

УДК 621.9.06

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА

Кроль О.С.

EVALUATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS CARRYING SYSTEM OF MULTISOPERATION MACHINE

Krol O.S.

Приведено решение задачи анализа динамических характеристик несущей системы многооперационного станка модели СФ68ПФ4. Определены узловые перемещения режущего инструмента и заготовки и рассмотрен баланс податливости основных формообразующих узлов. Дана оценка динамических характеристик внешних случайных воздействий на первых двух собственных частотах колебаний.

Ключевые слова: несущая система, многооперационный станок, динамическая податливость, MATLAB

Введение. Увеличение производительности и эффективности процессов изготовления деталей связано с повышением динамической устойчивости металлорежущих станков. Анализ баланса податливости и форм колебаний деталей и сборочных единиц станков фрезерно-сверлильно-расточной группы показал, что наиболее интенсивные колебания характерны для основных формообразующих узлов: шпиндельная головка – оправка – инструмент и стол – заготовка. Такие операции с прерывистым резанием как фрезерование характеризуются большим диапазоном силовых воздействий, возникающим в процессе обработки, включая вероятностную составляющую в виде совокупности динамических гармоник.

В работах посвященных вопросам исследования фрезерных станков [1, 2] спектральные составляющие зачастую не учитывались при построении моделей динамики упругих систем станков. При этом анализ случайных процессов при резании осуществляется численными методами с использованием аппарата спектрального анализа и алгоритмов быстрого преобразования Фурье [3]. Эффективность этой процедуры обеспечивается использованием модуля Signal Processing, входящего в математическую среду MatLab [4].

Целью данной работы является повышение динамического качества функционирования формообразующих узлов станка СФ68ВФ4 с учетом баланса податливости его упругой системы и

моделирования функционирования системы при входных сигналах полигармонического типа.

Изложение основного материала. В качестве объекта исследования рассматривается широкоуниверсальный станок фрезерно-сверлильно-расточной группы модели СФ68ВФ4, 3D-модель которого построена в САПР КОМПАС-3D (рис.1). Этот станок с успехом может применяться как в единичном, так и в мелкосерийном и серийном производствах. Станок модели СФ68ВФ4 предназначен для комплексной обработки деталей из стали, чугуна, цветных металлов и сплавов, пластмасс, для нужд народного хозяйства. Благодаря механизму перебора в сочетании с электродвигателем с бесступенчатым регулированием обеспечивает 24 скорости вращения шпинделя.

В отличие от других моделей фрезерных станков, станок модели СФ68ВФ4 на базе которого разрабатывается проектируемый станок имеет кинематические цепи главного привода на горизонтальный и вертикальный шпиндель, кинематические цепи коробки подач по координатам X,Y,Z, кинематические цепи привода по координате В (поворот планшайбы), кинематические цепи приставных устройств; долбежной и угловой головки (рис. 2).

Станок монтируется на чугунном основании на котором закреплена колонна, на которой монтируются все основные части станка.

По горизонтальным направляющим колонны перемещается бабка шпиндельная (ось "Z"), к которой крепится вертикальная и угловая головка или дополнительные устройства и приспособления.

По вертикальным направляющим колонны перемещается суппорт (ось "Y"), а по его горизонтальным направляющим основной вертикальный стол (ось "X"), к которому крепится, в зависимости от комплектации, жесткий угловой стол или поворотный стол для установки на них обрабатываемых деталей.

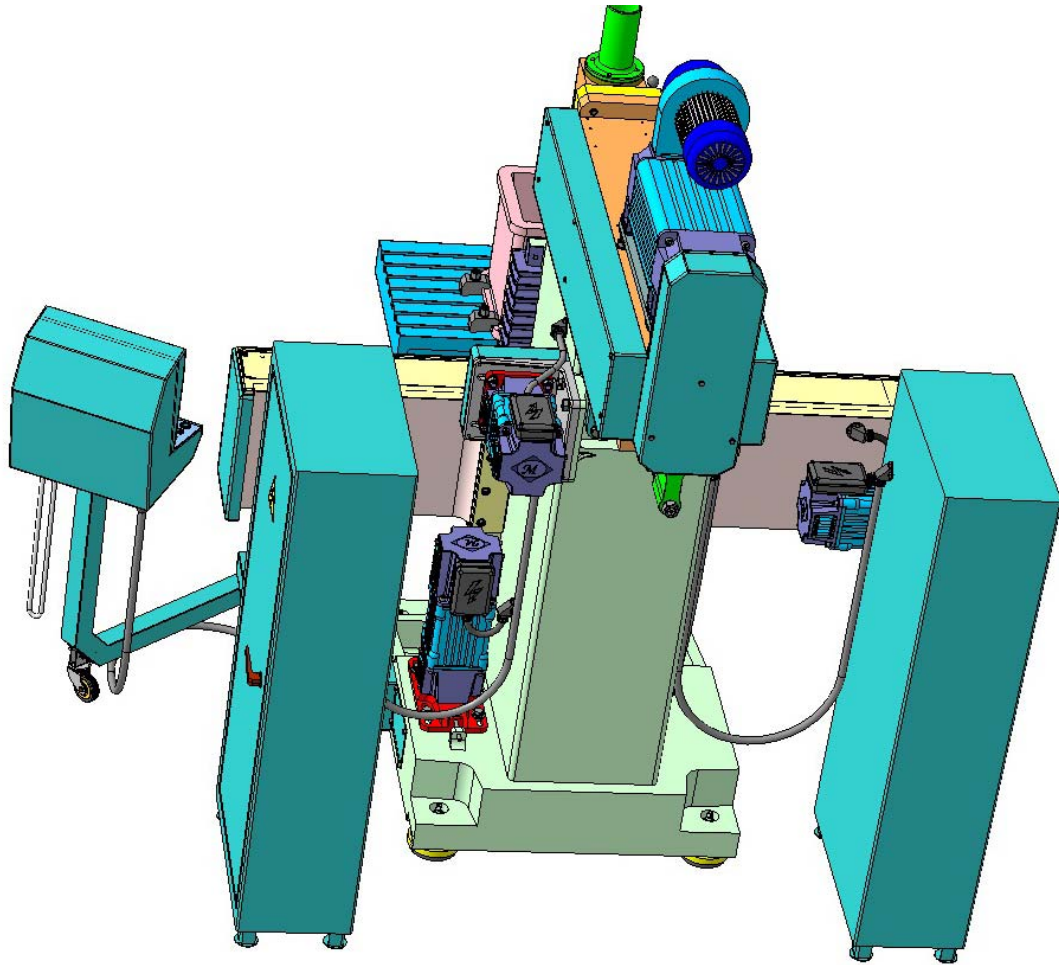


Рис.1. Конструкція станка моделі СФ68ВФ4

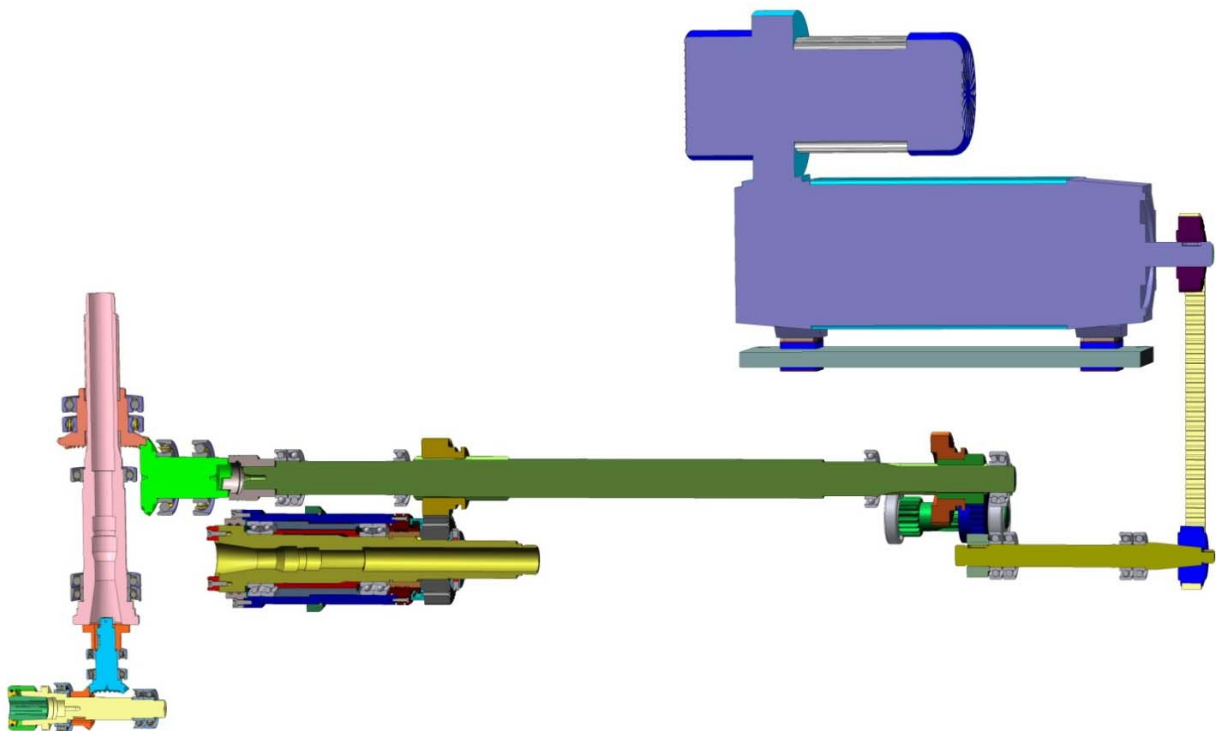


Рис.2. Кинематика станка моделі СФ68ВФ4

В верхней части колонны с левой стороны находится съемник, на котором устанавливается вертикальная головка в не рабочем положении.

Слева, у основания, размещен бак СОЖ с электронасосом, справа, на колонне, закреплена станция смазки. Пульт управления крепится посредством поворотного кронштейна к основанию.

Комплект шкафов (шкаф гидроаппарата, приводов и электроавтоматики) закреплены непосредственно на задней стенке колонны (рис.1).

Упругая система может быть представлена в виде линейной системы со многими степенями свободы и включает некоторое количество сосредоточенных и распределенных элементов, обладающих соответствующими инерционными, упругими и диссипативными характеристиками.

Во время предварительных экспериментов на базовой модели СФ68ВФ4 получены: перемещение инструмента в угловой головке и заготовки, установленной на угловом столе под действием веса узлов и силами $P_{x,y,z}$. При этом была учтена самая неблагоприятная схема расположения узлов несущей системы станка – шпиндель в самом крайнем положении; стол с заготовкой в самом нижнем положении.

Для оценки влияния параметров упругой системы на уровень динамической податливости необходимо построение форм колебаний на тех собственных частотах, которые характеризуются относительно высоким уровнем колебаний инструмента и заготовки. Анализ экспериментальных амплитудно-частотных характеристик показал, что наибольший интерес представляют низкочастотные колебания f_i (Гц):

$$f_i = \{ 16,5; 20,2; 24,6; 28,6; 44,2 \}.$$

На указанных частотах были рассчитаны формы колебаний несущей системы, численные

значения которых для инструмента и заготовки приведены в табл.1.

В данной таблице указаны численные значения линейных перемещений по осям X, Y, Z (мм) и угловых перемещений относительно осей F_x, F_y, F_z (мкм/мм).

На рис.3 графически представлены формы колебаний на частоте 28,6 Гц, характеризующихся интенсивными перемещениями шпиндельной бабки с поворотной головкой в плоскости YOZ и стола с заготовкой в плоскости XOZ.

В данной таблице указаны численные значения линейных перемещений по осям X, Y, Z (мм) и угловых перемещений относительно осей F_x, F_y, F_z (мкм/мм).

На рис.3 графически представлены формы колебаний на частоте 28,6 Гц, характеризующихся интенсивными перемещениями шпиндельной бабки с поворотной головкой в плоскости YOZ и стола с заготовкой в плоскости XOZ. При этом фиксировались упругие деформации при наиболее неблагоприятной схеме расположения узлов станка и следующем варианте нагружения:

$$P_{zI} = -164,0 \text{ Н}; \quad P_{yI} = P_{xI} = 164,0 \text{ Н (приложены на конце шпинделя)}.$$

При программном методе испытаний [2] возможно наложение динамической составляющей на статическое значение силы и воспроизведение большого диапазона силовых воздействий возникающих в процессе обработки. При этом сила резания P состоит из постоянной (статической) составляющей P_0 и совокупности динамических гармоник с амплитудой P_i и частотой ω_i :

$$P = P_0 + \sum_i P_i \sin \omega_i t.$$

Таблица 1

Узловые перемещения

Узел	Направление	Собственные частоты, Гц					
		16,5	20,2	24,6	28,6	40,9	44,2
Режущий инструмент	X	-0,02	-0,021	0,032	0,0063	0,0015	0,04
	Z	-0,013	-0,018	0,016	0,028	0,0034	0,02
	Y	-0,012	-0,027	0,03	0,0036	0,001	0,012
	Fx	$-0,26 \cdot 10^{-5}$	$0,48 \cdot 10^{-5}$	$0,11 \cdot 10^{-4}$	$-0,34 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,22 \cdot 10^{-4}$
	Fz	$-0,14 \cdot 10^{-4}$	$-0,35 \cdot 10^{-4}$	$0,54 \cdot 10^{-4}$	$0,53 \cdot 10^{-5}$	$0,32 \cdot 10^{-6}$	$0,27 \cdot 10^{-4}$
	Fy	$0,21 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^{-4}$	$0,79 \cdot 10^{-6}$	$0,19 \cdot 10^{-4}$	$0,61 \cdot 10^{-7}$	$0,72 \cdot 10^{-4}$
Заготовка	X	0,17	-0,031	-0,035	$0,57 \cdot 10^{-3}$	$-0,14 \cdot 10^{-4}$	0,047
	Z	0,065	-0,1	-0,04	-0,021	$-0,63 \cdot 10^{-4}$	0,046
	Y	0,037	-0,11	-0,034	0,036	$-0,1 \cdot 10^{-3}$	0,053
	Fx	$-0,64 \cdot 10^{-5}$	$0,78 \cdot 10^{-4}$	$0,23 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$-0,23 \cdot 10^{-6}$	$-0,96 \cdot 10^{-4}$
	Fz	$-0,1 \cdot 10^{-3}$	$-0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot 10^{-4}$	$-0,56 \cdot 10^{-4}$	$-0,2 \cdot 10^{-6}$	$-0,18 \cdot 10^{-4}$
	Fy	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$-0,89 \cdot 10^{-4}$	$0,41 \cdot 10^{-4}$	$-0,51 \cdot 10^{-4}$	$-0,65 \cdot 10^{-6}$	$-0,29 \cdot 10^{-4}$

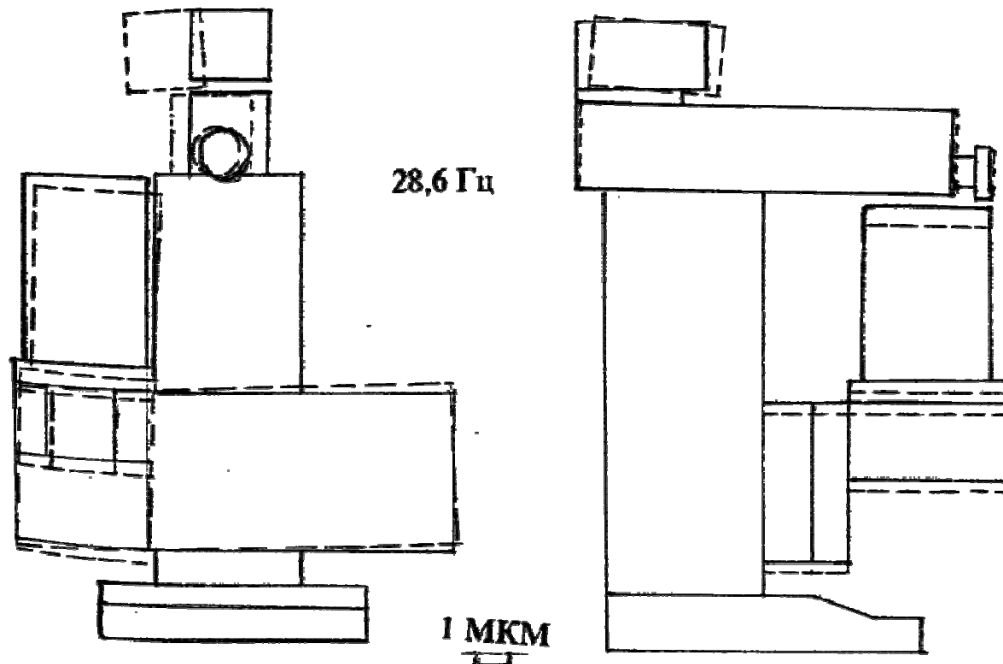


Рис. 3. Формы колебаний несущей системы

Обычно динамическая составляющая воспроизводится в виде простого синусоидального процесса, хотя при резании изменение сил во времени имеет более сложный характер. При формировании зависимости $P_i=f(t)$ необходимо оценить дисперсию и математическое ожидание сигнала, предназначенного для измерения силы резания. Кроме того, при реализации спектрального анализа, учитывается случайная составляющая типа “белый шум” и др [3].

Рассмотрим динамические характеристики внешних случайных воздействий $P_i(t)$ на первых двух частотах $\{f_1=20 \text{ Гц}; f_2=28 \text{ Гц}\}$, задавая при этом следующие параметры:

- 1) интервал и дискретность временной оси:
 $t = 0 : 0,001 : 0,6$;

- 2) зависимость $P_i = f(t)$ в виде полигармонического сигнала:

$$P_i = P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t ,$$

где P_1 и P_2 - амплитуды гармонических колебаний.

Частоты ω_1 и ω_2 могут быть заданы через некоторую частоту ω так, что $\omega_1 = 5 \cdot \omega$; $\omega_2 = 7 \cdot \omega$ и сумма будет периодической функцией с периодом $2\pi/\omega = \pi/2$.

Форма сигнала, содержащая частоты 20 Гц и 28 Гц :

$$P_i(t) = 246 \sin (2\pi \cdot 20t) + 109 \sin(2\pi \cdot 28t);$$

- 3) случайной составляющей типа “белый шум” с помощью команды “rand(‘normal’)”[4] с нулевым средним и “единичной дисперсией”;

- 4) объединенного сигнала, полученного путем наложения случайной составляющей на статическую:

$$y_i(t) = P_i + 2 \text{ rand } (t) ;$$

- 5) спектральной плотности $P_{yy}(i\omega)$:

$$p_{yy}(i\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\bar{y}_i(i\omega) \cdot \bar{y}_i^*(i\omega)}{2T} ,$$

где $\bar{y}_i(i\omega) = \bar{y}_i^*(-i\omega)$ - комплексно-сопряженные функции, представляющие преобразование Фурье для функции $y_i(t)$.

Для графической интерпретации случайной функции и идентификации частотных компонент воспользуемся дискретным преобразованием Фурье, которое дает выражение линейного спектра дискретной периодической функции.

При числе отсчетов $N=256$ (256-точечное быстрое преобразование Фурье (БПФ)) реализовать БПФ сигнала $y_i(t)$ можно с помощью Matlab-команды fft:

$$y = \text{fft}(y_i(t), 256)$$

- 6) первых 128 точек (другие 128 точек симметричны) энергетического спектра $P_{yy}(i\omega)$, представленных графически на оси частот с помощью команд :

$$f = 1000 \cdot (0:127)/256; \\ \text{plot}(f, P_{yy}(i\omega)(1:128)).$$

На рис. 4, а представлен график случайной функции $P_i(t)$ представляющий собой суперпозицию полезного синусоидального сигнала и “белого

шума” с нормальным распределением. Как правило, из-за высокого уровня шумов нельзя применить частотный и другие методы исследований, вместе с тем такого рода задача может быть решена на основе функций симметричной плотности [3]. На рис. 4,б представлен график спектральной плотности $S_p(i\omega)$, для которого уменьшение эффекта наложения частот и искажение спектра достигается за счет сокращения шага дискретизации и фильтрации шумовых высокочастотных составляющих.

Графическое представление деформаций упругих звеньев фрезерно-сверлильно-расточных станков позволяет более четко ориентироваться на первой стадии расчетов и следовательно повысить качество окончательных расчетов. Учет случайных составляющих входных сигналов системы делает процедуру моделирования более эффективной и позволяет определить картину динамического взаимодействия в широком диапазоне входных характеристик.

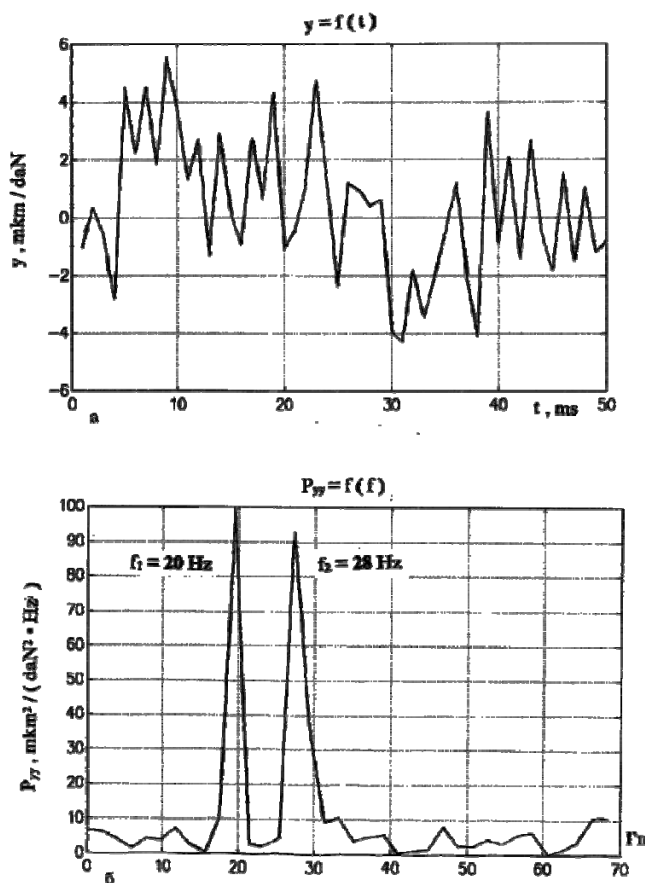


Рис. 4. Спектральные характеристики входного параметра системы: а – график случайной функции $P_i(t)$; б – график спектральной плотности $S_p(i\omega)$

Выводы. 1. Сформирован баланс перемещений формообразующих звеньев несущей системы станка модели СФ68ВФ4, и определены узловые перемещения режущего инструмента и заготовки в

направлениях координатных осей X, Y, Z под действием системы сил резания при фрезеровании.

2. Определены собственные частоты колебаний несущей системы станка и построены формы колебаний на тех собственных частотах, которые характеризуются относительно высоким уровнем вибраций инструмента и заготовки. На базе анализа экспериментальных амплитудно-частотных характеристик показано, что наибольший интерес представляют низкочастотные колебания.

3. Исследованы динамические характеристики внешних случайных воздействий на первых двух собственных частотах колебаний. Синтезирована случайная составляющая типа “белый шум” с помощью команды “rand(‘normal’)” в программной среде «Signal processing».

4. Построены графики случайной функции и спектральной плотности с использованием операции суперпозиции полезного синусоидального сигнала и “белого шума” с нормальным распределением.

Литература

1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Каминская В.В. Расчетный анализ динамических характеристик несущей системы станка / В.В. Каминская, А.В. Гринглаз // Станки и инструмент, 1989. – №2. – С. 10–13.
3. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации / А.И. Солодовников, А.М. Спиваковский. – Л.: ЛГУ, 1986. – 272 с.
4. Иглин С.П. Математические расчеты на базе Matlab/С.П.Иглин. – Издательство “ВНУ-Санкт-Петербург” 2005. – 640 с.

References

1. Kudinov V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 360 s.
2. Kaminskaja V.V. Raschetnyj analiz dinamicheskikh harakteristik nesushhej sistemy stanka / V.V. Kaminskaja, A.V. Gringlaz // Stanki i instrument, 1989. – №2. – S. 10–13.
3. Solodovnikov A.I. Osnovy teorii i metody spektral'noj obrabotki informacii / A.I. Solodovnikov, A.M. Spivakovskij. – L.: LGU, 1986. – 272 s.
4. Iglin S.P. Matematicheskie raschety na baze Matlab/S.P.Iglin. – Izdatel'stvo “ВНУ-Санкт-Петербург” 2005. – 640 s.

Кроль О.С. Оцінка динамічних характеристик несущей системы багатооперативного верстата

Наведено рішення задачі аналізу динамічних характеристик несущої системи багатооперативного верстата моделі СФ68ПФ4. Визначено вузлові переміщення ріжучого інструменту і заготовки і розглянутий баланс податливості основних формотворчих вузлів. Дана оцінка динамічних характеристик зовнішніх випадкових впливів на перших двох власних частотах коливань.

Ключові слова: несуча система, багатооперативний верстат, динамічна податливість, MATLAB.

Krol O.S. Evaluation of dynamic characteristics carrying system of multioperation machine

The solution of problems for analysis of dynamic characteristics to the support system multioperational machine model SF68VF4. Identified nodal displacements of the cutting tool and the workpiece and considered balance compliance basic formative nodes. The estimation of dynamic characteristics of random external influences on the first two natural frequencies of oscillation.

Keywords: *carrying system, multioperational machine, dynamic compliance, MATLAB.*

Кроль Олег Семенович – к.т.н., доцент, професор кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, krolos@yandex.ru

Рецензент: **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 06.10.2015.