

СИНТЕЗ МАШИНЫ ВИБРОУДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ УДАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Мачихо Д.В., Сакевич В.Н., д.т.н.

ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск

Ультразвуковые виброударные колебательные системы с подвижным инструментом обладают рядом специфических особенностей, присущих ультразвуковым виброударным системам, а именно: время контакта ударных элементов сравнимо с периодом ультразвуковых колебаний, собственная частота подвижного инструмента много меньше ультразвуковой частоты электроакустического преобразователя. Экспериментально установлено [1], что в зависимости от параметров

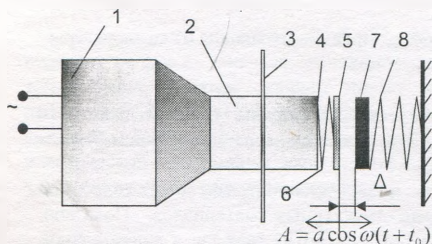


Рисунок 1 - Схема модели виброударной ультразвуковой колебательной системы: 1 - электроакустический преобразователь; 2 - волновод; 3 - фланец для крепления волновода; 4 - торец волновода; 5 - безинерционная пластина; 6 - линейная пружина с жесткостью c_2 , моделирующая контактную жесткость; 7 - масса m ; 8 - линейная

ультразвуковой колебательной системы и начальных условий возможны три вида ударных режимов движения подвижного инструмента: основной, при котором соударения инструмента с торцом волновода происходят с ультразвуковой частотой, субгармонический и стохастический.

В настоящей работе предлагается динамическая модель виброударной ультразвуковой колебательной системы, учитывающая контактную жесткость ударной пары и время соударения. Такой подход позволяет установить параметры областей неустойчивости основного режима с учетом контактной жесткости, времени удара и начального положения Δ массы 7 по отношению к торцу волновода 5.

Рассматривается динамическая модель: масса m на линейной пружине жесткости c_1 в состоянии статического равновесия либо прижата ($\Delta < 0$), либо отжата ($\Delta > 0$), либо касается торца ($\Delta = 0$) волновода 5, который движется по гармоническому закону с

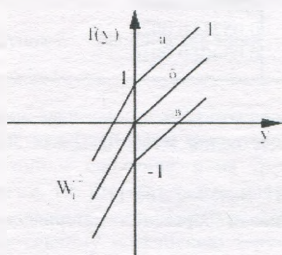


Рисунок 2 - Билинейная упругая характеристика колебательной системы, установленной: а - с предварительным натягом ($\Delta < 0$), б - с нулевым зазором ($\Delta = 0$), в - с предварительным зазором ($\Delta > 0$).

частотой ω , много большей собственной частоты массы на пружине. Контактная жесткость торца волновода 5 моделируется пружиной 6 с жесткостью c_2 . Схема расчетной модели показана на рис. 1.

На рис. 2 показаны билинейные упругие характеристики системы при различных начальных положениях массы 7 и торца волновода 5.

Уравнения движения рассматриваемой колебательной системы имеют вид:

$$m\ddot{x} + c_1 x \pm G = 0 \quad (1)$$

- уравнение движения массы до взаимодействия с торцом волновода, где $\pm G$ – сила статического поджатия либо отжатия массы к ограничителю соответственно;

$$m\ddot{x} + c_1 x + c_2 (x - a \cos \omega(t + t_0)) \pm G = 0. \quad (2)$$

- уравнение движения массы во время взаимодействия с торцом волновода, который движется по гармоническому закону $A = a \cos \omega(t + t_0)$, где a – амплитуда колебаний торцам волновода.

Переходя в уравнениях (1) и (2) к новой переменной z по формуле

$$z = x - a \cos \omega(t + t_0) \text{ и вводя безразмерные величины: } y = c_1 z / G, \quad \tau = \Omega t, \quad \Omega^2 = c_1 / m,$$

$W = \omega / \Omega$. $W_1^2 = 1 + c_2 / c_1 > 1$, $b = a(m\omega^2 - c_1) / G$ получим следующие уравнения относительного движения массы m :

$$\ddot{y} + y \pm 1 = b \cos W(\tau + \tau_0) \quad , \text{ при } y \geq 0 \quad (3)$$

$$\ddot{y} + W_1^2 y \pm 1 = b \cos W(\tau + \tau_0) \quad , \text{ при } y \leq 0 .$$

Полагая в уравнениях (1) и (2) $G=0$ и проведя вышеперечисленные преобразования, получим уравнения относительного движения массы m для случая с нулевым зазором:

$$\ddot{y}_0 + y_0 = b_0 \cos W(\tau + \tau_0), \quad \text{при } y_0 \geq 0 \quad (4)$$

$$\ddot{y}_0 + W_1^2 y_0 = b_0 \cos W(\tau + \tau_0), \quad \text{при } y_0 \leq 0 ,$$

где $y_0 = c_1 z$, $W_1^2 = c_2 / c_1$, $b_0 = a(m\omega^2 - c_1)$

Учитывая, отмеченную в работе [2], инвариантность топологии разбиения фазового пространства на траектории при различных вихах вынуждающей силы и услови, что эти силы обладают одинаковыми свойствами симметрии, рассмотрим колебательную систему с упругой билинейной характеристикой, описываемую уравнениями (3) и (4) без правой части, на которую действует периодическая система двухсторонних симметричных мгновенных импульсов S . Решение будем рассматривать на четырех участках. Первому участку соответствует $y \geq 0, \dot{y} \geq 0$, второму $y \leq 0, \dot{y} \geq 0$, третьему $y \leq 0, \dot{y} \leq 0$, и, наконец, четвертому $y \geq 0, \dot{y} \leq 0$. Начало отсчета времени на всех участках соответствуют точкам $y = 0$. Время движения на первом участке изменяется в пределах $-\tau_1 \leq \tau \leq 0$, на втором в пределах $0 \leq \tau \leq \tau_2$, на третьем – в пределах $-\tau_3 \leq \tau \leq 0$ и на четвертом – в пределах $0 \leq \tau \leq \tau_4$, причем мгновенные импульсы S_2 и S_1 действуют при переходе со второго на третий и с четвертого на первый участки соответственно. Диссипацией в системе пренебрегаем. Решение уравнения (3) имеет вид:

$$y_i = \pm \cos t + B_i \sin t \text{ м}, \quad \text{при } i = 1,4 \quad (5)$$

$$y_i = \pm W_1^{-2} \cos W_1 t + B_i \sin W_1 t \text{ м } W_1^{-2}, \quad \text{при } i = 2,3 .$$

и уравнения (4) соответственно

$$y_{0i} = B_{0i} \sin t, \quad \text{при } i = 1,4, \quad (6)$$

$$y_{0i} = B_{0i} \sin W_{01} t, \quad \text{при } i = 2,3 .$$

Последовательно проводя приписывание решений (5) на отдельных участках с учетом условий периодичности для системы с натягом или зазором, получим

$$\begin{aligned}
 B_1 &= (S_1 \sin t_4 \text{ m} \pm \cos(t_1 + t_4)) / \sin(t_1 + t_4), \\
 B_2 &= (\pm 1 \text{ m} \cos W_1(t_2 + t_3) - S_2 W_1 \sin W_1 t_3) / W_1^2 \sin W_1(t_2 + t_3), \\
 B_3 &= (S_2 W_1 \sin W_1 t_2 \text{ m} \pm \cos W_1(t_2 + t_3)) / W_1^2 \sin W_1(t_2 + t_3), \\
 B_4 &= (\pm 1 \text{ m} \cos(t_1 + t_4) - S_1 \sin t_1) / \sin(t_1 + t_4).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Верхний знак соответствует системе установленной с натягом, а нижний – с зазором.

Для случая с нулевым зазором получим следующие выражения:

$$\begin{aligned}
 B_{01} &= S_1 \sin t_4 / \sin(t_1 + t_4), \\
 B_{02} &= - S_2 \sin(W_1 t_3) / W_1 \sin W_1(t_2 + t_3), \\
 B_{03} &= S_2 \sin(W_1 t_2) / W_1 \sin W_1(t_2 + t_3), \\
 B_{04} &= - S_1 \sin t_1 / \sin(t_1 + t_4),
 \end{aligned} \tag{8}$$

которые совпадают с точностью до обозначений с выражениями, полученными в работе [1].

В процессе приспособывания решений также получим систему уравнений для отыскания значений t_1 и t_3 .

Для системы с натягом или зазором, эти уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{S_1 \sin t_4 \text{ m} \pm \cos(t_1 + t_4)}{\sin(t_1 + t_4)} = \frac{\pm 1 \text{ m} \cos W_1(t_2 + t_3) - S_2 W_1 \sin W_1 t_3}{W_1 \sin W_1(t_2 + t_3)} \tag{9}$$

$$\frac{S_2 W_1 \sin W_1 t_2 \text{ m} \pm \cos W_1(t_2 + t_3)}{W_1 \sin W_1(t_2 + t_3)} = \frac{\pm 1 \text{ m} \cos(t_1 + t_4) - S_1 \sin t_1}{\sin(t_1 + t_4)},$$

а для системы с нулевым зазором –

$$S_1 \sin t_4 / \sin(t_1 + t_4) = - S_2 \sin(W_1 t_3) / \sin W_1(t_2 + t_3) \tag{10}$$

$$S_2 \sin(W_1 t_2) / \sin W_1(t_2 + t_3) = - S_1 \sin t_1 / \sin(t_1 + t_4)$$

Рассмотрим случай, при котором $S_1 = -S_2 = S > 0$. Из системы уравнений (9) и системы уравнений (10) независимо друг от друга путем сложения уравнений получим одинаковое соотношение, как для системы с натягом, или зазором, так и для системы с нулевым зазором:

$$\frac{\sin t_4 - \sin t_1}{\sin(t_4 + t_1)} = \frac{\sin(W_1 t_3) - \sin(W_1 t_2)}{\sin W_1(t_3 + t_2)} \tag{11}$$

Из (11) следует единственное возможное решение

$$t_1 = t_4, t_2 = t_3. \tag{12}$$

Аналогично вычитая одно уравнение из другого из (9) найдем:

$$(S \mp 2 \sin \tau_1) / \cos \tau_1 = (S W_1 \pm 2 \sin \alpha) / W_1 \cos \alpha, \tag{13}$$

где $\alpha = W_1 t_2 = W_1 t_3$,

а для системы с нулевым зазором из (10) получим следующее соотношение:

$$\tau_1 = W_1 t_2. \tag{14}$$

Исследуем полученное решение на устойчивость с целью выяснения области неустойчивости основного режима. Для этого дадим малые начальные возмущения периодическому режиму и затем, последовательно приспособывая решения, с учетом периодического решения (5) и (6), получим следующую систему конечно-разностных уравнений, связывающих начальные $\Delta y_n, \Delta \dot{y}_n$ и конечные возмущения $\Delta y_{n+1}, \Delta \dot{y}_{n+1}$:

$$\Delta y_{n+1} = a_1 \Delta y_n + b_1 \Delta \dot{y}_n \quad (15)$$

$$\Delta \dot{y}_{n+1} = a_2 \Delta y_n + b_2 \Delta \dot{y}_n,$$

где $a_1 = b_2 = \cos 2\alpha \cos 2\tau_1 - 0.5W_1 \sin 2\alpha \sin 2\tau_1 - 0.5W_1^{-1} \sin 2\alpha \sin 2\tau_1$,

$$a_2 = -W_1 \cos^2 \tau_1 \sin 2\alpha + W_1^{-1} \sin^2 \tau_1 \sin 2\alpha - \cos 2\alpha \sin 2\tau_1,$$

$$b_1 = \cos 2\alpha \sin 2\tau_1 - W_1 \sin^2 \tau_1 \sin 2\alpha + W_1^{-1} \cos^2 \tau_1 \sin 2\alpha$$

Характеристическое уравнение системы (15) имеет вид:

$$\lambda^2 - (a_1 + b_2)\lambda + (a_1 b_2 - a_2 b_1) = 0 \quad (16)$$

Неустойчивость исследуемого решения будет иметь место, если хотя бы один из корней уравнения (16) по модулю будет больше единицы, т.е. при выполнении одного или двух условий

$$q_1 = |(a_1 + b_2)/2| > 1, \quad q_2 = |a_1 b_2 - a_2 b_1| > 1 \quad (17)$$

Для рассматриваемой не диссипативной системы $q_2 = 1$, поэтому условие неустойчивости основного режима имеет вид:

$$|\cos 2\alpha \cos 2\tau_1 - ((W_1^2 + 1)/2W_1) \sin 2\alpha \sin 2\tau_1| > 1. \quad (18)$$

Исследуя неравенство (18) и уравнение (13), отметим, что для области неустойчивости основного режима, рассматриваемой колебательной системы, выражение, стоящее под знаком модуля неравенства (18) должно быть меньше нуля. При этом границам неустойчивости соответствует равенство минус единице левой части неравенства (18). В этом случае получаем границы неустойчивости основного режима для системы с натягом (верхний знак) и зазором (нижний знак):

$$\cos \alpha = 0,5 \cdot \sin 2\tau_1 / (S \cdot \sin \tau_1 \mp 2), \quad W_1 = tg \alpha \cdot tg \tau_1 \quad (19)$$

$$\cos^2 \alpha - \cos \alpha \cdot \cos \tau_1 \mp (2/S) \sin \tau_1 = 0, \quad W_1 = ctg \alpha \cdot ctg \tau_1 \quad (20)$$

Для системы с нулевым зазором границы неустойчивости имеют вид

$$\sin^2 2\tau_1 = 4W_{01} / (W_{01} + 1)^2 \quad (21)$$

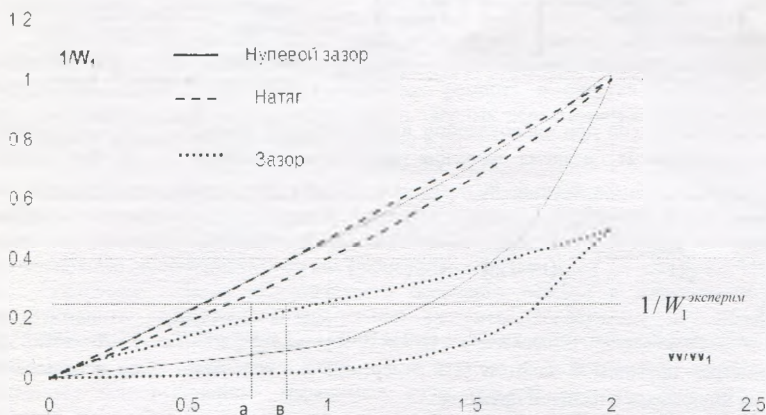


Рисунок 3 - Карта неустойчивости основного режима. Неустойчивости соответствуют замкнутые области.

Карта неустойчивости основного режима на плоскости параметров для самой большой области, построенная по соотношениям (19), (20), (21) и с учетом того, что

$\tau_1 + \tau_2 = \pi / W$ представлена на рис. 3. Неустойчивости основного режима соответствуют замкнутые области, границы которых для различных начальных положений Δ массы 7 по отношению к торцу волновода 5 (рис.1) отмечены на рис.3 различающимися линиями.

Смысл карты неустойчивости заключается в том, что существует достаточно большая область конструктивных параметров ультразвуковой машины, при которых основной режим неустойчив и, значит, при этих параметрах возможны субгармонические и стохастические режимы движения подвижного инструмента.

Следует отметить, что области неустойчивости основного режима при установке в начальном положении массы по отношению к торцу волновода с зазором или натягом не пересекаются, то есть не существует конструктивных параметров колебательной системы, при которых основной режим был бы одновременно неустойчивым для этих начальных положений массы.

Предложенная динамическая модель позволяет теоретически обосновать процедуру параметрического синтеза ультразвуковой машины виброударного действия с возможностью реализации стохастических режимов движения подвижного инструмента. Синтез осуществляется следующим образом.

1. Определяется контактная жесткость ударной пары, которую сконструировали и изготовили исходя из целевого технологического её назначения. Для этого помещают колебательную систему на вибростол 9 как показано на рис.4 и кинематически возбуждают виброударные колебания в контактной паре. Начальное положение массы 7 по отношению к торцу волновода 5 устанавливают с нулевым зазором ($\Delta=0$). Затем, каким-либо известным способом, например, по размыканию и замыканию

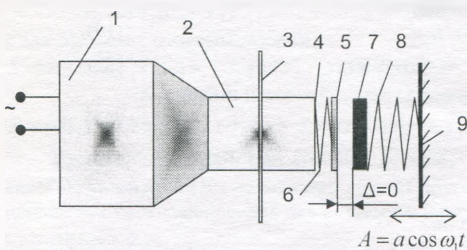


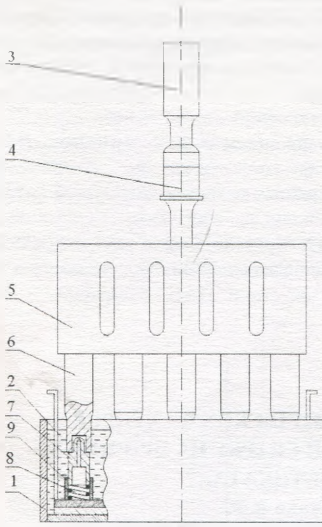
Рисунок 4 - Схема определения контактной жесткости ультразвуковой виброударной системы: 1 - электроакустический преобразователь; 2 - волновод; 3 - фланец для крепления волновода; 4 - торец волновода; 5 - безинерционная пластина; 6 - линейная пружина с жесткостью c_2 , моделирующая контактную жесткость; 7 - масса m ; 8 -

электрической цепи при виброударном взаимодействии элементов 5 и 7 определяют время контакта $2\tau_2$ и время движения массы m вне контакта $2\tau_1$. Из (14) находят $W_{01} = \tau_1 / \tau_2$ и, учитывая, что, $W_{01}^2 = c_2 / c_1$, а $W_1^2 = 1 + c_2 / c_1$ получают выражение для $W_1^{\text{эксперим}}$

$$W_1^{\text{эксперим}} = \sqrt{(1 + c_2 / c_1)} = \sqrt{(1 + W_{01}^2)} = \sqrt{(1 + (\tau_1 / \tau_2)^2)} \quad (22)$$

Следует отметить, что согласно выражению (22) значение $W_1^{\text{эксперим}}$ не зависит от параметров пружины 8, поэтому для измерений $W_1^{\text{эксперим}}$ может быть использована любая имеющаяся в наличии пружина.

2. Следующий шаг в параметрическом синтезе заключается в выборе жесткости



c_1 упругого элемента 8 подвижного инструмента или его собственной частоты $\Omega = \sqrt{c_1/m}$. Для этого:

- на рис. 3 проводится горизонтальная линия с координатой $1/W_1^{асимптот}$, и определяются координаты a и b её пересечения с границами области неустойчивости;
- выбирается область неустойчивости на рис. 3 исходя из технологических условий осуществления процесса (зазор, натяг,

Рисунок 5 - Общий вид синтезированного устройства в продольном разрезе для расклинивания форсунок и очистки их корпуса от нерастворимых загрязнений: 1- ванна; 2 - моющая жидкость; 3 - ультразвуковой преобразователь; 4 - трансформатор амплитуды продольных колебаний; 5 - длинноконтурный волновод; 6 - волноводы стержневого типа; 7 - корпус распылителя форсунки; 8 - упругие элементы (нулевой зазор);

- выбирается значение соотношения $W/W_1^{асимптот}$ из отрезка (a, b) , желательно в

середине отрезка и определяется W :

- находится собственная частота $\Omega = \sqrt{c_1/m}$ колебаний подвижного инструмента с учетом того, что $W = \omega/\Omega$ и ω заранее известная частота ультразвукового преобразователя;

- определяется жесткость c_1 упругого элемента при известной массе подвижного инструмента из выражения $c_1 = \Omega^2 m$.

Полученные результаты были использованы для параметрического синтеза устройства (рис. 5) для расклинивания и разборки прецизионных деталей распылителей форсунок дизельных двигателей в процессах ремонта и очистки внутренних и наружных поверхностей корпуса форсунки от твердых нерастворимых загрязнений в виде окисных плёнок, нагара и смолообразования [3].

Выводы

1. Предложена динамическая модель виброударной ультразвуковой колебательной системы, учитывающая контактную жесткость, время соударения и начальное положение элементов ударной пары относительно друг друга. Модель позволяет описать полную динамическую картину процесса соударения.

2. Построены области неустойчивости основного режима в зависимости от конструктивных параметров колебательной системы. Обнаружено, что области неустойчивости основного режима при установке в начальном положении массы по отношению к торцу волновода с зазором или натягом не пересекаются, то есть не существует конструктивных параметров колебательной системы, при которых основной режим был бы одновременно неустойчивым для системы, установленной с натягом и с зазором.

3. Теоретически обоснована процедура параметрического синтеза ультразвуковой машины виброударного действия с возможностью реализации стохастических режимов движения подвижного инструмента. Полученные результаты успешно применены для

параметрического синтеза ультразвукового устройства для расклинивания и разборки прецизионных деталей распылителей форсунок дизельных двигателей в процессах ремонта и очистки внутренних и наружных поверхностей корпуса форсунки от твердых нерастворимых загрязнений в виде окисных плёнок, нагара и смолообразования [3].

Список литературы

1. Артемьев, В.В. Ультразвуковые виброударные процессы / В.В. Артемьев, В.В. Клубович, В.Н. Сакевич. - Мн.: БНТУ, 2004. - 258 с.
2. Закржевский, М.В. Колебания существенно-нелинейных механических систем / М.В. Закржевский. - Рига: Зинатне, 1980. - 190 с.
3. Пат. 3030 Республика Беларусь, МПК В 08В3/12. Устройство для ультразвуковой контактной очистки [Текст] / Мачихо Д. В., Сакевич В.Н.; заявитель и патентообладатель ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси». – № 20060014; заявл. 01.10.06; опубл. 30.10.06.

УДК 621.791.1

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ (ТЕМПЕРАТУРЫ) ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКЕ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ ПВХ ПЛАСТИКАТА.

Шрубиков С.Н., Луцко В.Ф.

ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск

При заготовке и переработке донорской крови применяют полимерную тару, которая обычно состоит из двух пластиковых контейнеров (гемоконтейнеры), соединенных между собой магистралями из трубок поливинилхлоридного (ПВХ) пластиката. Для обеспечения длительного хранения и стерильности находящейся в гемоконтейнерах крови или ее компонентов требуется герметичная запайка полимерных этих трубок. Особенно актуальным является сохранение надежной герметизации гемоконтейнеров в условиях низких температур при так называемой "шоковой заморозке" до $-73 \pm 5^\circ\text{C}$ и длительном хранении в течение 140 дней при температуре $-30^\circ\text{C} \div -40^\circ\text{C}$ [1].

Запайку полимерных трубок систем переливания крови чаще всего производят сваркой токами высокой частоты (ТВЧ – сварка). Для этих целей используется также ультразвуковая сварка, обеспечивающая формирование герметизирующего шва за счет введения в зону сварки ультразвуковых колебаний высокой интенсивности [2]. Необходимо отметить, что ультразвуковая сварка термопластичных полимерных материалов является одним из наиболее эффективных и надежных способов соединения полимерных материалов. Ультразвуковая сварка пластмасс позволяет выполнять соединения в труднодоступных местах осуществлять сварку по поверхностям, загрязненным различными продуктами. Локальное выделение тепла в зоне сварки исключает перегрев пластмассы за счет быстрого нагрева материала до температуры вязкотекучего состояния [3].

Основными параметрами режима, определяющими качество ультразвуковой сварки являются амплитуда и частота колебаний рабочего торца сонотрода, время сварки, величина сварочного давления. Влияние этих параметров на процесс ультразвуковой сварки различных термопластичных полимерных материалов, в том числе и ПВХ, достаточно хорошо изучено. В тоже время, влияние климатических факторов на процесс ультразвуковой сварки практически не изучено не только для ПВХ, но и в целом для большинства термопластов. Оборудование для ультразвуковой