

УДК 621.9.048.6

Т.С. Ярошевич, доцент, канд. техн. наук,

А.В. Сыльвонюк,

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ ВИБРОМАШИН С ДВУМЯ ДЕБАЛАНСНЫМИ ВОЗБУДИТЕЛЯМИ

Рассмотрены особенности разбега вибрационных машин с плоским движением несущего тела и двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями. Показано, что важным дополнительным преимуществом вибромашин с самосинхронизирующимися возбудителями есть возможность отдельного пуска электродвигателей, позволяющего улучшить динамические и энергетические характеристики

Ключевые слова: *вибрационная машина, дебалансный вибровозбудитель, отдельный пуск, резонансная зона, самосинхронизация.*

Введение. Во время прохождения ротором дебалансного вибровозбудителя зоны собственных частот в системе возможно возникновение резонансных колебаний. В этом случае могут существенно возрасти динамические нагрузки на элементы конструкции вибромашин; кроме того, для их пуска требуется мощность электропривода в несколько раз больше необходимой для работы в установившемся режиме; в случае тяжелых машин с приводом от асинхронных электродвигателей ударный пусковой ток отрицательно влияет на питающую электросеть.

Прохождение зоны резонанса инерционным вибровозбудителем рассматривалось различными методами [1-4]. В [2] на примере простейшей колебательной системы с одной степенью свободы несущего тела и одним возбудителем показано, что теоретическое объяснение и количественное описание известных закономерностей, имеющих место при разбеге и выбеге вибромашин, относительно просто получается путем использования метода прямого разделения движений; получено формулу для вибрационного момента (средней добавочной динамической нагрузки), действующего на ротор электродвигателя при прохождении зоны резонанса.

В настоящей работе тот же подход используется для колебательных систем с двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями, установленными на несущем теле с тремя степенями свободы; получены выражения для вибрационных моментов, дополняющие известные результаты [2, 4].

Описание системы и уравнения движения. Значительное число вибрационных машин и устройств может быть идеализировано в виде несущего твердого тела, связанного с неподвижным основанием системой упругих и демпфирующих элементов. В качестве возбудителей колебаний чаще всего используют дебалансные вибровозбудители, представляющие собой неуравновешенные роторы. В рассматриваемом случае два таких возбудителя симметрично размещены на мягко амортизированном твердом теле (вибрирующем рабочем органе), которое может двигаться параллельно плоскости, перпендикулярной осям вращения роторов возбудителей (рисунок 1). Центр тяжести O несущего тела лежит в плоскости, проходящей через указанные оси и удален от них на одинаковые расстояния r . Роторы вибровозбудителей приводятся во вращение независимыми асинхронными электродвигателями.

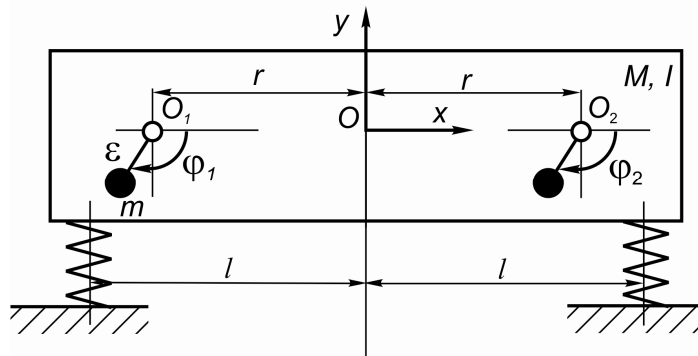


Рисунок 1 – Схема колебательной системы

Пусть x и y – координаты центра тяжести O в неподвижной системе координат xOy , а φ , φ_1 , φ_2 – соответственно, углы поворота несущего тела и роторов возбудителей. Дифференциальные уравнения движения колебательной системы запишем в виде (см., например, [1])

$$\begin{aligned} I_i \ddot{\varphi}_i &= L_i(\dot{\varphi}_i) - R_i(\dot{\varphi}_i) + m_i \varepsilon_i (\ddot{x} \sin \varphi_i + \ddot{y} \cos \varphi_i - \dot{\varphi}_i \cos \varphi_i + g \cos \varphi_i), \\ M \ddot{x} + \beta_x \dot{x} + c_x x &= \sum_{i=1}^2 m_i \varepsilon_i (\ddot{\varphi}_i \sin \varphi_i + \dot{\varphi}_i^2 \cos \varphi_i), \quad M \ddot{y} + \beta_y \dot{y} + c_y y = \sum_{i=1}^2 m_i \varepsilon_i (\ddot{\varphi}_i \cos \varphi_i - \dot{\varphi}_i^2 \sin \varphi_i), \\ J \ddot{\varphi} + \beta_\varphi \dot{\varphi} + c_\varphi \varphi &= \sum_{i=1}^2 m_i \varepsilon_i r_i (\ddot{\varphi}_i \cos \varphi_i + \dot{\varphi}_i^2 \sin \varphi_i), \quad i=1, 2 \end{aligned} \quad (1)$$

где M – общая масса несущего тела; J – момент инерции несущего тела относительно оси, которая проходит через центр тяжести; I_i – момент инерции i -го ротора возбудителя относительно оси его вращения; m_i, ε_i – соответственно, масса i -го ротора возбудителя и его эксцентриситет; $\beta_x, \beta_y, \beta_\varphi$ – коэффициенты вязкого сопротивления; c_x, c_y – жесткости пружин на сдвиг и растяжение-сжатие, соответственно; $c_\varphi = c_y l^2$; r_i – расстояние от оси i -го ротора возбудителя до центра тяжести несущего тела, здесь $r_1 = -r, r_2 = r$; l – расстояние, определяющее положение осей пружин; $L(\dot{\varphi}_i), R(\dot{\varphi}_i)$ – вращающий момент i -го двигателя и момент сил сопротивления вращению; g – ускорение свободного падения.

Прохождение зоны резонанса. Воспользуемся методом прямого разделения движений [2]. В соответствии с основной предпосылкой метода предположим, что рассматриваемые движения могут быть представлены в виде

$$\varphi_i = \sigma_i [\omega_i t + \psi_i(t, \omega_i t) + \alpha_i], \quad x = x(t, \omega_i t), \quad y = y(t, \omega_i t), \quad \varphi = \varphi(t, \omega_i t),$$

где $\omega_i = \omega_i(t)$ – медленная, а ψ_i и x, y, φ – быстрые функции времени, причем они являются 2π -периодическими по $\tau_i = \omega_i t$ и их средние значения за этот период равны нулю; предполагаем также, что $\dot{\psi}_i \ll \omega_i$; $\sigma_i = \pm 1$ в зависимости от направления вращения ротора возбудителя; α_i – постоянные (начальные фазы вращения). Такое представление решений уравнений системы (1) при исследовании прохождения резонансной зоны, когда имеет место проявление эффекта Зоммерфельда и, соответственно, частота вращения ротора $\dot{\varphi}_i$ изменяется относительно медленно, представляется правомерным [4].

Следуя данному методу, несложно прийти к уравнениям медленных движений роторов возбудителей в зоне резонанса в виде [2]

$$I_i \dot{\omega} = L_i(\omega) - R_i(\omega) + V_i, \quad (2)$$

где $V_i = \frac{m_i \varepsilon_i \omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} [\ddot{x} \sin \varphi_i + (\ddot{y} - r_i \dot{\varphi}) \cos \varphi_i] d\tau$ – так называемый вибращионный момент [1, 2].

При получении уравнений (2) выполнена линеаризация выражений $L_i(\dot{\varphi}_i), R_i(\dot{\varphi}_i)$ вблизи значения $\dot{\varphi}_i = \omega$ (где ω – частота “застревания” ротора), как в [1]; в качестве первого приближения было принято $\varphi_i = \sigma_i [\omega_i t + \alpha_i]$ и соответствующие решения уравнений колебаний несущего тела (1).

Пусть статические моменты роторов возбудителей в точности одинаковы ($m_1 \varepsilon_1 = m_2 \varepsilon_2 = m\varepsilon$) и вращаются в одном направлении с одинаковыми угловыми скоростями и нулевым сдвигом фаз (случай круговых поступательных колебаний несущего тела). Отметим, что разница между скоростями возбудителей, как правило, может быть лишь достаточно малой, поскольку обычно при наличии нескольких самосинхронизирующихся возбудителей, их параметры, как и параметры электродвигателей, выбираются максимально одинаковыми; перед пуском электродвигателей дебалансы занимают нижнее вертикальное положение. Тогда выражения для вибращионных моментов, действующих на роторы, принимают вид

$$V_1 = V_2 = -\frac{1}{2} \frac{(m\varepsilon\omega)^2}{M} \left[\frac{n_x}{B_x^2} + \frac{n_y}{B_y^2} \right] = -\frac{1}{2} M \omega^2 [A_x^2 n_x + A_y^2 n_y], \quad (3)$$

$$\text{где } A_x = \frac{m\varepsilon}{MB_x}, \quad B_x = \sqrt{(1-\lambda_x^2)^2 + 4n_x^2}, \quad \lambda_x = \frac{p_x}{\omega}, \quad p_x = \sqrt{\frac{c_x}{M}}, \quad n_x = \frac{\beta_x}{2M\omega}, \quad A_y = -\frac{m\varepsilon}{MB_y},$$

$$B_y = \sqrt{(1-\lambda_y^2)^2 + 4n_y^2}, \quad \lambda_y = \frac{p_y}{\omega}, \quad p_y = \sqrt{\frac{c_y}{M}}, \quad n_y = \frac{\beta_y}{2M\omega}.$$

Эта формула отличается от полученной в [4] для колебательной системы с одним вибровозбудителем, ось которого совпадает с осью центра масс несущего тела, лишь коэффициентом $\frac{1}{2}$.

Таким образом, как и следовало ожидать, в случае привода вибромашины от двух синфазно вращающихся одинаковых возбудителей, динамическая нагрузка в зоне резонанса на ротор каждого электродвигателя будет в два раза меньше, чем при использовании только одного возбудителя с двойным статическим моментом, т.е. при той же амплитуде вынужденных колебаний. При этом, конечно, необходимая суммарная мощность электропривода в обоих случаях одинакова.

В случае вращения роторов возбудителей в противоположных направлениях (более распространенный на практике случай, соответствующий прямолинейным поступательным колебаниям несущего тела в направлении оси Oy) выражения для вибрационных моментов принимают вид

$$V_1 = V_2 = -\frac{1}{2} \frac{(m\varepsilon\omega)^2}{M} \frac{n_y}{B_y^2} = -\frac{1}{2} M\omega^2 A_x^2 n_x, \quad (4)$$

т.е. величина среднего тормозящего вибрационного момента действующего в зоне резонанса на каждый из роторов, будет приблизительно в два раза меньше, чем при вращении возбудителей в одинаковых направлениях. Следовательно, и необходимая суммарная мощность электропривода вибромашины (выбираемая из условий пуска) с такими режимами работы будет существенно меньше.

Вибромашины с самосинхронизирующимися возбудителями допускают возможность отдельного (поочередного) пуска электродвигателей. Такой пуск двигателей позволяет во многих случаях уменьшить амплитуды резонансных колебаний несущего тела. Представление вибрационных моментов через амплитуды вынужденных колебаний A_x, A_y (3) делает очевидным то, что для системы с одной степенью свободы несущего тела, в случае отдельного пуска двигателей резонансные вибрационные моменты станут в два раза меньшими.

Проверим возможность уменьшения величины вибрационных моментов при таком пуске вибромашины с плоским движением несущего тела. Выражение для вибрационного момента в случае разбега только одного ротора вибровозбудителя имеет вид

$$V_1^{(1)} = -\frac{1}{4} \frac{(m\varepsilon\omega)^2}{M} \left[\frac{n_x}{B_x^2} + \frac{n_y}{B_y^2} + \frac{Mr^2}{J} \frac{n_\phi}{B_\phi^2} \right], \quad (5)$$

$$\text{где } A_{\phi i}^{(1)} = \frac{m\varepsilon r_i}{JB_\phi}, \quad B_\phi = \sqrt{(1-\lambda_\phi^2)^2 + 4n_\phi^2}, \quad \lambda_\phi = \frac{p_\phi}{\omega}, \quad p_\phi = \sqrt{\frac{c_\phi}{J}}, \quad n_\phi = \frac{\beta_\phi}{2J\omega}.$$

Правые части выражений (3), (4) и (5) можно представить через «частные» вибрационные моменты v_x, v_y, v_ϕ (составляющие, характеризующие воздействие на вращение ротора возбудителя колебаний несущего тела, соответствующих его q -ой обобщенной координате) в форме

$$V_1 = V_2 = v_x + v_y, \quad V_1 = V_2 = v_y \quad \text{и} \quad V_1^{(1)} = \frac{1}{2} v_x + \frac{1}{2} v_y + \frac{Mr^2}{J} \frac{1}{2} v_\phi. \quad (6)$$

Учитывая, что для рассматриваемых колебательных систем все собственные частоты p_x, p_y, p_ϕ рекомендуется принимать равными (близкими) по значению, а также считая, что коэффициенты затухания n_x, n_y и n_ϕ примерно одинаковы, первую и последнюю формулы (6) представим в виде

$$V_1 = V_2 \approx 2v_y, \quad V_1^{(1)} \approx v_y \left(1 + \frac{Mr^2}{2J} \right).$$

Примем во внимание, что для случая, когда роторы возбудителей вращаются в одном направлении, для их синфазного вращения необходимо, чтобы параметры вибромашины удовлетворяли условию $\frac{Mr^2}{J} > 2$, а при вращении в противоположных направлениях – обычно $\frac{Mr^2}{J} < 1$ [1]. Тогда, в случае пуска одного из двигателей вибромашины с параметрами, обеспечивающими выполнение

указанных двух условий, приходим к таким оценкам величин вибрационных моментов (соответственно): $V_1^{(1)} > 2v_y$ и $V_1^{(1)} < 1,5v_y$.

Таким образом, для системы с плоским движением рабочего органа, в случае отдельного пуска электродвигателей, величины вибрационных моментов в зоне резонанса получаются теоретически несколько большими, чем при одновременном пуске двигателей. Уменьшения вибрационного момента (как для системы с одной степенью свободы несущего тела) не происходит по причине возникновения поворотных колебаний. В то же время, то что в этом случае вибрационный момент представляет собой сумму трех частных моментов (5), колебания которых сдвинуты по фазе, позволяет сделать предположение об уменьшении амплитудных значений тормозных моментов (при той же средней величине). Определенный положительный эффект может быть достигнут и за счет установки демпфера поворотных колебаний, а также при неравномерном размещении технологической нагрузки (при смещении ее в сторону пускающегося двигателя) или в случае уменьшения частоты собственных поворотных колебаний; к тому же, поскольку двигатели пускаются поочередно, пусковой ток в питающей электросети будет существенно (почти в два раза) меньшим, чем в случае их одновременного пуска.

Отметим, что после выхода на установившийся режим движения первого электродвигателя и при последующем включении второго, максимальный тормозящий вибрационный момент, в рассматриваемом приближении будет такой же величины, которая определяется по формуле (5). С учетом следующих приближений появляются добавочные слагаемые к вибрационному моменту, действующие на ротор второго возбудителя. Однако, их величины достаточно малы и, следовательно, они заметно не изменяют общей картины разбега.

Сравнение с результатами компьютерного моделирования. Проведенное аналитическое исследование обнаружило хорошую согласованность с результатами численного моделирования, которое выполнено в программной среде Maple для колебательной системы с параметрами, соответствующими экспериментальной установке: $M = 52,4 \text{ кг}$; $I = 2,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $m = 7,4 \text{ кг}$; $\varepsilon = 0,014 \text{ м}$; $I = 0,0062 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $c_x = 48 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$; $c_\phi = 2,2 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$; $\beta_x = \beta_y = 150 \text{ кг/с}$; $\beta_\phi = 15 \text{ кг м}^2/\text{с}$. Привод осуществлялся от трехфазных асинхронных электродвигателей с синхронной частотой вращения $n_c = 1500 \text{ об/мин}$ и мощностью $P = 0,9 \text{ Вт}$. Отметим, что при моделировании использовалась динамическая модель асинхронного двигателя, используемая в работе [5]; действие сил тяжести на ротор и собственную динамику электродвигателя не учитывали.

На рисунке 2 представлены поля траекторий центра масс несущего тела, а на рисунке 3 продемонстрированы изменения во времени действующих на роторы возбудителей вибрационных моментов, для случаев одновременного пуска двух двигателей (обычный пуск) и пуска только одного из двигателей (раздельный пуск).

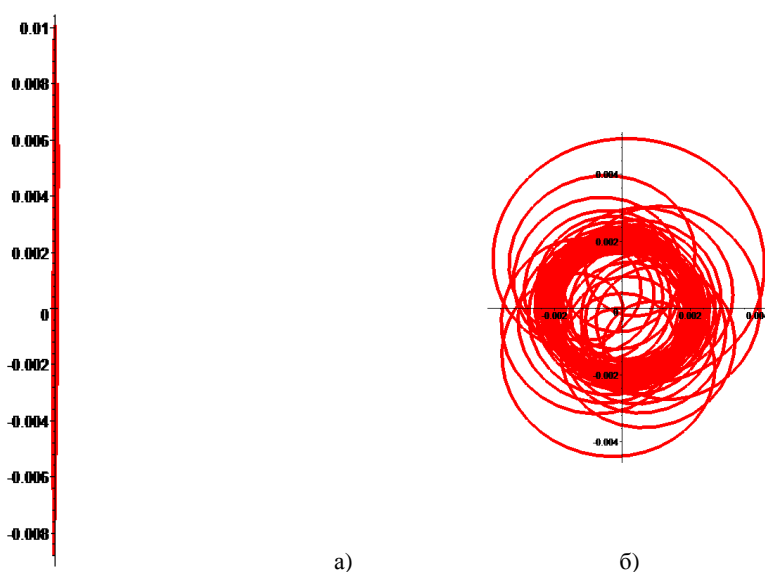


Рисунок 2 – Траектории центра масс несущего тела:
а) одновременный пуск двигателей; б) пуск одного двигателя

Согласно приведенным на рисунке 2, а графикам, в случае пуска одного из двигателей во время прохождения зоны резонанса максимальные амплитуды вертикальных колебаний несущего тела существенно уменьшаются (с 14 мм до 7,2 мм). При этом значительно возрастают амплитуды горизонтальных (рисунок 2, б) и поворотных резонансных колебаний. Однако, их величины далеки от максимальных значений амплитуд вертикальных колебаний.

Сравнение кривых 1 и 2 (рисунок 3, а) показывает, что в случае разбега одного из двух двигателей, колебания вибрационного момента в зоне резонанса заметно уменьшаются, при приблизительно том же значении среднего момента. Так, амплитудные значения тормозящих вибрационных моментов для рассматриваемых двух случаев, соответственно, составляют 0,36 Нм; 1,17 Нм; 1,59 Нм; 1,09 Нм и 0,3 Нм; 0,84 Нм; 0,95 Нм; 0,26 Нм, то есть существенно уменьшаются при раздельном пуске двигателей.

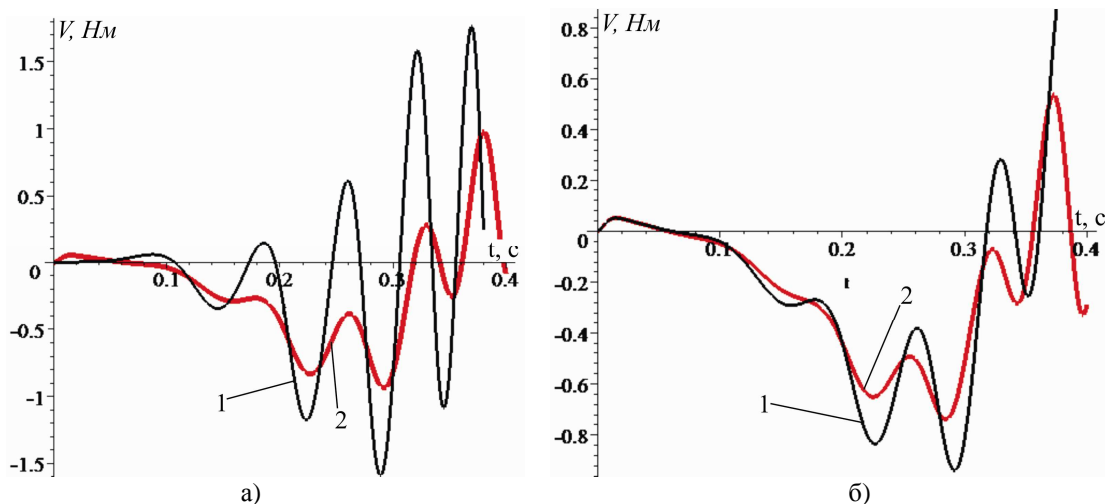


Рисунок 3 – Временные зависимости вибрационных моментов, действующих в зоне резонанса:
 а) 1 – одновременный пуск двигателей; 2 – пуск одного из двигателей;
 б) раздельный пуск: 1 – $\beta_{\varphi} = 15 \text{ кг м}^2 / \text{с}$; 2 – $\beta_{\varphi} = 90 \text{ кг м}^2 / \text{с}$

Согласно рисунку 3, б установка демфера поворотных колебаний ($\beta_{\varphi} = 90 \text{ кг м}^2 / \text{с}$) приводит к заметному уменьшению амплитуд резонансных поворотных колебаний и, соответственно, тормозящих вибрационных моментов в зоне резонанса. Отметим, что к такому же положительному эффекту приводит и уменьшение частоты собственных поворотных колебаний несущего тела.

Выводы. Важным дополнительным преимуществом вибрационных машин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями есть возможность раздельного пуска приводящих электродвигателей, позволяющего уменьшить амплитуды резонансных колебаний несущего тела, динамическую нагрузку на роторы электродвигателей при разбеге, а также величину пускового тока в питающей электросети.

Дальнейшие исследования связаны с составлением инструкции по эксплуатации вибрационных машин.

Библиографический список использованных литературных источников

1. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике / И.И. Блехман. — М.: Наука, 1981. — 352 с.
2. Blekhman I.I. Vibrational Mechanics / I.I. Blekhman. — Singapore.: World Scientific, 2000. — 509 p.
3. Блехман И.И. Медленные движения в системах с инерционным возбуждением колебаний / И.И. Блехман, Д.А. Индейцев, А.Л. Фрадков // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. — 2008. — № 1. — С. 25–31.
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. — СПб.: Наука, 2009. — С. 170–192.
5. Ярошевич Н.П. Компьютерное моделирование двойного пуска вибрационных машин с инерционным возбуждением колебаний / Н.П. Ярошевич. // Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика. — СПб.: Наука, 2009. — С. 476–486.

Поступила в редакцию 8.04.2013 г.

Ярошевич Т.С., Силивонюк А.В., Ярошевич М.П. Динаміка розбігу вібраційних машин з двома дебалансними збудниками, що самосинхронізуються

Розглянуто особливості розбігу вібраційних машин з плоским рухом робочого органу і двома дебалансними збудниками, що самосинхронізуються. Показано, що важливою додатковою перевагою вібромашин із збудниками, що самосинхронізуються є можливість почергового пуску електродвигунів, який дозволяє покращити динамічні та енергетичні характеристики

Ключові слова: вібраційна машина, дебалансний віброзбудник, почерговий пуск, резонансна зона, самосинхронізація.

Yaroshevich T.S., Sylyvonyuk A.V., Yaroshevich N.P. Dynamic of vibration machine acceleration with two self-synchronisation unbalanced vibroexciters

Features of approach of vibromachines with plane motion of action body and with two self-synchronising unbalanced vibroexciters were 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 vibroexiter, self-synchronization, vibrational moment, resonance zone, separate start.