

*Е.А. ВЛАДЕЦКАЯ, С.М. БРАТАН*, д-р техн. наук,  
*А.О. ХАРЧЕНКО*, канд. техн. наук, Севастополь, Украина

## **ПОВЫШЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ ПЛАВУЧИХ РЕМОНТНЫХ МАСТЕРСКИХ**

Розглянуто особливості вібраційних взаємодій верстата в умовах роботи плавучої ремонтної майстерні, наведено аналіз впливання зовнішнього середовища на її плавучу основу, розроблено динамічну модель технологічної системи верстата, а також наведено нову конструкцію віброізолюючого пристрою металорізального верстата для вказаних умов.

Ключові слова: технологічна система, шліфувальний верстат, плавуча ремонтна майстерня, вібраційні взаємодії, вібростійкість, віброізолюючий пристрій.

Рассмотрены особенности эксплуатации механообрабатывающего оборудования плавучей ремонтной мастерской при наличии воздействий как окружающей среды, так и внешнего оборудования. Приведенный в работе анализ позволяет выявить пути снижения влияния вибрационных воздействий на технологическую систему шлифовального станка.

Ключевые слова: технологическая система, шлифовальный станок, плавучая ремонтная мастерская, вибрационные взаимодействия, виброустойчивость, виброизолирующие устройства.

The features of vibration influence on grinding machine mounted in floating repair shop were presented. Moreover the analysis of environmental impacts on floating repair shop hull was given. Developed a dynamic model of the technological system of machine, and also shown the new design of vibration isolation device for these conditions.

Key words: technologic system, grinding machine, floating workshop, vibration interference, vibration stability, vibration isolation device.

В судостроении и в судоремонтной отрасли широкое применение находят такие передвижные механические комплексы, как плавучие ремонтные мастерские (ПРМ) (рисунок 1), на палубах которых размещены различные участки, в том числе и механообрабатывающие, включающие практически все виды станочного оборудования (рисунок 2). Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных действием различных источников, приводящее к снижению точности и чистоты обработки, а также и к другим нарушениям технологических процессов.

Наличие колебаний в отклонениях расположения шероховатости поверхности объясняются возмущающими воздействиями в технологических процессах, вызванных нестабильностью технологической системы. Нестабильность параметров деталей определяется воздействием в процессе их производства на технологическую систему (ТС) изменяющихся внешних факторов, часть из которых неизвестна и не контролируется в процессе обработки. Эта проблема особенно актуальна для условий работы оборудования в ПРМ.



Рисунок 1 – Общий вид плавучей ремонтной мастерской (ПРМ) судоремонтного завода (г. Севастополь)

При системном анализе динамической системы оборудования плавучей ремонтной мастерской кроме воздействий внешнего оборудования, характерных для работы в стационарных условиях участка (цеха), таких как компрессоры, вентиляторы, насосы, транспортно-загрузочные устройства, создающих гармоническое воздействие на основание с частотой вращения приводных двигателей ( $f = 12 \dots 48,5 \text{ с}^{-1}$ ) и оборудование, создающее импульсное воздействие на основание – прессовое, долбежные и строгальные станки, необходимо учитывать такие воздействия внешней среды, как колебания водной поверхности, передающие вибрационные воздействия через плавучее основание и поверхность палубы на оборудование.

При декомпозиции механической обработки в ПРМ выделяют подсистемы: «Источник колебаний» и подсистема «Объект виброзащиты», которые соединены между собой связями, вызывающими колебания объекта от динамических воздействий. Знакопеременные напряжения, вызванные вибрационными воздействиями, приводят к накоплению повреждений в материале, что вызывает появление усталостных трещин и разрушения. Кроме усталостных разрушений в механических системах наблюдаются

такие явления, как ослабление неподвижных соединений, смещение сопряженных поверхностей соединений деталей машин; при этом происходит изменение структуры поверхностных слоев сопрягаемых деталей, их износ и, как результат, уменьшение силы трения в соединении, что вызывает изменение диссипативных свойств объекта, смещает его собственные частоты и т.п.



Рисунок 2 – Технологическое оборудование механообрабатывающих участков ПРМ

Процесс влияния возмущений на технологическую систему металлорежущего станка представлен на рисунке 3. На схеме стрелками и цифрами 0...8 показаны направления и последовательность колебаний, возбуждаемых соответственно внешней средой, плавучим основанием, внешним оборудованием, поверхностью палубы, а также станиной станка и его узлами и системами. Стрелками и цифрами 9...19 обозначены направления и последовательность передачи колебаний от самовозбуждения (колебания и вибрации в зоне резания и работы приводов). Стрелки и цифры 9'...12' указывают на передачу вибраций от силовых приводов.

Так, в системе металлорежущего станка (например, круглошлифовального) при его работе происходят сложные вибрационные воздействия, как стационарные, так и нестационарные, в результате колебательных процессов (кинетических и силовых). Можно предположить также наличие ударных воздействий – механических кратковременных в результате работы внешнего оборудования одновременно с процессом обработки, а также длительного действия за счет качки при колебаниях водной поверхности, передаваемых плавучим основанием через поверхность палубы технологическому оборудованию.

Период работы оборудования должен обеспечиваться удержанием плавучей ремонтной мастерской в заданном месте в условиях воздействия

внешней среды – ветра, течения и морского волнения. В случае прекращения мер по удержанию, возмущающие силы могут привести к приостановке работ, к аварийным ситуациям и к выходу из строя технологического оборудования. На основании вышеизложенного цель настоящей работы заключается в выявлении путей снижения влияния шумов возбуждений, связанных как с внутренними, так и с внешними источниками колебаний ТС в условиях ПРМ.

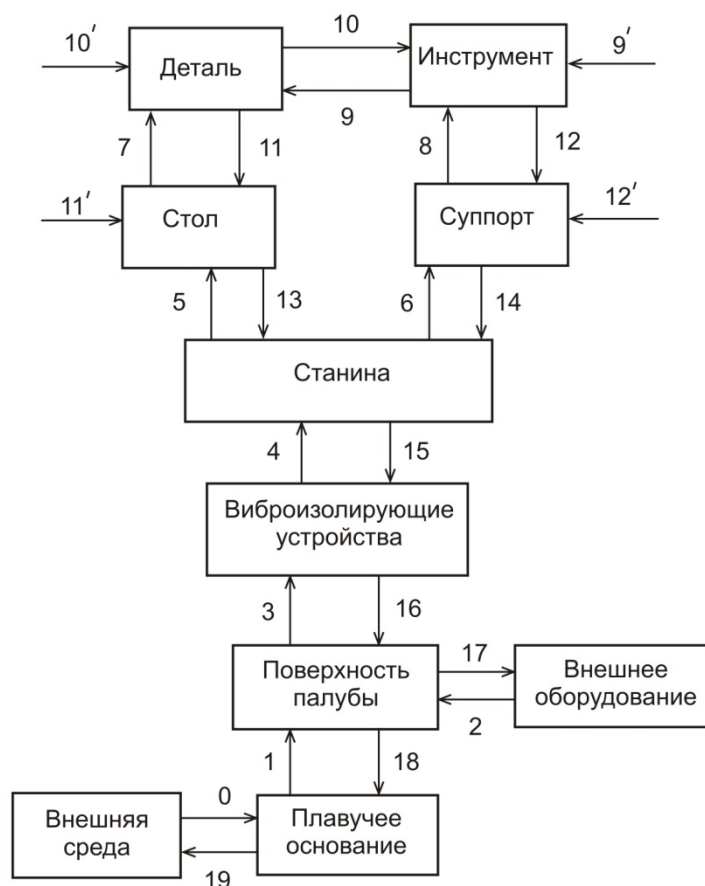


Рисунок 3 – Схема вибрационных взаимодействий системы станка в условиях работы ПРМ

Для обеспечения работоспособности оборудования необходимо создавать возможность компенсации колебаний, создаваемых технологическим оборудованием. В результате внешних возмущений, которые определяются сезонными условиями заданных акваторий. В час  $\kappa_{\xi}$ ,  $\kappa_{\eta}$ ,  $\kappa_{\zeta}$ ,  $\kappa_{\theta}$ ,  $\kappa_{\psi}$  – редуцированные коэффициенты поперечно-горизонтальной, продольно-горизонтальной, вертикальной, бортовой и килевой качки соответственно;  $V$  – водоизмещение ПРМ;  $\rho$ ,  $g$  – удельная плотность воды и ускорение силы тяжести;  $k$  – волновое число,  $k \cong w^2/g$ ;  $S$  – площадь ватерлинии;  $h$ ,  $H$  –

малый и большой метацентрический радиус судна;  $w$  – круговая частота волнения;  $r(t)$  – ордината волнового профиля;  $t$  – время.

Редукционные коэффициенты могут быть определены либо путем испытания масштабных моделей в опытовых бассейнах, либо путем интегрирования расчетных полей давления в взволнованной жидкости по объемам, занимаемым судовыми корпусами и их поверхностями [2]. Такие операции производятся обычно при помощи номограмм, либо с учетом параболической, либо интегральной интерполяции.

Для определения динамических характеристик несущей системы, а именно, амплитудно-частотных и амплитудно-фазовых частотных характеристик, необходимо наличие динамических моделей технологических систем (ТС) станка, которые могут быть построены на основе конкретной расчетной схемы.

Так, для круглошлифовального станка модели 3М151 расчетная схема приведена в работе [3]. Однако в реальности такие многомассовые системы представляют собой довольно сложные и громоздкие математические модели, в связи с чем их заменяют упрощенными эквивалентными схемами. Одна из таких предложенных схем [4] позволяет проиллюстрировать динамику перемещений центров круга, заготовки и изменения фактической глубины резания в процессе круглого наружного шлифования.

В работе [4] на основе принципа возможных перемещений, для системы построена ее модель в виде совокупности дифференциальных уравнений, характеризующих динамику перемещений центров круга, заготовки и изменения фактической глубины резания.

Для исходного положения заготовки в момент начала ее контакта с инструментом ( $L_0 = R_0 + r_0$ ;  $S_0 = 0$ ;  $x_{10} = 0$ ;  $x_{20} = 0$ ;  $t_f = 0$ ) система уравнений в отклонениях запишется:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3 (\dot{x}_1 + \dot{R}) + c_3 (x_1 + \Delta R) - \\ - h_3 (\dot{x}_2 - \dot{r}) - c_3 (x_2 - \Delta r) - h_1 \dot{S} - c_1 S = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 + h_3 (\dot{x}_2 - \dot{r}) + c_3 (x_2 - \Delta r) - \\ - h_3 (\dot{x}_1 + \dot{R}) - c_3 (x_1 + \Delta R) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Вследствие вращения круга и заготовки вариации геометрических размеров имеют периодический или почти периодический характер, что и объясняет появление внутренних возбуждающих сил, в существенной степени определяющих динамику процесса шлифования.

Для решения задач моделирования динамики процесса целесообразно записать систему (16) совместно с уравнением наблюдений. В матричной форме пространства состояний система (16) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_0 &= A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot \Psi + C_0 \cdot U; \\ Z_0 &= E_0 \cdot Y_0 + F_0 \cdot V_0; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{где } \dot{Y}_0 = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix}, Y_0 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}, A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1 + c_3}{m_1} & -\frac{h_1 + h_3}{m_1} & \frac{c_3}{m_1} & \frac{h_3}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_3}{m_2} & \frac{h_3}{m_2} & -\frac{c_2 + c_3}{m_2} & -\frac{h_2 + h_3}{m_2} \end{bmatrix},$$

$$U = \begin{bmatrix} S \\ \dot{S} \end{bmatrix}, \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix}, \Psi_1 = [\Delta R + \Delta r], \Psi_2 = [\dot{R} + \dot{r}],$$

$$B_{01} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{c_3}{m_1} \\ 0 \\ \frac{c_3}{m_2} \end{bmatrix}, B_{02} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{h_3}{m_1} \\ 0 \\ \frac{h_3}{m_2} \end{bmatrix}, C_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{c_1}{m_1} & \frac{h_1}{m_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_0 = [B_{01} \quad B_{02}],$$

где  $Y_0$  – вектор (матрица-столбец), представляющая вектор состояния системы,  $\dot{Y}_0$  – вектор производных состояний системы,  $A_0$  – матрица, характеризующая динамические свойства системы,  $B_0$  – матрица параметров влияния отклонений формы детали и круга,  $\Psi$  – вектор состояний отклонений формы детали и круга от номинальных параметров,  $C_0$  – матрица управления процессом,  $U$  – вектор управляющих воздействий, связанный с поперечной подачей.

$$E_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, F_0 = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}, V_0 = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, T_0 = [t_f] Q_0 = [-1 \quad 1],$$

где  $E_0, F_0, V_0, T_0, Q_0$  – матрица состояния измерений, матрица интенсивностей шумов измерителей; матрица независимых гауссовых белых шумов измерителей единичной интенсивности, матрица глубины резания и матрица преобразования совокупных измерений соответственно.

Оцененная таким образом глубина резания  $t_f$  несвободна как от погрешностей, определяемых качеством процесса измерений шумами измерителей, так и от влияния случайных составляющих отклонений форм детали и круга от номинальных и внешних возмущений.

Для повышения качества обработки прецизионные станки должны быть защищены от вибраций соседних установок. При монтаже некоторых станков (шлифовальных, точных токарно-винторезных, балансировочных и т.п.) на фундаментах первой группы, когда роль собственно фундамента выполняет станина, ряд заводов практикует в качестве antivибрационного мероприятия установку станков на виброизолирующих опорах. При недостаточно тщательном подборе или при изменении режима работы станка упругие элементы могут вызывать даже усиление вибраций.

Однако, в тех случаях, когда требуется особо высокая чистота обработанной поверхности или когда источник большой вибрации находится поблизости, то вышеуказанный способ виброизоляции является недостаточным.

Повышение качества обработки деталей непосредственно связано с необходимостью ослабления вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников. Уровень вынужденных колебаний станка снижается при установке его на виброизолирующие устройства.

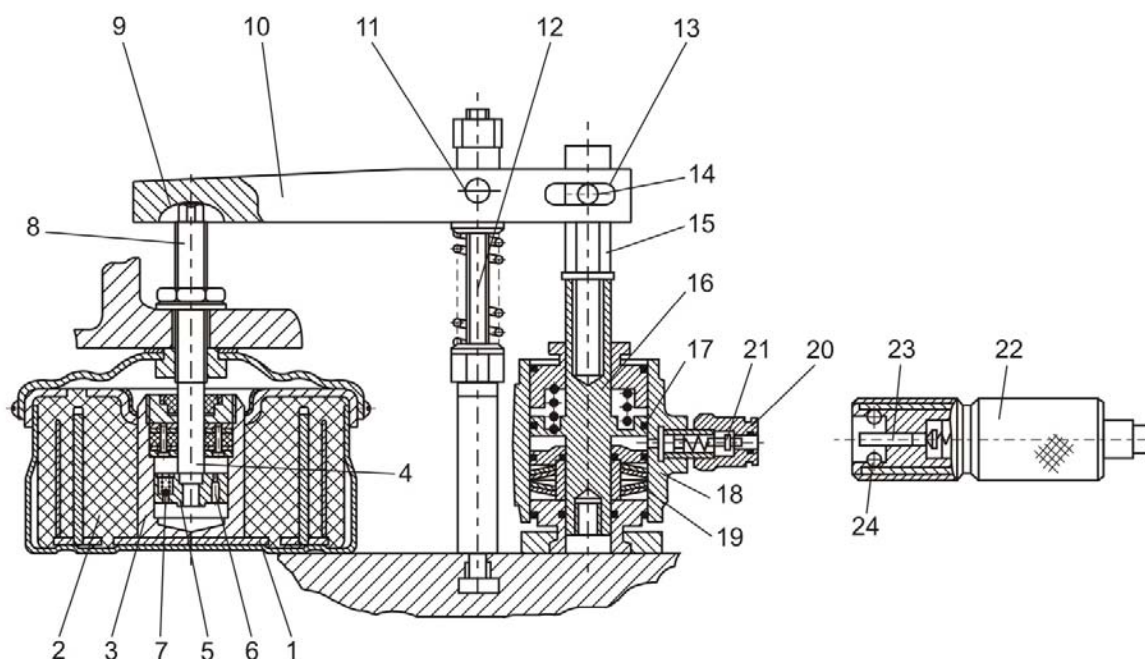


Рисунок 4 – Общий вид виброизолирующего устройства: 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винта; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихвата; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарики

Как правило, на палубах плавучих ремонтных мастерских фиксация станков обеспечивается фундаментом, который не обеспечивает достаточного уровня виброизоляции вследствие значительных колебательных воздействий, как от внешнего оборудования, так и от внешней среды через плавучее основание и поверхность палубы.

Традиционные виброизолирующие опоры металлорежущих станков [3] выполнены на основе виброизоляторов, различающихся упруго-демпфирующими характеристиками, различным сочетанием виброизолирующих и ударно-защитных свойств, долговечностью, способностью функционировать в тех или иных климатических условиях, а также чисто конструктивными особенностями – габаритами, способом монтажа и т.д., не могут быть использованы на плавучих ремонтных мастерских по причине невозможности их функционирования в условиях качки плавучего основания и горизонтальных смещений под ее воздействием.

**Выводы.** В Севастопольском национальном техническом университете с целью повышения надежности виброзащиты станков от внешних колебаний на металлообрабатывающих участках ПРМ разработано устройство (рисунок 4) [5], позволяющее повысить надежность виброзащиты металлорежущих станков от внешних колебаний, в том числе и от волнений водной поверхности, упростить возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования ПРМ, повысить качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения внешних и внутренних колебаний, гашению которых способствуют виброизолирующие опоры и пружинные аккумуляторы в гидроцилиндрах.

Предложенное устройство имеет следующие преимущества:

- повышается надежность виброзащиты металлорежущих станков, установленных и работающих в условиях ПРМ, от внешних колебаний, в том числе и от волнений водной поверхности;
- упрощается возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования ПРМ путем применения вместо используемых в настоящее время бетонных фундаментов (даже для легких и средних станков) предлагаемых виброизолирующих устройств на каждой из опор;
- повышается качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения внешних и внутренних колебаний,



гашению которых способствуют виброизолирующие опоры и пружинные аккумуляторы в гидроцилиндрах.

Приведенный в работе анализ позволил выявить пути снижения влияния шумов возбуждений, связанных как с внутренними, так и с внешними источниками колебаний. Для этого необходимо расширить систему (17), которую можно непосредственно использовать при реализациях процедур стохастического наблюдения и фильтрации.

Полученная таким образом расширенная модель будет представлять собой стохастическое описание процесса съема материала при контактировании абразивного инструмента, заготовки и источника внешних возмущений и является основой для определения стохастических представлений основных технологических показателей процесса обработки в условиях ПРМ, что является задачей дальнейших исследований.

**Список использованных источников:** 1. Волосенко Е.Б. К вопросу воздействия ветровой нагрузки на судно// Мореходность и управляемость судов. – Л.: Судостроение, 1988, Вып. 105. – С. 53-60. 2. Бородай И.К. Качка судов на морском волнении/ И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. – Л.: Судостроение, 1989. – 432 с. 3. Братан С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования/ С.М. Братан, Е.А. Владецькая. – Вестник НТУ «ХПИ». – Сб. научн. трудов. - № 35, 2008. – С. 13-22. 4. Стохастическая диагностика взаимодействия инструмента и заготовки при круглом наружном шлифовании/ Новоселов Ю.К., Братан С.М. Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей. Присвячується 75-річчю з дня народження академіка НАН України Н.В. Новікова/ За заг. ред. А.І. Грабченка. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – С. 91-102. 5. Пат. №51621 Україна, МПК В23Q 1/00, Віброізолюючий пристрій металорізального верстата плавучої ремонтної майстерні/ О.О.Харченко, К.О. Владецька, С.М. Братан, Д.О.Владецький; заявник та патентовласник Севастопольський національний технічний університет.— №201000394; заявл.18.01.2010; опубл.26.07.2010, Бюл.№14.