

УДК 621.01.62.50

О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН С САМОСИНХРОНИЗИРУЮЩИМИСЯ ИНЕРЦИОННЫМИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯМИ

© Илья Израилевич Блехман, Владислав Борисович Васильков,
Николай Павлович Ярошевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Проблем
Машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

blekhman@vibro.ipme.ru

Аннотация. На основе выполненных ранее теоретических и экспериментальных исследований рассматриваются две возможности совершенствования вибрационных машин с самосинхронизирующимися дебалансными (инерционными) вибровозбудителями с зарезонансной рабочей частотой колебаний. Первая касается режимов пуска машин, а вторая – работы в установившемся режиме. Предлагаемые усовершенствования позволяют снизить установочные мощности двигателей, энергозатраты и динамические нагрузки при эксплуатации машин.

1. Введение

Явление самосинхронизации механических вибровозбудителей, открытое в СССР в 1947 г., в настоящее время хорошо изучено. Оно широко используется в вибрационной технике как в России, так и за рубежом [1-3]. Вместе с тем возможности совершенствования вибрационных машин на основе этого явления еще далеко не исчерпаны.

В настоящей работе в качестве базовой модели рассматриваются мягко виброизолированные (зарезонансные) вибрационные машины с прямолинейными колебаниями рабочего органа, приводимые от двух самосинхронизирующихся вибровозбудителей (плоская схема). По такой схеме реализовано большое число современных вибрационных грохотов [4]. Однако результаты допускают обобщение на другие типы машин.

Рассматриваются две возможности совершенствования таких машин, вытекающие из выполненных исследований [1-3, 5-7].

Первая из возможностей состоит в использовании поочередного пуска двигателей возбудителей. В результате удается значительно снизить амплитуды колебаний рабочего органа при прохождении через резонанс в период пуска и, тем самым, значительно уменьшить динамические нагрузки на конструкции и опоры машины. Кроме того, удается уменьшить установочную мощность электродвигателей, часто определяемую условием преодоления потенциального барьера при пуске машины: при недостаточной мощности двигателя возможно «застревание» скорости его вращения вблизи частот свободных колебаний корпуса машины на пружинах (эффект Зоммерфельда). Наконец, оказывается возможным снизить ударный пусковой ток в период прохождения через резонанс при пуске.

Вторая возможность заключается в использовании эффекта вибрационного поддержания вращения неуравновешенного ротора [1-3]. В результате машина с двумя дебалансными возбудителями может работать при одном выключенном электродвигателе. В результате электрические потери в одном из двигателей отсутствуют.

Таким образом, как в результате первого, так и в результате второго усовершенствования имеет место сбережение энергии. Реализация обоих усовершенствований практически не требует затрат.

2. Схема системы и уравнения движения

Схема колебательной системы представлена на рис. 1. Два дебалансных вибровозбудителя (неуравновешенных ротора) размещены на несущем твердом теле массой M , которое может двигаться параллельно плоскости, перпендикулярной осям вращения роторов возбудителей. Оси вращения удалены от центра тяжести тела C на одинаковые расстояния r и одна от другой на расстоянии $O_1O_2 = 2a$. С неподвижным основанием твердое тело связано системой упругих и демпфирующих элементов (c и β).

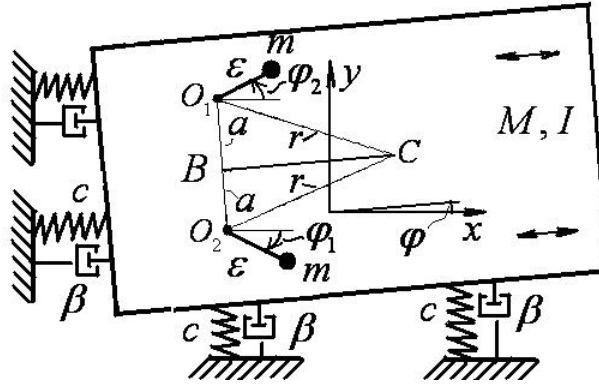


Рис. 1. Динамическая схема вибромашины с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями.

Роторы вибровозбудителей предполагаются номинально одинаковыми, приводятся во вращение от асинхронных электродвигателей и вращаются в противоположных направлениях. Рассматриваемая система имеет пять степеней свободы. За обобщенные координаты несущего тела можно принять смещение центра тяжести C тела относительно неподвижных координат xOy и угол поворота тела φ , причем в положении статического равновесия $x = 0$, $y = 0$, $\varphi = 0$. Положение роторов вибровозбудителей определяется их углами поворота φ_1 и φ_2 , которые в настоящей работе будем отсчитывать от направления оси x в противоположных направлениях (рис. 1).

Движение системы описывается системой существенно нелинейных дифференциальных уравнений. К настоящему времени достаточно подробно исследованы как ее установившиеся движения, так и переходные процессы [4-6].

3. Переход через резонанс при обычном пуске

В практически важном случае мягко виброизолированных (зарезонансных) вибромашин, когда частоты свободных колебаний несущего тела с остановленными роторами на упругих элементах значительно (обычно – не менее чем в три раза) меньше рабочей частоты колебаний машины ω_0 , т.е. $p_x, p_y, p_\varphi < \omega_0 / 3$. Тогда оказывается устойчивым режим самосинхронизации возбудителей с одинаковыми фазами вращения в различных направлениях (см. рис. 1) $\varphi_1 = \omega_0 t$, $\varphi_2 = \omega_0 t$.

В таком режиме тело совершает поступательные прямолинейные колебания, параллельные прямой BC , т.е. перпендикулярно к линии O_1O_2 . При этом $x = 2m\varepsilon \sin \omega t / M$, $y \approx 0$, $\varphi \approx 0$.

Будем предполагать, что при пуске синхронность и синфазность вращения роторов сохраняется. Тогда колебания тела происходят вдоль оси Ox и их амплитуда определяется по формуле [3, 5]

$$A_x = \frac{2m\varepsilon}{M} \frac{1}{B_x}, \quad (1)$$

где $B_x = \sqrt{(1 - \lambda_x^2)^2 + 4n_x^2}$, $\lambda_x = p_x / \omega$, $p_x = \sqrt{c_x / M}$, $n_x = \beta_x / 2M\omega$, а текущая частота ω находится из уравнения

$$I_1 \dot{\omega} = L(\omega) - R(\omega) + V(\omega)$$

Здесь $L(\omega)$ и $R(\omega)$ – соответственно вращающий момент одного двигателя и момент сопротивления его вращению, I_1 – момент инерции ротора, а

$$V(\omega) = -\frac{1}{2} \frac{1}{4} \frac{(2m\varepsilon\omega)^2}{M} \frac{n_x}{B_x^2} = -\frac{1}{2} \frac{(m\varepsilon\omega)^2}{M} \frac{n_x}{B_x^2} \quad (2)$$

вибрационный момент, представляющий дополнительную нагрузку на двигатель вследствие колебаний тела, на котором установлен ротор.

Величины A_x и V при обычных для приложений значениях коэффициентов n_x , n_y и n_φ резко возрастают вблизи резонансов, когда $\lambda_x \approx 1$, $\lambda_y \approx 1$, $\lambda_\varphi \approx 1$. Через λ_y и λ_φ здесь обозначены отношения частот свободных колебаний тела вдоль оси y и поворотных колебаний к частоте ω , а через n_y и n_φ – соответствующие безразмерные коэффициенты затухания. Предполагается, что упругие и демпфирующие элементы расположены симметрично относительно осей x и y (рис. 1). При этом резкое возрастание величины V при приближении к резонансу как раз и объясняет возможное «застревание» частоты ω_0 в процессе пуска (эффект Зоммерфельда). Для выхода возбудителя на рабочую частоту ω_0 момент двигателя должен преодолеть вибрационный момент $V(\omega)$. Максимальное (пиковое) значение этого момента, согласно формуле (2), тем больше, чем меньше затухание n_x . Поэтому пуск машины при отсутствии рабочей нагрузки более затруднен, чем при ее наличии.

4. Использование отдельного пуска вибровозбудителей

При отдельном пуске вместо формул (1) и (2) будем иметь [6]

$$A'_x = \frac{m\varepsilon}{MB_x}, \quad A'_y = \frac{m\varepsilon}{MB_y}, \quad A'_\varphi = \frac{m\varepsilon r}{IB_\varphi},$$

$$\begin{aligned}
 V'(\omega) &= -\frac{1}{4} \frac{(m\varepsilon\omega)^2}{M} \left[\frac{n_x}{B_x^2} + \frac{n_y}{B_y^2} + \frac{Mr^2}{I} \frac{n_\varphi}{B_\varphi^2} \right] = \\
 &= -\frac{1}{4} M\omega^2 \left[(A'_x)^2 n_x + (A'_y)^2 n_y + (A'_\varphi)^2 n_\varphi \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

где

$$B_y = \sqrt{(1 - \lambda_y^2)^2 + 4n_y^2}, \quad B_\varphi = \sqrt{(1 - \lambda_\varphi^2)^2 + 4n_\varphi^2}$$

Будем считать, что частоты p_x , p_y и p_φ , т.е. также λ_x , λ_y и λ_φ , в достаточной мере отличны одна от другой. Этого всегда можно добиться выбором виброизолирующих упругих элементов. Будем считать также, что, как обычно, $Mr^2 / I < 1$, а коэффициенты затухания n_x , n_y и n_φ примерно одинаковыми. Тогда с изменением частоты ω каждое слагаемое в формуле (3), кроме одного, соответствующего либо $\omega \approx p_y$, либо $\omega \approx p_x$, либо $\omega \approx p_\varphi$, будут пренебрежимо малы, и мы приходим к оценке

$$V'(\omega) \approx \frac{1}{2} V(\omega), \tag{4}$$

Иными словами, при соблюдении указанных условий можно ожидать, что при раздельном пуске вибровозбудителей вибрационный момент, действующий на каждый ротор, будет в два раза меньше. Кроме того, раздельный пуск позволяет снизить в два раза амплитуды колебаний при прохождении резонансных зон. В отличие от совместного пуска при сделанных предположениях появляются колебания тела также вдоль оси Oy и поворотные колебания; их амплитуда, однако, также примерно в два раза меньше амплитуды колебаний при совместном пуске. (Заметим, что некоторые «побочные» колебания имеют место и при совместном пуске вследствие определенного отличия фаз в процессе установления). Следует учитывать также, что если частоты p_x , p_y и p_φ отличаются одна от другой, то соответствующие резонансные колебания происходят не одновременно^{1*)}.

5. Использование эффекта вибрационного поддержания вращения

Экспериментально и теоретически установлено, что самосинхронизация во многих случаях не нарушается при выключении одного или нескольких из работающих двигателей; в сущности этот эффект и послужил толчком к открытию явления самосинхронизации [2, 3]. Это относится и к машинам, осуществленным по схеме рис. 1. Выключение одного из двигателей в этих случаях обычно приводит лишь к появлению некоторого небольшого сдвига фаз вращения роторов. В результате, помимо основных колебаний тела по координате x , появляются незначительные гармонические колебания по координатам y и φ , что, в свою очередь, приводит к некоторой эллиптичности колебаний точек тела. Как правило, это не ведет к существенному нарушению технологического процесса, а при специально подобранных параметрах системы может привести (например, в вибрационных грохотах) и к

¹ Как отмечается в работе [6], с точки зрения снижения амплитуды резонансных колебаний при выбеге целесообразно наоборот выбирать эти частоты близкими (кинетическая энергия вращения ротора распределяется между тремя степенями свободы. Представляется, однако, что следует руководствоваться требованиями, облегчающими пуск, как более важными.

его улучшению. Условия сохранения синхронного режима работы вибровозбудителей при выключении одного из двух двигателей приведены в книгах [1-3]; там же имеются формулы для оценки величины соответствующего сдвига фаз вращения роторов $\Delta\alpha$.

Использование рассмотренного эффекта позволяет снизить энергозатраты за счет отсутствия электрических потерь в выключенном двигателе.

6. Оценка снижения установочной мощности двигателей и энергозатрат

Примем следующие обозначения: $N_w = 2N_{w1}$ – мощность, затрачиваемая на поддержание установившегося (рабочего) режима колебаний (N_{w1} – то же для одного двигателя).

$N = 2N_1 = qN_w = 2qN_{w1}$ – установочная мощность двигателей, необходимая для преодоления области резонансных частот при одновременном пуске ($q > 1$ – коэффициент, характеризующий превышение N над величиной N_w), N_1 – установочная мощность одного двигателя, N_1' – мощность одного двигателя, необходимая для преодоления резонансных частот при раздельном пуске.

Оценим соотношение между введенными величинами. Во-первых, предположим, что $N_1' = \frac{1}{2}qN_{w1}$, т.е. что при раздельном пуске мощности соотносятся также как вибрационные моменты (4). Но мощность одного двигателя при раздельном пуске не может быть меньше, чем мощность N_{w1} , затрачиваемая этим двигателем в рабочем режиме. Поэтому необходимая установочная мощность одного двигателя при раздельном пуске N_1^* определится соотношением

$$N_1^* = \sup [N_1', N_{w1}] = \sup \left[\frac{1}{2}qN_{w1}, N_{w1} \right] = \begin{cases} N_{w1} = \frac{N_1}{q} & \text{при } q < 2 \\ \frac{1}{2}qN_{w1} = \frac{1}{2}N_1 & \text{при } q > 2 \end{cases}$$

Отсюда видно, что установочная мощность одного двигателя при раздельном пуске N_1^* всегда меньше необходимой установочной мощности N_1 при одновременном пуске (при $q > 2$ в два раза, а при $q < 2$ в q раз).

Что касается снижения расхода энергии при раздельном пуске, то оно будет иметь место, во-первых, за счет устранения электрических потерь в выключаемом двигателе и, во-вторых, за счет увеличения КПД двигателей вследствие устранения их недогрузки в рабочем режиме. На оценке этой величины здесь не останавливаемся.

7. Заключение

Изложенное показывает, что возможности совершенствования вибрационных машин при использовании явления самосинхронизации еще далеко не исчерпаны. Примечательно, что оба предложенных мероприятия по существу не требуют затрат.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-08-01009).

Список литературы

1. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. – М.: Наука, 1971. – 895 с.
2. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. – М.: Наука, 1981. – 351 с.
3. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994, 400 с.
4. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с..
5. Блехман И.И., Индейцев Д.А., Фрадков А.Л. Медленные движения в системах с инерционным возбуждением колебаний //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 25–32. (англ. перевод: Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2008. V. 37, № 1. PP. 21–27).
6. Блехман И.И., Ярошевич Н.П. Переходные режимы в инерционно-возбуждаемых послерезонансных вибрационных устройствах с несколькими степенями свободы несущей системы //Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика: сб научн. трудов / Под ред. В.В. Белецкого, Д.А. Индейцева, А.Л. Фрадкова; Ин-т проблем машиноведения РАН. – СПб.: Наука, 2009. С. 215–238.
7. Румянцев С.А. Динамика переходных процессов и самосинхронизация движений вибрационных машин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 135 с.