

С.Л. Букин (канд. техн. наук, доц.),

М.В. Чашко (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

МАГНИТНАЯ УПРУГАЯ ТОРЦОВАЯ МУФТА – КАК ЭЛЕМЕНТ ТРАНСМИССИИ ВИБРОПРИВОДА ИНЕРЦИОННЫХ СУПЕРГАРМОНИЧЕСКИХ МАШИН

Рассматривается взаимодействие двух полумуфт с постоянными магнитами при изменении угла поворота между ними. Для торцовой муфты получены аналитические выражения, определяющие силы упругости и коэффициент жесткости. Использование новой конструкции упругого элемента предполагается в трансмиссиях приводов дебалансных возбуждателей колебаний вибромашин инерционного типа с целью возбуждения супергармонических резонансов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ВИБРОМАШИНА, ДЕБАЛАНСНЫЙ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЬ, ТРАНСМИССИЯ, МУФТА, УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ, ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ, УПРУГАЯ СИЛА, ЖЕСТКОСТЬ, ЗАВИСИМОСТЬ.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В последние годы внимание исследователей многих стран мира привлекает интенсификация технологических процессов переработки, осуществляемых с применением машин вибрационного типа путем возбуждения суб- и супергармонических резонансов в нелинейных колебательных системах [1, 2]. В работе [3] изучена возможность возбуждения полигармонических колебаний в одномассовой инерционной вибромашине с центробежным вибровозбудителем дебалансного типа. Разработанная математическая модель колебательной системы, с учетом упругого звена в приводе дебалансного вибровозбудителя, позволила исследовать область рабочих режимов, спектральный состав и влияние основных конструктивных параметров системы на динамические показатели вибромашин. Принципиальная схема предлагаемой трансмиссии супергармонического вибропривода инерционной вибромашин приведена на рис. 1. Электродвигатель 6 приводит во вращение дебалансный вал 1 центробежного вибровозбудителя посредством карданного вала 2 и упругой муфты, состоящей из обоймы 3, соединенной с карданным валом 2,

упругого элемента 4 и втулки 5, закрепленной на валу электродвигателя 6.

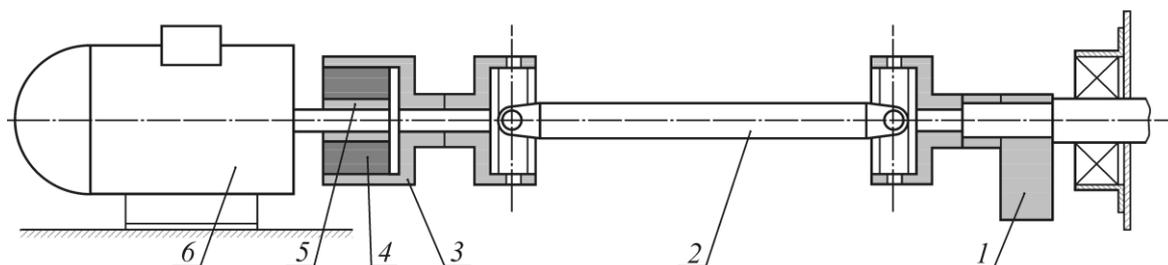


Рис. 1 - Принципиальная схема трансмиссии привода вибровозбудителя супергармонической инерционной вибромашины: 1 — дебалансный вибровозбудитель; 2 — карданный вал; 3 — обойма; 4 — упругий элемент муфты; 5 — втулка; 6 — электродвигатель

В вибрационных машинах широко применяются упругие элементы двух типов [4]: виброизоляторы и основные элементы связей подвижных масс. Во многих случаях упругие элементы изготавливаются из эластомеров (резины, полиуретана) обычно методом литья под давлением [5, 6]. Однако обеспечение требуемой долговечности и необходимой жесткости упругих элементов вибрационных машин зачастую достигается усложнением конструкции как непосредственно самих упругих элементов [7], так и технологической оснастки, предназначенной для их изготовления [8]. Кроме того, изделия из эластомеров подвержены старению на этапах хранения и эксплуатации, в процессе которых жесткостные параметры упругих элементов могут существенно изменяться. Технология изготовления изделий из эластомеров является достаточно сложной. Показатели качества изделий зависят от большого числа факторов, поэтому выдержать стабильными основные параметры в процессе производства весьма затруднительно.

В рассматриваемой трансмиссии супергармонического вибропривода инерционной вибромашины в зависимости от жесткости упругого элемента муфты, соединяющей вибровозбудитель с электродвигателем привода вращения, возможно существенное усиление супергармонических колебаний на определенных частотах. Однако в связи с узостью зон резонансных частот и по причинам, приведенным выше, применение упругих элементов из эластомеров (например, из резины) для данной задачи проблематично.

Анализ исследований и публикаций.

Изучение и анализ литературных источников позволил авторам заострить внимание на использовании магнитных свойств постоянных магнитов. Упругие магнитные опоры, амортизаторы, муфты в последние годы получают все большее применение в различных областях промышленности в связи с резким снижением стоимости постоянных высокоэнергетических магнитов на основе сплавов типа NdFeB (неодим-железо-бор) магнитов [9]. Новый класс постоянных магнитов системы Nd-Fe-B с рекордным энергетическим произведением $(BH)_{\text{MAX}}$ - до 400 кДж/м был разработан в середине восьмидесятых годов прошлого века. В настоящее время применение неодимовых супермагнитов в вибрационных устройствах является весьма перспективным, так как усилие взаимодействия супермагнитов значительно выше сил упругости широко применяемых упругих элементов из эластомеров. Это позволяет уменьшить размеры упругих элементов, а также обеспечить минимальный разброс параметров упругих характеристик при их изготовлении и эксплуатации. Следует обратить внимание и на минимизацию потерь энергии при работе упругих магнитных элементов вследствие малого коэффициента диссипации (близкого к нулю).

Таким образом, в качестве упругих элементов в инерционной вибромашине целесообразно применить постоянные магниты, обеспечивающие высокую стабильность жесткостных параметров в процессе серийного производства, практически полное отсутствие процесса «старения» и незначительные потери энергии при работе. Магнитные муфты обычно используются для передачи крутящего момента от ведущего вала ведомому без механического контакта за счет взаимодействия магнитных полей, создаваемых постоянными магнитами, установленными в ведущей и ведомой полумуфтах. В предлагаемой конструкции вибрационной машины предполагается применение магнитной муфты в качестве основного упругого элемента трансмиссии привода центробежного вибровозбудителя, обеспечивающего настройку на режим супергармонического резонанса.

Постановка задачи.

Целью данного исследования является изучение силовых и жесткостных характеристик магнитной муфты торцового типа с постоянными магнитами. Это позволит расширить научно-методическую базу необходимую для создания промышленных об-

разцов упругих муфт нового типа для вибрационных супергармонических машин.

Изложение материала и результаты.

В данной работе рассмотрен вариант магнитной муфты торцового типа. Ведущая и ведомая полумуфты идентичны друг другу, причем на обеих полумуфтах закреплено равное количество постоянных магнитов. Взаимодействие между полумуфтами происходит только через магнитное поле: магниты ведомой и ведущей полумуфт притягиваются разноименными полюсами и отталкиваются одноименными.

В основе анализа использована методика [10, 11], заключающаяся в определении силы взаимодействия магнитов как силы взаимодействия между электрическими токами, создающими такое же магнитное поле, как и постоянные магниты.

Взаимодействие между магнитами представляем как взаимодействие между электрическими токами, создающими такую же напряженность магнитного поля, что и магниты. В этом случае эквивалентный ток равен

$$I = H_c h,$$

где H_c – коэрцитивная сила (остаточное намагничивание) магнита, А/м; h – высота магнита, м.

На рис. 2 приведена расчетная схема магнитной системы и схема сил, действующих на N-й элемент муфты (рис. 2, в).

Сила притяжения (отталкивания) между магнитами раскладывается на две составляющих: перпендикулярную торцу муфты F_δ и касательную к нему F_ϕ . Сила F_δ компенсируется такой же силой со стороны противоположной полумуфты при равном числе магнитов на каждой полумуфте, а сила F_ϕ обуславливает передачу крутящего момента с ведущей полумуфты на ведомую.

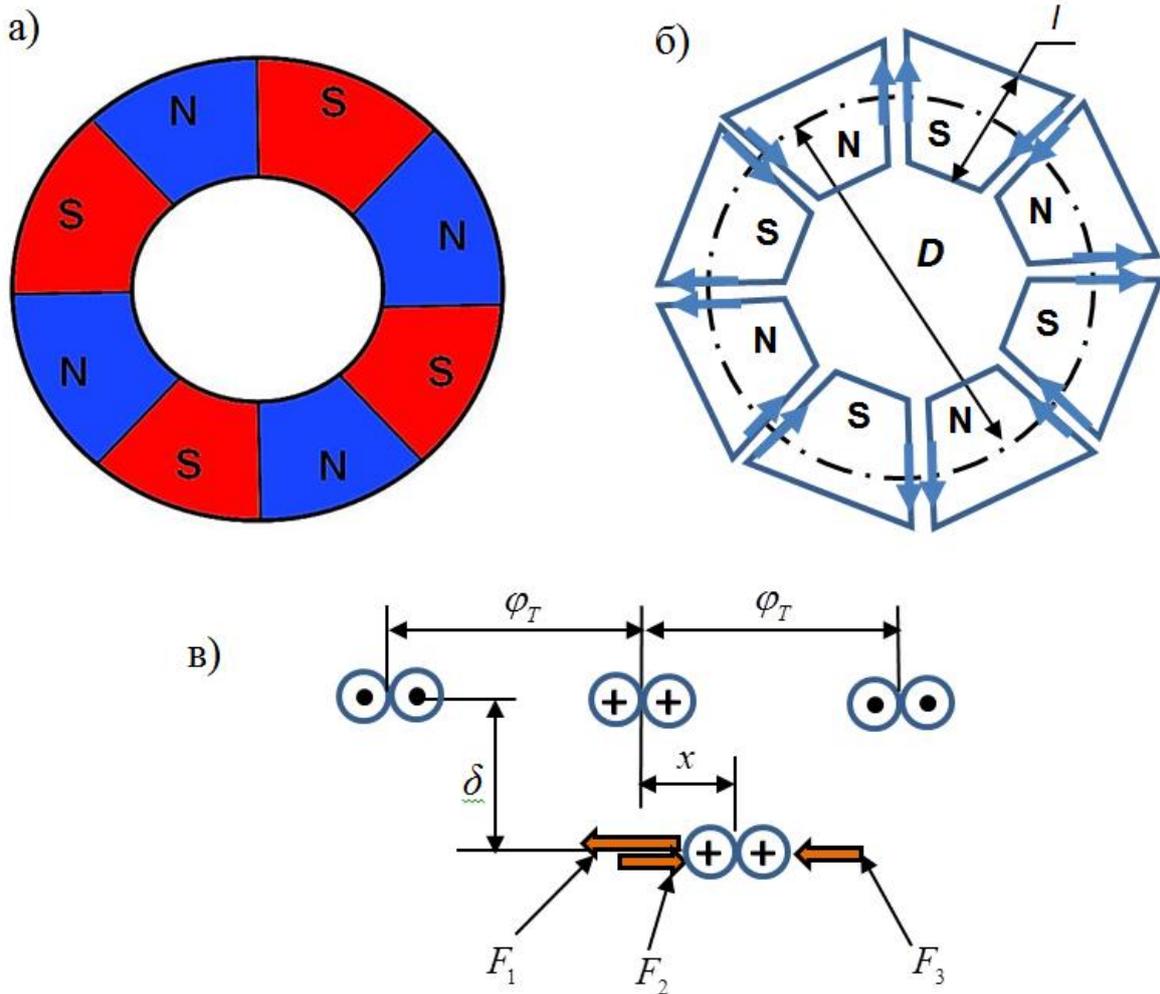


Рис. 2 – Расчетные схемы торцевой муфты: а – расположение магнитов на полумуфте; б – расположение эквивалентных магнитным полюсам токов; в – схема сил, обусловленных токами

Сила F_φ равна

$$F_\varphi = F_1 + F_2 + F_3,$$

где

$$F_1 = \frac{k \frac{D}{2} \sin \varphi}{\delta^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 \sin^2 \varphi}, F_2 = \frac{k \left(\frac{\pi D}{N} + \frac{D}{2} \sin \varphi\right)}{\delta^2 + \left(\frac{\pi D}{N} + \frac{D}{2} \sin \varphi\right)^2}, F_3 = \frac{k \left(\frac{\pi D}{N} - \frac{D}{2} \sin \varphi\right)}{\delta^2 + \left(\frac{\pi D}{N} - \frac{D}{2} \sin \varphi\right)^2};$$

$k = 16 \cdot 10^{-7} N (H_C h)^2 l / D$; N – количество магнитов, шт.; l – длина магнита, м; D – средний диаметр магнита, м; φ – угловое смещение полумуфт, рад.

В окончательном виде выражение момента, передаваемого магнитной торцовой муфтой, имеет вид:

$$M = 8 \cdot 10^{-7} N (H_C h)^2 l \left[\frac{\sin \varphi}{\tilde{\delta}^2 + \sin^2 \varphi} + \frac{\varphi_T - \sin \varphi}{\tilde{\delta}^2 + (\varphi_T - \sin \varphi)^2} - \frac{\varphi_T + \sin \varphi}{\tilde{\delta}^2 + (\varphi_T + \sin \varphi)^2} \right],$$

где $\varphi_T = 2\pi/N$ – шаг расположения магнитов, рад; $\tilde{\delta} = 2\delta/D$ – относительный зазор.

Максимальное значение момента наступает при $\varphi = \tilde{\delta}$ и приблизительно равно (с точностью до нескольких процентов)

$$M_{\max} \approx 8 \cdot 10^{-7} N (H_C h)^2 l / \tilde{\delta}.$$

Коэффициент жесткости определяется как

$$c = \frac{dM}{d\varphi} \approx 8 \cdot 10^{-7} N (H_C h)^2 l \left[\frac{(\tilde{\delta}^2 - \sin^2 \varphi)}{(\tilde{\delta}^2 + \sin^2 \varphi)^2} + \frac{4}{\varphi_T^2} \right] \cos \varphi.$$

Относительный момент и относительный коэффициент жесткости представляем в виде

$$\tilde{M} = \frac{M}{M_{\max}} = \tilde{\delta} \left[\frac{\sin \varphi}{\tilde{\delta}^2 + \sin^2 \varphi} + \frac{\varphi_T - \sin \varphi}{\tilde{\delta}^2 + (\varphi_T - \sin \varphi)^2} - \frac{\varphi_T + \sin \varphi}{\tilde{\delta}^2 + (\varphi_T + \sin \varphi)^2} \right],$$

$$\tilde{c} = \frac{c}{c_{\max}} = \left[1 + \left(\frac{4}{\varphi_T} \right)^2 \right]^{-1} \left[\frac{\tilde{\delta}^2 - \sin^2 \varphi}{(\tilde{\delta}^2 + \sin^2 \varphi)^2} + \frac{4}{\varphi_T^2} \right] \cos \varphi.$$

$$\text{где } c_{\max} = 8 \cdot 10^{-7} N (H_C h)^2 l \left[1 + \left(\frac{4}{\varphi_T} \right)^2 \right] - \text{максимальное значение коэффициента жесткости.}$$

ние коэффициента жесткости.

На рис. 3 и 4 приведены графики момента, передаваемого муфтой, и коэффициента жесткости от углового смещения полумуфт.

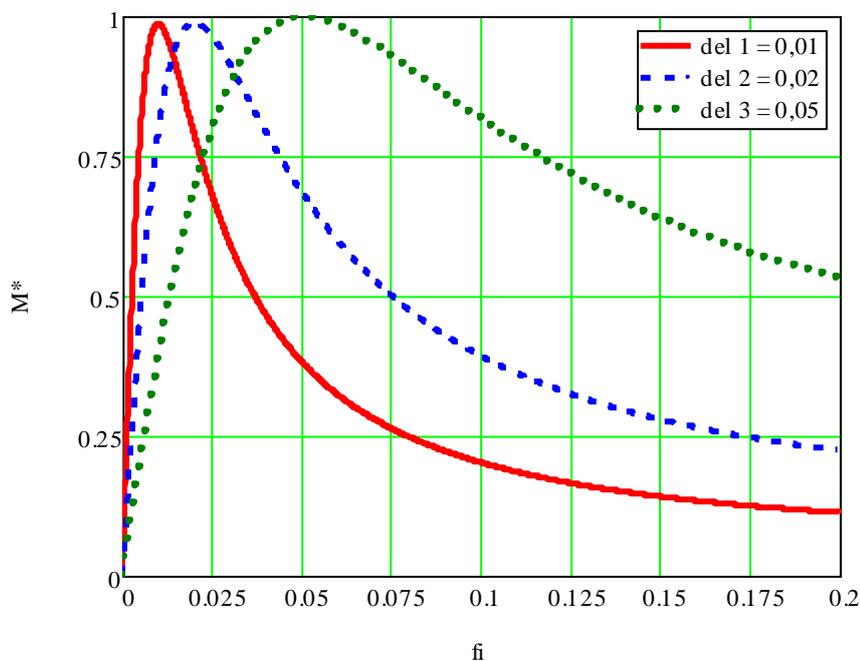


Рис. 3 – Графики зависимостей относительного момента M^* от угла смещения полумуфт φ

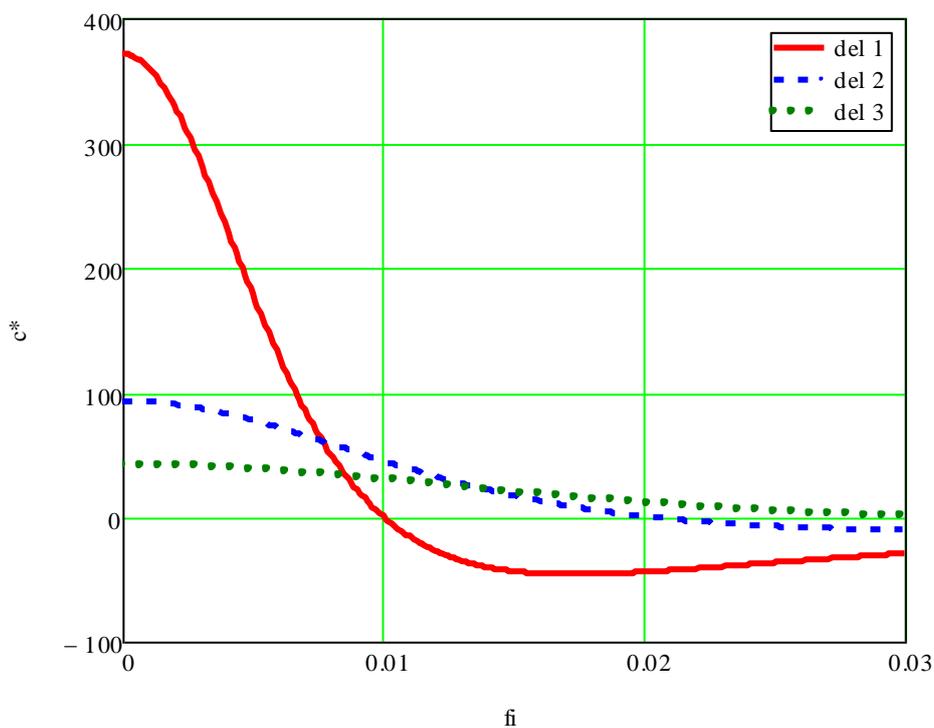


Рис. 4 – Графики зависимостей относительного коэффициента жесткости c^* от угла смещения полумуфт φ

Из графиков (рис. 3) видно, что при изменении угла смещения полумуфт передаваемый момент резко возрастает и после превышения максимального значения момента происходит срыв сцепления.

Коэффициент жесткости в зависимости от момента (рис. 4), а, следовательно, и от смещения, изменяется нелинейно, уменьшаясь от максимального значения при малых моментах до нуля при срыве сцепления.

При изменении зазора между торцами полумуфт возможный передаваемый момент и коэффициент жесткости изменяются приблизительно обратно пропорционально квадрату зазора.

Выводы и направления дальнейших исследований.

При расположении магнитов с наличием зазора между их плоскостями передаваемый момент имеет максимальное значение, превышение которого приводит к срыву сцепления.

Значения критического момента, передаваемого муфтой, и максимального коэффициента жесткости пропорциональны объему магнитов и квадрату их коэрцитивной силы.

Необходимо соблюдать условие двойного запаса момента, передаваемого муфтой, как это принято в электроприводе.

Аналитические зависимости момента взаимодействия постоянных магнитов и коэффициента жесткости магнитной муфты торцового типа будут использованы при разработке конструкций упругих элементов в трансмиссиях инерционных виброприводов супергармонических вибрационных машин.

Разработка магнитных упругих муфт для конкретных вибромашин требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Belovodskiy V.N. Nonlinear Antiresonance Vibrating Screen / V.N. Belovodskiy, S.L. Bukin, M.Y. Sukhorukov // *Advances in Mechanisms Design. Proceedings of TMM 2012. Mechanisms and Machine Science.* – Springer, 2012. – Vol. 8 – pp. 167-173.
2. Belovodskiy V.N. Harmonic Balans Method and Combination Resnances in Nonliners Systems with Polynominal Nonlinearities and Periodic Exitation / V.N. Belovodskiy, S.L. Bukin // *Transactions on Electrical Engineering*, Vol. 2 (2013), No. 4. –p. 121-125.
3. Возбуждение полигармонических колебаний в одномассовой инерционной вибромашине с дебалансным вибровозбудителем и упругой муфтой / С.Л. Букин, В.П. Кондрахин, В.Н. Беловодский, В.Н. Хоменко // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2014. №1. – С. 103-110.
4. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела, 1981. - 509 с.

5. Потураев В.Н. Резиновые и резино-металлические детали машин / В.Н. Потураев. – М.: Машиностроение. 1966. - 300 с.
6. Быховский И.И. Упругие элементы вибромашин / И.И. Быховский. – М.: Машиностроение. 1971. - 82 с.
7. Букин С.Л. Теоретические предпосылки совершенствования цилиндрических упругих элементов инерционных вибромашин / С.Л. Букин, А.Я. Жислин, С.Г. Маслов // В сб.: Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 15 (131), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – С. 78-85.
8. Уайт Дж. Л. Переработка каучуков: Технологии, материалы, принципы. – М.: Из-во «Научные основы и технологии», 2012. – 600 с.
9. Цивилицин В.Ю. Современные магнитотвердые материалы на основе РЗМ / В.Ю. Цивилицин, Ю.В. Мильман, И.Б. Бондар//Журн. функцион. материалов. -2008. -2, №2. –С. 42-47.
10. Букин С.Л. О возможности использования постоянных магнитов в упругих элементах основной связи подвижных масс многомассовых вибромашин с направленными колебаниями / С.Л. Букин, М.В. Чашко // «Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжн. зб. наукових праць». - Донецьк: ДонНТУ, 2013. Вип. 1, 2 (46). - С.30-36.
11. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Том 5 / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир. 1966.

Стаття надійшла до редколегії 30.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. С. Белецкий

С.Л.Букін, М.В.Чашко. Донецький національний технічний університет

Магнітна пружна торцева муфта - як елемент трансмісії вібропривода інерційних супергармонійних вибромашин.

Розглядається взаємодія двох напівмуфт з постійними магнітами при зміні кута повороту між ними. Для торцевої муфти отримано аналітичні вирази, які визначають сили пружності і коефіцієнт жорсткості. Використання нової конструкції пружного елемента передбачається в трансмісіях приводів дебалансних збудників коливань вибромашин інерційного типу з метою збудження супергармонічних резонансів.

Ключові слова: вібромашина, дебалансний збуджувач, трансмісія, муфта, пружний елемент, постійний магніт, пружна сила, жорсткість, залежність.

S.Bykin, M.Chashko. Donetsk National Technical University, Donetsk

Magnetic Elastic Face Coupling - As Element of the Transmission Vibration Drive Inertial Superharmonic Machines.

Discusses the interaction of two half-couplings with constant magnets when you change the angle between them. In recent years, the attention of researchers of many countries of the world attracts the intensification of technological processes of processing, carried out with the use of machines vibrating type by excitation of sub - and superharmonic resonance in nonlinear oscillating systems. In this transmission superharmonic of inertial vibrating machines depending on the stiffness of the elastic element coupling connecting the vibration exciter with electric motor of a drive of rotation, perhaps considerable strengthening superharmonic fluctuations on certain frequencies. Elastic magnetic couplings receive wide distribution in different fields of

industry in connection with sharp reduction in the cost of high-energy permanent magnets of type NdFeB. For mechanical face coupling analytical expressions are obtained that determine the strength of elasticity and stiffness coefficient. The use of a new design of the elastic element is assumed in transmissions drives unbalanced exciters oscillations of vibrating screens inertial type for the purpose of initiating superharmonicity resonances.

Keywords: inertia vibration machine, transmission, coupling, elastic element, permanent magnet, elastic force, springiness, dependence.

© С.Л. Букин, М.В. Чашко, 2014
