

УДК621.9

А.А. Оргиян, д-р техн. наук, Р.М. Минчев, аспирант,  
Одесса, Украина

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ШИРОКОУНИВЕРСАЛЬНЫХ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ**

*Технологічна динаміка широкоуніверсальних фрезерних верстатів. У статті розглянуті завдання вібростійкості широкоуніверсальних фрезерних верстатів при торцевому фрезеруванні. Показано, що розрахунки коливань з урахуванням тільки значень статичної жорсткості є вельми наближеними. Для уточнення розрахунків слід користуватися елементами матриць лінійної і кутової жорсткостей. Наведено граничні значення глибини різання і подачі при стійкому різанні. Вивчено залежності коливань від швидкості обертання шпинделя і зубцевої частоти.*

*Ключові слова: широкоуніверсальні фрезерні верстати, вібростійкість, торцеве фрезерування*

*Технологическая динамика широкоуниверсальных фрезерных станков. В статье рассмотрены задачи виброустойчивости широкоуниверсальных фрезерных станков при торцевом фрезеровании. Показано, что расчеты колебаний с учетом только значений статической жесткости являются весьма приближенными. Для уточнения расчетов следует пользоваться элементами матриц линейной и угловой жесткостей. Приведены предельные значения глубины резания и подачи при устойчивом резании. Изучены зависимости колебаний от скорости вращения шпинделя и зубцовой частоты.*

*Ключевые слова: широкоуниверсальные фрезерные станки, виброустойчивость, торцевое фрезерование*

*Technological dynamics of wide-universal milling machines. The problems of vibration resistance of wide-universal milling machines at face milling are considered in the article. It is shown that the calculations of oscillations taking into account only the static stiffness values are approximate. To refine the calculations, one should use elements of matrices of linear and angular rigidity. The limiting values of the depth of cutting and feed for steady cutting are given. The dependence of the oscillations on the rotational speed of the spindle and the tooth frequency is studied.*

*Keywords: superuniversal milling machines, vibration resistance, face milling*

Известно, что процесс фрезерования сопровождается периодическими и весьма интенсивными силовыми воздействиями [1,2]. Однако, для разработки динамической модели следует учесть и характерные особенности фрезерования, к которым следует отнести и переменность коэффициентов резания, и изменения направлений резания на зубьях фрезы, а также прерывистость процесса. Именно эти особенности вызывают параметрические возмущения в динамической системе станка. Следует отметить, что интенсивность параметрических воздействий и методы расчета параметрических колебаний, влияющих на качество обработки, остаются слабо изученными, несмотря на возрастающее число исследований

по динамике фрезерных станков.

Обобщая результаты динамических исследований отметим:

1) При рассмотрении замкнутой динамической системы станка процесс резания на каждом зубе описан кусочно-постоянной функцией угла поворота фрезы, а силы резания определяются суммированием по всем зубьям. К весьма сложной форме границы устойчивой обработки приводит учет регенерации следа [3, 4, 5, 6].

2) В работе [4] приведены зависимости области устойчивости при фрезеровании от условий обработки при усредненных по времени переменных коэффициентах уравнений движения. Обнаружено [6, 7], что область устойчивости уменьшается с увеличением числа режущих зубьев и с наличием асимметрии жесткости упругой системы. Во всех этих работах параметрическое воздействие колебаний не учитывается. Однако, в работе [7], вводя в уравнения движения переменные коэффициенты, подчеркивается важность исследования параметрической неустойчивости, а в работе для описания процесса фрезерования используется модель прерывистого резания [5].

3) Роль крутильных колебаний в динамических моделях фрезерных станков требует дополнительных исследований, особенно в приводе главного движения [8]. Показано, что гармонические изменения скорости резания позволяют эффективно гасить регенеративные колебания [5], а в некоторых работах установлено, что взаимодействие изгибных и крутильных колебаний может как увеличивать, так и понижать устойчивость обработки. Методы повышения эффективности и точности торцевого фрезерования проанализированы в работах [5, 9, 10] и др.

Экспериментальные исследования жесткости ШФС свидетельствуют об анизотропии деформативных свойств несущей системы, так как при разных операциях (фрезерование, сверление, растачивание) направление силы резания изменяется. При таких исследованиях следует определять матричные характеристики жесткости. На рис. 1 показаны точки, в которых измерялась жесткость и направления осей её измерений. Определялись три угловых и 3 линейных перемещения. Стрелками показаны положительные направления перемещений для инструмента (для детали они противоположны). В указанных точках А, Б и В определялось положение вертикального шпинделя относительно стола, а также изменялось состояние стыков (свободный стык или зажатый стык). Элементы матрицы линейной жесткости при взаимных положениях стола и шпинделя по точкам А, В и С, нагружении по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , при зажатых и свободных стыках приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Элементы матрицы линейной жесткости

Перемещение по оси	Линейная жесткость $C_{ij}$ , МН/м, при взаимных положениях шпинделя и стола А, Б, В (рис. 1), нагружения по осям x, y, z и состояниях стыков								
	А			Б			В		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Не зажат стык бабка - стойка									
x	14	-200	-70	20	-150	1000	10	-60	220
y	-40	33	-100	-60	35	2500	-35	30	500
z	-80	-100	12	-250	1300	33	30	-1100	30
Не зажат стык суппорт - стойка									
x	15	-140	180	35	180	900	30	-60	230
y	-45	35	-110	-135	23	1100	-25	20	450
z	-100	-700	20	-130	1400	35	1400	1600	30
Не зажат стык суппорт – салазки									
x	15	-40	95	36	50	1000	30	-45	130
y	-50	15	-100	-135	35	1600	-35	25	300
z	-180	-1700	25	-450	1400	40	220	-1500	27
Все стыки зажаты									
x	15	170	95	35	190	900	30	50	220
y	-45	35	-100	-150	35	900	35	30	140
z	-160	-900	25	-25	1300	40	10	-1200	30

Расчет с учетом скалярной характеристики жесткости вместо использования матричной характеристики может привести к значительным ошибкам при определении упругих перемещений. Рассмотрим пример: при фрезеровании торцевой фрезой горизонтальной поверхности в положении Б при подаче бабкой усилие резания по оси y равно 1 кН. Используя соотношение между составляющими усилиями резания, получаем  $P_x = 0,5$  кН и  $P_z = 0,35$  кН. При использовании скалярной характеристики жесткости при расчете перемещений шпиндельной головки относительно стола в положении А в результате получим:

$$\Delta C_x = P_x / C_{xx} = 500 / 20 = 25 \text{ мкм.}$$

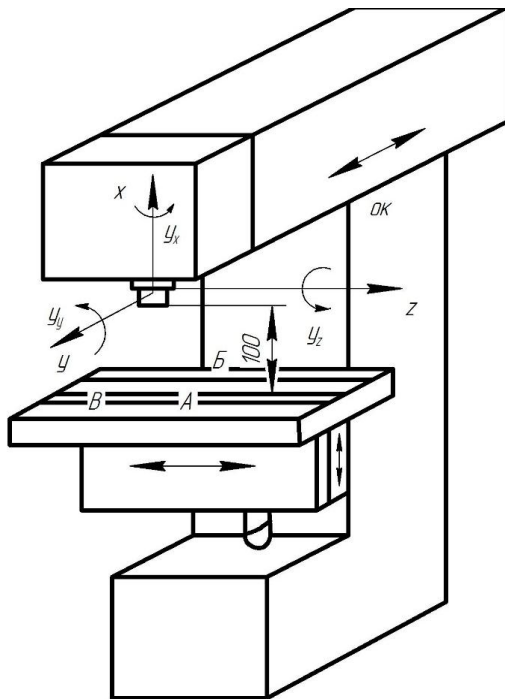


Рисунок 1 – Схема направлений и точек измерений на ШФС.

То же перемещение с учетом матрицы элементов жесткости в положении А приводит к результату:

$$\Delta_x^M = \sum_{j=1}^3 P_j / C_{ij} = P_x / C_{xx} - P_x / C_{xy} - P_x / C_{xz} =$$

$$= 500 / 20 - 1000 / 200 - 350 / 70 = 15 \text{ мкм}$$

В направлениях трех осей x, y и z измерены жесткости шпинделя с оправкой относительно корпуса вертикальной головки:

$$C_{xx}^u = 720 \text{ МН / м}, C_{zz}^u = C_{yy}^u = 30 \text{ МН / м}.$$

Таким образом, при использовании в расчетах характеристики жесткости в матричной форме удастся получить уточненные результаты по определению упругих перемещений. Таким образом, осевая жесткость шпиндельного узла обеспечивает весьма малые перемещения вдоль оси шпинделя, а перемещения по осям z, обусловленные деформациями шпинделя с инструментом, практически равны.

Сравнение значений элементов матрицы жесткости для перемещений показывает, что наибольшая жесткость соответствует положению точки В. Наибольшая жесткость достигается в стыке суппорт – стойка, а среднее значение диагональных элементов матрицы жесткости определяем по соотношению  $C_{cp} = (C_{xx} + C_{yy} + C_{zz})/3$ . Таким образом,  $C_{cp}$  (Мн/м) равно в положении А ~ 196 Мн/м; В – 25 Мн/м; С – 23,3 Мн/м. Наиболее жестким из не зажатых стыков является стык суппорт – стойка.

Также определены величины элементов матрицы угловой жесткости  $\lambda_{ij}$ , которая определяется силой, например, по j-ой оси и вызывает поворот шпиндельной головки относительно стола на 1 град вокруг i-ой оси. Установлено, что соотношения диагональных элементов матриц линейной жесткости для подсистемы детали ( $C_{xx}^d$ ) и подсистемы инструмента ( $C_{xx}^e$ ) находится в пределах 1 – 3 (табл.2).

Таблица 2 – Диагональные элементы матрицы линейной жесткости

Состояние стыков	Линейная жесткость, Мн/м		
	$C_{xx}^u$	$C_{xx}^d$	$C_{xx}^d / C_{xx}^u$
Суппорт – салазки – стык (свободный)	60	70	1,26
Бабка – стойка – стык (свободный)	28	80	2,85
Суппорт – стойка – стык - свободный	54	70	1,3
Стыки зажаты	54	75	1,4

Из таблицы следует, что жесткость подсистемы детали незначительно больше жесткости инструмента при зажатых стыках, а также при подаче суппортом. Следует отметить, что жесткость подсистемы инструмента значительно уменьшается при подаче бабкой.

На 4-х станках моделей 6Б75В изучались колебания при холостом ходе. Основные частотные диапазоны, в которых возникают колебания в направлении осей Z и Y, характерны для 4-х значений частот вращения:  $n = 70$  об/мин,  $200$  об/мин,  $810$  и  $2000$  об/мин. На этих числах оборотов реализуются спектры колебаний в таких частотных диапазонах:  $40-120$  Гц,  $170-320$  Гц,  $510-620$  Гц,  $620-850$  Гц и больше  $970$  Гц. Следует отметить, что частотный диапазон  $170-320$  Гц реализуется по направлениям Y и Z при всех указанных скоростях вращения шпинделя (рис. 2).

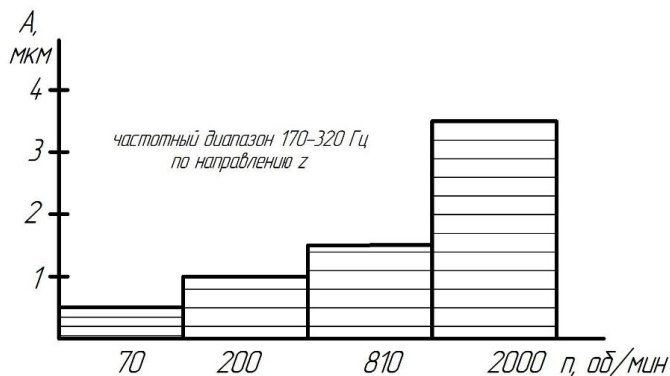


Рисунок 2 – Характерные значения амплитуд гармоник при холостом ходе фрезерного станка

Наибольший уровень колебаний реализуется на максимальной частоте вращения шпинделя и в 3 – 5 раз больше, чем при других числах оборотов и в других частотных диапазонах.

Устойчивость процесса фрезерования (при изменении глубины резания) определялась по увеличению отношения  $a_{рез}/a_{xx}$  при симметричном фрезеровании торцевой фрезой Ø50 мм с 6-ю зубьями образцов из чугуна и стали (рис. 3).

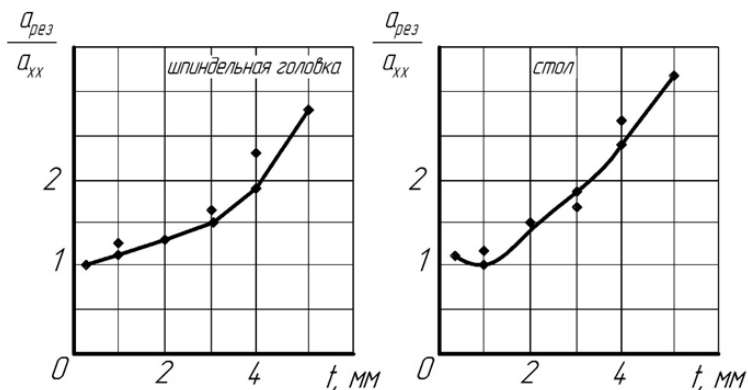


Рисунок 3 – Пределная глубина резания при устойчивом фрезеровании образцов из стали 45 и чугуна СЧ18:  $n = 350$  об/мин,  $S = 120$  мм/мин; а) сталь 45; б) чугун СЧ18.

Пределная глубина, при которой резание протекает устойчиво, составляет 2,4 мм для стали и 3,5 мм для чугуна.

Следует отметить, что при фрезеровании торцовыми фрезами возникают колебания в противофазе стола и шпиндельной головки в вертикальном направлении с частотой 170-200Гц. Возрастание амплитуд колебаний происходит при увеличении подачи и глубины резания. Этот эффект проявляется особенно сильно при приближении к границе устойчивости. Увеличение ширины фрезерования приводит к чередованию повышенных и пониженных уровней колебаний в соответствии с изменениями коэффициента возбуждения параметров процесса резания.

Частоты вращения и зубцовая частота  $f_z$  также отражаются в спектрах поступательных перемещений. При приближении к границе устойчивости развиваются также и угловые колебания в приводе вращения, причем эти колебания возбуждаются с частотой  $f_z$ . Для торцевых фрез с  $z = 3$  и  $z = 6$  измерены уровни поступательных и угловых колебаний. С увеличением частоты вращения (увеличением зубцовой частоты) амплитуды поступательных перемещений также возрастают (рис. 4). Однако, при резонансных значениях зубцовой частоты, при которых возрастают амплитуды угловых колебаний, происходит их локальное уменьшение.

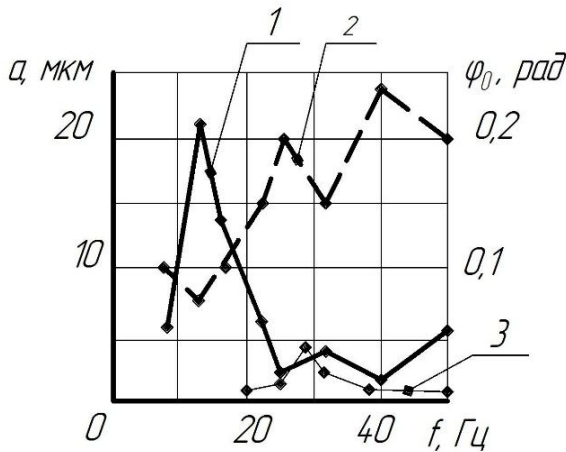


Рисунок 4 – Влияние зубцовой частоты на размах поступательных 2 и угловых 1 колебаний: сталь,  $t = 1$  мм,  $S_z = 0,25$  мм; 1, 2 -  $z = 3$ , 3 -  $z = 6$ .

Если  $f_z$  вдвое больше  $f_{yzt}$ , где  $f_{yzt}$  — собственная частота угловых колебаний, возникает главный параметрический резонанс, при котором максимум амплитуды угловых колебаний существенно уменьшается по сравнению с случаем, когда  $f_z = f_{yzt}$ , при  $z = 3$ . При  $z = 6$  реализуется главный параметрический резонанс. В связи с этими экспериментами возникает задача изучения параметрического возбуждения вынужденных колебаний при

фрезеровании для определения влияния угловых колебаний на поступательные.

**Список использованных источников:** 1. *Кудинов В.А.* Динамика станков. М.: Машиностроение, 1970. 320 с. 2. *Копелев Ю.Ф.* Влияние направления силы резания на точность фрезерования. / *Ю.Ф. Копелев, О.И. Рябцев и др.* // *Металлорежущие станки.* Респ. межвед. науч. – техн. сб., 1980, вып. 8, с. 30 – 32. 3. *Сродхар Р.* К вопросу об автоколебаниях металлорежущих станков / *Р. Сродхар, Р. Хон и др.* // *Конструирование и технология машиностроения*, 1970, т. 90. с. 102 – 120. 4. *Опейц Х.* Исследование и расчет устойчивости токарных и фрезерных станков при резании. – ЭИ/ВИНИТИ, сер. Автомат. линии и металлорежущие станки, 1970, №39, с. 1 – 16. 5. О некоторых особенностях решений задач устойчивости динамической системы фрезерных станков / *М.А. Есаян и др.* – Изв. АН. Арм. ССР. Сер. техн. наук, 1979, №4, с. 3 – 10. 6. *Клебанов М.К.* Динамическая устойчивость вертикально - фрезерного станка. / *М.К. Клебанов, Ю.Л. Муравьев.* – Станки и инструмент, 1978, №10, с. 20 – 21. 7. *Жарков И.Г.* Исследование автоколебаний, возникающих при обработке резанием конструкционных материалов: Автореф. дис. докт. техн. наук. – Куйбышев, 1974. – 43 с. 8. *Великовский А.Л., Чугаринов А.В.* Влияние параметров упругой системы главного привода координатно-расточного станка на производительность торцевого фрезерования. – Станки и инструмент, 1979, №4. с. 5-7. 9. *Кудряшов Е.А.* Обеспечение показателей качества конструктивно сложных деталей при торцевом фрезеровании. / *Е.А. Кудряшов, И.М. Смирнов* // *Вестник ЗабГУ*, №02(105). 2014. с.82 – 86. 10. *Большаков А.Н.* Повышение эффективности торцевого фрезерования. Диссерт. на соискание ученой степени к.т.н. Орел. 2014., 160 с. Спец. 05.02.07. 11. *Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов и др.* Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами. / *НТУ "ХПИ"*, 2011. с. 32 – 37.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Kudinov V.A.* Dinamika stankov. M.: Mashinostroenie, 1970. 320 s. 2. *Kopelev Ju.F.* Vlijanie napravlenija sily rezanija na tochnost' frezerovanija. / *Ju.F. Kopelev, O.I. Rjabcev i dr.* // *Metallorezhushhie stanki.* Resp. mezhved. nauch. – tehn. sb., 1980, vyp. 8, s. 30 – 32. 3. *Srodhar R.* K voprosu ob avtokolebanijah metallorezhushhijh stankov / *R. Srodhar, R. Hon i dr.* // *Konstruirovanie i tehnologija mashinostroenija*, 1970, t. 90. s. 102 – 120. 4. *Opejc H.* Issledovanie i raschet ustojchivosti tokarnyh i frezernyh stankov pri rezanii. – *JeI/VINITI*, ser. Avtomat. linii i metallorezhushhie stanki, 1970, №39, s. 1 – 16. 5. O nekotoryh osobennostjah reshenij zadach ustojchivosti dinamicheskoj sistemy frezernyh stankov / *M.A. Esajan i dr.* – *Izv. AN. Arm. SSR. Ser. tehn. nauk*, 1979, №4, s. 3 – 10. 6. *Klebanov M.K.* Dinamicheskaja ustojchivost' vertikal'no - frezernogo stanka. / *M.K. Klebanov, Ju.L. Murav'ev.* – *Stanki i instrument*, 1978, №10, s. 20 – 21. 7. *Zharkov I.G.* Issledovanie avtokolebanij, vznikajushhijh pri obrabotke rezaniem konstrukcionnyh materialov: Avtoref. dis. dokt. tehn. nauk. – *Kujbyshev*, 1974. – 43 s. 8. *Velikovskij A.L., Chugarinov A.V.* Vlijanie parametrov uprugoj sistemy glavnogo privoda koordinatno-rastochного stanka na proizvoditel'nost' torcevoго frezerovanija. – *Stanki i instrument*, 1979, №4. s. 5-7. 9. *Kudrjashov E.A.* Obespechenie pokazatelej kachestva konstruktivno slozhnyh detalej pri torcevom frezerovanii. / *E.A. Kudrjashov, I.M. Smirnov* // *Vestnik ZabGU*, №02(105). 2014. s.82 – 86. 10. *Bol'shakov A.N.* Povyshenie jeffektivnosti torcevoго frezerovanija. Dissert. na soiskanie uchennoj stepeni k.t.n. Орel. 2014., 160 s. Spec. 05.02.07. 11. *Ju.N. Vnukov, V.A. Logominov i dr.* Stend dlja izuchenija mehanicheskijh kolebanij pri frezerovanii malozhestkijh detalej koncevymi frezami. / *NTU "HPI"*, 2011. s. 32 – 37.

*Поступила в редколлегию 25.06.2018*