

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИБРООБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Шеремет А.И.

Донбасская государственная машиностроительная академия

sheremet-a@mail.ru

The article is devoted to construction a mathematical model of an electromechanical system for vibration processing of metal details simultaneously on all resonance frequencies. For want of it as the actuator the electrodynamic activator of oscillations is applied.

Введение. Виброобработка является одним из наиболее эффективных и экономичных способов снижения остаточных механических напряжений в металлических деталях. Предварительные исследования показали, что существующие электромеханические системы ведут виброобработку деталей последовательно на каждой из резонансных частот детали. Для сложных деталей количество резонансных частот может быть более двадцати, поэтому обработка отдельно на каждой из резонансных частот приводит к значительному увеличению времени и энергоемкости виброобработки. В работе [1] предложен рациональный способ виброобработки, заключающийся в формировании полигармонического или почти периодического сигнала, включающего в себя весь спектр резонансных частот обрабатываемой детали. Реализация этого способа требовала специальной электромеханической системы [2]. Одним из ключевых элементов такой системы является линейный двигатель, создающий вибрации. Для рассматриваемой электромеханической системы был принят линейный электродвигатель возвратно-поступательного действия. Основным достоинством такого двигателя являются широкие функциональные возможности, поскольку его принцип работы основан на взаимодействии тока, протекающего по подвижному проводнику, с постоянным магнитным полем, причем создаваемое вибровозбудителем усилие пропорционально току, подводимому к подвижному проводнику, и полностью повторяет его по форме.

Цель работы. Основной целью проведенных в работе исследований является получение математической модели усовершенствованной автоматизированной электромеханической системы для виброобработки металлических деталей одновременно на всех резонансных частотах, а также построение ее структурной схемы.

Материал и результаты исследований. Для установления взаимосвязей между механическими и электрическими параметрами системы построена полная электрическая эквивалентная схема электромеханической системы для релаксации механических напряжений в металлических деталях (рис. 1). Эта схема представляет как электрическую, так и механическую части системы. Исполнительный орган (электродинамический линейный двигатель) конструктивно состоит из двух взаимодействующих через электромагнитное поле катушек – подвижной и закрепляемой (неподвижной) [3].

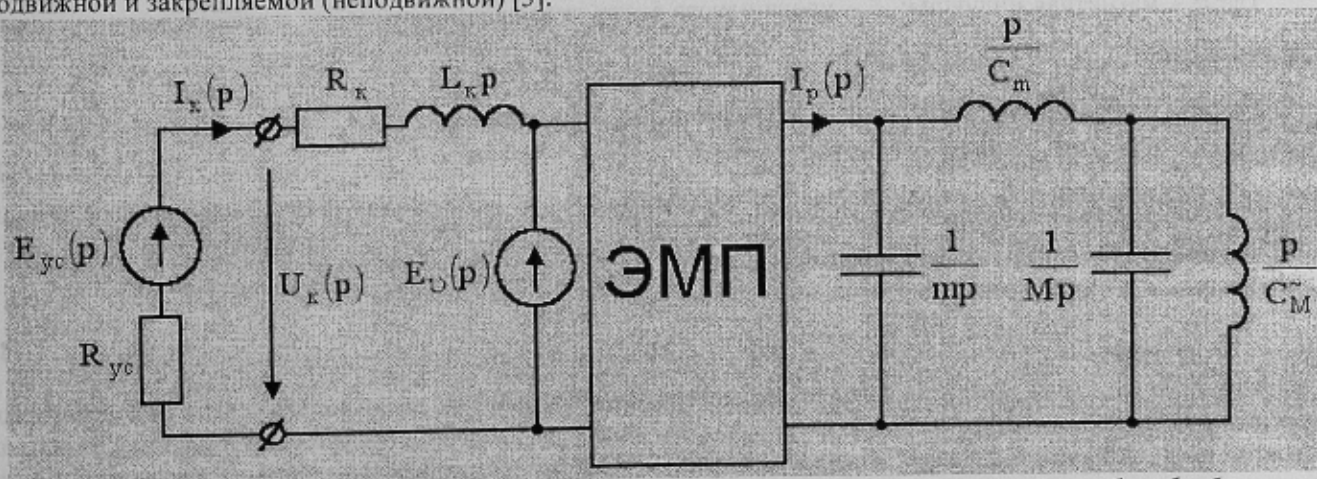


Рисунок 1 - Электрическая эквивалентная схема электромеханической системы для виброобработки металлических деталей

На схеме введены следующие обозначения: $E_{yc}(p)$ - ЭДС источника питания (усилителя); $E_g(p)$ - противо-ЭДС; R_{yc} - внутреннее электрическое сопротивление усилителя; $I_k(p)$ - ток, протекающий через обмотку подвижной катушки; $U_k(p)$ - напряжение на зажимах подвижной катушки; L_k - индуктивность обмотки подвижной катушки; R_k - электрическое сопротивление подвижной катушки; $I_p(p)$ - рабочий ток, скорость изменения которого эквивалентна силе, действующей на подвижную катушку со стороны электрической части; ЭМП - электромеханический преобразователь, согласующий между собой электрическую и механическую час-

ти эквивалентной схемы (в простейшем случае это усилительное звено, согласующее электрические и механические параметры); m, M – соответственно массы подвижной катушки вместе с крепежом и направляющими, а также обрабатываемой детали и закрепляемой на ней части линейного двигателя – эквиваленты электрической емкости; C_M, C_m – соответственно жесткость крепежа и детали, а также жесткость пружины, установленной между закрепляемой и подвижной частью линейного двигателя – эквиваленты инверсной индуктивности.

В соответствии со схемой на рис. 1 можно составить систему уравнений в пространстве Лапласа, описывающую динамику процесса виброобработки

$$\begin{cases} mp^2 x_m = F(p) - C_m(x_m - x_M) \\ Mp^2 x_M = -C_M x_M - C_m(x_M - x_m) \end{cases} \quad (1)$$

После преобразований системы уравнений (1) получим передаточную функцию по ускорению обрабатываемой детали и закрепляемой на ней части линейного двигателя

$$W_M(p) = \frac{a(p)}{F(p)} = \frac{C_m p^2}{mMp^4 + (m(C_m + C_M) + MC_m)p^2 + C_m C_M} \quad (2)$$

где $a(p)$ – изображение виброускорения в пространстве Лапласа.

Передаточная функция по скорости обрабатываемой детали и закрепляемой на ней части линейного двигателя

$$W_{Mv}(p) = \frac{px_M(p)}{F(p)} = \frac{C_m p}{mMp^4 + (m(C_m + C_M) + MC_m)p^2 + C_m C_M} \quad (3)$$

Передаточная функция по скорости массы подвижной катушки вместе с крепежом и направляющими

$$W_{mv}(p) = \frac{px_m(p)}{F(p)} = \frac{Mp^3 + (C_m + C_M)p}{mMp^4 + (m(C_m + C_M) + MC_m)p^2 + C_m C_M} \quad (4)$$

Передаточная функция подвижной катушки

$$W_k(p) = \frac{I_k(p)}{U_k(p) - E_g(p)} = \frac{1}{R_k + L_k p} = \frac{1/R_k}{p + 1} \quad (5)$$

Передаточная функция ЭМП

$$W_{ЭМП}(p) = \frac{F(p)}{I_k(p)} = Bw\ell \quad (6)$$

где B – магнитная индукция; ℓ – длина одного витка подвижной катушки; w – количество витков подвижной катушки.

Противо-ЭДС $E_g(p)$ будет определяться по формуле (7) в форме Лапласа

$$E_g(p) = p(x_m(p) - x_M(p))Bw\ell \quad (7)$$

где $p(x_m(p) - x_M(p))$ – относительная скорость движения подвижной катушки в поле катушки подмагничивания.

Обратная связь осуществляется по линейной скорости подвижной катушки $v(p)$ с коэффициентом

$$W_{oc}(p) = \frac{E_g(p)}{v(p)} = Bw\ell \quad (8)$$

Структурная схема электромеханической системы виброобработки, включающая в себя подсистему сопряжения и исполнительный орган, в качестве которого выступает электродинамический линейный двигатель возвратно-поступательного действия, приведена на рис. 2. Подсистема управления предполагает представление в виде управляющей программы и на рис. 2 выступает задатчиком воздействия $U_k(p)$.

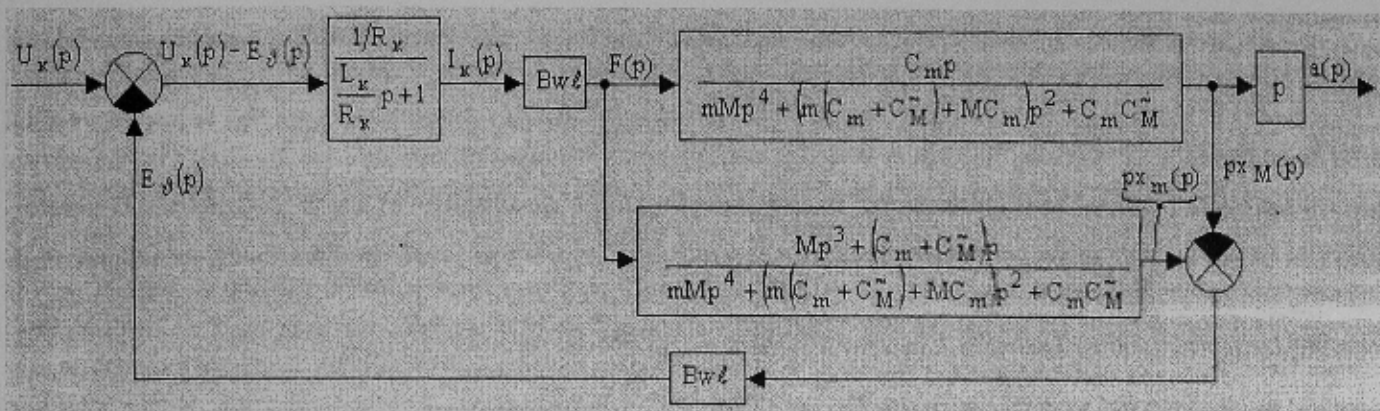


Рисунок 2 - Структурная схема автоматизированной электромеханической системы виброобработки с представлением компонентов в виде передаточных функций

Полная передаточная функция по управляющему воздействию электромеханической системы для виброобработки с электродинамическим двигателем возвратно-поступательного действия в качестве исполнительного органа, полученная после преобразований структурной схемы

$$W(p) = \frac{Bw\ell C_m p^2}{D(p)}, \quad (9)$$

где

$$D(p) = mL_k p^5 + mMR_k p^4 + \left((m(C_m + C_M^-) + MC_m) \cdot L_k + M(Bw\ell)^2 \right) p^3 + \left((m(C_m + C_M^-) + MC_m) \cdot R_k \cdot p^2 + (C_m C_M^- L_k + C_M^- (Bw\ell)^2) p + C_m C_M^- R_k \right) \quad (10)$$

Построим логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) электромеханической системы для выявления ее динамических свойств (рис. 3).

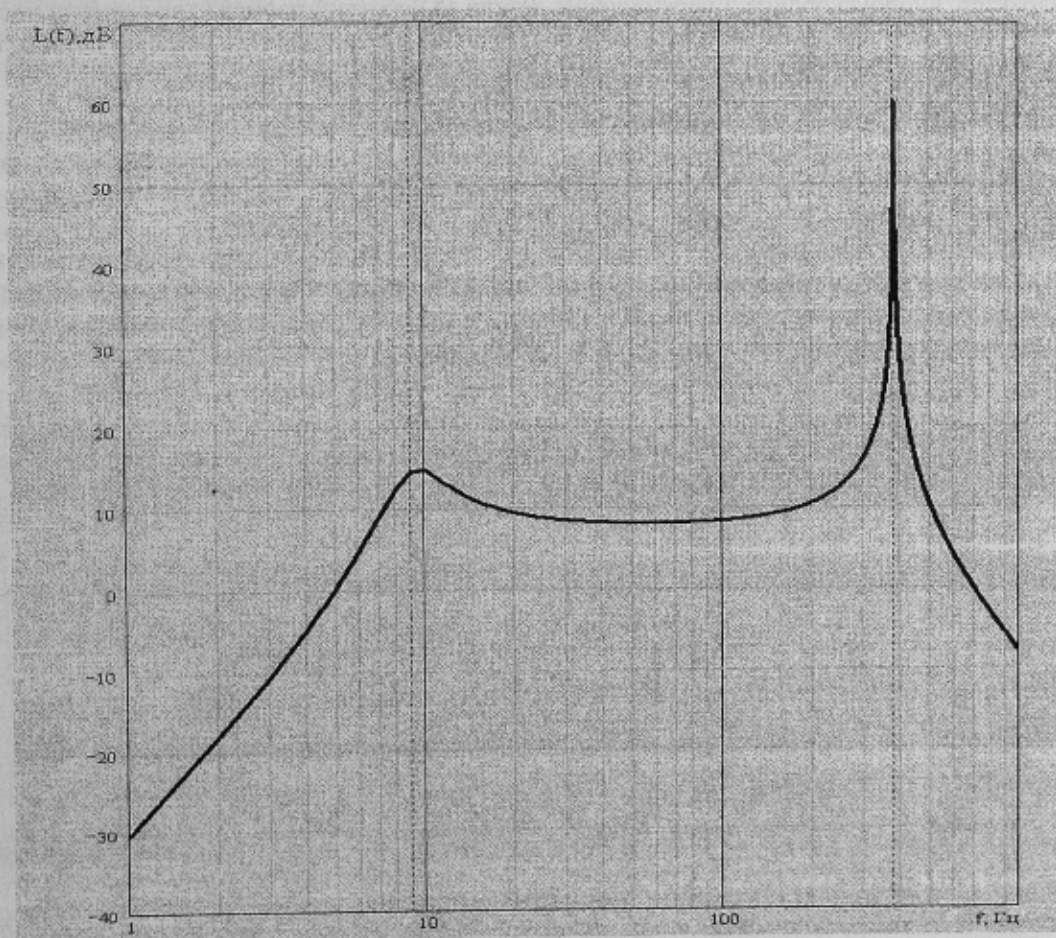


Рисунок 3 - ЛАЧХ электромеханической системы для вибростабилизирующей обработки металлических деталей

При моделировании были использованы следующие числовые значения: $M = 80$ кг (масса закрепляемой на детали части двигателя – холостой ход), $m = 10$ кг (масса свободной подвижной части), $C_M = 4,6 \cdot 10^8$ Н/м, $C_m = 3,2 \cdot 10^4$ Н/м (из расчета статического сжатия примерно на 3 мм под весом подвижной части двигателя). Магнитная индукция $B = 1$ Тл, число витков подвижной катушки $w = 10$, $\ell = 0,4$ м. Расчетные индуктивность и активное сопротивление подвижной катушки $L_k = 3,12 \cdot 10^{-6}$ Гн и $R_k = 0,063$ Ом соответственно. Коэффициент усиления системы составляет 5500 м/(В·с²). С его увеличением амплитуда вибровоздействия также увеличивается.

Из рис. 3 следует, что система имеет две ярко выраженные резонансные частоты, одна из которых обусловлена массой подвижной части двигателя m и жесткостью C_m , а вторая – массой закрепляемой части двигателя вместе с деталью M и переменной жесткостью C_M . Для выбранных параметров системы $f_m = 9$ Гц, $f_M = 381$ Гц.

Исследование поведения системы, имеющей в замкнутом состоянии ЛАЧХ, приведенную на рис. 3, проводилось при подаче на ее вход (напряжение на обмотке подвижной катушки) сигналов различного вида:

- единичного сигнала (постоянное напряжение на входе усилителя);
- синусоидального сигнала с резонансной частотой закрепляемой массы линейного двигателя возвратно-поступательного движения;
- синусоидального сигнала с частотой, отличной от резонансных частот вибросистемы;
- полигармонического сигнала, содержащего в своем спектре три частоты, не совпадающие с резонансными частотами вибросистемы.

Моделирование проводилось на компьютере с использованием численных методов решения дифференциальных уравнений с адаптивным шагом.

Было установлено, что при подаче единичного сигнала колебательный процесс носит затухающий характер. Колебания проходят как на резонансной частоте большой массы, так и на резонансной частоте малой массы. Колебания на частоте f_m затухают быстрее, судя по форме огибающей, а на частоте f_M длятся дольше, но с течением времени тоже затухают.

При обработке на резонансной частоте электромеханической системы переходный процесс носит расходящийся характер, виброускорение и перемещение детали за короткий промежуток времени достигает опасных значений, которые могут оказать деструктивное воздействие, как на обрабатываемую деталь, так и на вибропривод (допустимое виброускорение, как правило, не должно превышать 50 м/с²).

При обработке на одной частоте, отличной от собственных частот электромеханической системы переходный процесс носит колебательный характер, но колебания, обусловленные собственными частотами вибропривода довольно быстро (в течение 0,3-0,5 секунд) затухают и далее обработка ведется лишь на частоте возмущающей силы.

В случае воздействия полигармоническим сигналом с частотами, отличными от собственных частот электромеханической системы (рис. 4), переходный процесс протекает так же, как и в случае гармонического воздействия: переходный процесс быстро заканчивается и система точно воспроизводит заданный полигармонический закон виброобработки (рис. 5).

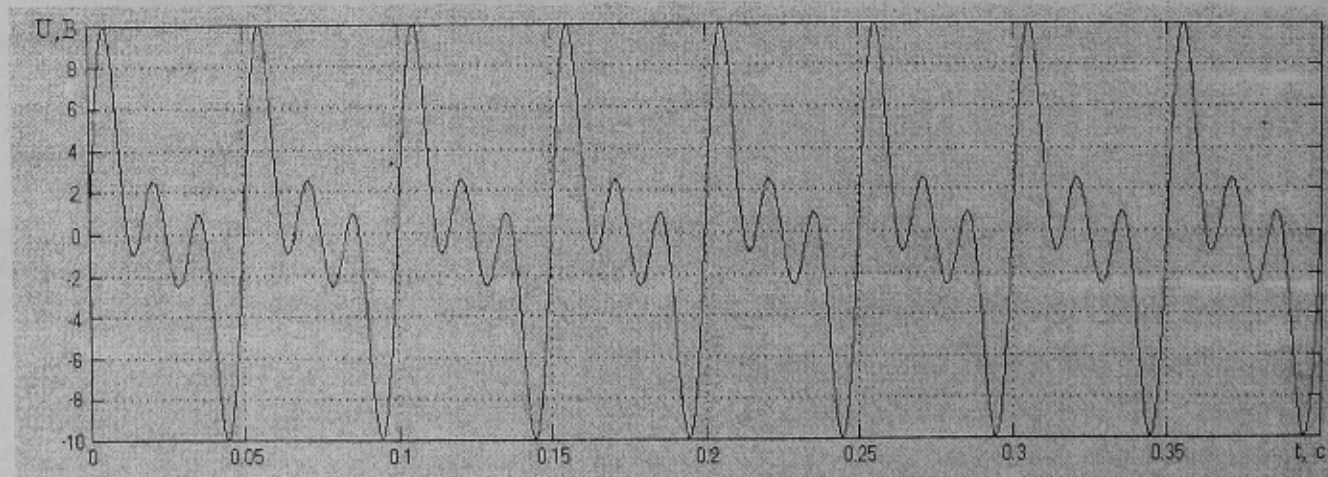


Рисунок 4 - Полигармонический сигнал, содержащий три гармоники частотами 20, 40, 60 Гц с равными амплитудами (напряжения величиной 4 В)

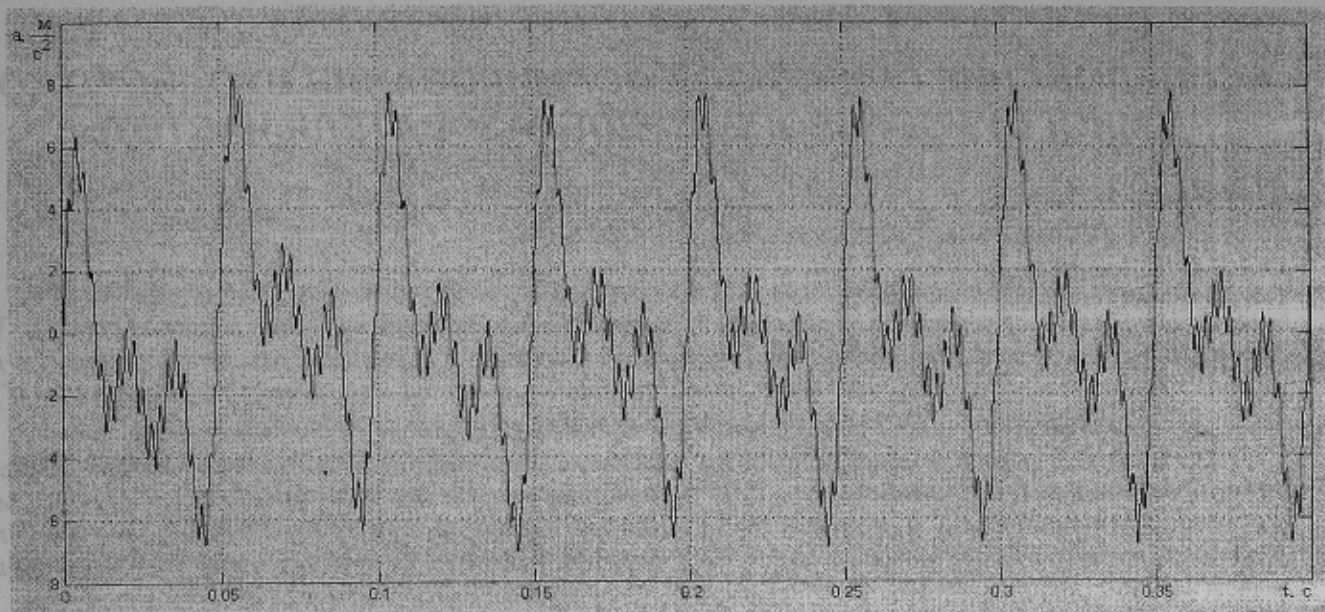


Рисунок 5 - Виброускорение, получаемое при подаче на вход математической модели сигнала, показанного на рисунке 4

Таким образом, усовершенствованная электромеханическая система для виброобработки металлических деталей имеет возможность создавать гармоническое, полигармоническое или почти периодическое механическое воздействие на деталь на частотах, отличных от собственных частот вибропривода. Подсистема управления должна давать запрет на появление собственных частот вибросистемы в спектре сигнала задания или формировать сигнал управления, ограничивающий виброускорение по амплитуде.

Выводы:

1. Проведенные исследования показали, что электромеханическая система с электродинамическим линейным двигателем возвратно-поступательного движения и цифровой системой управления способна повторять форму управляющего воздействия по электрическому напряжению, преобразуя его в механические колебания.

2. Рассмотренный электропривод отличается высоким быстродействием – время, затрачиваемое на переходные процессы не превышает 0,5 с.

3. Виброобработку следует вести на резонансной частоте детали, если она отлична от собственной частоты электропривода. Если же собственная частота детали достаточно близка к резонансу электропривода, то необходимо организовать обработку на другой частоте. Защитный алгоритм «ухода» от собственных частот привода должен быть заложен в программе, по которой работает подсистема управления.

4. При виброобработке необходимо постоянно контролировать амплитуду виброускорения, поскольку в процессе виброобработки собственные частоты детали будут меняться и могут приближаться к резонансным частотам электромеханической системы.

5. Полученная в общем виде передаточная функция вибропривода дает возможность, зная основные параметры конкретного механизма (массы подвижной и закрепляемой частей, индуктивность и сопротивление обмотки подвижной катушки, магнитную индукцию, питающее напряжение, количество витков обмотки подмагничивания), дать аналитическую оценку его динамических свойств, что особенно важно при реализации режима обработки с «уходом» от резонанса электропривода, т.е. такого интеллектуального режима работы привода, при котором он, ведя обработку на резонансной частоте детали при ее смещении в область низких, никогда не должен выходить на свою резонансную частоту, чтобы не привести к разрушению вибросистемы или детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 56421 А Україна, МПК С21D1/04. Спосіб автоматичної віброобробки металевих деталей / А.І. Панкратов, О.І. Шеремет (Україна). – №2002043116; Заявлено 16.04.2002; Опубл.15.05.2003, Бюл. № 5. – 3 с.

2. Пат. 63094 А Україна, МПК С21D1/04, С21D10/00. Спосіб автоматичної віброобробки металевих деталей та автоматизована електромеханічна система для його здійснення / А.І. Панкратов, О.І. Шеремет (Україна). – №2002119296; Заявлено 22.11.2002; Опубл.15.01.2004, Бюл. № 1. – 5 с.

3. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник: В 2 т. / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1 – 448 с.

Рекомендовано проф., д.т.н. Карась С.В.