УДК 621.9.048.6

И.П. Забродец, аспирант,
Т.С. Ярошевич, доцент, канд. техн. наук,
В.Н. Тимощук, доцент, канд. техн. наук,
Н.П. Ярошевич, профессор, д-р техн. наук
Луцкий национальный технический университет
ул. Львовская 75, м. Луцк, Украина, 43018
E-mail: m_yaroshevich@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ В ВИБРАЦИОННЫХ ПЛОЩАДКАХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Рассматривается возможность совершенствования вибрационных площадок с вертикальными колебаниями. Определен характер синхронных движений, получены условия их устойчивости и выражения для вибрационных моментов для случая двух бигармонических вибровозбудителей, установленных на плоско колеблющемся несущем теле. Приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: *вибрационная машина, дебалансный вибровозбудитель, самосинхронизация, бигармонические колебания.*

Введение

Для создания высокоэффективных и надежных вибрационных машин важное значение имеет явление самосинхронизации механических вибровозбудителей. Вибрационные машины с самосинхронизирующимися возбудителями широко используются в вибрационной технике, как в Украине, так и за рубежом. Наиболее успешные примеры: грохоты инерционные самосинхронизирующиеся и блочные виброплощадки с вертикально направленными колебаниями. Вместе с тем, возможности совершенствования вибромашин на основе этого явления еще далеко не исчерпаны.

Об исследованиях в области самосинхронизации вибровозбудителей

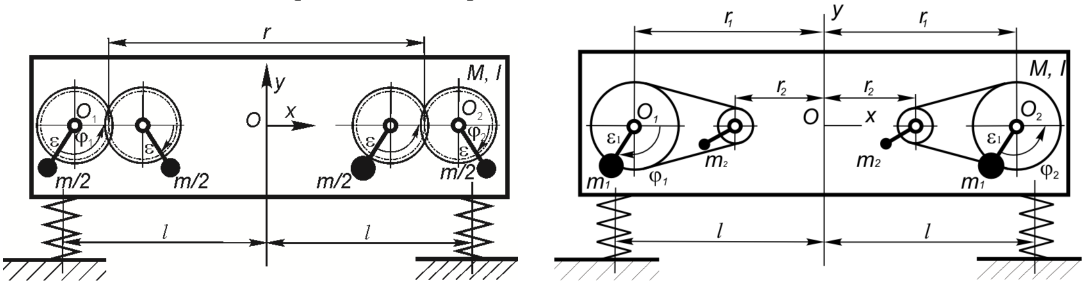
К настоящему времени это явление изучено достаточно полно, разработана теория и методы расчета устройств с самосинхронизирующимися возбудителями. Основная заслуга в разработке теории синхронизации принадлежит И.И. Блехману. С единой точки зрения рассмотрены различные аспекты теории синхронизации, при этом большое внимание уделено изучению синхронизации механических возбудителей [1, 2]. Случаи кратной самосинхронизации механических вибровозбудителей рассмотрены во многих работах, обзор которых дан в [1-3]; в [3] обращается внимание на то, что вибрационные моменты, характеризующие динамическую связь между роторами возбудителей, вращающихся с кратными частотами, сравнительно малы и практически использовать эффект кратной самосинхронизации (в отличие от простой) достаточно сложно.

Постановка задачи

Блочные вибрационные площадки с вертикально направленными колебаниями типа СМЖ (два спаренных виброблока каждый из которых содержит два дебалансных вибровозбудителя соединенных зубчатой передачей) широко используются для формирования железобетонных изделий. В тоже время, в связи со значительными динамическими нагрузками, эксплуатация таких площадок часто требует проведения технического обслуживания и ремонта. Вибромашины с такой динамической схемой (рисунок 1, а) имеют более «жесткое» условие устойчивости и относительно слабую динамическую связь между возбудителями, например, по сравнению с вибрационными грохотами с двумя самосинхронизирующимися возбудителями. Учитывая сказанное, а также принимая во внимание высокую стабильность режима противофазного синхронного вращения в противоположных направлениях двух вибровозбудителей на несущем теле, совершающем плоские колебания, рассмотрена возможность практического использования этого режима для виброплощадок с бигармоническими возбудителями (рисунок 1, б). В пользу такого решения свидетельствует технологическая эффективность вибрационных машин с бигармоническим законом движения рабочего органа.

Описание системы и уравнения движения

На мягкоамортизированном плоско колеблющемся несущем твердом теле симметрично установлены два бигармонических вибровозбудителя (рисунок 1, б). Каждый из них представляет два моногармонических дебалансных возбудителя, связанных между собой зубчато-ременной передачей с передаточным отношением 1:2. Оси вращения роторов вибровозбудителей лежат в одной плоскости с центром тяжести несущего тела. Возбудители, вращающиеся с основной частотой, приводятся в движение независимыми асинхронными электродвигателями.



а) б)

Рисунок 1 – Схемы колебательных систем: а) с моногармоническими возбудителями; б) с бигармоническими возбудителями

Рассмотрим задачу о самосинхронизации бигармонических возбудителей. Движение колебательной системы описывается системой дифференциальных уравнений к настоящему времени достаточно хорошо разработанной [2]:

$$M\ddot{x}+\beta_x\dot{x}+c_x x=m_1\varepsilon_1\sum_{i=1}^{2}(\ddot{\varphi}_i\sin\varphi_i+\dot{\varphi}_i^2\cos\varphi_i)+4m_2\varepsilon_2\sum_{i=1}^{2}\left[\ddot{\varphi}_i\sin(2\varphi_i+\beta)+\dot{\varphi}_i^2\cos(2\varphi_i+\beta)\right],$$

$$M\ddot{y}+\beta_y\dot{y}+c_y y=m_1\varepsilon_1\sum_{i=1}^{2}(\ddot{\varphi}_i\cos\varphi_i-\dot{\varphi}_i^2\sin\varphi_i)+4m_2\varepsilon_2\sum_{i=1}^{2}\left[\ddot{\varphi}_i\cos(2\varphi_i+\beta)-\dot{\varphi}_i^2\sin(2\varphi_i+\beta)\right],$$

$$J\ddot{\varphi}+\beta_\varphi\dot{\varphi}+c_\varphi\varphi=m_1\varepsilon_1r_1\left(\ddot{\varphi}_1\cos\varphi_1-\dot{\varphi}_1^2\sin\varphi_1\right)-m_1\varepsilon_1r_1\left(\ddot{\varphi}_2\cos\varphi_2-\dot{\varphi}_2^2\sin\varphi_2\right)+$$
$$+4m_2\varepsilon_2r_2\left[\ddot{\varphi}_1\cos\left(2\cos\varphi_1+\beta\right)-\dot{\varphi}_1^2\sin\left(2\varphi_1+\beta\right)\right]-4m_2\varepsilon_2r_2\left[\ddot{\varphi}_2\cos\left(2\cos\varphi_2+\beta\right)-\dot{\varphi}_2^2\sin\left(2\varphi_2+\beta\right)\right],$$

$$I_1\ddot{\varphi}_1=L_1\left(\dot{\varphi}_1\right)-R_1\left(\dot{\varphi}_1\right)-2R_3\left(\dot{\varphi}_1\right)+m_1\varepsilon_1\left[\ddot{x}\sin\varphi_1+\ddot{y}\cos\varphi_1+r_1\ddot{\varphi}\cos\varphi_1+g\cos\varphi_1\right]$$
$$+2m_2\varepsilon_2\left[\ddot{x}\sin(2\varphi_1+\beta)+\ddot{y}\cos(2\varphi_1+\beta)+r_1\ddot{\varphi}\cos(2\varphi_1+\beta)+g\cos(2\varphi_1+\beta)\right].$$

$$I_2\ddot{\varphi}_2=L_2\left(\dot{\varphi}_2\right)-R_2\left(\dot{\varphi}_2\right)-2R_4\left(\dot{\varphi}_2\right)+m_1\varepsilon_1\left[\ddot{x}\sin\varphi_2+\ddot{y}\cos\varphi_2-r_1\ddot{\varphi}\cos\varphi_2+g\cos\varphi_2\right]+$$
$$+2m_2\varepsilon_2\left[\ddot{x}\sin(2\varphi_2+\beta)+\ddot{y}\cos(2\varphi_2+\beta)-r_2\ddot{\varphi}\cos(2\varphi_2+\beta)+g\cos(2\varphi_2+\beta)\right].$$

где M, J – соответственно, масса и момент инерции несущего тела относительно оси, которая проходит через его центр тяжести; m_i,ε_i – соответственно, масса и эксцентриситет i-го ротора возбудителя; r_i – расстояние от оси i-го возбудителя до центра тяжести несущего тела, β – угол сдвига фаз между возбудителями, связанными передачею; I_i – суммарный момент инерции i-го ротора вибровозбудителя относительно его оси вращения; β_x, β_y, β_φ – коэффициенты вязкого сопротивления; c_x, c_y – жесткости пружин на сдвиг и растяжение-сжатие, соответственно; $c_\varphi=c_y l^2$; l_i – расстояние, определяющее положение осей пружин до центра тяжести несущего тела; $L_i\left(\dot{\varphi}_i\right)$, $R_i\left(\dot{\varphi}_i\right)$ – вращающий момент i-го двигателя и момент сил сопротивления вращению; g – ускорение свободного падения.

Решение задачи с помощью интегрального критерия устойчивости синхронных движений

Согласно интегральному критерию, устойчивые синхронные движения роторов вибровозбудителей соответствуют точкам грубого минимума потенциальной функции D [1, 2]. В рассматриваемом случае самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей с положительными и одинаковыми парциальными угловыми скоростями, а также ввиду предположения о мягкости упругих опор, потенциальная функция равна среднему значению кинетической энергии несущего тела; она вычисляется в предположении, что роторы возбудителей вращаются равномерно. Выражение для потенциальной функции

$$D=\frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega}M\left[\left(\dot{x}\right)^2+\left(\dot{y}\right)^2\right]+I\left(\dot{\varphi}\right)^2d\tau=\frac{m^2\varepsilon^2\omega^2}{2M}\left(a_1\cos\alpha+\frac{1}{4}a_2\cos2\alpha\right)+C\,,$$

где C – независящая от углов α_i величина, $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$, $a_i = \left(1 + \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_2 \dfrac{Mr_i^2}{I}\right)$, $i = 1,2$; σ_i – величины, равные $+1$ или -1, в зависимости от направления вращения i-го ротора возбудителя; $m\varepsilon = m_1\varepsilon_1 = 4m_2\varepsilon_2$.

Приравнивая нулю производные потенциальной функции $\partial D/\partial\alpha$, приходим к уравнениям для определения разностей фаз α в возможных синхронных движениях и, соответственно, к решениям:

$$1)\ (\alpha)_1 = 0; \qquad 2)\ (\alpha)_2 = \pi; \qquad 3)\ (\alpha)_3 = \arccos\left(-\frac{a_1}{a_2}\right). \tag{1}$$

Условием устойчивости синхронных движений (1) является условие минимума потенциальной функции [2]. Для двух практически важных случаев, отвечающих синфазному вращению вибровозбудителей в одном направлении и противофазному вращению возбудителей в противоположных направлениях, условия устойчивости принимают вид, соответственно

$$\frac{M(r_1^2 + r_2^2)}{J} < 4; \quad \frac{M(r_2^2 - r_1^2)}{J} < 2.$$

Очевидно, что первое условие выполнить на практике трудно; второе, наоборот, всегда выполняется для колебательной системы, в которой вибровозбудители, вращающиеся с двойной частотой, размещены между возбудителями, вращающимися с основной частотой. Полученное выражение для потенциальной функции D позволяет записать выражение для вибрационных моментов, необходимых для оценки стабильности [2]:

$$V_1 = -V_2 = \frac{F^2}{2M\omega^2}\frac{Mr_1^2}{J}\sin\alpha\left(1 + \frac{r_2^2}{r_1^2}\cos\alpha\right). \tag{2}$$

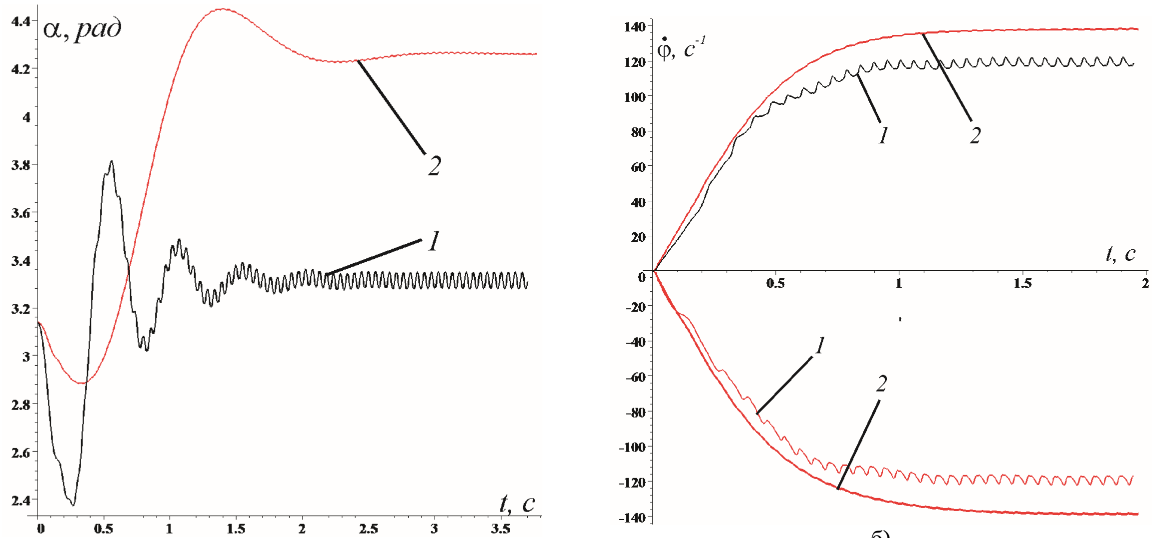
Величины вибрационных моментов (2) имеют один порядок с вибрационными моментами для такой же системы с двумя моногармоническими возбудителями [2], для которой рассматриваемый режим есть достаточно стабильным, и которая нашла широкое практическое применение. В то время, как для схемы на рисунке 1, а, согласно [2], модуль вибрационного момента существенно меньше, а условие устойчивости жестче: $V_{\max} = \dfrac{m^2\varepsilon^2\omega^2}{2M}\left|1 - \dfrac{Mr^2}{J}\right|$, $\dfrac{Mr^2}{J} > 1$, соответственно.

Результаты моделирования

Численное моделирование выполнено в программной среде Maple для колебательной системы с параметрами, соответствующим экспериментальной установке (рисунок 3): $M = 82{,}4\,кг$; $J = 4{,}8\,кг \cdot м^2$; $m = 4{,}6\,кг$; $\varepsilon = 0{,}0084\,м$; $I = 0{,}0039\,кг \cdot м^2$; $r_1 = 0{,}33\,м$; $r_2 = 0{,}22\,м$; $c_x = 48 \cdot 10^3\ Н/м$; $c_y = 48 \cdot 10^3\ Н/м$; электродвигатели асинхронные с частотой $n_c = 1500\ об/мин$ и мощностью $P = 0{,}12\,Вт$; динамическая модель асинхронного двигателя – та же, что используется в работе [4].

Исследование подтвердило возможность устойчивого противофазного синхронного вращения в противоположных направлениях двух бигармонических возбудителей на несущем теле с тремя степенями свободы. О факте самосинхронизации свидетельствует, прежде всего, то, что сразу после разбега двигателей средний сдвиг фаз между роторами вибровозбудителей устанавливается постоянным и близким к значению, полученному аналитически ($\alpha = 3{,}31\,рад$), при этом они вращаются с одинаковой средней синхронной угловой скоростью (рисунок 2). Полученные результаты указывают на высокую стабильность режима, устойчивость которого сохранялась при изменении параметров системы в достаточно широких пределах; самосинхронизация не устанавливалась (или устойчив практически неинтересный режим со сдвигом фаз, соответствующим третьему решению (1)), лишь при амплитудах вертикальных колебаний несущего тела меньших, чем $A_y = 0{,}5\,мм$ и отклонениях коэффициентов трения в подшипниках качения возбудителей на $\Delta f = 30\%$.

Отметим, что для колебательной системы, в которой вращающиеся с основной частотой вибровозбудители размещены между возбудителями, движущимися с двойной частотой, устойчивым является режим синхронного вращения в противоположных направлениях бигармонических возбудителей со сдвигом фаз $(\alpha)_3 = \arccos(-r_1^2 / r_2^2)$.



а) б)

Рисунок 2 – Зависимость от времени: а) разности фаз между вибровозбудителями; б) угловых скоростей вибровозбудителей: 1 – режим $A_y = 2 мм, \Delta f = 5\%$; 2 – режим $A_y = 0,5 мм, \Delta f = 30\%$

Экспериментальное подтверждение самосинхронизации бигармонических возбудителей

Экспериментальная установка включает собственно вибромашину (рисунок 3), соответствующую динамической схеме изображенной на рисунок 1, б; систему датчиков (фотоэлектрические энкодеры и трехкоординатный акселерометр) со специальным контроллером для обработки сигналов; персональный компьютер с устройствами сопряжения с физической аппаратурой. В процессе экспериментов фиксировались положения и угловые скорости двух независимых роторов возбудителей, вращающихся с основной частотой, снимались виброграммы ускорений центра масс несущего тела (рис 4); кроме того, характер установившихся движений вибровозбудителей и несущего тела оценивался визуально в стробоскопическом освещении.

Рисунок 3 – Экспериментальная вибрационная с бигармоническими возбудителями

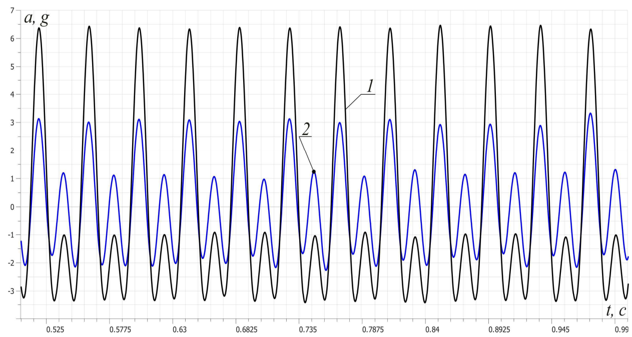


Рисунок 4 – Виброграммы ускорения несущего тела: 1– вертикальное; 2 – горизонтальное направление

В результате экспериментальных исследований подтверждена возможность возбуждения устойчивых бигармонических колебаний несущего тела при использовании эффекта самосинхронизации вибровозбудителей; показано, что режим противофазного синхронного вращения в противоположных направлениях двух бигармонических возбудителей есть достаточно стабильным в широком диапазоне изменения основных конструктивных и динамических параметров системы.

Выводы

Динамическая схема вибрационной машины с двумя бигармоническими вибровозбудителями на плоско колеблющемся несущем теле имеет довольно «мягкое» условие устойчивости синхронного противофазного вращения возбудителей в противоположных направлениях и относительно сильную вибрационную связь между ними, что позволяет рекомендовать такую схему для использования в вибрационных площадках вертикальных колебаний.

Библиографический список использованной литературы

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника / И.И. Блехман. — СПб, ИД «Руда и Металлы», 2013. — 640 с.
2. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем / И.И. Блехман. — М.: Наука, 1971. — 896 с.
3. Ярошевич Н.П. К теории кратной синхронизации механических вибровозбудителей, связанных с линейной колебательной системой / Н.П. Ярошевич // Проблемы машиностроения и надежности машин. — М.: РАН, 2003. — № 4. — С. 3–10.
4. Блехман И.И. Переходные режимы в инерционно-возбуждаемых послерезонансных вибрационных устройствах с несколькими степенями свободы несущей системы / И.И. Блехман, Н.П. Ярошевич // Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика: сб. ИПМаш РАН. — СПб.: Наука, 2009. — С. 110–122.

Поступила в редакцию 08.02.2014 г.

Забродець І.П., Ярошевич Т.С., Тимощук В.М., Ярошевич М.П. Використання самосинхронізації у вібраційних майданчиках вертикальних коливань

Розглянуто можливість удосконалення вібраційних майданчиків вертикальних коливань. Визначений характер синхронних рухів, отримані умови їх стійкості та вирази для вібраційних моментів для випадку двох бігармонічних віброзбудників, встановлених на несучому тілі, що здійснює плоскі коливання. Наводяться результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень.

Ключові слова: вібраційна машина, дебалансний віброзбудник, самосинхронізація, бігармонічні коливання.

Zabrodets I.P., Yaroshevich T.S., Tymoshchook N.V., Yaroshevich N.P. Dynamic of acceleration of vibration machines with two self-synchronisation unbalanced vibroexciters

Features of approach of vibromachines with plane motion of action body and two self-synchronization unbalanced vibroexciters are considered. It is shown that possibility of separate start of electric motors is an important additional benefit that allows to improve dynamic and energetic characteristics.

Keywords: vibration machine, unbalanced vibro-exiter, self-synchronization, biharmonic vibrations.