

FRI-ONLINE-1-MEMBT-09

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE MECHANICAL OSCILLATIONS DURING THE MILLING PROCESS⁹

Assoc. Prof. Dimitar Dimitrov, PhD

Department of Manufacturing engineering

“Angel Kanchev” University of Ruse

Phone: 082-888 653

E-mail: ddimitrov@uni-ruse.bg

Abstract: *It is known that when machining by mechanical cutting there are prerequisites for the occurrence of vibrations at low stability of the technological system. Such are the cases when processing thin-walled beams. A typical example is the columns of truck cranes. They are characterized by large length, thin walls and low stability. In series production, machining centers and special devices are used to establish the column to the working table of the machine. The device provides a certain oriented and constant position of the beam relative to the coordinate system of the machine. The effective use of additional supports and attachments requires them to be in the right places. For this purpose, the amplitude-frequency characteristics of the interfering force must also be known. The publication presents the results of experimental research for this purpose*

Keywords: *Metal cutting, vibrations.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Цифровите технологии, машините с ЦПУ и масовото прилагане на автоматизация са характерна особеност на съвременното машиностроително производство във всичките му типове от единично до серийно. (Penchev M.S., I. Peeva .(1995), (Kostadinov Ch., I. Peeva. (2017,2019,2020). Основно изискване към технологиите, базирани на машини и оборудване с ЦПУ със сравнително висока цена е постигането на висока производителност в съчетание с ефективност на процесите. Прилагането на интензификация е естествен подход за повишаване на производителността, но това е съпътствано с по-голямо силово натоварване на технологичната система и се ограничава от нейните възможности да го поеме, без да повлияе на другите показатели и изисквания. Известно е, че стабилността (податливостта) е основна характеристика на технологичната система, имаща пряко отношение към ефективността на технологичния процес. Общата стабилност (податливост) на системата се формира от механичните характеристики на всеки от един от компонентите - машина, приспособление, инструмент, заготовка. (Angelov, Yu. A. 1999,2010), (Bozduganova, esteV.,M. Todorov. (1993), (Enchev PT, YA Angelov. (2004). Практиката показва, че при механично обработване чрез рязане, един от основните проблеми за ефективността са вибрациите в технологичната система, предизвикани от силите на рязане. Всяка технологична система може да се приеме и за механична. Следователно тя има свои собствени честоти на трептене, зависещи от конструктивните ѝ особености и механичните характеристики на материалите, от които е изработена (Stoyanov Sv., St. Stoyanov. (2011), Stoyanov, S. (2014,2017). При внасяне на смущаващи външни сили, съвпадащи по честота със собствените честоти на трептене на системата и отделните компоненти, се създават предпоставки за възникване на резонансни явления. При нарастване на амплитудата на трептене в системата и особено в обработвания детайл или режещия инструмент се влияе

⁹ Докладът е представен в секция „Механика и машиностроителни технологии“ на 13 ноември 2020 с оригинално заглавие на български език: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА АМПЛИТУДНО-ЧЕСТОТНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА МЕХАНИЧНИТЕ ТРЕПТЕНИЯ ПРИ ФРЕЗОВАНЕ

негативно върху процеса на механично обработка чрез рязане и получаването на желаното качество на повърхнините.

За ограничаване на негативния ефект от вибрациите са възможни няколко подхода.

1. Прилагане на дисипация. Целта е да се постигне намаляване на енергията (амплитудата) на вече възникнали вибрации с използване на виброгасящи устаройства. Това е доста разпространен метод от инженерната практика при режещите инструменти и инструментални държачи и адаптери.

2. Повишаване на стабилността на технологичната система. За детайла това се постига с допълнителни закрепвания в местата, съответстващи на собствените му форми - в зоните с максимуми на амплитудата (Dimitrov D., I. Georgiev.(2015), (Dimitrov D, N. Nikolov (2019). Изборът на места за допълнителни закрепвания се прави за онези собствени форми и честоти, които биха могли да съвпадат с предполагаемите или установените честоти на смущаващата сила. Подходът изисква да се моделират собствените честоти и форми на технологичната система и да се разполага с бази от данни за специфичните спектрални характеристики на смущаващата сила, възникваща при обработване с конкретен режещ инструмент.

3. Избягване на работа при вероятност от възникване на периодична смущаваща сила с честота, съпадаща със собствени честоти на технологичната система. Това предполага предварително определяне на собствените честоти на технологичната система чрез моделиране и чрез създаване на бази от данни за специфичните спектрални характеристики на смущаващата сила, възникваща при обработване с конкретен режещ инструмент.

Както бе отбелязано, за последните два подхода е необходима информация както за честотните характеристики на системата, така и на смущаващата сила. Например един такъв периодичен източник на смущаваща сила, който може лесно да бъде определен аналитично е честотата на врязване на режещите ръбове на инструмента при прекъснато рязане, напр. фрезование. Освен този източник е известно, че съществуват и други, които са функция на особеностите на процеса рязане, каквото е и стружкочупенето.

Характеристиките на технологичната система, включващи собствените честоти и форми на системните компоненти могат да се определят аналитично чрез модален анализ с метода на крайните елементи. Това е изключително трудоемка задача, но благодарение на научните изследвания и постижения, съчетаващи фундамента на механиката с изчислителните възможности на компютрите и на моделиращите и симулиращи компютърни програми вече е възможно да се получат бързи решения за инженерната практика. (Bozduganova, V.,M. Todorov. (1993), (Draganov I. (2016), Draganov I., R. Milkov, A. Pukhlev. (2018), Draganov I., N. Ferdinandov, D. Gospodinov, R. Radev, S. Mileva. (2019), Velchev, D. (2003).

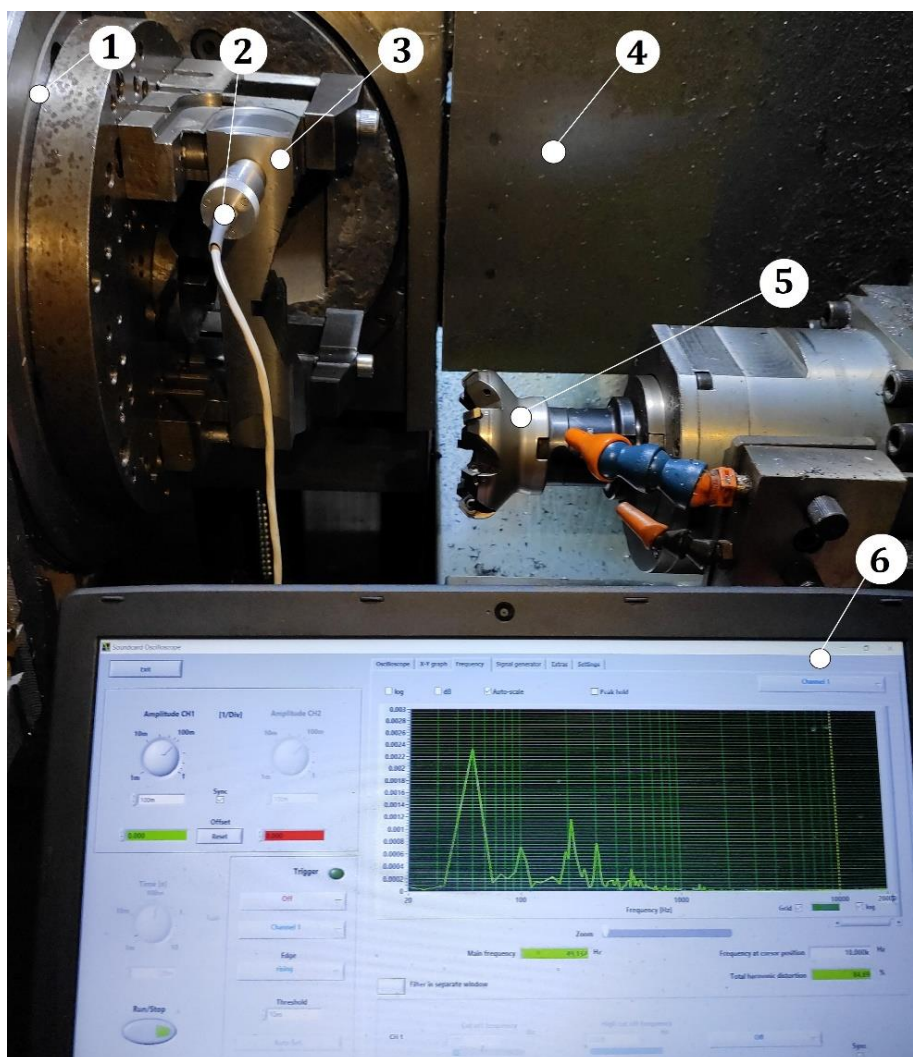
ИЗЛОЖЕНИЕ

Както бе посочено, използването на втория и третия подход изисква да се познават амплитудно-честотните характеристики на конкретния процес на рязане. Вече бе уточнено, че това може да се реши аналитично единствено по отношение на врязванията на режещите ръбове на инструмента. Друга възможност за получаване на тези характеристики е експерименталното им установяване. Тук е важно да се уточни, че натрупването на такива данни за даден режещ инструмент би било целесъобразно единствено, ако получената характеристика се характеризира с повторяемост и дори с възпроизводимост.

Потвърждаването или отхвърлянето на направеното допускане за повторяемост и възпроизводимост на амплитудно-честотната характеристика на процеса при рязане с даден вид режещ инструмент изисква провеждането на експеримент.

Експерименталната установка (fig.1) включва металоурежеша машина 1, която в случая е обработващ център MC 032, опитен образец (обработван детайл) 3, датчик за ускорение (акселерометър) 2 и персонален компютър (лаптоп) 6 със софтуер за обработване и представяне на данните от експеримента. Към работната маса 1 на металоурежешата машина с помощта на специално приспособление е закрепен опитния образец (детайл). Използвани са

два вида образци от конструкционна стомана, Единият е плътно тяло с призматична форма, а другият е правоъгълна тънкостенна греда. Акселерометърът е подбран и калибриран за честотен диапазон $20 \div 4000 \text{ Hz}$. Той е закрепен към образеца чрез постоянен магнит и е свързан с лаптопа посредством кабел. Сигналът от него се обработва със Soundcard Scope (Soundcard Oscilloscope) чрез преобразуване на Фурие. Като краен резултат се получава



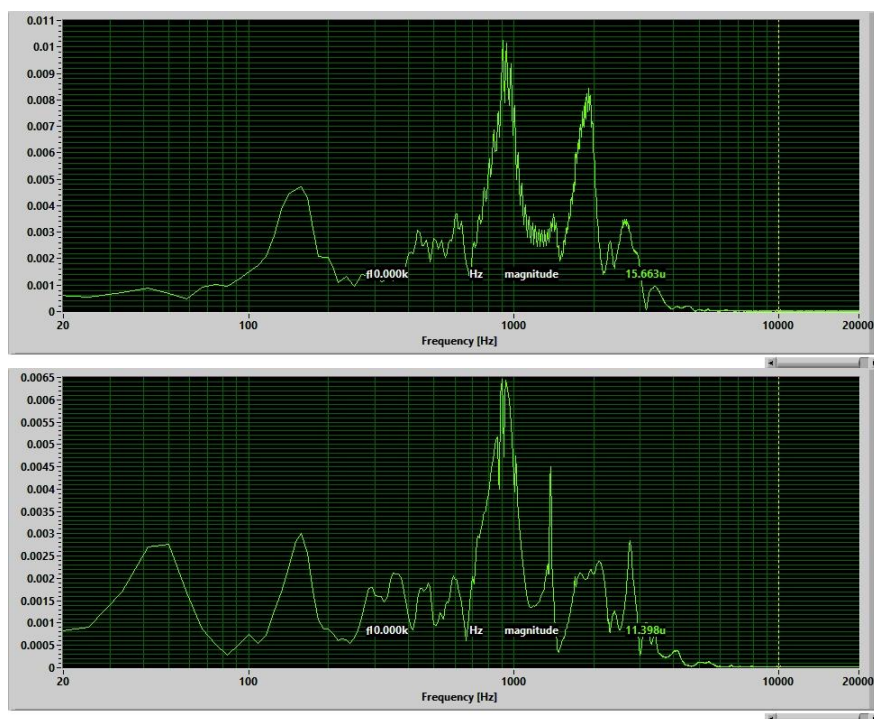
Фиг. 1 Опитна уредба

списък от честоти и амплитуди. Същият може да бъде онагледен графично под формата на осцилограма.

При експеримента са използвани металоурежещи инструменти за челно фрезозане със сменяеми твърдосплавни пластини, съответно със 7 и 8 на брой режещи зъба и диаметри съответно $\varnothing 80$ и $\varnothing 100 \text{ mm}$. Режимите на рязане са подбрани в съответствие с препоръчаните от производителя на режещите пластини и възможностите на машината. С всяка отделна фрезова глава са извършени серии от опити.

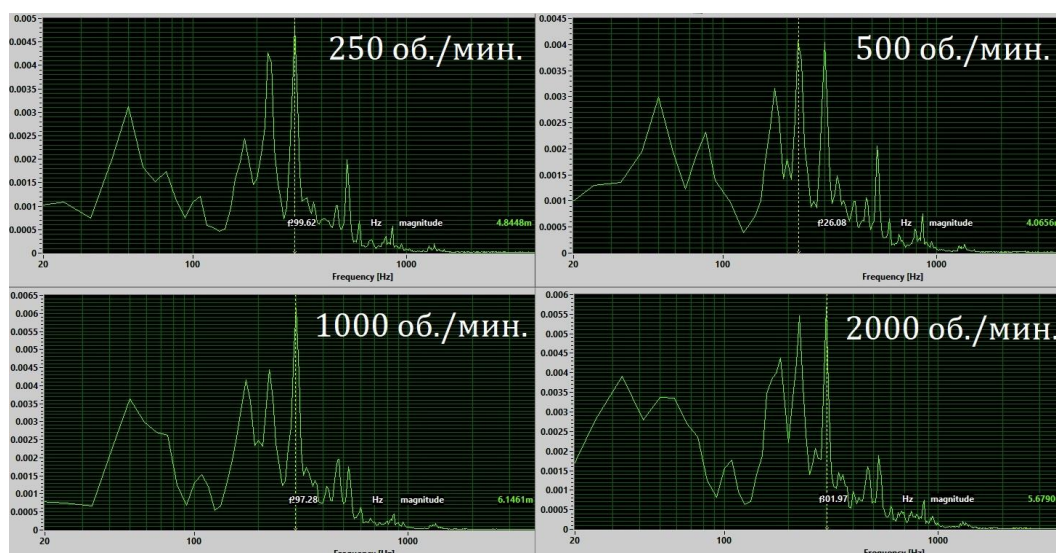
Експериментът е проведен в следната последователност и условия:

1) Първо се извършват измервания за определяне на собствените честоти и форми на технологичната система. За целта технологичната система е в покой и след еднократно импулсно (с удар) внасяне на неголяма смущаваща сила се отчита поведението на системата и се извеждат данни за собствените честоти. На фиг. 2 се виждат осцилограмите на два от направените опити. Анализът им чрез честотно и графично сравняване показва повтораемост на резултатите за получените собствени честоти. Разликата в амплитудите се дължи на нееднаквостта в големината на внасяната смущаваща сила.



Фиг. 2 Собствени честоти на експерименталната технологична система върху MC 032 и плътен образец

2) Осъществяват се измервания при работа на празен ход на машината, т.е. вretenото се върти, но няма контакт между режещия инструмент и образца. Опитите са проведени при четири различни скорости - по две скорости за всеки от двата оборотни диапазона, с които разполага скоростната кутия на машината, както следва: 250 min^{-1} и 500 min^{-1} за I-ви оборотен диапазон и 1000 min^{-1} и 2000 min^{-1} за II-ри оборотен диапазон. Отчитанията се правят в рамките на един цикъл, след последователно редуване на четирите избрани честоти на въртене. Изпълнени са 5 цикъла. Част от данните от един цикъл са представени в графична форма на фиг. 3.



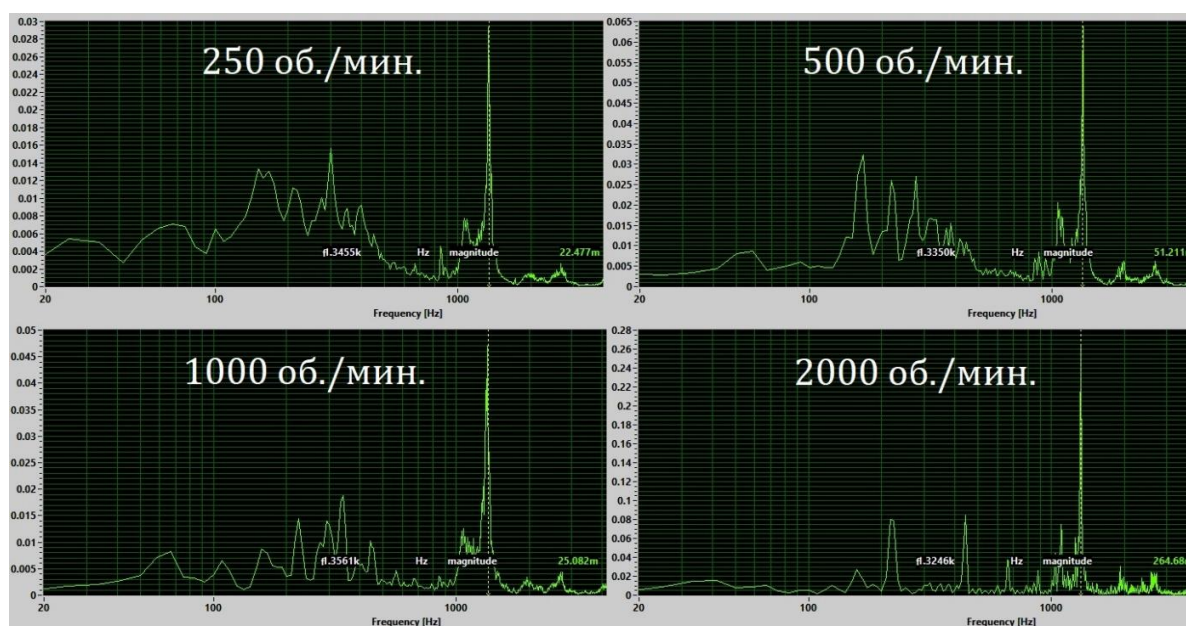
Фиг. 3 Честотни спектри при празен ход на MC 032

При съпоставка на графиките от фиг. 3 може да се установи, че промяната на оборотите на вretenото за изследваните честоти на въртене има несъществено влияние върху получаваната спектрална характеристика. Наблюдават се максимуми при едни и същи честоти.

3) Измерванията се осъществяват в работни условия с осъществяване на рязане при същите обороти на вретеното, както при празен ход. При всяка от тези четири различни честоти на въртене – 250, 500, 1000, 2000 min^{-1} са извършени по 5 повторения (измервания) на вибрациите. Изпълнени са две серии опити. Първата е с фреза със 7 режещи ръба. Втората серия включва опити с фреза с 8 режещи ръба при честота на въртене 500 min^{-1} .

Дълбочината на рязане при всички опити е $a=0,4 \text{ mm}$, и съответства на характерната за чисто фрезозане. Работният ход се изпълнява чрез подавателно движение 60 mm, на инструмента по ос Y. Подаването на зъб е $f_z=0,1 \text{ mm}$. Скоростта на минутното подаване се изчислява за всеки опит в зависимост от честотата на въртене на фрезата и броя режещи зъби. Така при обработване с еднакво подаване на зъб и дълбочина на рязане за всеки опит се осигуряват сравнително еднакви условия на рязане за всеки експеримент. Променлив фактор за дадена фреза е само честотата на въртене.

На Фиг. 4 са показани графичните интерпретации на вибрационното поведение на технологичната система при рязане на плътен образец при изследваните честоти. Анализът



Фиг. 4 Честотни спектри при обработване на плътен образец с фреза със 7 зъба

им дава основание за следните твърдения:

- За получените спектрални характеристики се наблюдава съвпадение на едни и същи или близки честоти с отчетливо по-големи амплитуди при изследваните различни обороти, т.е. част от трептенията не се влияят от различните скорости на рязане – наличие на възпроизводимост.

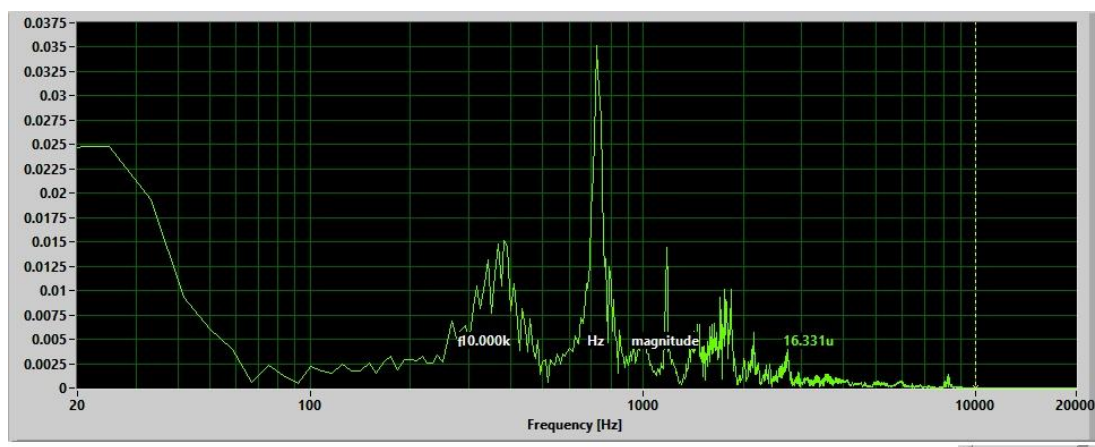
- При всяка от изследваните скорости 250, 500, 1000, 2000 min^{-1} се наблюдават по-големи амплитуди за честоти, близки до теоретично пресметнатите очаквани честоти 29, 58, 116 и 233 Hz, които съответстват на честотата на врязванията с фреза със 7 режещи ръба.

- При честота около 1000 Hz се наблюдава резонансен ефект – съвпадение на собствена честота с една от честотите на смущаващата сила.

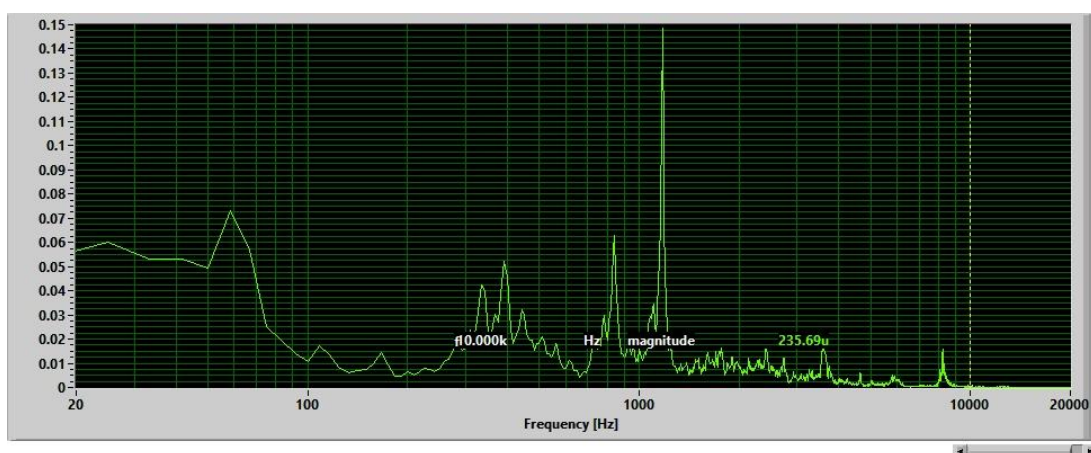
Графичното представяне на собствените честоти на технологичната система, когато образецът е тънкостенна греда и при експерименталното ѝ обработване с фреза със 7 режещи ръба със същите режими на рязане при 500 min^{-1} е показано на фиг.5.

- Наблюдава се (фиг. 5А) повишена амплитуда на честота (около 60Hz), съответстваща на врязванията на режещите ръбове на фрезата при зададената честота на въртене

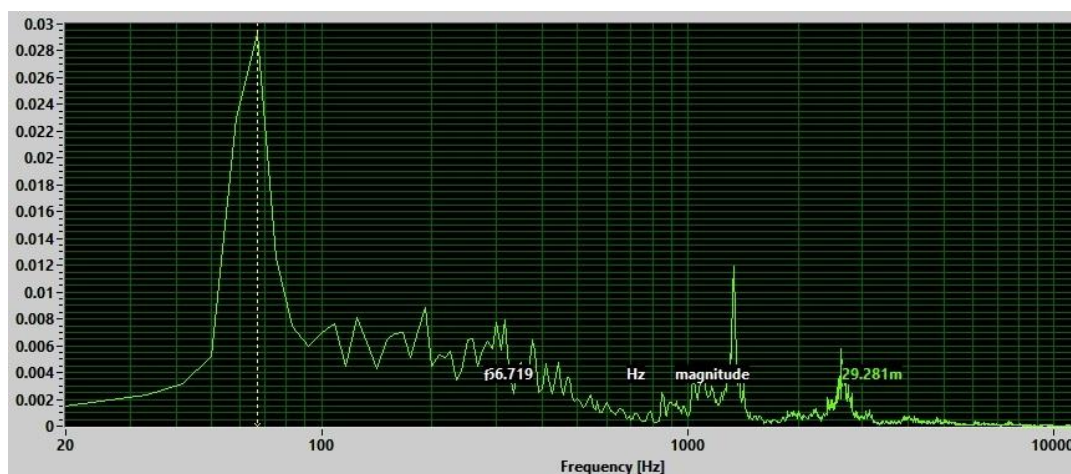
- В резултат на резонанс се отчита $4 \div 10$ пъти увеличаване на амплитудата на част от честотите при обработване спрямо съответните собствени честоти



Фиг. 5 А) Собствени честоти на технологичната система с тънкостенна греда



Фиг. 5 Б) Честотен спектър на технологичната система при фрезване с 500 min^{-1} на тънкостенна греда



Фиг. 6 Честотен спектър на трептения при обработване на плътен образец с фреза с 8 режещи ръба.

С фреза с 8 режещи ръба е изпълнен само един експеримент при честота на въртене на вретеното 500 min^{-1} . На Фиг. 6 е представен графично резултатът, получен при едно от измерванията. Честотата (около 66 Hz) с най-голяма амплитуда съответства на врязванията на режещите ръбове на фрезата.

ИЗВОДИ

Проведеното експериментално изследване потвърждава пряката връзка между генерираните честоти и внасяните смущения във функцията на периодичните връзвания на режещите ръбове на въртящ се инструмент.

Промяната на честотата на въртене на фрезата не оказва съществено влияние на получаваната честотна характеристика, а само на амплитудата на някои от честотите.

Получените резултати при обработване на един и същи образец показват повторимост на резултатите, независимо от намаляването на масата на образца след всяко обработване.

При определени технологични условия се наблюдава възпроизводимост на честотите във вибрационното поведение на технологичната система.

Дори това ограничено по отношение на факторите изследване показва, че са налице предпоставки да се твърди, че за определени технологични условия е налице предвидимост на някои аспекти във вибрационното поведение на системата и съответно е възможно да се направи спектрален паспорт на технологичната система и режещия инструмент.

REFERENCES

Angelov, Yu. A. (1999) Modeling and research of the dissipative properties of joints and gears from main translations of metal-cutting machines. In: 5th International Conference AMTECH'99, Plovdiv, TU Plovdiv, 1999, pp. 116-122. **(Оригинално заглавие:** предавки от главни преводи на металоурежещи машини. В: 5-та международна конференция AMTECH'99, Пловдив, ТУ Пловдив, 1999, стр. 116-122)

Angelov, Yu. A. (2010) Parametric study of the vibration resistance of the main translation of a metal-cutting machine. International virtual journal for science, technics and innovations "Machines, Technologies, Materials", 2010, issue Issue 4-5, pp. 28-31, ISSN 1313-0226. **(Оригинално заглавие:** Ангелов, Ю. А. Параметрично изследване на виброустойчивостта на главен превод на металоурежеща машина. International virtual journal for science, technics and innovations "Machines, Technologies, Materials", 2010, брой Issue 4-5, стр. 28-31, ISSN 1313-0226.)

Bozduganova, V., M. Todorov. (1993) *Numerical study of longitudinal impact of an elastic rod using the finite element method*, Scientific Laboratories of the Higher School of Higher Education in Bulgaria, T. 27, Higher Military General School in V. Tarnovo - Tarnovo, 1993, pp. 34-39

Dimitrov D., I. Georgiev. (2015) Development of the concept of a metal-cutting machine for processing of thin-walled large-size details, Scientific Conference - RU&SU'15 Balgariya, Ruse, 171-174. **(Оригинално заглавие:** Димитров Д., И. Георгиев. (2015) *Разработване на концепцията на металоурежеща машина за обработване на тънкостенни едрогабаритни детайли*, Научна конференция - РУ&СУ'15, 2015, 171-174)

Dimitrov D, N. Nikolov (2019) Studying the Possibilities of an Approach for Limiting Vibrations when Machining Thin-Walled Beams Scientific Conference - RU&SU'15 Balgariya, Ruse pp. 22-26, FRI-1.417-1-MEMBT-02, ISSN 2603-4123

Dokova (Peeva) I., M. Penchev. (1989) On the design of springs for vibrating power supplies. In: NT of VTU "A. Kanchev", volume XXXII, series 1, Ruse, 1989, pp. 105-110. **(Оригинално заглавие:** Докова (Пеева) И., М. Пенчев. Относно проектиране на ресори за вибрационни захранващи устройства. НТ на ВТУ "А. Кънчев", том XXXII, серия 1, Русе, 1989, стр. 105-110

Draganov I. (2016) Application of the volumetric shell finite elements when using the P1SR technique. In: Scientific works of the University of Ruse, volume 55, series 2, Ruse, 2016, pp. 56-62, ISBN 1311-3321. **(Оригинално заглавие:** Драганов И. Приложение на обемните черупкови крайни елементи при използване на техниката P1CP. В: Научни трудове на Русенския университет, том 55, серия 2, Русе, 2016, стр. 56-62, ISBN 1311-3321.

Draganov I., R. Milkov, A. Pukhlev. (2018) Methodology for strain gauge and chassis of a container loader. *Mechanics of Machines*, 2018, issue 2, pp. 74-77, ISSN 0861-9727. **(Оригинално заглавие:** Драганов И., Р. Милков, А. Пухлев. Методика за тензометриране на стрела и шаси на контейнеран товарач.// *Механика на Машините*, 2018, брой 2, стр. 74-77, ISSN 0861-9727.

Draganov I., N. Ferdinandov, D. Gospodinov, R. Radev, S. Mileva. (2019) Numerical simulation of titanium alloy welding by electric arc discharge in vacuum. *Mechanical Engineering and Mechanical Engineering*, 2019, issue 1, pp. 29-33, ISSN 1312-8612. **(Оригинално заглавие:** Драганов И., Н. Фердинандов, Д. Господинов, Р. Радев, С. Милева. Числено симулиране на заваряване на титанова сплав чрез електродъгов разряд във вакуум.// *Машиностроене и машинознание*, 2019, брой 1, стр. 29-33, ISSN 1312-8612.)

Enchev PT, YA Angelov. (2004) Vibration resistance of the main translation of a metal-cutting machine. *Mechanics of machines*, 2004, issue XII, book 2, pp. 92-95, ISSN 0891-9727. **(Оригинално заглавие:** Енчев П.Т., Ю.А.Ангелов. Виброустойчивост на главен превод на металоуреждаща машина. *Мех. на машините*, 2004, брой год. XII, кн. 2, стр. 92-95, ISSN 0891-9727.)

Kostadinov Ch., I. Peeva. (2017) Influence of the scenario of service of technological machines in RTM of parallel action. *International scientific journal "Actual Science"* 3/2017, Volgograd, 2017, pp.:39-42, ISSN 2587-9022. **(Оригинално заглавие:** Костадинов Ч., И. Пеева. Влияние сценария обслуживания технологических машин в РТМ параллельного действия. *Международный научный журнал „Актуальная наука“* 3/ 2017, Волгоград, 2017, стр.: 39-42, ISSN 2587-9022.)

Kostadinov Ch., I. Peeva. (2017) Regarding the dependence of RTM productivity on the service equipment maintenance scenario. *Scientific notices of NTS in mechanical engineering*, XXV year, issue 2/217, XXVI ISTC "ADP-2017", Sozopol, 2017, pp. 150-154. **(Оригинално заглавие:** Костадинов Ч., И. Пеева. Относно зависимостта на производителността на РТМ от сценария на обслужване на технологичното оборудване. *Научни известия на НТС по машиностроене*, XXV год, брой 2/217, XXVI МНТК “АДП-2017”, Созопол, 2017, стр.: 150-154.)

Kostadinov Ch., I. Peeva. (2017) Comparative analysis of models for analytical forecasting of the performance of robotic technological modules. *Scientific notices of NTS in mechanical engineering*, XXV year, issue 2/217, XXVI ISTC "ADP-2017", Sozopol, 2017, pp. 144-149.) **(Оригинално заглавие:** Костадинов Ч., И. Пеева. Сравнителен анализ на модели за аналитично прогнозиране на производителността на роботизирани технологични модули. *Научни известия на НТС по машиностроене*, XXV год, брой 2/217, XXVI МНТК “АДП-2017”, Созопол, 2017, стр.: 144-149.)

Kostadinov Ch., I. Peeva. (2019) Simulatoion modeling of RTM with parallel structure. *Journal of the Technical University - Sofia, Plovdiv Branch “Fundamental Sciences and Applications”* vol.25, 2019, Online ISSN: 2603-459 X.

Kostadinov Ch., I. Peeva. (2020) Features of queuing systems with queues, *Discrete Production Automation Magazine*, 2/2020, ed. TU-Sofia, pp. 22-25, ISSN: 2682-9584. **(Оригинално заглавие:** Костадинов Ч., И. Пеева. Особенности на системите за масово обслужване с опашки, сп. *Автоматизация на дискретн. произв.*, 2/2020, изд. ТУ-София, стр. 22-25, ISSN: 2682-9584.)

Nikolov N., (2019) Establishment for Experimental Determination of Natural Frequencies and Forms of Hollow Steel Beams. *Procedings Volume 58, book 2.2 Mechanical Engineering and Machine-Building Technologies Ruse 2019*, pp. 24-29, WED-SSS-MEMBT-05, ISSN 2603-4123

Penchev M.S., I. Peeva. (1995) In Sat. '95, Sofia, p .: Study of the efficiency of a vibrating power supply device with variable spring elasticity.// *Automation and Informatics*, 1995, issue 5, pp. 397 – 400 **(Оригинално заглавие:** Пенчев М.С., И.В.Пеева .- В сб. '95, София, , стр.: . Изследване на ефективността на вибрационно захранващо устройство с променлива еластичност на ресорите.// *Автоматика и информатика*, 1995, брой 5, стр. 397 – 400

Stoyanov Sv., St. Stoyanov. (2011) *Experimental oscillating system*. C: Scientific Works of the University Angel Kunchev, Rousse, 2011, ISBN 1311-3321

Stoyanov, S. (2017) *Sensors mass influence on the natural frequency of a cantilever beam*. JOURNAL OF THE TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA, PLOVDIV BRANCH, BULGARIA, "Fundamental Sciences and Applications", 2017, No 23, pp. 147-150, ISSN ISSN 1310-8271.

Stoyanov, S. (2014) *Vibration isolation experimental setup*. Part II: Theoretical investigation. IN: Scientific papers of the University of Ruse, Ruse, 2014, pp. 33-37 ISSN 1311-3321

Velchev, D. (2003) *Application of the finite element method for calculating a non-bearing skeletal facade wall*. In: АМТЕХ, Varna, 2003 (**Оригинално заглавие:** Велчев, Д., 2003) *Приложение на метода на крайните елементи за изчисляване на неносеща скелетна фасадна стена*. В: АМТЕХ, Варна, 2003

Dynamich vibration technology <http://www.vibrationmountsindia.com/CNC-vibration-isolation.html>

This publication has been developed in conjunction with the FTM 03 2020 project from the University of Rousse "A. Kanchev " research fund.