

УДК 621.0

СТАЦИОНАРНОЕ ВРАЩЕНИЕ НЕУРАВНОВЕШЕННОГО РОТОРА С ЖИДКОСТНЫМ АВТОБАЛАНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ

В.А. Дубовик, Е.Н. Пашков

Томский политехнический университет

E-mail: epashkov@rambler.ru

Рассмотрено влияние сил внешнего трения на вращение ротора с жидкостным автобалансирующим устройством. Жидкость в балансирующей камере при стационарном движении вращается вместе с ротором как твердое тело. Получены аналитические выражения для прогиба вала, дисбаланса системы и необходимого вращающего момента от двигателя, обеспечивающего вращение с заданной скоростью.

Для устранения дисбаланса вращающихся тел используют жидкостные балансирующие устройства (АБУ) [1]. При проектировании таких АБУ необходимо знать влияние жидкости на вращение тела. Исследованию вращения уравновешенного ротора при частичном его заполнении жидкостью посвящены работы [2, 3]. Изгибные колебания вала с неуравновешенным диском на нем изучены в [4, 5]. В [6, 7] показано влияние жидкости во вращающемся роторе на автоматическую балансировку механической системы без учета сил сопротивления. Ниже рассматривается установившееся движение неуравновешенного ротора с жидкостью при наличии внешнего трения.

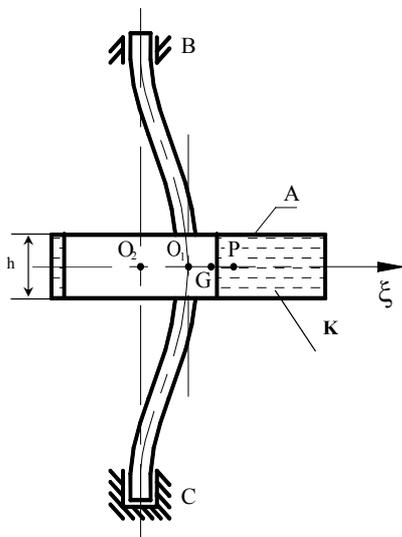


Рис. 1. Схема закрепления ротора

Пусть ротор А (рис. 1) с балансирующей камерой К, заполненной частично жидкостью, симметрично закреплен на гибком вертикальном валу, проходящем через геометрический центр O_1 . Центр масс ротора (точка P) смещен от O_1 на расстояние $O_1P=e$. При вращении ротора вал смещается на величину $O_2O_1=a$, а несжимаемая однородная жидкость, плотностью ρ , перетекает в сторону прогиба вала. В случае установившегося движения жидкость во вращающемся роторе занимает цилиндрический слой высотой h , свободной поверхностью которого является окружность радиуса r_2 с центром на оси вращения BC (точка O_2 на рис. 2), и враща-

ется с угловой скоростью ротора $\omega=\text{const}$ [1]. Отсюда центр масс слоя жидкости находится на линии центров O_2O_1 в точке G , а движение ротора является плоским.

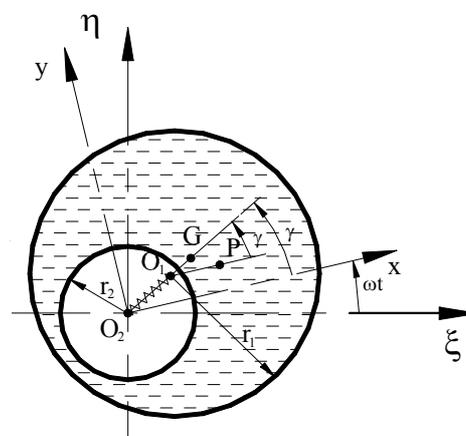


Рис. 2. Сечение ротора с жидкостью

Введем в плоскости движения точек O_1, G, P две системы координат (рис. 2) с общим началом в точке O_2 на линии BC : неподвижную систему $O_2\xi\eta$ и подвижную O_2xy , ось x которой параллельна отрезку O_1P . Угловые скорости вращения ротора и системы O_2xy одинаковые, следовательно, ротор в подвижной системе координат неподвижен. За обобщенные координаты возьмем координаты в подвижной системе точки $O_1 - x, y$.

На ротор со стороны вала действует сила упругости $\vec{F}_c = -c\vec{O}_2O_1$ и сила внешнего трения, приложенная в точке O_1 , пропорциональная абсолютной скорости \vec{V}_{O_1} этой точки, $\vec{F}_\chi = -\chi\vec{V}_{O_1}$, где c и χ коэффициенты упругости и внешнего трения. Согласно принципу Даламбера, справедливому для любой механической системы, имеем уравнение равновесия главных векторов внешних сил и сил инерции:

$$-c\vec{O}_2O_1 - \chi\vec{V}_{O_1} - m_1\vec{a}_P^e - m_2\vec{a}_G^e = 0. \quad (1)$$

Здесь m_1 и m_2 – массы ротора и жидкости, \vec{a}_P^e и \vec{a}_G^e – переносные ускорения точек P и G соответственно. Координаты этих точек определяются выражениями

$$x_P = x + e, \quad y_P = y, \quad x_G = rx, \quad y_G = ry, \quad (2)$$

где $r=r_2^2/(r_1^2-r_2^2)$; r_1 – радиус ротора.

Проецируя (1) на оси x , y и используя (2) для вычисления \bar{V}_0 , \bar{a}_p^e и \bar{a}_c^e , получаем уравнения стационарного движения системы:

$$\begin{aligned} cx - \chi\omega y - m\omega^2 x &= m_1 e \omega^2; \\ cy + \chi\omega x - m\omega^2 y &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $m = m_1 + rm_2$ – приведенная масса системы, $rm_2 = \rho\pi^2 h$ – фиктивная масса жидкости, заполняющая всю балансирующую камеру ротора [1].

Из уравнения равновесия моментов всех сил относительно оси BC , определяем вращающий момент M , приложенный к валу со стороны двигателя

$$M = O_2 O_1 \cdot \chi V_{O_1} = \chi a^2 \omega = \chi \omega (x^2 + y^2). \quad (4)$$

Решение уравнений (3) имеет вид

$$x = \frac{m_1 e \omega^2 (c - m\omega^2)}{(c - m\omega^2)^2 + \chi^2 \omega^2}; \quad y = -\frac{m_1 e \chi \omega^3}{(c - m\omega^2)^2 + \chi^2 \omega^2}. \quad (5)$$

По формулам (2–5) вычисляются прогиб вала $a = \sqrt{x^2 + y^2}$; дисбаланс системы $d = (m_1 + m_2)r_c$, где $r_c = \sqrt{(x_p m_1 + x_c m_2)^2 + (y_p m_1 + y_c m_2)^2} / (m_1 + m_2)$ – отклонение центра масс ротора с АБУ от оси BC ; и вращающий момент M

$$\begin{aligned} a &= \frac{ez}{\sqrt{D(\mu)}}; \quad d = \frac{m_1 e \sqrt{1+nz}}{\sqrt{D(\mu)}}; \quad M = \frac{e^2 z^2 c \sqrt{nz}}{D(\mu)}; \\ D(\mu) &= (1 - \mu z)^2 + nz. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $z = m_1 \omega^2 / c$, $n = \chi^2 / (cm_1)$ – безразмерный коэффициент сопротивления, $\mu = m/m_1$ – отношение приведенной массы системы к массе ротора.

Для сравнения движения ротора с жидкостным АБУ и без него рассмотрим следующие отношения:

$$\frac{a}{a_1} = \frac{d}{d_1} = \sqrt{\frac{D(1)}{D(\mu)}}; \quad \frac{M}{M_1} = \frac{D(1)}{D(\mu)}, \quad (7)$$

где a_1 , d_1 , M_1 – прогиб вала, дисбаланс, вращающий момент при движении ротора без балансирующей жидкости, получаемые из (6) при $\mu=1$.

Угол сдвига фазы движения γ определяется формулой

$$\operatorname{tg} \gamma = y/x = -\frac{\chi\omega}{c - m\omega^2} = -\frac{\sqrt{nz}}{1 - \mu z}, \quad (8)$$

Это выражение при отсутствии жидкости, т.е. при $\mu=1$, совпадает с аналогичной формулой в [3]. Отношение прогибов вала a/a_1 , при $n=0$, совпадает с соответствующим значением, полученным для вращения без сил трения в [5].

Из формул (5–8) следует, что при $\omega \rightarrow \infty$ ($z \rightarrow \infty$), $a \rightarrow m_1 e / m$, т.е. прогиб вала становится меньше неуравновешенности e , т.к. $m_1 / (m_1 + rm_2) < 1$; $r_c \rightarrow 0$, $\gamma \rightarrow \pi$, $x \rightarrow -m_1 e / m$, $y \rightarrow 0$; координаты центров масс ротора и слоя жидкости принимают значения: $x_p = rm_2 e / m$, $y_p = 0$ и $x_c = -rm_1 e / m$, $y_c = 0$; $d \rightarrow 0$; $M \rightarrow \infty$. Таким образом, при больших ω центр масс системы стремится занять положение на оси вращения BC ; происходит самоцентрирование системы.

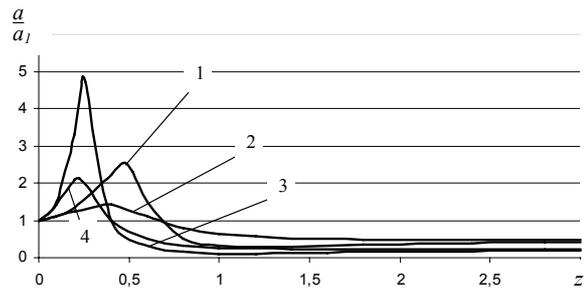


Рис. 3. Зависимость прогиба вала a/a_1 от относительной угловой скорости z при различных значениях μ и n : 1) $\mu=2$, $n=0,1$; 2) $\mu=2$, $n=0,7$; 3) $\mu=4$, $n=0,1$; 4) $\mu=4$, $n=0,7$

Так как $D(1) < D(\mu)$ при $z > 2/(1+\mu)$, то согласно (7) жидкостное АБУ уменьшает прогиб, дисбаланс системы по сравнению с ротором без жидкости на частотах вращения выше $2/(1+\mu)$.

На рис. 3 показано отклонение прогиба вала ротора с действующим АБУ к прогибу без него, рассчитанное для $\mu=2$; 4 и $n=0,1$; $0,7$. Из рисунка видно, что при одном и том же значении μ и различных n совпадение прогибов вала системы и ротора без жидкости наступает при одном и том же значении z . С увеличением параметра μ критическая частота вращения убывает, а экстремальное значение прогиба уменьшается с ростом n . Эти же кривые описывают изменение отношения дисбаланса и радиалов вращающихся моментов.

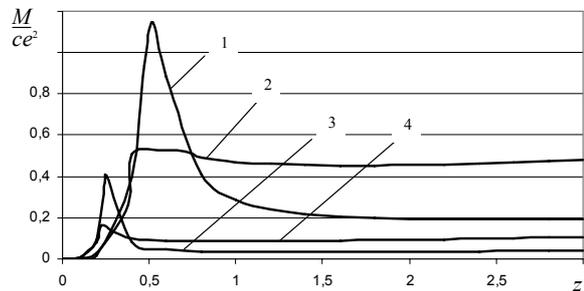


Рис. 4. Зависимость вращающего момента от относительной угловой скорости z при различных значениях μ и n : 1) $\mu=2$, $n=0,1$; 2) $\mu=2$, $n=0,7$; 3) $\mu=4$, $n=0,1$; 4) $\mu=4$, $n=0,7$

Из (6) следует, что максимальный прогиб вала $a^{sp} = 2e/\sqrt{4\mu n - n^2}$ наступает при критической угловой скорости $z^{sp} = 2/(2\mu - n)$. При отсутствии жидкости в балансирующей камере $z_1^{sp} = 2/(2-n)$ и $a_1^{sp} = 2e/\sqrt{4n - n^2}$. Сравнивая эти значения, заключаем: жидкостное АБУ уменьшает критическую скорость и максимальное отклонение ротора от оси вращения. Изменение вращающего момента от угловой скорости показано на рис. 4. Расчеты показали, что эти кривые при $\mu > 2n$ имеют две экстремальные частоты вращения $z_{1,2} = (6\mu - 3n \pm \sqrt{(6\mu - 3n)^2 - 20\mu^2}) / (2\mu^2)$. Первая (знак минус) соответствует максимальному значению момента, вторая – минимальному. Отсюда, в случае малой мощности двигателя, при переходе через частоту z_1 [8], возможна ситуация, когда энергии не хватает для преодоления резонанса.

Выводы

Установлены зависимости прогиба вала, дисбаланса системы, вращающего момента при заданной угловой скорости вала от отношения приведенной массы к массе ротора и сил внешнего трения. Получена частота вращения, зависящая только от отношения масс, выше которой указанные характери-

стики движения системы с АБУ становятся меньше чем для ротора без жидкости. Вычислена угловая скорость, при которой ротор не может преодолеть критическую частоту для малой мощности двигателя. Полученные результаты следует учитывать при проектировании и использовании жидкостных АБУ для гашения колебаний неуравновешенных роторов с вертикальной осью вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. 6782722 USA. Drum washing machine // Yokoi e.a. Sanyo Electric Co., Ltd.; 31.08.2004.
2. Епишев Л.В. О динамической неустойчивости вращающегося ротора при неполном налив жидкости // Научн. докл. высш. школы. Машиностроение и приборостроение. – 1959. – № 2. – С. 66–74.
3. Дерендяев Н.В., Сандалов В.М. Об устойчивости стационарного вращения цилиндра, частично заполненного вязкой несжимаемой жидкостью // Прикладная математика и механика. – 1982. – Т. 46, вып. 4. – С. 578–586.

4. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 246 с.
5. Рубановский В.Н., Самсонов В.А. Устойчивость стационарных движений в примерах и задачах. – М.: Наука, 1988. – 304 с.
6. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия. – М.: Наука, 2002. – 119 с.
7. Нестеренко В.П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1985. – 85 с.
8. Диментберг Ф.М., Шаталов К.Т., Гусаров А.А. Колебания машин. – М.: Машиностроение, 1964. – 308 с.

УДК 621.375.026

УСИЛИТЕЛЬ ОДНОПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ РАДИОЛОКАЦИИ

А.А. Титов, В.П. Пушкарев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: titov_aa@rk.tusur.ru

Описан усилитель видеопульсов, предназначенный для работы в качестве источника импульсного питания диодов Ганна ЗА763А-М системы ближней радиолокации. Характеристики усилителя: коэффициент усиления 16 дБ; максимальная амплитуда выходных импульсов 6 В; максимальный ток в импульсе 2,5 А.

В настоящее время для измерения скорости движущихся объектов, например, автомобилей, широко используют системы ближней радиолокации, основанные на эффекте Доплера [1]. Генераторы СВЧ колебаний указанных систем выполняются чаще всего на диодах Ганна, работающих в непрерывном режиме. Возможности таких систем ближней радиолокации могут быть расширены при переводе генераторов в импульсный режим работы. В этом случае появляется возможность кроме измерения скорости объектов определять также и дальность до них.

В соответствии с паспортными данными [2] для возбуждения диодов Ганна ЗА763А-М требуются генераторы видеопульсов положительной полярности амплитудой 5...6 В при выходном токе 1,5...2 А. Стандартные генераторы импульсных сигналов работают как правило на стандартную нагрузку 50 Ом и имеют выходное напряжение 1 В.

На рис. 1 приведена принципиальная схема усилителя, позволяющего повысить выходные параметры стандартного генератора импульсных сигналов до требуемых значений.

Усилитель содержит входной резистивный делитель напряжения, два каскада усиления, генератор стабильного тока, контрольный выход.

Резистивный делитель напряжения, стоящий на входе усилителя и выполненный на резисторах R1–R3, обеспечивает согласование усилителя с выходным сопротивлением генератора и стабилизацию глубины общей отрицательной обратной связи, охватывающей усилитель.

В обоих каскадах усилителя, выполненных на транзисторах VT2 и VT4, применена активная коллекторная термостабилизация токов покоя [3]. Сами точки покоя транзисторов выбирались исходя из неискаженного усиления видеопульсов со скважностью изменяющейся от 10 до ∞. Для транзистора VT2 ток покоя равен 70 мА, для VT4 – 300 мА, которые устанавливают подбором номиналов резисторов R5 и R12.

В процессе запуска генератора на диоде Ганна его сопротивление изменяется. Для уменьшения влияния изменяющегося сопротивления нагрузки на характеристики усилителя его выходной каскад выполнен по схеме с общим коллектором, а сам усилитель охвачен общей отрицательной обратной