

9. Zaharia, S. Reliability Tests [Text] / S. Zaharia, I. Martinescu // Transylvania University Press, Brasov, 2012.
10. Кузьмич, Л. Д. Ускоренные испытания вагонных конструкций на усталостную прочность. [Текст] / Л. Д. Кузьмич // Труды ВНИИВ. – 1971. – Вып. 14. – С. 31–33.
11. Деркач, Б. А. О методах определения надежности деталей ходовых частей при проектировании [Текст] / Б. А. Деркач // Труды ВНИИВ. – 1976. – Вып. 30. – С. 41–43.
12. Артамоновский, В. П. Оценка надежности модернизированных рам тяжелых электропоездов при отсутствии отказов в опытной партии. [Текст] / В. П. Артамоновский, Б. А. Деркач // Труды ВНИИВ. – 1978. – Вып. 34. – С. 51–53.
13. Мартинов, І. Е. До питання створення моделі відмов буксових роликів і шпінників. [Текст] / І. Е. Мартинов, Е. Д. Тартаковський, І. Е. Мартинов, П. А. Устич // Українська державна академія залізничного транспорту. Зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 96. – С. 154–158.
14. Мартинов, І. Е. Планування випробувань високонадійних вузлів вагонів. [Текст] / І. Е. Мартинов // Транспортні системи і технології КУЕТТ. – 2005. – № 7. – С. 79–83.
15. Мартинов, І. Е. Визначення показників надійності букс за результатами випробувань [Текст] / І. Е. Мартинов // Харків: УкрДАЗТ. – 2005. – Вип. 56 – С. 191–198.
16. Рипс, Я. А. Информационный аспект статистической оценок надежности. [Текст] / Я. А. Рипс // Автоматика и телемеханика. – 1967. – № 7. – С. 140–150.
17. Фано, Р. Передача информации [Текст] / Р. Фано. – Статистическая теория связи. – Изд-во «Мир», 1965. – 231 с.

*Представлені математичні моделі ручної шліфувальної машини ИП2014П і виконаний їх аналіз в режимах холостого і робочого ходу. Наведено результати аналізу вимог діючих стандартів до невірності мас абразивних кіл. Зроблена оцінка вібраційної безпеки праці ручної шліфувальної машини в режимах робочого і холостого ходу*

*Ключові слова: ручна шліфувальна машина, вібрації, віброшвидкість, абразивний круг, дисбаланс, математична модель*

*Представлены математические модели ручной шлифовальной машины ИП2014П и выполнен их анализ в режимах холостого и рабочего хода. Приведены результаты анализа требований действующих стандартов к неуравновешенности масс абразивных кругов. Произведена оценка вибрационной безопасности работы ручной шлифовальной машины в режимах рабочего и холостого ход*

*Ключевые слова: ручная шлифовальная машина, вибрации, виброскорость, абразивный круг, дисбаланс, математическая модель*

УДК 621.922 : 62-752

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37848

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ РУЧНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ИП2014П

**Д. В. Сталинский**

Доктор технических наук, профессор,  
генеральный директор\*  
E-mail: energostal@energostal.org.ua

**Ю. А. Сизый**

Доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник\*

**П. В. Романченко**

Начальник отдела\*  
E-mail: romanchenko@energostal.kharkov.ua

\*Государственное предприятие  
«Украинский научно-технический центр  
металлургической промышленности «Энергосталь»  
пр. Ленина, 9, г. Харьков, Украина, 61166

## 1. Введение

В условиях современного производства одним из распространенных неблагоприятных факторов внешней среды являются вибрации.

В различных отраслях народного хозяйства, таких как металлургия, машиностроение, судостроение имеют широкое распространение ручные шлифовальные машины (РШМ), применяемые для зачистки проката, сварных швов, острых кромок деталей и других операций. Работа этими машинами сопровождается вибрациями, оказывающими вредное воздействие на оператора машины.

Вибрации РШМ исследуются экспериментально, аналитически и на компьютерных моделях, которые все время совершенствуются.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Экспериментальные исследования вибраций РШМ представлены в работах [1, 2] которые показывают, что уровень вибраций РШМ превышает допустимые санитарными нормами значения в 1,7–5 раз. В работе [2] отмечено, что важнейшим источником вибра-

ций РШМ является неуравновешенность абразивного круга. Необходимо отметить, что результатов только экспериментальных исследований недостаточно для объективной оценки степени влияния различных факторов на вибрационную характеристику работы РШМ. Очевидно, что такие исследования должны проводиться на математических и компьютерных моделях.

Моделированию вибраций РШМ посвящен ряд работ авторов данной статьи. В работах [3, 4] приведены математические модели вибраций РШМ в режиме холостого хода, однако они не учитывают внешнее воздействие на РШМ, обусловленное процессом шлифования.

В работе [5] описаны модели вибраций РШМ в режимах холостого и рабочего ходов, характеризующиеся достаточно высокой степенью адекватности реальному объекту моделирования, но не учитывающие в качестве источника вибраций неуравновешенные центробежные силы деталей привода вращения круга, т. е. ротора пневмодвигателя, шпинделя и муфты, соединяющей ротор со шпинделем, кроме этого модель описанная в работе [5] не в полной мере учитывает пульсирующий характер изменения силы резания.

В связи с малыми радиальными размерами муфты и шпинделя их неуравновешенность может не учитываться, но при массе ротора  $m_{rot}=1,22$  кг незначительные смещения его тяжести от оси вращения может создать заметный уровень вибрации, что показали эксперименты исследования [6]. Этот источник вибраций будем в дальнейшем называть «внутренним» в отличие от источника вибрации неуравновешенным шлифовальным кругом называемым «внешним».

Кроме этого, анализ литературных источников [7] показал, что ротационные пневмодвигатели обладают мягкой механической характеристикой, что приводит к заметному падению частоты вращения круга при нагружении привода его вращения моментом сопротивления (резания) и должно быть учтено в исследованиях динамики работы РШМ.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является оценка вибрационной безопасности работы РШМ в режимах холостого и рабочего хода с абразивными кругами, изготовленными по существующей технологии формообразования и отвечающими действующим требованиям к дисбалансу.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработка математической и компьютерной модели РШМ в режиме холостого хода с учетом центробежных сил ротора пневмодвигателя.
2. Разработка математической и компьютерной модели РШМ в режиме рабочего хода с учетом центробежных сил ротора пневмодвигателя и пульсирующего характера изменения силы резания.
3. Анализ результатов моделирования вибраций РШМ модели ИП2014П в режимах холостого и рабочего хода.

### 4. Моделирование вибраций РШМ в режимах холостого и рабочего хода с учетом динамики привода и пульсирующего характера силы резания

Для учета в качестве источника вибраций РШМ неуравновешенных центробежных сил деталей привода вращения круга, т. е. ротора пневмодвигателя, шпинделя и муфты, соединяющей ротор со шпинделем, модель описанная в работе [5] дополнена моделью динамики привода вращательного движения.

Графическая модель системы «абразивный круг – РШМ – оператор», представлен на рис. 1 отличается от описанной в [5] тем, что в точке  $O_1$  приложена центробежная сила  $F_1$  неуравновешенного ротора пневмодвигателя.

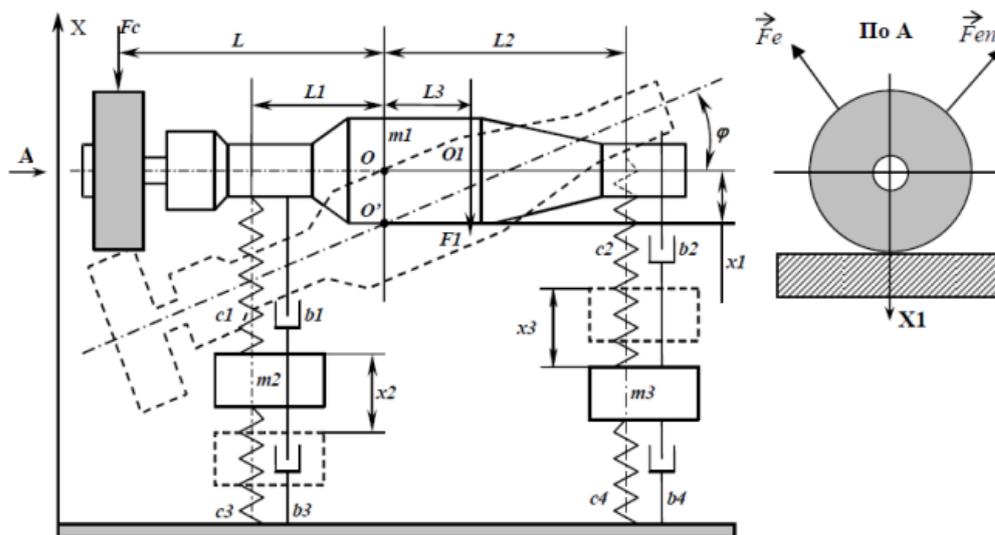


Рис. 1. Графическая модель динамической системы «Абразивный круг – РШМ – Оператор»

На приведенной схеме (рис. 1) имеются следующие обозначения:  $m_1, m_2, m_3$  – массы РШМ, левой и правой рук оператора;  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – жесткости пружин соединяющих руки оператора с РШМ и телом оператора;  $b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты демпфирования в связях рук оператора с РШМ и телом;  $X_1, X_2, X_3$  – координаты поступательного перемещения РШМ, левой и правой рук оператора и угловая координата  $\varphi$  вращательного движения РШМ вокруг центра тяжести (точка  $O$ ).

На виде по стрелке  $A$  условно показаны векторы центробежных сил от эксцентрисичности круга  $\vec{F}_c$ , непараллельности его торцев  $\vec{F}_{en}$ , прижима круга к зачи-

щаемой поверхности  $F_{pr}$  и сила резания  $F_p$ . На главном виде показана сила

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_{en}. \quad (1)$$

В [5] описана математическая модель вибрации РШМ, которая при учете «внутреннего» источника вибраций будет следующей:

$$\left\{ \begin{aligned} I\ddot{\phi} + b_1\dot{q}_1 - b_2\dot{q}_2 + c_1q_1 - c_2q_2 &= F_e l - F_1 l_3, \\ m_1\ddot{x}_1 + b_1\dot{q}_1 + b_2\dot{q}_2 + c_1q_1 + c_2q_2 &= F_e + F, \\ m_2\ddot{x}_2 - b_1\dot{q}_1 + b_3\dot{x}_2 - c_1q_1 + c_3x_2 &= 0, \\ m_3\ddot{x}_3 + b_2\dot{q}_2 + b_4\dot{x}_3 + c_2q_2 + c_4x_3 &= 0. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Обозначения  $q_1 = X_1 + \phi \cdot l_2 - X_2$ ;  $q_2 = X_1 - \phi \cdot l_2 + X_3$  имеют ясный физический смысл – это упруго диссипативные связи левой и правой рук оператора с РШМ соответственно.

Для моделирования вибраций РШМ коэффициента жесткости и демпфирования для средней напряженности мышц оператора взяты из [8]:  $C_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ ,  $C_2 = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ ,  $C_3 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$ ,  $C_4 = 3,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$ ,  $b_1 = 430 \text{ Н·с/м}$ ,  $b_2 = 690 \text{ Н·с/м}$ ,  $b_3 = 400 \text{ Н·с/м}$ ,  $b_4 = 450 \text{ Н·с/м}$ . Значения масс рук оператора  $m_2 = 3,1 \text{ кг}$ ,  $m_3 = 3,6 \text{ кг}$ .

Измерениями и расчетом определены положения рук оператора, источников вибраций (шлифовального круга и ротора пневмодвигателя) относительно центра тяжести РШМ ИП2014П, а также момент инерции и масса машины с кругом и без круга. Эти данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные и измеренные параметры РШМ ИП2014П

РШМ	Параметры					
	Масса, кг	Момент инерции $I$ кг·м <sup>2</sup>	$L$ , мм	$L_1$ , мм	$L_2$ , мм	$L_3$ , мм
РШМ ИП2014П с кругом ПП 150x25x32	6,0	0,053	165	30	230	90
РШМ ИП2014П без круга и деталей его крепления	4,5	0,038	–	90	170	30

Для удобства анализа вибраций РШМ созданы две компьютерные модели отдельно для машины в режиме холостого хода и в режиме рабочего хода.

Общая блок-схема программы решения системы управления (2) в пакете «VisSim» для режима холостого хода такая же, как и в [5]. Отличия состоят в Compaund блоках «Angle move» и «Machine move», моделирующих перемещения РШМ по координатам  $\phi$  и  $x_1$  соответственно. В этих блоках добавлены воздействия от «внутреннего» источника вибраций: –  $F_1 \cdot L_3$  и  $F_1$  (см. уравнение 2).

Чтобы учесть внутренний источник вибраций необходимо было его идентифицировать. При известной массе ротора  $m_{rot} = 1,22 \text{ кг}$  для определения  $F_1$  необходимо знать  $r$  – смещение центра тяжести ротора относительно его оси вращения.

В экспериментах [6] измерен уровень вибраций левой рукоятки РШМ, определяемый среднеквадратическим значением (СКЗ) виброскорости  $V_{скз}$ , он равен 20 мм/с.

Воспроизводя на модели условия работы РШМ в режиме холостого хода без круга и деталей его крепления, можно подобрать такое значение  $r$ , которое создаст центробежную силу  $F_1$ , вызывающую  $V_{скз} = 20 \text{ мм/с}$ .

На рис. 2 приведена блок-схема программы таких условий, т. е. условий, когда действует на РШМ только сила  $F_1$  и подобранное значение обеспечило значение  $V_{скз} = 19,898 \text{ мм/с}$ , т. е. примерно равное 20 мм/с. В дальнейших исследованиях принимались полученные параметры внутреннего источника вибраций  $m_{rot} = 1,22 \text{ кг}$  и  $r = 0,2 \text{ мм}$ .

Таким образом получена виртуальная, компьютерная модель вибраций РШМ, скорректированная по экспериментальным исследованиям. Этим самым не только найден неизвестный параметр модели  $r$ , но и достигнута адекватность всей модели вибраций РШМ в режиме холостого хода.

Центробежная сила от внутреннего источника вибраций описана следующим образом:

$$F_1 = r \cdot m_{rot} \cdot \omega^2 \cos(\omega t + \beta). \quad (3)$$

В (3) учтено отклонение вектора  $F_1$  от вектора  $\vec{F}_e$  на угол  $\beta$ . Кроме этого в модели (рис. 2) учтено взаимное положение векторов  $\vec{F}_e$  и  $\vec{F}_1$  углом  $\alpha_1$ .

Экспериментальные исследования вибраций РШМ ИП2014П в режиме холостого хода с кругом производились на частоте ее вращения 5100 об/мин (85 об/с), что соответствует скорости шлифования кругом  $\varnothing 150 \text{ мм}$  равной 40 м/с. Для этих условий допустимое СКЗ виброскорости согласно санитарных норм, т. е. ГОСТ17770-86 [9] равно 25 мм/с, а допустимый дисбаланс круга согласно ГОСТ 23182-78 [10]  $m_d = 0,004$ ,  $m_{кр} = 0,004 \cdot 1,139 \text{ кг} + 0,0045 \text{ кг}$  на его радиусе  $R = 75 \text{ мм}$ . Такой дисбаланс создает центробежную силу

$$F = m_d \cdot R \cdot \omega \cos \omega t = 97,43 \cdot \cos \omega t,$$

где  $\omega = \frac{5100 \cdot 2\pi}{60} = 534 \text{ рад/с}$ .

При таком воздействии и различных значениях угла  $\beta$  между векторами  $F$  и  $F_1$  получены значения  $V_{скз}$ , приведенные в табл. 2.

Из этой таблицы видно, что  $V_{скз}$  изменяется от 24,3 мм/с до 43,6 мм/с, что в среднем превышает допустимое значение СКЗ виброскорости на 9 мм/с.

В литературе [1] приводятся значения СКЗ вибрации на холостом ходу без круга для РШМ ИП2011 и С-475Б, С-499А, которые не превышают величины 0,6 см/с. Эти значения более чем в три раза меньше измеренного экспериментально для РШМ ИП2014П [6]. В связи с этим можно предположить о некачественном экземпляре машины, подвергнутом экспериментальным исследованиям.

Таблица 2

Значения  $V_{скз}$ , мм/с зависимости от  $\beta$  и  $r$  при холостом ходе

$\beta$ , рад	$R = 0,2 \text{ мм}$	$R = 0,06 \text{ мм}$
0	43,6	36,7
1,57	32,3	33
3,14	24,3	30,9
4,7	37,9	34

Если принять  $r = 0,06 \text{ мм}$ , т. е. в три раза меньше чем 0,2 мм, то при допустимом дисбалансе круга, формирующем центробежную силу  $F = 97,43 \cdot \cos \omega t$

( $\omega=534$  рад/с) получим на модели изменение  $V_{скл}$  в диапазоне от 30,9 мм/с до 36,7 мм/с (табл. 2), т. е. превышение 25 мм/с в среднем равно 8,6 мм/с. Таким образом, и значительное уменьшение дисбаланса ротора не гарантирует обеспечение санитарных норм при допустимом значении дисбаланса круга.

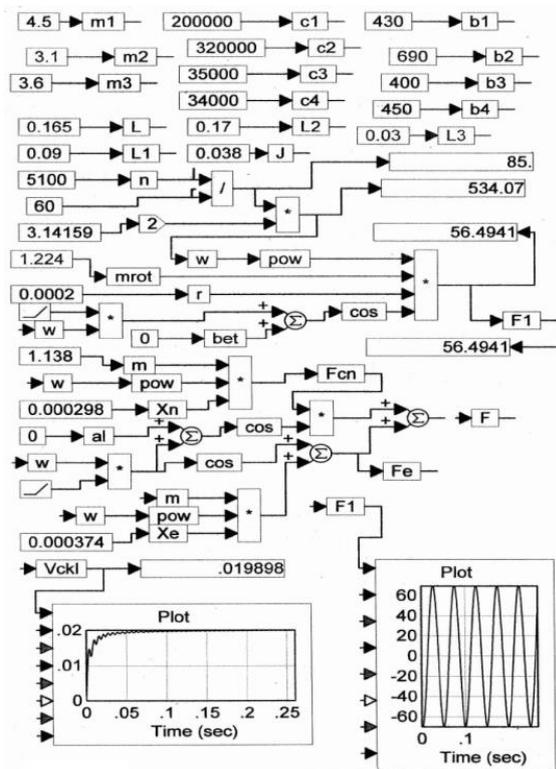


Рис. 2. Распечатка Compaund блока Initial data при моделировании колебаний РШМ в режиме холостого хода без круга

Очевидно, что достичь уменьшения вибраций до допустимого уровня санитарными нормами можно только уменьшением дисбаланса круга, а значит увеличением точности его формообразования при изготовлении.

В отличие от модели РШМ в режиме холостого хода модель РШМ в режиме рабочего хода в общей своей структуре отличается тем, что вместо Compaund блока «Initial data» введены два Compaund блока «Внешнего воздействия» и «Постоянные данные». Таким образом, общая структура модели с блок-схемой расчета  $V_{скл}$  и  $V_{скр}$  выглядит так, как показано на рис. 3.

В Compaund блоке «Постоянные данные» вводятся все неизменные параметры модели РШМ ИП2014П с кругом ПП 150x25x32.

Основное отличие модели РШМ в режиме рабочего хода от режима холостого хода заложено в Compaund блоке «Внешнего воздействия», учитывающем разгон и торможение вращательного движения шлифовального круга при изменении на нем момента сопротивления, составляющей силы шлифования  $F_y$  и внешних воздействий  $F$  и  $F_1$ . Моделирование вышеуказанных составляющих Compaund блока «Внешнее воздействие» приведено на рис. 4–6, соответственно.

В этом блоке кроме постоянных данных «работают» условия шлифования с максимальной эксцентricностью ( $X_e=0,3996$  мм) и не параллельностью торцов

( $X_{п}=0,298$  мм) круга ПП 150x25x32, которые полечены размерным анализом прессформы формирующей размеры круга при существующей на производстве кругов технологии формообразования. В этом же Compaund блоке эксцентricность ротора  $X_{rot}=0,06$  мм, углы между векторами сил внешнего и внутреннего источников вибраций взяты равными  $\alpha_1=3,14$  рад,  $\beta=0$  рад.

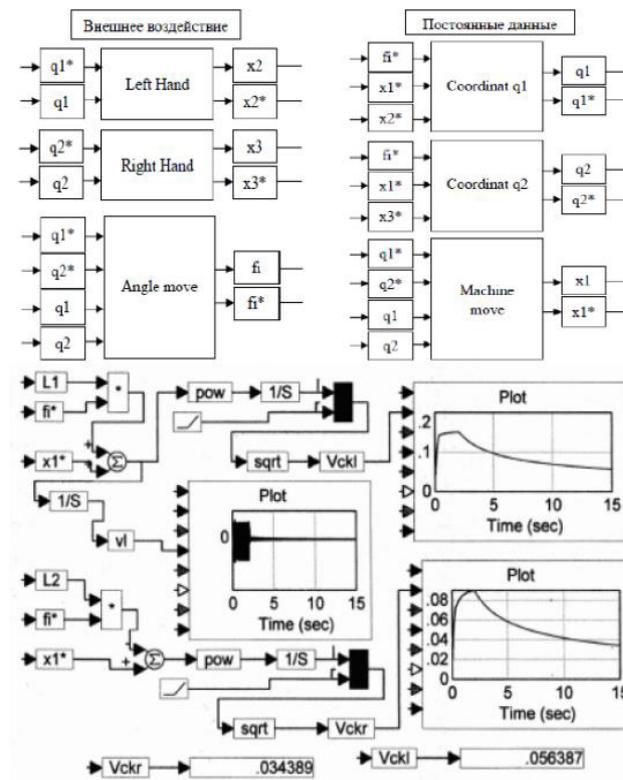


Рис. 3. Структура модели РШМ в режиме рабочего хода с блок-схемой расчета  $V_{скл}$  и  $V_{скр}$

Упомянутое основное отличие модели РШМ в режиме рабочего хода от режима холостого хода состоит в том, что в Compaund блоке реализованы модели вращательного движения РШМ и процесса шлифования с определением составляющих силы резания: окружной  $F_{рез}$  и нормальной  $F_y$ .

Для составления модели динамики привода вращательного движения РШМ использованы данные механической характеристики ротационного пневмодвигателя приведены в [1]:

$$M_d \cdot K = \omega_0 - \omega_1, \tag{4}$$

где  $M_d$  – момент движущий (развиваемый) пневмодвигателем;  $\omega_0$  – установившееся (настраиваемое) значение угловой скорости;  $\omega_1$  – угловая скорость как функция времени; значение коэффициента  $K$  принято равным 26 рад/с·Н·М, что соответствует давлению воздуха в пневмосети РШМ равна 50 н/м<sup>2</sup> [7].

Если к уравнению (4) добавить уравнение движения двигателя:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_c \tag{5}$$

и вместо  $M_d$  поставить его значение из (4), то получим:

$$I\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{K} - \frac{\omega}{K} - M_c, \quad (6)$$

где  $I$  – момент инерции всех вращающихся деталей привода, приведенных к шпинделю РШМ, кгм<sup>2</sup>;  $M_c = F_{рез} \cdot R_{кр}$  – момент сопротивления (момент силы резания);  $R_{кр}$  – радиус круга.

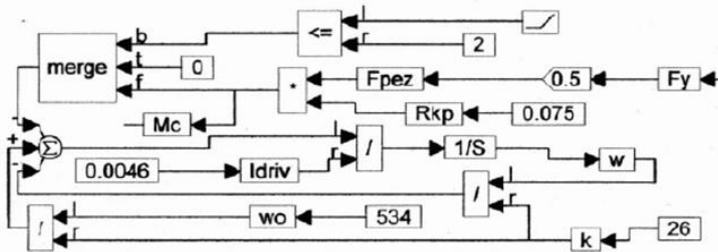


Рис. 4. Simulink блок «Внешнее воздействие». Разгон и торможение вращательного движения шлифовального круга при изменении на нем момента сопротивления

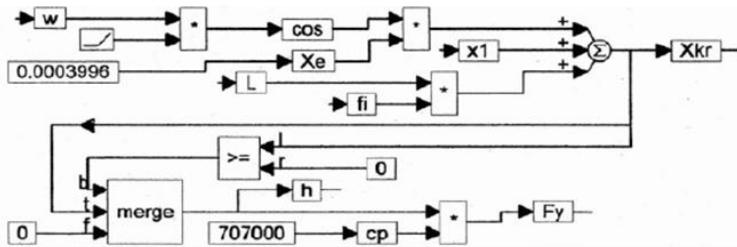


Рис. 5. Simulink блок «Внешнее воздействие». Расчет составляющей силы шлифования  $F_y$

Уравнение (6) реализовано блок-схемой программы, приведенной на рис. 4. В этой схеме принято  $\omega_0 = 534$  рад/с, т. е. угловая скорость, настраиваемая в режиме холостого хода. Момент инерции  $I$  вращающихся деталей РШМ с кругом ПП 150x25x32 и деталями его крепления на шпинделе РШМ, обозначенный на рис. 4 как  $I_{driv}$ , рассчитан согласно размеров деталей привода и их масс и равен 0,0046 кг·м<sup>2</sup>.

В программе рис. 4 реализована обычная для практики ситуация, когда РШМ включается на холостом ходу, а затем производится шлифование. Для используются стандартные блоки «VisSim» «merge» и «больше или равно». В приведенной схеме  $M_c$  будет прикладываться к кругу через две секунды.

На рис. 7 приведен график изменения угловой скорости шлифовального круга  $\omega$ . Сначала РШМ на холостом ходу разгоняется до  $\omega = 534$  рад/с, а затем, через 2 сек, круг начинает шлифовать и РШМ теряет обороты примерно до 435 рад/с. При этом видно, что в режиме рабочего хода угловая скорость РШМ колеблется, что связано с колебаниями силы резания.

Программа моделирования нормальной составляющей  $F_y$  силы резания приведена на рис. 5, для чего и использована зависимость  $F_y = C_p \cdot h$ , взятая из экспериментальных исследований [11] обдирочного шлифования по упругой схеме кругом ПП 300x30x75

и скорректированная для круга ПП 150x25x32, так как это сделано в [6]. При этом получено  $C_p = 707$  н/мм.

В программе на рис. 5 сила  $F_y$ , формируемая не только усилием прижима  $F_{пр}$ , а и кинематикой вращения круга с радиальным биением его наружной поверхности.

Перемещение режущей поверхности круга по нормам к шлифуемой поверхности  $X_{кр}$  описывается следующим выражением:

$$X_{кр} = X_1 + L \cdot \varphi + X_{e \cos \omega t}. \quad (7)$$

Круг будет резать, когда  $X_{кр} > 0$ , а это и будет глубина шлифования  $h$ .

Принимаем, что окружная сила резания  $F_{рез}$  в два раза меньше радиальной. Такое соотношение между  $F_y$  и  $F_{рез}$  типично для обдирочного шлифования. Сила  $F_{рез}$  является входным сигналом в блок-схему рис. 4 для моделирования момента сопротивления  $M_c$ .

На рис. 8, 9 показаны графики сигналов  $h$  и  $F_{рез}$ , соответственно. Из этих графиков виден сложный, пульсирующий характер изменений глубины резания  $h$ , значения которой меняются от нуля до 0,18 мм, а сила резания  $F_{рез}$  меняется от нуля до 55 Н.

Инерционность вращения частей привода вращения сглаживает колебания частоты  $\omega$  вращения круга и она устанавливается на каком-то уровне примерно с равным 435 рад/с, т. е. ниже  $\omega_0 = 534$  рад/с.

Приведенные условия моделирования вибраций РШМ на рабочем ходе соответствуют наибольшим значениям эксцентricности круга  $X_e = 0,3996$  мм и непараллельности его торцов  $X_{п} = 0,248$  мм, а также значениям угла  $\alpha = 3,14$  рад и  $\beta = 0$ . При этих условиях  $V_{скл} = 56,3$  мм/с, а  $V_{скр} = 34,38$  мм/с.

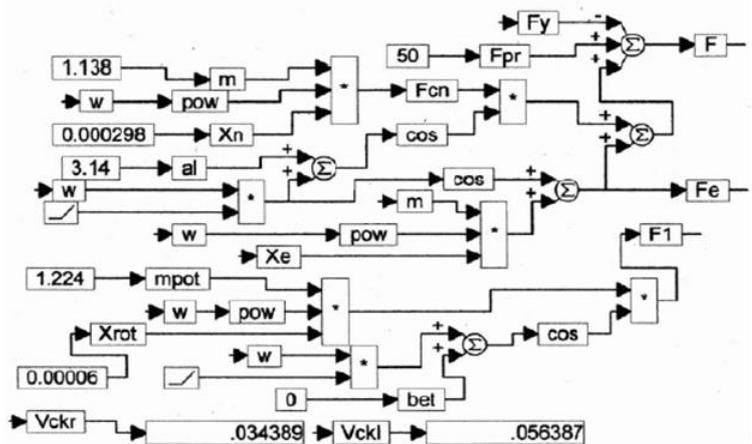


Рис. 6. Simulink блок «Внешнее воздействие». Моделирование внешних воздействий  $F$  и  $F_1$

Необходимо отметить, что влияние угла  $\alpha_1$  (на рис. 6 он обозначен как  $\alpha$ ) очень велико  $V_{скл}$ . Если при холостом ходе изменение  $\alpha_1$  в диапазоне  $0 \div 6,28$  рад ведет к изменению  $V_{скл}$  в диапазоне 16 мм/с, то в режиме рабочего хода этот диапазон увеличивается до 30 мм/с (от 26 мм/с до 56 мм/с). Наибольшее значение  $V_{скл}$  имеет место при  $\alpha_1 = 3,14$  рад/с, т. е. при противо-

положном направлении векторов центробежных сил от погрешностей формы круга и его установки на шпиндель РШМ. Такой факт имеет четкое физическое объяснение.

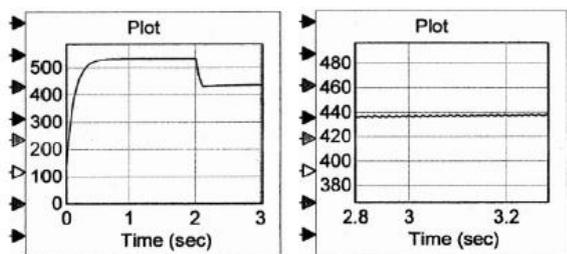


Рис. 7. График угловой скорости круга  $\omega$ , рад/с

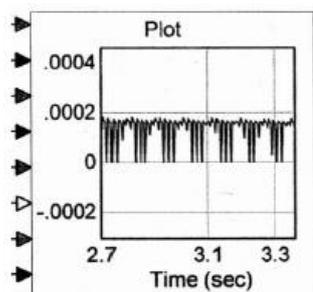


Рис. 8. График глубины шлифования  $h$ , м

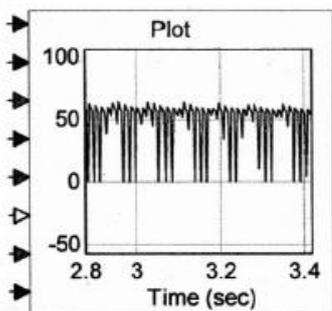


Рис. 9. График окружной силы резания  $F_{рез}$ , Н

Когда вектора  $X_e$  и  $X_p$  имеют одинаковое направление ( $\alpha_1=0$ ), т.е. складываются, то сила резания  $F_y$ , направленная против этой суммы как бы «гасит» колебания РШМ. Когда же эти вектора имеют противоположное направление ( $\alpha_1=3,14$ ), то сила резания  $F_y$  «гасит» только одну из центробежных сил, т.е. суммарная сила внешнего воздействия  $F$  от погрешностей формы круга будет больше, чем ее значение при  $\alpha=0$ . Это хорошо видно из графиков силы  $F$  на рис. 10, 11.

При  $\alpha_1=0$  сила  $F$  колеблется в диапазоне (-30÷200) Н, а при  $\alpha_1=3,14$  сила  $F$  колеблется в диапазоне (-12÷128) Н.

Влияние угла  $\beta$  на  $V_{скл}$  незначительно, т.е. направления вектора неуравновешенности ротора пневмодвигателя  $F_1$  невелико в диапазоне  $V_{скл} \approx 3$  мм/с, так как само значение смещения ротора от оси его вращения принято небольшим ( $X_{рот}=0,06$  мм).

Полезно сравнить уровень вибрации РШМ в режимах холостого и рабочего хода. В режиме холостого хода  $V_{скл}$  колеблется с изменением углов  $\alpha_1$  и  $\beta$  в диапазоне (33÷49) мм/с, а в режиме рабочего хода – в

диапазоне (26÷56) мм/с, при прочих одинаковых условиях (одинаковой неуравновешенности круга и ротора пневмодвигателя). Диапазон колебаний вибрации в режиме рабочего хода больше, чем в режиме холостого, однако средний их уровень примерно одинаков, что наблюдалось и при экспериментальных исследованиях [6]. Это еще раз косвенно подтверждает адекватность разработанной математической модели.

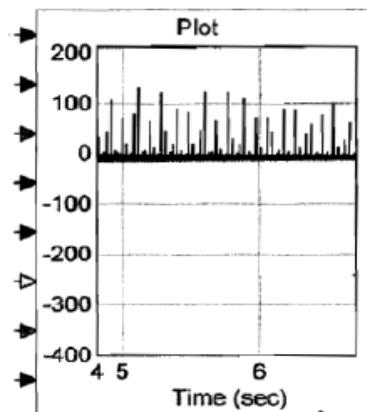


Рис. 10. График изменения суммарной силы  $F$  внешнего воздействия от центробежных сил, создаваемых кругом и нормальной составляющей силы резания  $F_y$  при  $\alpha_1=3,14$  рад

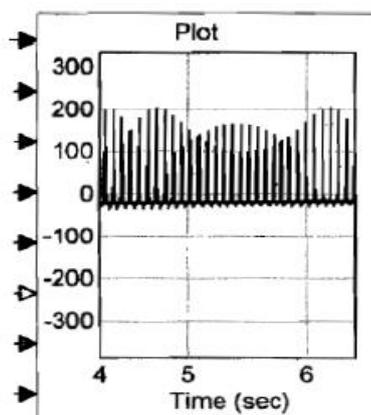


Рис. 11. График изменения суммарной силы  $F$  внешнего воздействия от центробежных сил, создаваемых кругом и нормальной составляющей силы резания  $F_y$  при  $\alpha_1=0$

### 5. Выводы

1. Разработаны математические и компьютерные модели РШМ в режиме холостого и рабочего хода, представляющие РШМ как жесткую цельную конструкцию, совершающую при вибрациях как поступательное, так и вращательное вокруг центра тяжести движения под действием центробежных сил неуравновешенного круга и ротора пневмодвигателя.

2. Используя результаты экспериментального исследования вибраций в режиме холостого хода без

круга для РШМ ИП-2014П, откорректирована компьютерная модель, чем достигнута ее адекватность с реальным объектом моделирования.

3. Установлено моделированием вибраций на левой рукоятке РШМ в режиме холостого хода, что дисбаланс круга равный 0,004 мкр на его радиусе 75 мм, т. е. при предельно допустимом его значении согласно ГОСТ 23182-78 не гарантирует выполнение санитарных норм.

4. Разработаны математическая и компьютерная модели вибрации РШМ в режиме рабочего хода, учитывающие динамику приводов вращательного движения и пульсирующий характер изменения силы

резания, обусловленный радиальным биением круга и центробежными силами его неуравновешенности.

5. Установлено, что при существующей технологии формообразования круга ПП 150x25x32 максимальная погрешность формы круга и установки его на шпиндель РШМ ведут к возбуждению вибраций на левой рукоятке РШМ в режиме холостого хода в диапазоне (33÷49) мм/с, а в режиме рабочего хода в диапазоне (26÷56) мм/с, что в среднем в 1,6 раза превышает санитарные нормы.

6. Выполнение санитарных норм по уровню вибраций возможен только при значительном увеличении точности формообразования круга и его установки на шпиндель РШМ.

#### Литература

1. Микулинский, А. М. Защита от вибраций при работе с пневматическими шлифовальными машинами [Текст] / А. М. Микулинский, Г. А. Стариков, Л. С. Шейман. – М.: Машиностроение, 1976. – 84 с.
2. Страмцов, В. Ю. О влиянии абразивных кругов на вибрацию ручных шлифовальных машин [Текст]: науч.-техн. реф. сб. / В. Ю. Страмцов, Я. Г. Готлиб // Механизированный инструмент и отделочные машины. – М., 1969. – Вып. 2.
3. Сталинский, Д. В. Влияние неуравновешенности масс абразивных кругов на вибрационную характеристику работы ручных шлифовальных машин [Текст] / Д. В. Сталинский, Ю. А. Сизый, Л. Г. Яровая, П. В. Романченко // Экология та виробництво. – 2002. – № -3. – С. 53–56.
4. Сталинский, Д. В. УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков, Украина Влияние точности изготовления и эксплуатационных свойств абразивного инструмента на условия работы операторов ручных шлифовальных машин [Текст]: сб. научн. статей к XI Межд. науч.-тех. конф. / Д. В. Сталинский, Л. Г. Яровая, П. В. Романченко // Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов. – 2003. – Т. 1. – С. 89–97.
5. Сталинский, Д. В. Вибрации ручной шлифовальной машины при рабочем и холостом ходе [Текст] / Д. В. Сталинский, П. В. Романченко, Ю. А. Сизый // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – № 40. – С. 3–8.
6. Сталинский, Д. В. Экспериментальные исследования вибрационной характеристики ручных шлифовальных машин [Текст]: тр. 19-й межд. науч.-прак. конф. / Д. В. Сталинский, Ю. А. Сизый, П. В. Романченко, Ю. Н. Любимый // Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ГП ХМЗ «ФЕД», 2014. – С. 21–29.
7. Исследование явления обледенения ручных пневматических инструментов [Текст] / Механизированный инструмент и отделочные машины. – 1969. – Вып. 2. – С. 24–43.
8. Васильев, Ю. М. О механическом импедансе согнутой руки человека [Текст] / Ю. М. Васильев, А. Г. Борисов // Научные работы институтов охраны труда ВУСПС. – М.: Профиздат, 1968. – Вып. 52.
9. ГОСТ 17770-86. Машины ручные. Требования к вибрационным характеристикам [Текст] / Взамен ГОСТ 17770-72. – 10 с.
10. ГОСТ 23182-78. (СТ СЭВ 559-77) Круги шлифовальные для ручных машин. Технические условия [Текст] / Термины и определения – по ГОСТ 21445–75. – 6 с.
11. Сталинский, Д. В. Оптимальное проектирование динамических систем обдирочно-шлифовальных станков [Текст] / Д. В. Сталинский, Ю. А. Сизый. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 113 с.