

# ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 534.1

**Ю. Н. ВНУКОВ**, д-р техн. наук, проф., **В. А. ЛОГОМИНОВ**,  
**С. А. БЕЗДОЛЬНЫЙ**, Запорож'є, Україна

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ЗАЩЕМЛЕННЫХ ПЛАСТИН

У статті викладена методика визначення динамічних характеристик нежорстких деталей типу затиснених пластин. Динамічні характеристики визначались за віброграмою згасаючих коливань, отриманої з використанням безконтактного струмовихрового датчика. Отримані значення частот власних коливань і логарифмічного декременту згасаючих коливань при різних вильотах платини і різних значеннях додаткових мас. Проведено порівняння вимірянних значень частот власних коливань з їх розрахунковими значеннями.

В статье изложена методика определения динамических характеристик нежестких деталей типа защемленных пластин. Динамические характеристики определялись по виброграмме затухающих колебаний, полученной с использованием бесконтактного токовихрового датчика. Полученные значения частот собственных колебаний и логарифмического декременту затухающих колебаний при разных вылетах платины и разных значениях дополнительных масс. Проведены сравнения измеренных значений частот собственных колебаний с их расчетными значениями.

*Ju. N. VNUKOV, V. A. LOGOMINOV, S. A. BEZDOL'NYJ*  
*DEFINITION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF NONRIGID DETAILS OF THE*  
*JAMMED PLATES TYPE*

The article contains technique of determining the dynamic characteristics of non-rigid parts such as clamped plates. Dynamic characteristics were determined by vibrorecord of damped oscillations obtained using contactless eddy-current sensor. The values of natural frequencies and logarithmic decrement have been measured at different overhang of plate and different values of the additional masses. Comparison the measured values of natural frequencies with their calculated values has been carried.

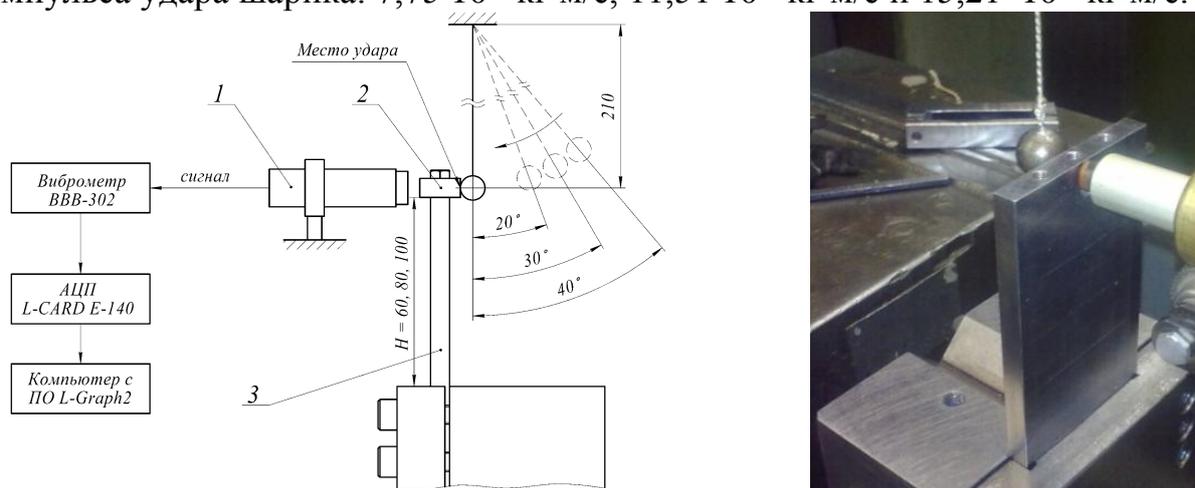
Одной из тенденций развития современного машиностроения является снижение материалоемкости. В этой связи все более широкое применение находят детали с тонкостенными нежесткими элементами. Обработка резанием нежестких деталей связана с некоторыми трудностями, одними из которых является появление вибраций. Методики прогнозирования виброустойчивых режимов обработки исходят из того факта, что система СПИД при резании представляет собой замкнутую динамическую систему, состоящую, собственно, из упругой системы и процесса резания [1]. Виброустойчивость процесса резания определяется динамическими характери-

стиками системы СПИД и процесса резания. В случае обработки нежестких деталей доминирующей колебательной системой, в составе системы СПИД, является система заготовки. Таким образом, для прогнозирования виброустойчивости обработки нежестких деталей необходимо уметь определять их динамические характеристики.

Под динамическими характеристиками нежестких деталей типа защемленных пластин будем подразумевать частоты собственных колебаний и логарифмический коэффициент демпфирования. Частоты собственных колебаний определялись аналитически, методом конечных элементов и экспериментально.

Аналитический расчет частот собственных колебаний защемленных пластин проводился по методике, изложенной в работе [2]. Расчет частот собственных колебаний методом конечных элементов проводился с помощью программного пакета ANSYS [3]. Для моделирования пластин использовались как 8-ми узловой оболочечный элемент, так и 20-ти узловой трехмерный конечный элемент. Для нахождения частот и форм собственных колебаний использовался метод Ланцоша [4]. Влияние демпфирования на снижение частоты собственных колебаний не учитывалось.

Экспериментальное определение динамических характеристик проводили на установке, моделирующей нежесткую деталь типа защемленной пластины (рис. 1). Упругий элемент (пластина) изготовлена из Стали 60Г, имеет толщину 8 мм, ширину 60 мм и регулируемую высоту (вылет). Исследования проводились при трех значениях вылетов: 60, 80 и 100 мм, для четырех схем крепления дополнительных масс (рис. 2) и трех значениях импульса удара шарика:  $7,75 \cdot 10^{-3}$  кг·м/с,  $11,51 \cdot 10^{-3}$  кг·м/с и  $15,21 \cdot 10^{-3}$  кг·м/с.



1 – бесконтактный токовихревой датчик;  
2 – образец; 3 – упругий элемент (пластина)

Рисунок 1 – Схема определения динамических характеристик с помощью бесконтактного датчика

Динамические характеристики определялись по виброграмме затухающих колебаний, которые вызывались методом ударного возбуждения [5]. Виброперемещение упругого элемента регистрировалось бесконтактным токовихревым датчиком, входящим в комплект виброметра ВВВ-302. Далее аналоговый сигнал с виброметра преобразовывался аналого-цифровым преобразователем Е-140 фирмы LCARD и записывался с помощью программы L-Graf. Частоту собственных колебаний определяли спектральным анализом виброграммы затухающих колебаний методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [6]. Типичный спектр показан на рис. 3. Как видно из рис. 3 основной вклад в колебаниях упругого элемента вносят колебания по первой изгибной форме.

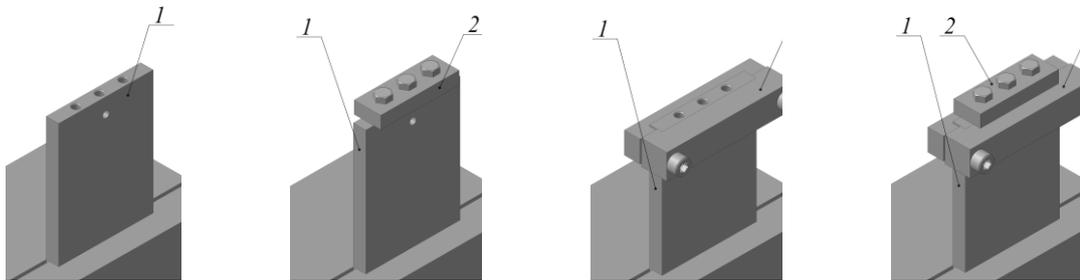


Схема 1

Схема 2

Схема 3

Схема 4

1 – упругий элемент; 2 – образец ( $m = 44,5$  г);  
3 – дополнительная масса ( $m = 185,5$  г).

Рисунок 2 – Схемы крепления дополнительных масс

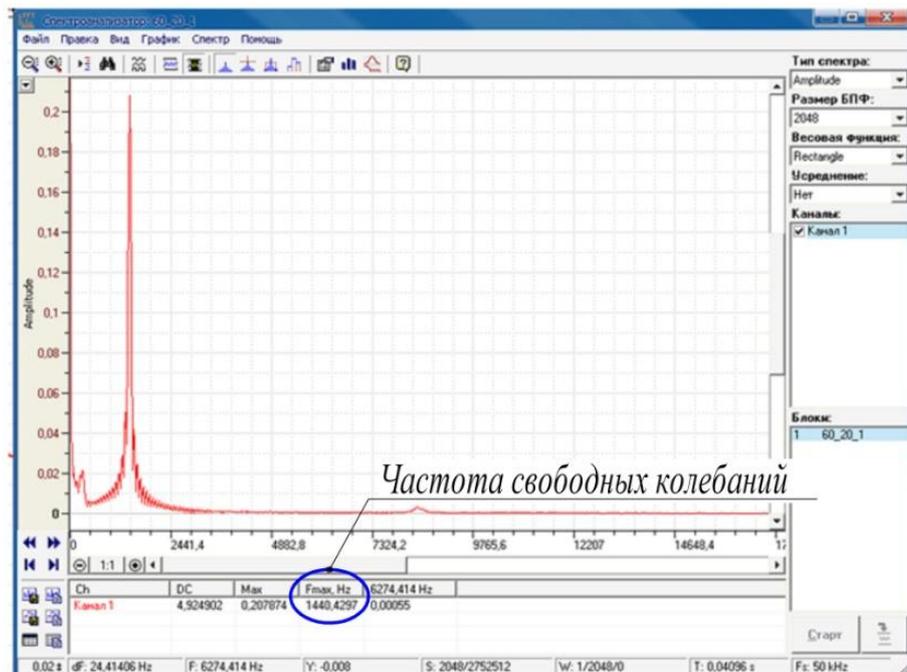


Рисунок 3 – Спектр затухающих колебаний упругого элемента, полученный методом БПФ

Исследовалось влияние вылета упругого элемента на частоту собственных колебаний при различных схемах крепления дополнительных масс. На рис. 4 показаны частоты собственных колебаний упругого элемента для 1 схемы при различных его вылетах, полученные расчетными методами и экспериментально измеренные. Погрешность рассчитанных частот собственных колебаний снижается с увеличением вылета упругого элемента: 33% для  $H=60$  мм, 23% для  $H=80$  мм и 13% для  $H=100$  мм. Эта погрешность связана с неидеальностью закрепления. Для остальных схем закрепления погрешность рассчитанных частот собственных колебаний также снижается с увеличением вылета упругого элемента.

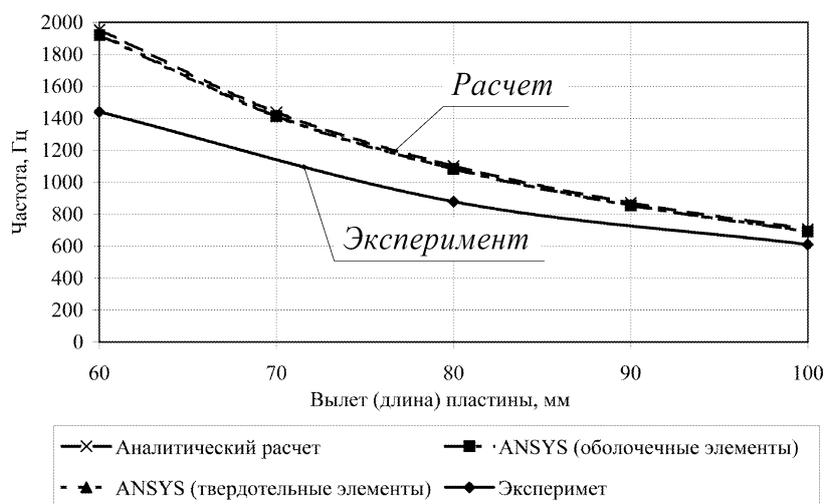


Рисунок 4 – Частоты собственных колебаний упругого элемента по первой форме для первой схемы

На рис. 5 показано влияние закрепления дополнительных масс на частоту собственных колебаний упругого элемента. Как видно с увеличением дополнительной массы частота свободных колебаний снижается тем больше, чем больше добавляемая масса.

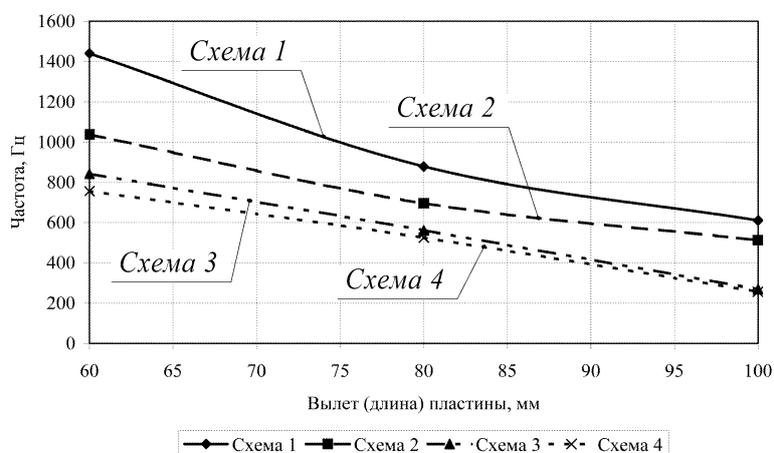


Рисунок 5 – Экспериментально измеренные частоты собственных колебаний упругого элемента по первой форме

Зависимость максимальной амплитуды колебаний (амплитуда первого колебания) от импульса удара шарика показана на рис. 6. С увеличением импульса удара и снижением дополнительной массы возрастает максимальная амплитуда колебаний при всех вылетах упругого элемента. Частота собственных колебаний упругого элемента при этом не изменяется.

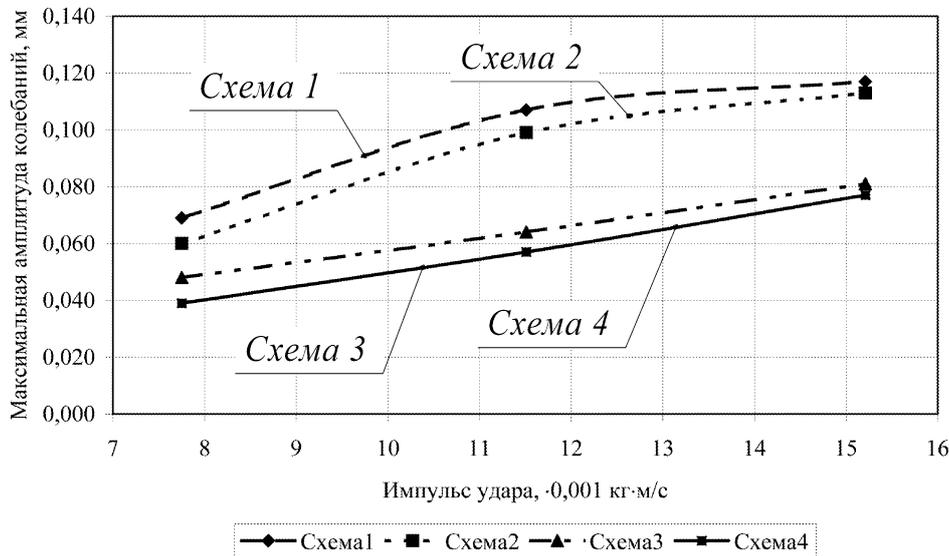


Рисунок 6 – Зависимость максимальной амплитуды колебаний от импульса удара шарика для вылета упругого элемента  $H=100$  мм

Логарифмический декремент затухающих колебаний определялся следующим образом. Из сигнала затухающих колебаний (рис. 7а) используя преобразование Гильберта находится аналитический сигнал:

$$\dot{s}_a t = s t + j s_{\perp} t , \quad (1)$$

где  $\dot{s}_a t$  – аналитический сигнал;  $s_{\perp} t$  – сопряженный сигнал, полученный из исходного сигнала  $s t$  преобразованием Гильберта;  $j$  – мнимая единица. Далее из аналитического сигнала находим его амплитудную огибающую (рис. 7б) [6]:

$$A t = |\dot{s}_a t| = \sqrt{s^2 t + s_{\perp}^2 t} . \quad (2)$$

Обработка виброграммы производится в среде программы MATLAB. Далее амплитудная огибающая аппроксимируется в пакете Curve Fitting Toolbox программы Matlab экспоненциальной функцией (рис. 7в) [7]:

$$A t = A_{\max} e^{-bt} . \quad (3)$$

По найденному коэффициенту  $b$  определяем логарифмический декремент:

$$\delta = \frac{b}{f}, \quad (4)$$

где  $f$  – частота свободных колебаний упругого элемента.

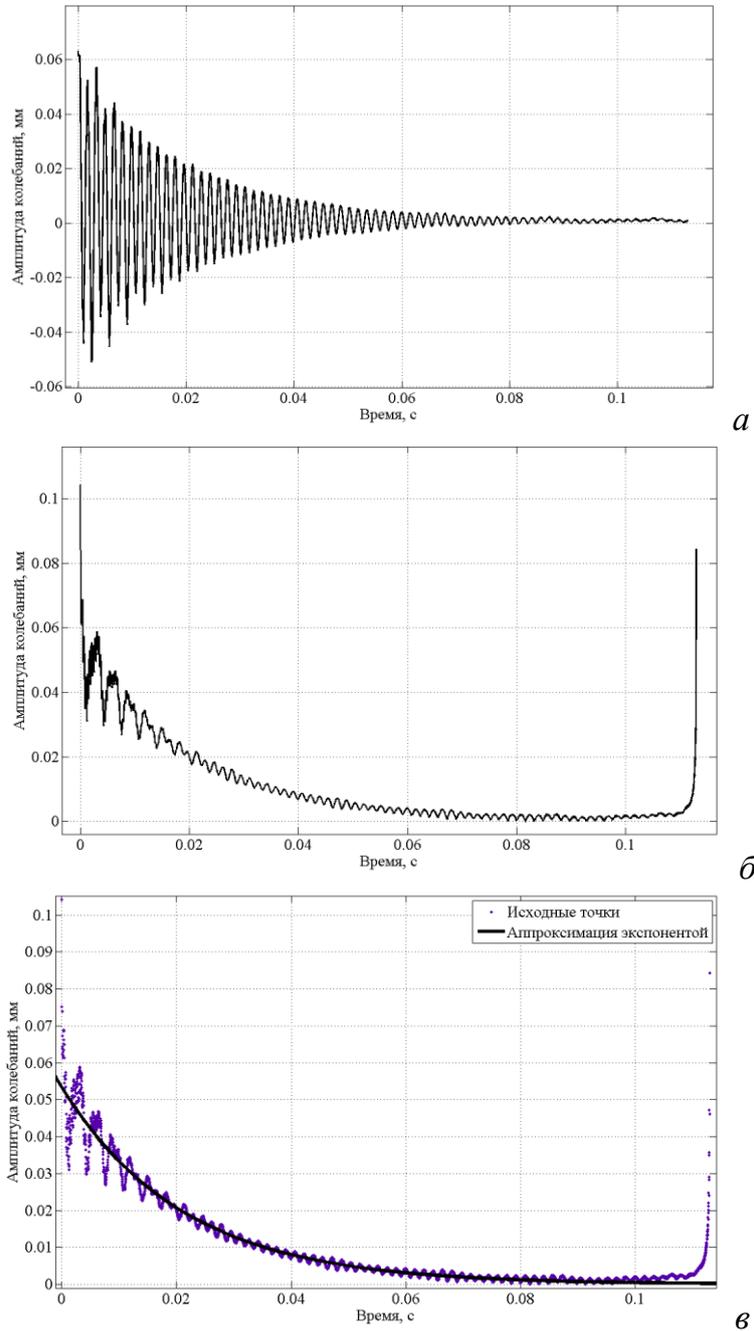


Рисунок 7 – Обработка виброграммы затухающих колебаний

Проведенные измерения логарифмического декремента показали (рис. 8), что он возрастает при увеличении вылета упругого элемента и увеличении дополнительных масс. От величины импульса удара шарика логарифмический декремент практически не изменяется (рис. 9).

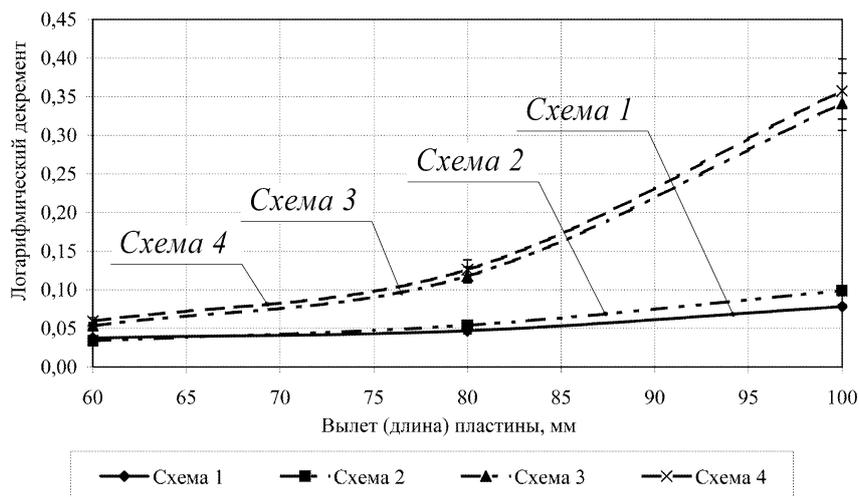


Рисунок 8 – Логарифмический декремент затухающих колебаний при различных вылетах упругого элемента

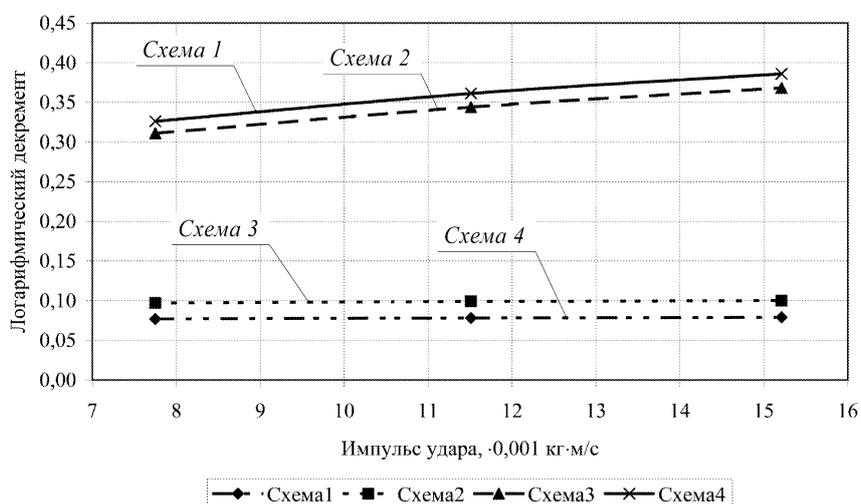


Рисунок 9 – Логарифмический декремент затухающих колебаний при различных импульсах удара шарика

Полученные значения логарифмического декремента находятся в одном диапазоне со значениями, приведенными в работе [2] (средний логарифмический декремент для фрезерных станков – 0,23) и в работе [8] (логарифмический декремент для фрезерной оправки из Стали 45 – 0,32, из Стали 30ХГСА – 0,33).

Проведенные исследования динамических характеристик установки моделирующей нежесткую деталь типа заземленной пластины позволяют сделать следующие выводы:

1. При ударном возбуждении стальным шариком возникают преимущественно колебания по первой изгибной форме.
2. Частота собственных колебаний определяется свойствами самой упругой системы и не зависит от импульса удара шарика. Частота собст-

венных колебаний уменьшается с увеличением вылета упругого элемента (пластины), и увеличением массы колебания системы.

3. Максимальное значение амплитуды, после ударного возбуждения УС импульсом силы увеличивается с увеличением вылета упругого элемента (пластины), и снижением массы УС. Увеличение значения импульса силы увеличивало амплитуду колебаний.

4. Логарифмический декремент затухания, определяющий демпфирующие характеристики УС, возрастает с увеличением вылета упругого элемента (пластины) и массы колебательной системы. Изменение импульса удара не оказывает влияния на величину логарифмического декремента затухания.

В дальнейшем планируется использовать установку, моделирующую нежесткую деталь типа заземленной пластины, для исследований вибрационных процессов при фрезеровании с целью изучения влияния динамических характеристик упругой системы и режимов фрезерования на вибрации, возникающие при обработке.

**Список использованных источников:** 1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с. 2. Прочность, устойчивость, колебания – Справочник в трех томах. Том 3 / Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 587 с. 3. Madenci E. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS / Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. – USA, Springer. – 686 p. 4. Гайджузов П.П. Расчет стержневых систем на устойчивость и колебания: учебное пособие / П.П. Гайджузов. – Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2009. – 195 с. 5. ГОСТ ISO 7626-5-99 Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Часть 5. Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не прикрепляемым к конструкции. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 20 с. 6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / Сергиенко А.Б. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с. 7. Ануфриев И. MATLAB 7. Наиболее полное руководство / И. Ануфриев, А. Смирнов, Е. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1082 с. 8. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1986. – 184 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kudinov V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. – M.: Mashino-stroenie, 1967. – 360 s. 2. Prochnost', ustojchivost', kolebanija – Spravochnik v treh tomah. Tom 3 / Pod red. I.A. Birgera i Ja.G. Panovko. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 587 s. 3. Madenci E. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using AN-SYS / Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. – USA, Springer. – 686 p. 4. Gajdzhurov P.P. Raschet stержnevyyh sistem na ustojchivost' i kolebanija: uchebnoe posobie / P.P. Gaj-dzhurov. – Juzh.-Ros. gos. tehn. un-t. – Novocherkassk: JuRGTU, 2009. – 195 s. 5. GOST ISO 7626-5-99 Vibracija i udar. Jeksperimental'noe opredelenie mehanicheskoy pod-vizhnosti. Chast'5. Izmerenija, ispol'zuvuie udarnoe vozbuzhdenie vozbuditelem, ne prikrepnjaemym k konstrukcii. – Minsk: Mezhhgosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii, 2000. – 20 s. 6. Sergienko A.B. Cifrovaja obrabotka signalov / Sergienko A.B. – SPb.: Piter, 2002. – 608 s. 7. Anufriev I. MATLAB 7. Naibolee polnoe rukovodstvo / I. Anufriev, A. Smirnov, E. Smirnova. – SPb.: BHV-Peterburg, 2005. – 1082 s. 8. Zharkov I.G. Vibracii pri obrabotke lezviynym instru-mentom / I.G. Zharkov. – L.: Mashinostroenie. Leningr. Otd-nie, 1986. – 184 s.