

**Д.В. СТАЛИНСКИЙ**, д-р. техн. наук, ген. д-р,  
УкрДНТЦ «Енергосталь», Харьков;  
**П.В. РОМАНЧЕНКО**, инж., УкрДНТЦ «Енергосталь», Харьков;  
**Ю.А. СИЗЫЙ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков.

## **ВИБРАЦИИ РУЧНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОЧЕМ И ХОЛОСТОМ ХОДЕ**

У статті розглядається модель вібрації ручної шліфувальної машини при холостому ході, тобто при навантаженні її лише дисбалансом круга, і при робочому ході з навантаженням машини ще і силою різання.

The article deals with the vibration model of a manual grinding machine during idle running, i.e. when it is only loaded with circular unbalance, as well as under operating conditions, when the machine is also loaded with the cutting force.

В статье рассматривается модель вибрации ручной шлифовальной машины при холостом ходе, т.е. при нагружении ее только дисбалансом круга, и при рабочем ходе с нагружением машины еще и силой резания.

Ключевые слова: Ручная шлифовальная машина, абразивный круг, среднеквадратическая виброскорость, динамическая модель

В статьях [1, 2] описана динамическая модель ручной шлифовальной машины (РШМ) модели ИП 2001, предназначенной для работы с кругами ПП 150x25x32 и ПП 125x25x32.

Графическая модель динамической системы «абразивный круг – РШМ – оператор» показана рис.1. В отличие от статьи [1] графическая модель на рис.1 дополнена видом по стрелке А с силами  $F_c$ ,  $F_{сп}$ ,  $F_{рг}$  и  $F_p$  силы  $F_c$ ,  $F_{сп}$  это центробежные силы эксцентричности оси вращения относительно оси круга и от смещения центра тяжести круга за счет непараллельности его торцов. Векторы этих осей показаны произвольно. Векторы же силы прижима  $F_{пр}$  и резания  $F_r$  показаны в направлениях  $k$  и от шлифуемой поверхности.

На этом рисунке шлифовальная машина представлена единичной массой  $m_1$ , которая сосредоточена в центре ее тяжести в точке О. Машина, удерживаемая двумя руками оператора, которые моделируются массами  $m_2$  и  $m_3$ , соответственно для левой и правой рук оператора. Руки присоединены к машине прижимами жесткостью  $C_1$  и  $C_2$ , а к телу оператора – пружинами жесткостью  $C_3$  и  $C_4$ . Рассеивание колебаний учтено демпферами с коэффициентами демпфирования  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ .

В модели принимается движение рук, т.е. масс  $m_2$  и  $m_3$  только в направлении оси X и координатами движения рук будут соответственно перемещения  $X_2$  и  $X_3$ . Шлифовальная машинка под действием центробежных сил  $F_c$ ,  $F_{сп}$ , а также под действием силы резания  $F_r$  и силы

прижима круга к зачищаемой поверхности  $F_{pr}$ , может перемещаться поступательно вдоль оси X и координата такого перемещения  $X_1$ . Кроме этого, машина может совершать поворот вокруг оси O на угол  $\varphi$ . Таким образом, у модели четыре координаты перемещения  $\varphi, X_1, X_2$  и  $X_3$ .

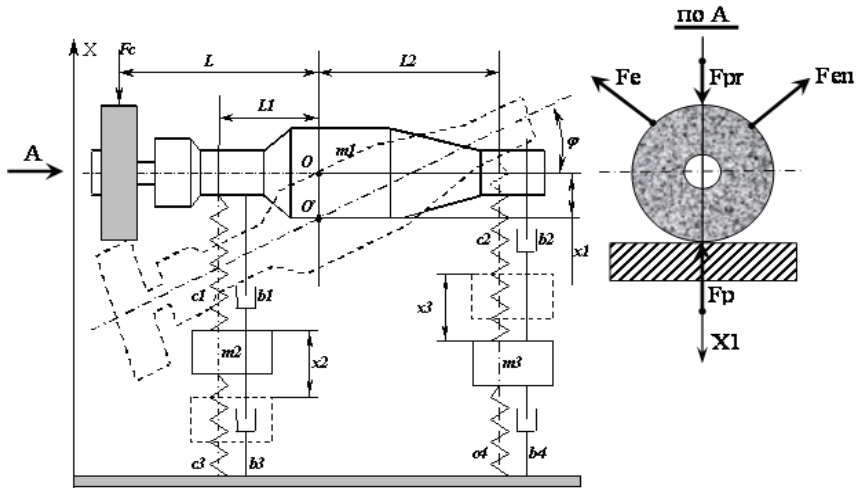


Рис. 1 – Графическая модель динамической системы «Абразивный круг – РШМ – оператор»

В [1] описана математическая модель динамической системы «круг – РШМ – оператор» которая, с учетом только воздействия на круг центробежной силой, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{cases} \ddot{\Phi} = \frac{1}{I} (F_u L - b_1 L_1 \dot{q}_1 + b_2 L_2 \dot{q}_2 - c_1 L_1 q_1 + c_2 L_2 q_2); \\ \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} (F_u - b_1 \dot{q}_1 - b_2 \dot{q}_2 - c_1 q_1 - c_2 q_2); \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} (b_1 \dot{q}_1 - b_3 \dot{x}_2 + c_1 q_1 - c_3 x_2); \\ \ddot{x}_3 = \frac{1}{m_3} (-b_2 \dot{q}_2 - b_4 \dot{x}_3 - c_2 q_2 - c_4 x_3). \end{cases} \right\}, \quad (1)$$

$q_1 = (x_1 + \varphi L_1 - x_2)$  - деформация упругой связи левой руки оператора с РШМ;  
 $q_2 = (x_1 - \varphi L_2 + x_3)$  - деформация упругой связи правой руки оператора с РШМ.

Система уравнений (1) позволяет моделировать вибрации РШМ, в частности, перемещения левой и правой рукояток машины только при холостом ходе.

При рабочем ходе, т.е. при шлифовании на шлифовальный круг, как показано на рис.1, действует сила, которая является векторной суммой сил  $F_c$ ,  $F_{pr}$ ,  $F_{sp}$  и  $F_p$ :

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_{pr} + \vec{F}_{cn} + \vec{F}_p, \quad (2)$$

Рассматривая движения РШМ только вдоль оси X необходимо векторы  $\vec{F}_c$ ,  $\vec{F}_{pr}$ ,  $\vec{F}_{cn}$ ,  $\vec{F}_p$  проектировать на ось X.

Сила прижима  $F_p$  направлена к шлифуемой поверхности, т.е. в положительном направлении оси X1, а сила резания, ее нормальная составляющая  $F_r$  – в отрицательном направлении оси X1.

Центробежная сила является в свою очередь векторной суммой центробежных сил  $\vec{F}_c$ ,  $\vec{F}_{cn}$ .

Таким образом, математическая модель динамической системы «круг – РШМ – оператор» при рабочем ходе буде отличаться от модели (1) при холостом ходе только тем, что вместо  $F_c$  будет сила F.

Необходимо отметить то, что эксцентricность оси вращения круга является опять же векторной суммой смещения:

- оси керна пресс-формы относительно оси отверстия в ее кольце [2];
- оси втулки, устанавливаемой перед прессованием на керна от оси керна;
- оси круга со втулкой относительно оси вращения шпинделя РШМ при установке круга на него.

В настоящей статье не рассматривается методика расчета всех этих смещений и вычислений смещения центра тяжести от эксцентricности Xc и от непараллельности торцов Xп.

Рассмотрим расчет и моделирование всех составляющих силы F, т.е.  $F_p$ ,  $F_c$ ,  $F_{sp}$ ,  $F_r$ .

Нормальная составляющая силы резания  $F_r$  принимается прямо пропорциональной глубине шлифования  $h$  при неизменных прочих условиях (скорости шлифования, скорости подачи материала детали и т.п.) и направленной в отрицательном направлении координаты X1:

$$F_p = -h \cdot C_p, \quad (3)$$

где  $C_p$  – жесткость процесса шлифования, определяется экспериментально. Глубина шлифования  $h$  формируется значениями координат X1,  $\phi$  и радиальным биением круга, которое описывается косинусоидой

$$X_{rad} = X_c \cdot \cos \omega t, \quad (4)$$

где:

$X_c$  – эксцентricность оси наружной поверхности круга относительно оси его вращения;

$\omega$  – частота вращения, рад/с;

$t$  – время, с.

Суммарное значение глубины шлифования  $h$  получим суммированием X1,  $\phi \cdot L$  и  $X_{rad}$ :

$$h = X_1 + \phi \cdot L + X_p, \quad (5)$$

где  $L$  – расстояние до круга вдоль оси шпинделя РШМ от центра тяжести РШМ.

При этом должно выполняться условие  $h > 0$ , т.е. круг должен быть внедрен в обрабатываемую поверхность.

В (5) перемещение круга вдоль  $X$  за счет поворота РШМ на угол  $\varphi$  принимается равным  $L \cdot \varphi$ , т.е. принимаем дугу  $L \cdot \varphi$  равной ее проекции на ось  $X$ . Такое допущение приемлемо при малых значениях  $\varphi$ , что имеет место при вибрации РШМ.

Таким образом, подставляя (5) и (4) в (3), получим силу резания  $F_p$ :

$$F_p = -(X_1 + \varphi \cdot L + X_c \cos \omega t) \cdot C_p, \quad (6)$$

Сила прижима  $F_{pg}$  принимается постоянной и равной, например 50Н.

Проекция центробежной силы на ось  $X$  является векторной суммой центробежных сил от непараллельности торцов круга  $F_{cp}$  и от эксцентричности его  $F_c$ .

В [2] получена формула расчета  $F_c$  от эксцентричности оси вращения круга  $X_c$  и показано, что смещение центра тяжести круга практически равно эксцентричности  $X_c$ . Поэтому:

$$F_c = X_c \cdot \cos \omega t \cdot m \cdot \omega^2, \quad (7)$$

где  $m$  – масса круга.

Составляющую центробежной силы от непараллельности торцов круга рассчитываем следующим образом:

$$F_{cn} = X_n \cos(\omega t + \phi) \cdot m \omega^2, \quad (8)$$

где  $X_n$  – смещение центра тяжести круга за счет непараллельности торцов;

$\alpha$  – угол между векторами  $F_{cp}$  и  $F_c$

На рис. 2 приведена распечатка блок-схемы моделирующей внешние воздействия в пакете «VisSim», т.е. силу  $F$ , приложенную к шлифовальному кругу при рабочем ходе, а также исходные данные по параметрам РШМ с руками оператора. Эти данные приведены вверху рис.2 применительно к РШМ ИП 2001 на этом же рисунке приведены графики:

верхний – изменение глубины шлифования  $h$ ;

средний – графики сил  $F$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ,  $F_{cp}$ ;

нижний – результаты моделирования, т.е. среднеквадратическая скорость левой рукоятки РШМ-Vskl.

Значения величин  $X_n = 0,000279$ м,  $X_c = 0,0001$ м полученные для следующих условий прессования круга (размеров деталей пресс-формы [2]) и установки на шпиндель РШМ: - круг ПП 150х25х32;

- посадка верхняя плита – керн 32н9/f9;

- посадка верхняя плита – кольцо 150н9/f9;

- размер отверстия во втулке, с которой прессуется круг  $32^{+0,05}$ ;

- толщина верхней плиты 25мм;

- размер посадочной поверхности под круг на шпинделе РШМ 32h6

Из верхнего графика рис.2 видно, что круг за счет вибрации РШМ и радиального его биения внедряется в обрабатываемую поверхность периодически с максимальной глубиной 0,25мм.

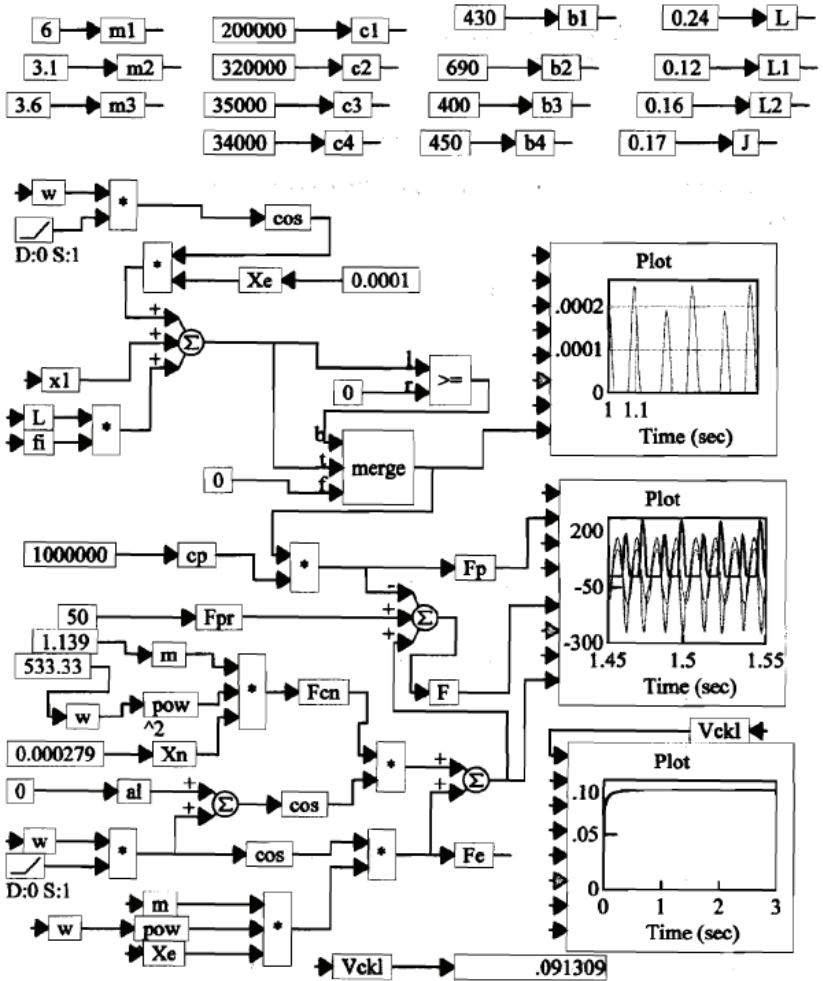


Рис.2 – Программа введения исходных данных моделирования и расчета внешних сил воздействия на шлифовальный круг

Суммарная сила  $F$ , воздействия на шлифовальный круг колеблется в пределах от  $-250\text{Н}$  до  $+170\text{Н}$ . Установившееся значение среднеквадратической виброскорости левой рукоятки РШМ при  $\alpha=0$  достигает значения  $9,1\text{ см/с}$ , что значительно выше предельно допустимого значения  $2,5\text{ см/с}$  виброскорости из условия санитарных норм.

Изменяя угол  $\alpha$  между векторами непараллельности торцов и эксцентричности видно, как он влияет на виброскорость. Так при  $\alpha=1,57$ рад ( $90^0$ )  $V_{ckl}$  уменьшается до 7,1см/с и наименьшее ее значение будет при  $\alpha=2,355$ рад ( $135^0$ ) равное 7,04см/с.

Известно, что абразивные круги для РШМ формируются методом холодного и горячего прессования. При холодном прессовании непараллельность торцов не ведет к смещению центра тяжести круга, что имеет место при горячем прессовании.

Для моделирования вибраций при рабочем ходе для круга холодного прессования надо в блок-схеме рис.2 задать  $X_p=0$ . Для описанных условий получаем  $V_{ckl}=3,3$ см/с. Таким образом, уменьшение  $V_{ckl}$  более чем в два раза указывает на большую роль непараллельности торцов на вибрацию РШМ с кругами горячего прессования.

Определенный интерес представляет сравнение уровня вибрации при холостом и рабочем ходах. Условия вибраций при холостом ходе моделируются блок-схемой рис.2 при разрыве связей  $F_p$ ,  $F_{pg}$  с сумматором на котором они суммируются с силами  $F_{сп}$  и  $F_c$ . Так, для условий холостого хода с кругом горячего прессования получается  $V_{ckl}=5,9$ см/с, а с кругом для холодного прессования  $V_{ckl}=1,54$ см/с.

Таким образом, разработана динамическая модель системы «круг – РШМ - оператор» для условий рабочего и холостого хода. Установлено, что для условий рабочего хода вибрации РШМ выше чем, при условиях холостого хода.

Установлено также большое влияние на уровень вибрации РШМ с кругами горячего прессования непараллельности торцов. Показано, что уровень вибраций РШМ с кругами холодного прессования значительно меньше, чем с кругами горячего прессования. Установлено заметное влияние на уровень вибраций РШМ сдвига по фазе  $\alpha$  между центробежными силами от непараллельности торцов круга и эксцентричности круга относительно оси вращения.

**Список литературы:** 1. *Сталинский Д.В., Сизый Ю.А., Яровая Л.Г., Романченко П.В.* Влияние неуравновешенности масс абразивных кругов на вибрационную характеристику работы ручных шлифовальных машин. / Экология та виробництво. – 2002. - №2-3. – с. 53 – 56.  
2. *Д.В. Сталинский, Л.Г. Яровая, П.В. Романченко* УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков, Украина Влияние точности изготовления и эксплуатационных свойств абразивного инструмента на условия работы операторов ручных шлифовальных машин. / сб. научн. статей к XI Международной научно-технической конференции «Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов». – Харьков. – УкрГНТЦ «Энергосталь», 2003. – Т1. – с. 89 – 97.

*Поступила в редколлегию 09.06.11*