора [5]. Это приводит к постепенному увеличению остаточной вибрации ротора и нижней границы устойчивости (т.е. наибольшей критической скорости вращения системы «ротор – АБУ»).

Практически важно при проектировании автобалансира выбрать такие его параметры, при которых обеспечивается достаточно низкий уровень вибрации машины в течение заданного периода эксплуатации. Косвенным показателем вибрации ротора с АБУ может служить запас устойчивости автобалансировки по частоте вращения. В связи с этим представляется актуальным выявление взаимосвязи между наибольшей критической скоростью вращения роторной системы и текущим дисбалансом. Анализ литературных источников показывает, что данный вопрос лишь частично изучался в работах [4, 3].

Цель работы – анализ характера изменения границы устойчивости автобалансировки в процессе эксплуатационного роста дисбаланса однодискового ротора с многомассовым АБУ.

### 2. Физическая модель. Безразмерные параметры.

Рассмотрим однодисковый ротор на двух изолированных опорах. Статически неуравновешенный диск ротора расположен посередине между опорами и совершает плоское движение. В плоскости диска расположен автобалансир с компенсирующими массами в виде шариков или маятников (рисунок 1). Непосредственный контакт между КМ отсутствует.

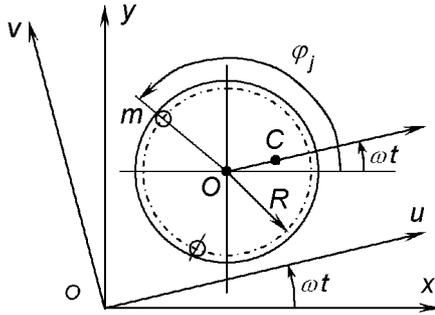


Рисунок 1 – Механическая система «ротор – автобалансир»

Данная механическая система характеризуется следующими физическими параметрами:  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора, рад/с;  $M$  – масса диска, кг;  $r$  – эксцентриситет, м;  $K$  – жесткость вала и его опор, приведенная к центру диска, Н/м;  $\beta$  – коэффициент внешнего вязкого демпфирования ротора,  $c^{-1}$ ;  $p$  – критическая скорость вращения ротора без АБУ, рад/с;  $x, y$  – текущие координаты геометрического центра диска, м;  $m, n$  – масса одного шара (кг) и их количество;  $R$  – радиус окружности движения центров масс шаров в АБУ, м;  $\beta_0$  – коэффициент внутреннего вязкого сопротивления движению шаров в АБУ,  $c^{-1}$ ;  $\alpha_j$  – постоянные угловые положения шаров относительно диска в режиме автобалансировки, рад;  $\varphi_j$  – текущая угловая координата  $j$ -го шара относительно оси  $x$ , рад.

В режиме автобалансировки шары занимают в АБУ положения, при которых выполняются соотношения:

$$\sum_{j=1}^n \cos \alpha_j = -\frac{Mr}{mR} = -\frac{n}{E}; \quad \sum_{j=1}^n \sin \alpha_j = 0, \quad (1)$$

где  $E = \frac{nmR}{Mr} = \frac{n\mu\rho}{1-n\mu}$  – балансирующая ёмкостью автобалансира.

Анализ динамики системы может быть сведен к исследованию уравнений, зависящих от следующих безразмерных параметров [3, 4]:

$$\Omega = \frac{\omega}{p}; \quad B = \frac{\beta}{p}; \quad \mu = \frac{m}{M + nm}; \quad \rho = \frac{r}{R}; \quad B_0 = \frac{\beta_0}{p};$$

$$D = \frac{1}{n^2} \left[ \left( \sum_{j=1}^n \cos 2\alpha_j \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^n \sin 2\alpha_j \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $\Omega$  – безразмерная угловая скорость вращения;

$B, B_0$  – безразмерные коэффициенты внешнего и внутреннего вязкого демпфирования ротора и АБУ;

$\mu$  – относительная масса одного шара;

$\rho$  – относительный радиус окружности движения центров масс шаров в АБУ;

$D$  – параметр расположения шаров в режиме автобалансировки.

Характерные диапазоны значений параметров [3, 4]:  $B=0,01 \dots 0,5$ ;  $n\mu=0,001 \dots 0,05$ ;  $B_0=0,01 \dots 0,5$ .

Критические скорости механической системы определяются характеристическим уравнением вида [3]:

$$\sum_{k=0}^8 a_k \Delta^{8-k} = 0, \quad (3)$$

где  $a_0 = 1 - n\mu + 0,25n^2\mu^2(1 - D)$ ;

$$a_1 = (2 - n\mu)(B + B_0);$$

$$a_2 = (2 - n\mu)(1 + \Omega^2 + BB_0) + (B + B_0)^2 + n^2\mu^2\Omega^2(1 - D);$$

$$a_3 = 2(B + 2B_0)(1 + \Omega^2) + 2BB_0(B + B_0) - n\mu(B_0(1 + \Omega^2) - 2B\Omega^2);$$

$$a_4 = (\Omega^2 - 1)^2 + n\mu\Omega^2(6 + \Omega^2 + 2BB_0) + 2B_0(2B + B_0)(1 + \Omega^2) + B^2(B_0^2 + \Omega^2) + 1,5n^2\mu^2\Omega^4(1 - D);$$

$$a_5 = 2B_0(\Omega^2 - 1)^2 + 2BB_0[B_0 + (B + B_0)\Omega^2] + n\mu\Omega^2[3B\Omega^2 + B_0(6 + \Omega^2)];$$

$$a_6 = n\mu\Omega^4(\Omega^2 - 1 + 3BB_0) + n^2\mu^2\Omega^6(1 - D) + B_0^2[(\Omega^2 - 1)^2 + B^2\Omega^2];$$

$$a_7 = n\mu B_0 \Omega^4 (\Omega^2 - 1); \quad a_8 = 0,25n^2\mu^2\Omega^8(1 - D);$$

$\Delta$  – собственное число механической системы.

При  $\Omega > 1$  все коэффициенты  $a_k > 0$ .

При типичных значениях параметров область устойчивости автобалансирующего режима ограничивается снизу наибольшей критической скоростью роторной системы  $\Omega_k$ , которая неявным образом определяется уравнением (3). Как видим из (3) граница устойчивости зависит от дисбаланса через геометрический параметр  $D$ , свойства которого в общем случае неоднозначны и недостаточно изучены в существующих работах по автобалансиром.

### 3. Геометрические особенности расположения КМ в АБУ

В автобалансирующем режиме КМ в АБУ занимают положения, при которых общий центр масс КМ и диска ротора расположен в центре диска  $O$ . Параметр  $D$  зависит от  $\alpha_j$ , которые в свою очередь определяются дисбалансом  $M_i$ . Изменение дисбаланса приводит к изменению величины  $D$ , а также емкости  $E$ .

В случае  $n=2$  расположения шаров и значение параметра  $D$  однозначны. Из (1), (2) для этого случая вытекают выражения:

$$\alpha_1 = -\alpha_2 = \arccos\left(-\frac{1}{E}\right); \quad D = \left(\frac{2}{E^2} - 1\right)^2. \quad (4)$$

В случае  $n=3$  ситуация неоднозначна. Во-первых, существует множество вариантов размещения шариков в АБУ. Результат расположения шариков можно трактовать как произвольное размещение  $(n-2)$  шариков (в пределах возможного) и однозначное расположение оставшихся двух шариков согласно равенствам (1).

Во-вторых, параметр  $D$  не может быть однозначно

выражен через суммы  $\sum_{j=1}^n \cos \alpha_j$  и  $\sum_{j=1}^n \sin \alpha_j$ .

Вследствие этого величина  $D$  может принимать произвольное значение в некотором интервале  $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$ . В известных работах для параметра  $D$  указывается лишь общий диапазон его возможных значе-

ний:  $D=0 \dots 1$ . Однако более внимательное изучение показывает, что при заданном значении дисбаланса (а значит и емкости) величина  $D$  изменяется в более узком диапазоне, т.е.  $D_{\min} \geq 0$  и  $D_{\max} \leq 1$ .

В частности для случая  $n=3$  на основе (1), (2) могут быть получены следующие выражения:

$$D_{\min} = \frac{1}{E^2} \left(\frac{n}{E} - 2\right)^2;$$

$$D_{\max} = \begin{cases} \frac{1}{2n^2} \left(27 - 10 \frac{n^2}{E^2} + \frac{n^4}{E^4}\right), & 1 \leq E < 3; \\ \frac{1}{E^2} \left(\frac{n}{E} + 2\right)^2, & E \geq 3. \end{cases} \quad (4)$$

Из рисунка 2 видны основные особенности зависимости параметра  $D$  от емкости, которая изменяется обратно пропорционально дисбалансу. При  $E=1$  в любом случае  $D=1$ . В случае  $n=2$  зависимость  $D(E)$  однозначна. При  $n=3$  (и более) всегда имеется некоторый диапазон возможных значений параметра  $D$ . Причем при  $E$ , близких к единице, этот диапазон весьма узкий.

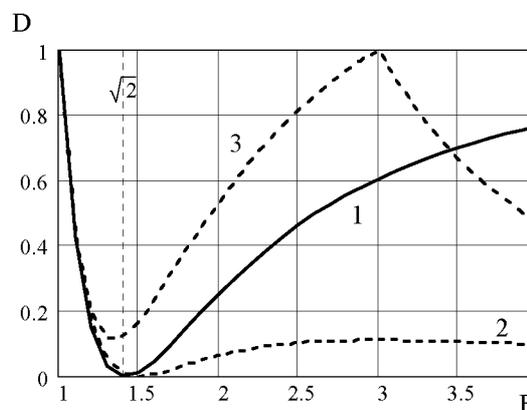


Рисунок 2 – Зависимость параметра  $D$  от емкости  $E$ :  
1 –  $D(E)$  при  $n=2$ ;  
2, 3 –  $D_{\min}(E)$  и  $D_{\max}(E)$  при  $n=3$

### 4. Изменение границы устойчивости

В процессе эксплуатации происходит постепенная разбалансировка ротора, выражающаяся в увеличении эксцентриситета  $g$ . Это приводит к снижению запаса устойчивости автобалансирующей системы и изменению уровня остаточной вибрации. Граница устой-

чивости  $\Omega_K$ , как видно из (3), является функцией параметра  $D$ , который в свою очередь зависит от дисбаланса. Зависимость  $\Omega_K(D)$  носит нелинейный характер (см. рисунок 3) [3].

Указанные выше особенности приводят к своеобразному изменению границы устойчивости, что видно из рисунка 4. Расчеты проводились на основе уравнения (3) при  $\text{Re}(\Delta)=0$ . При этом были приняты следующие исходные данные:  $V=0,2$ ;  $\mu=0,01$ ;  $V_0=0,05$ ; начальная емкость АБУ  $E_{\text{нач}}=5$ .

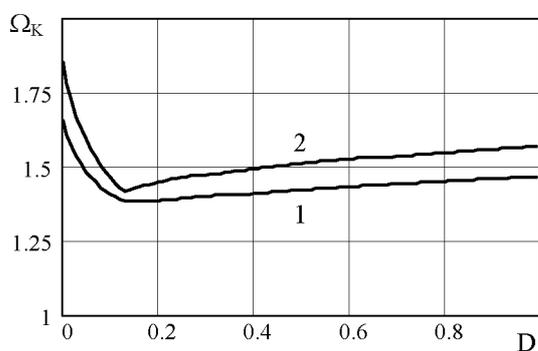


Рисунок 3 – Зависимость границы устойчивости  $\Omega_K$  от параметра  $D$ :  
1, 2 – при  $n=2$  и  $n=3$

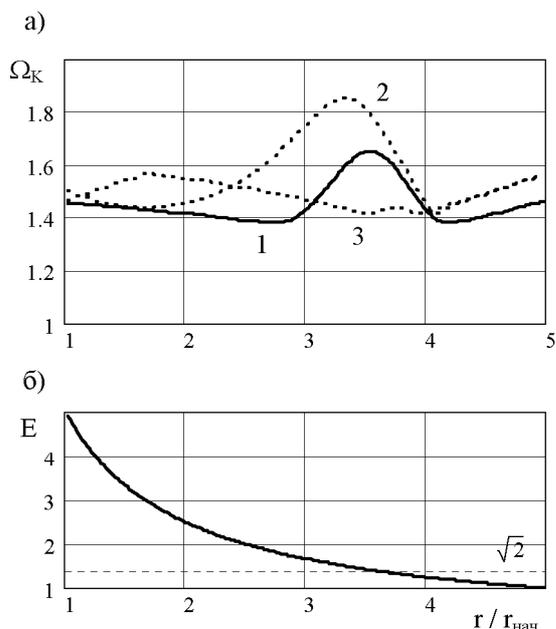


Рисунок 4 – Зависимость границы устойчивости  $\Omega_K$  (а) и емкости автобалансира (б) от эксцентриситета:  
1 –  $n=2$ ;  
2, 3 –  $n=3$  при  $D_{\text{min}}$  и  $D_{\text{max}}$

## Заключение

В работе установлены следующие основные особенности изменения границы устойчивости автобалансировки в процессе эксплуатационного роста дисбаланса ротора.

1. Имеется качественное различие в поведении двух- и многомассовых АБУ. При  $n=2$  каждому значению дисбаланса соответствует одно значение  $\Omega_K$ . При  $n \geq 3$  каждому значению дисбаланса соответствует определенный интервал  $\Omega_K$ .

2. В процессе роста дисбаланса возможно явление аномального повышения  $\Omega_K$  с последующим ее снижением. Данная особенность проявляется при  $D$  близком к нулю.

Полученные результаты будут полезны для дальнейших исследований и на производстве.

## Литература

1. Автоматическая балансировка роторов машин / А.А.Гусаров, В.И.Сусанин, Л.Н.Шаталов, Б.М.Грушин. - М.: Наука, 1979. – 151 с.
2. Нестеренко В.П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы. - Томск: Томский ун-т, 1985. - 84 с.
3. Горбенко А.Н. Об устойчивости автобалансировки ротора с помощью шариков // Проблемы прочности – 2003. – № 3 (363). – с. 120-129.
4. Филимонихин Г.Б. Зрівноваження і виброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 352с.
5. Самаров Н.Г. Автоматическое балансирующее устройство как конструктивный узел вращающихся механизмов // Автоматизация и современные технологии. 1995. №7. 20-22с.

Поступила в редакцию 31.05.2008 г.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Кислый А.А. Керченский государственный морской технологический университет.

Библиографическое описание статьи:

Горбенко А.Н. Изменение границы устойчивости автобалансировки ротора шарами в процессе эксплуатации // Авиационно-космическая техника и технология: Научно-технический журнал. – Харьков: "Харьковский авиационный институт". – 2008. – Вып.8 (55). - с. 156-159.