

УДК 621.9.048.6

А.В. Сылывонюк

Луцкий национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗБЕГА ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН С ДВУМЯ САМОСИНХРОНИЗИРУЮЩИМИСЯ ДЕБАЛАНСНЫМИ ВОЗБУДИТЕЛЯМИ

Рассмотрены особенности разбега вибрационных машин с плоским движением рабочего органа 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 системы.

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

А.В. Силивонюк

Луцкий национальный технический университет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ 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 системи.

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

Sylyvonyuk A.V.

Lutsk National Technical University

RESEARCH OF ACCELERATION DYNAMIC OF VIBRATION MACHINE WITH TWO SELF-SYNCHRONISATION UNBALANCED VIBROEXCITERS

Considered the features of vibrating machines run-up with flat movement of the working body and the two self-synchronizing unbalanced vibro-exciter. It is shown that an important additional advantage of vibrating machines with self-synchronizing exciters have the ability of separate motors starting allowing to improve the dynamic and power characteristics of the system.

Keywords: vibration machine, debalance vibroexciter, separate start, resonance zone, self-synchronization

Постановка проблемы. Проблемы пуска и выбега колебательных систем с инерционным приводом представляют значительный интерес для вибрационной техники. При прохождении ротором 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; к тому же, в случае тяжелых машин с приводом от асинхронных электродвигателей ударный пусковой ток отрицательно влияет на питающую электросеть.

Процесс прохождения зоны резонанса ротором дебалансного вибровозбудителя рассматривался различными методами во многих работах, обзор которых можно найти в [1-4]. В [2] на примере простейшей колебательной системы с одной степенью свободы несущего тела и одним инерционным возбудителем показано, что теоретическое объяснение и количественное описание известных закономерностей, имеющих место в зоне резонанса при разбеге и выбеге вибромашины, 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].

Схема 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 (рис. 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.

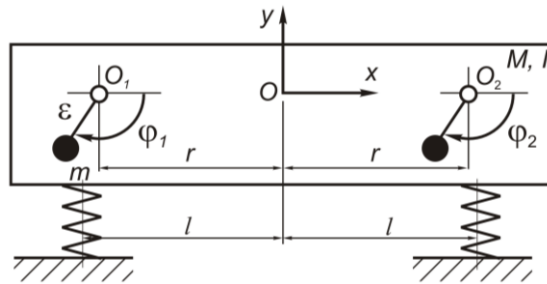


Рис. 1. Схема колебательной системы

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]):

$$I_i \ddot{\varphi}_i = L_i(\dot{\varphi}_i) - R_i(\dot{\varphi}_i) + m_i \varepsilon_i (\ddot{x} \sin \varphi_i + \ddot{y} \cos \varphi_i - \ddot{\varphi}_i r_i \cos \varphi_i + g \cos \varphi_i),$$

$$M \ddot{x} + \beta_x \dot{x} + c_x x = \sum_{i=1}^2 m_i \varepsilon_i (\ddot{\varphi}_i \sin \varphi_i + \dot{\varphi}_i^2 \cos \varphi_i),$$

$$M \ddot{y} + \beta_y \dot{y} + c_y y = \sum_{i=1}^2 m_i \varepsilon_i (\ddot{\varphi}_i \cos \varphi_i - \dot{\varphi}_i^2 \sin \varphi_i),$$

$$J \ddot{\varphi} + \beta_\varphi \dot{\varphi} + c_\varphi \varphi = \sum_{i=1}^2 m_i \varepsilon_i r_i (\ddot{\varphi}_i \cos \varphi_i + \dot{\varphi}_i^2 \sin \varphi_i), i = 1, 2 \quad (1)$$

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; β_x , β_y , β_φ – коэффициенты вязкого сопротивления; c_x , c_y – жесткости пружин на сдвиг и растяжение-сжатие, соответственно; $c_\varphi = c_y l^2$; 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.

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

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

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.

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):

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

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

Прохождение зоны резонанса. 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. 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 вибрационных моментов, действующих на роторы, принимают вид:

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

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

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

Эта формула отличается от полученной в [4] для колебательной системы с одним вибровозбудителем, ось которого совпадает с осью центра масс несущего тела, лишь коэффициентом 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) выражения для вибрационных моментов принимают вид:

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

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 раздельного (поочередного) пуска электродвигателей. Такой пуск двигателей позволяет уменьшить амплитуды резонансных колебаний несущего тела. Представление вибрационных моментов через амплитуды вынужденных колебаний (3) делает очевидным то, что для системы с одной степенью свободы несущего тела, в случае раздельного пуска двигателей резонансные вибрационные моменты станут в два раза меньшими.

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

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

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

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

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

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:

$$V_1(\omega) = V_2(\omega) \approx 2v_y, \quad V_1^{(1)}(\omega) \approx v_y \left(1 + \frac{Mr^2}{2J}\right). \quad (7)$$

Примем во внимание, что для случая, когда роторы возбудителей вращаются в одном направлении, необходимо выполнение условия $\frac{Mr^2}{J} > 2$ [1], а при вращении в противоположных

направлениях – обычно $\frac{Mr^2}{J} < 1$. Тогда, приходим к таким оценкам величин вибрационных моментов при пуске одного из двигателей для рассматриваемых направлений вращения: $V_1^{(1)}(\omega) > 2v_y$ и $V_1^{(1)}(\omega) < 1,5v_y$.

Таким образом, для системы с плоским движением рабочего органа, в случае раздельного 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, и в случае неравномерного размещения 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 меньшим (почти в два раза), чем в случае одновременного пуска двигателей.

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 и определяться формулой (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 результатов численного моделирования, которое выполнено в программной среде Sinulink/Matlab с результатами полученными в среде Maple [6]. Колебательная система имеет следующие параметры: $M = 52,4 \text{ кг}$; $J = 2,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $I_1 = I_2 = 0,0062 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $m_1 = m_2 = 7,37 \text{ кг}$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,014 \text{ м}$; $r_1 = r_2 = 0,185 \text{ м}$; начальное положение роторов вибровозбудителей соответствует углам $\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = -\pi/2 \text{ рад}$; $c_x = c_y = 48000 \text{ Н/м}$; $c_\varphi = 2220 \text{ Н/м}$; $\beta_x = \beta_y = 150 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$; $\beta_\varphi = 15 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$; привод от трехфазных асинхронных электродвигателей с синхронной частотой вращения $n_c = 1500 \text{ об/мин}$ и мощностью $P = 0,18 \text{ кВт}$. Отметим, что при моделировании использовалась динамическая модель асинхронного двигателя которая входит в библиотеку SimPowerSystems пакета Simulink.

На рис. 2 и рис. 3 продемонстрированы изменения амплитуд вертикальных и горизонтальных резонансных колебаний во время разбега центра масс несущего тела и действующих вибрационных моментов на роторы возбудителей, для случаев одновременного пуска двух двигателей (обычный пуск) и пуска только одного из двигателей (раздельный пуск).

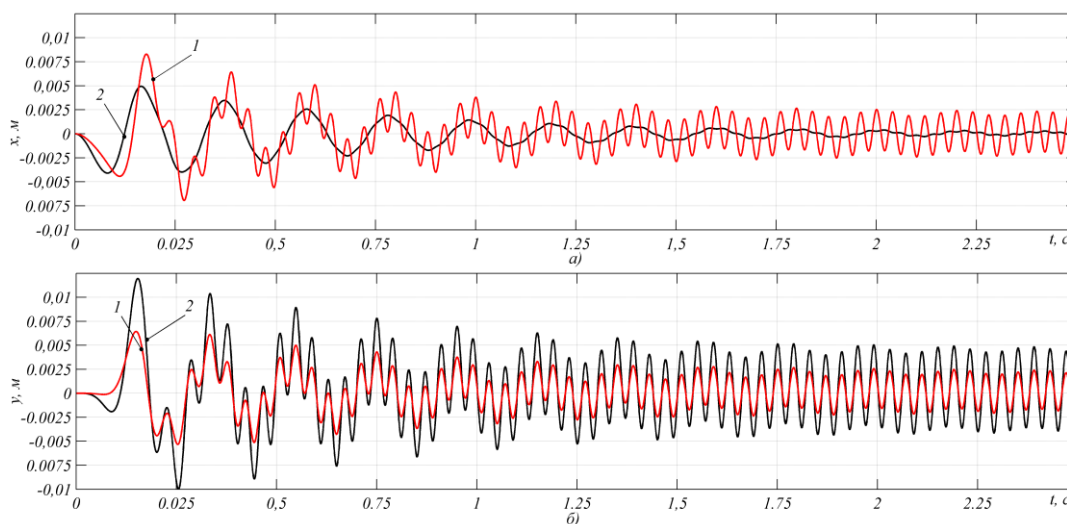


Рис. 2. Временные зависимости а) горизонтальных; б) вертикальных колебаний несущего тела: 1 – одновременный пуск двигателей; 2 – пуск одного двигателя

Согласно приведенным на рис. 2, б графикам, в случае пуска одного из двигателей во время прохождения зоны резонанса максимальные амплитуды вертикальных колебаний несущего тела существенно уменьшаются (с 12,5 мм до 5,5 мм). При этом значительно возрастают амплитуды горизонтальных (рис. 2, а) и поворотных резонансных колебаний. Однако, их величины далеки от максимальных значений амплитуд вертикальных колебаний.

Сравнение кривых 1 и 2 (рис. 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, то есть существенно уменьшаются при раздельном пуске двигателей.

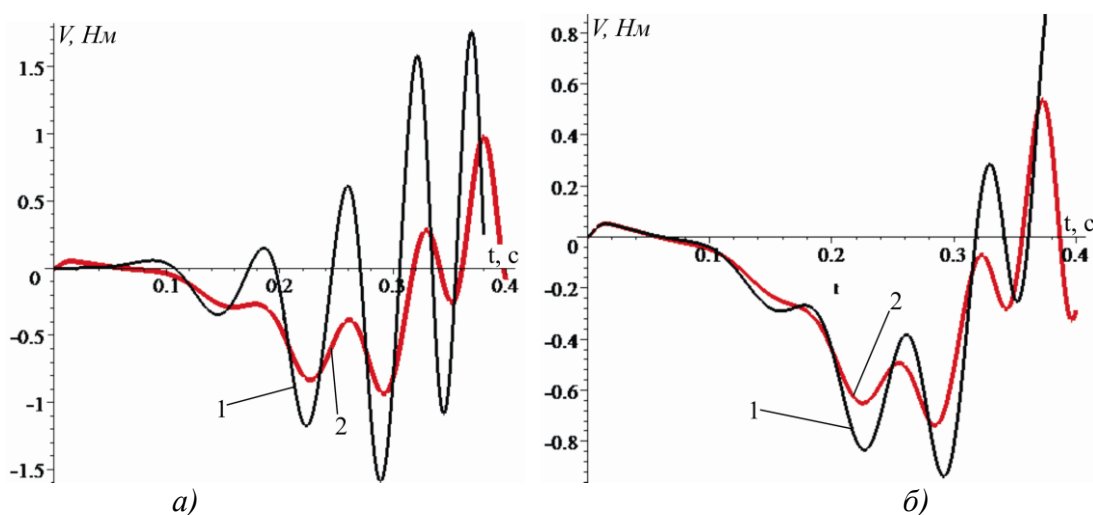


Рис. 3. Временные зависимости вибрационных моментов, действующих в зоне резонанса:

а) – одновременный пуск двигателей; б) раздельный пуск:

1 – $\beta_\phi = 15 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$; 2 – $\beta_\phi = 90 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$; 2 – пуск одного из двигателей

Установка демпфера поворотных колебаний ($\beta_\phi = 90 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$) приводит к заметному уменьшению амплитуд резонансных поворотных колебаний и, соответственно, тормозящих вибрационных моментов в зоне резонанса (рис. 3, б). Отметим, что к такому же положительному эффекту приводит и уменьшение частоты собственных поворотных колебаний несущего тела.

Выводы. Важным дополнительным преимуществом вибромашин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями, есть возможность раздельного пуска

электродвигателей, позволяющего уменьшить амплитуды резонансных колебаний несущего тела, динамическую нагрузку на роторы электродвигателей и значение пускового тока. Полученные результаты компьютерного моделирования соответствуют результатам, полученным в [6], но с другими параметрами асинхронного двигателя.

1. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. – М.: Наука, 1981. – 352 с.
2. Blekhman I.I. Vibrational Mechanics / I.I. Blekhman Singapore et al.: World Scientific. – 2000. – 509 p.
3. Блехман И.И., Индейцев Д.А., Фрадков А.Л. Медленные движения в системах с инерционным возбуждением колебаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. 2008. №1. – С. 25-31.
4. Блехман И.И., Ярошевич Н.П. Переходные режимы в инерционно- возбуждаемых послерезонансных вибрационных устройствах с несколькими степенями свободы несущей системы / В сб. 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. – В сб. Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика. – СПб.: Наука, 2009. – С. 476-486.
6. Сылывонюк А.В. Исследование пусковых режимов вибромашин с двумя дебалансными возбудителями / Т.С. Ярошевич, А.В. Сылывонюк, М.П. Ярошевич // Вестник СевГТУ. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013.– Вып. 137: Механика, энергетика, экология – С. 49-54.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2015.