суттєво підвищити продуктивність сміттєвозів в цілому (економія пального 2,2 т/рік на один автомобіль) за рахунок кращої наповненості кузова.

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 2004 року № 265 "Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами". 2. Pressmullfahrzeuge Faun Kuka Rotopress. – Osterholz-Scharmbeck, 1995. – С. 2-3. 3. Патент України № 61580 А, МПК7 В 65 F 3/20. Гідропривод ущільнюючої плити сміттєвоза / В.І. Савуляк, О.В. Березюк – 2003032027; Заявл. 07.03.2003. Опубл. 17.11.2003, Бюл. № 11. – С.22. 4. Патент України № 5076 U, МПК7 F 15 B 21/12. Клапан-пульсатор диференціальної дії / О.В. Березюк – 20040705249; Заявл. 01.07.2004. Опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2. – С.41. 5. Коц И.В. Разработка и исследование клапанов-пульсаторов для гидравлических приводов вибрационных горных машин. – Дис… канд. техн. наук: 05.02.03. – Винница, 1994. – 227 с. 6. Березюк О.В. Вібраційний гідропривод плити пресування твердих побутових відходів у сміттєвозах: Дис… канд. техн. наук: 05.02.03. – Вінниця, 2005. – 217 с. 7. Гидропривод сваепогружающих и грунтоуплотняющих машин / М.Е. Иванов, И.Б. Матвеев, Р.Д. Искович-Лотоцкий, В.А. Пишенин, И.В. Коц. – М.: Машиностроение, 1977. – 174 с.

УДК 629.3.03:62-837:62-531.7

П.С. БЕРНИК, Р.В. ЧУБИК

Вінницький державний аграрний університет

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИНАХ ІЗ ДЕБАЛАНСНИМ ПРИВОДОМ

© Берник П.С., Чубик Р.В., 2006

Розглянуто перехідні процеси у вібраційних технологічних машинах із дебалансним приводом. За допомогою експериментально отриманих характеристик обґрунтовано методику, що дозволяє одержати мінімальні перехідні процеси в момент запуску та зупинки (АВТМ ВТМ) із дебалансним приводом.

In this article the analysis of transitional processes is conducted in the technological machines of vibrations from where by occasion. On the base of analysis of the experimentally got descriptions grounded method, that allows to get minimum transitional processes in the moment of start and stop from where by occasion.

Постановка проблеми. Практично всі вібраційні технологічні машини (ВТМ) із дебалансним приводом [1] працюють в резонансному режимі. В момент запуску та зупинки таких ВТМ відбувається перехід ВТМ через резонанс, що супроводжується 2-3-кратним зростанням амплітуди. Як наслідок виникають значні перевантаження в пружній системі ВТМ та в підшипниках дебалансного вала.

Аналіз останніх досліджень. Для зменшення перехідних процесів у вібраційних технологічних машинах із дебалансним приводом широко застосовуються керовані дебалансні віброзбуджувачі [2]. Принцип дії таких віброзбуджувачів полягає в тому, що при виході кутової швидкості дебалансного вала віброприводу на задані технологічно обумовлені частоти обертання, які відповідають зарезонансному режиму роботи ВТМ, відбувається збільшення ексцентриситету дебалансної маси віброприводу в діапазоні від 0 (мм) до заданого значення. Така реалізація приводу ВТМ дозволяє проводити запуск в резонансному режимі. Досконалішими за керовані дебалансні віброзбуджувачі є ВТМ із адаптивними системами управління параметрами приводу (адаптивні вібра-

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

ційні технологічні машини АВТМ) [3, 4, 8]. АВТМ із дебалансним приводом працюють у постійному резонансному режимі і у разі потреби також можуть забезпечити зарезонансний режим роботи ВТМ. Перехідні процеси у (АВТМ та ВТМ) із дебалансним приводом істотно відрізняються один від одного і на сучасному етапі не є достатньо дослідженими.

Задачі досліджень. Експериментально дослідити перехідні процеси у (АВТМ та ВТМ) із дебалансним приводом. На базі аналізу експериментально отриманих характеристик обґрунтувати методику, що дозволяє одержати мінімальні перехідні процеси в момент запуску та зупинки (АВТМ ВТМ) із дебалансним приводом.

Дослідження перехідних процесів у (ВТМ та АВТМ) ДП. Перехідні процеси досліджують на експериментальній моделі вібраційної технологічної машини із дебалансним приводом (рис. 1) за допомогою віброметрологічного комплексу ROBOTRON 00-100 [9] із стандартними п'єзоелектричними датчиками KD 35 (акселерометрами). За допомогою ROBOTRON 00-100 можуть бути виміряні: пікове додатне, пікове від'ємне та ефективне (діюче) значення трьох основних параметрів: вібропереміщення (s), віброшвидкості (V), віброприскорення (a) в частотному діапазоні з 1 Гц по 15 кГц із основною похибкою 0.5%. Отримані експериментальні результати записували та обробляли за допомогою програмного середовища MATLAB.

Рис. 1. Загальний вигляд обладнання та експериментальної установки для дослідження перехідних процесів у ВТМ та АВТМ

Для дослідження перехідних процесів у ВТМ із дебалансним приводом було проведено плавний запуск експериментальної установки (рис. 1) у зарезонансний режим роботи (характерний для ВТМ із ДП) за допомогою перетворювача частоти фірми MITSUBISHI FR-E540 0.75K – EC [5]. Під час виходу установки на зарезонансний режим роботи, роботи та зупинки установки записували три основні вібропараметри: (s), (V), (a) у реальному часі із частотою дискретизації $f_d = 1\,кГц$ програмним середовищем MATLAB. Отримані результати зображені на рис. 2, рис. 3, рис. 4, відповідно до вищевказаної послідовності. Результати записували окремо кожний, але усі при однаковій масі робочого органу та мали однакову тривалість в часі ($t = 12c$). Кожна із трьох зображених віброграм (рис. 2, рис. 3, рис. 4) поділена на три основні зони. Зона **А** – плавний запуск установки в зарезонансний режим роботи. При плавному запуску частота обертання валу дебалансного приводу прямолінійно залежить від часу і, як видно, із рис. 2, через 3 секунди її значення дорівнювало номінальній частоті обертів вала електродвигуна (4А71В2У3) (змінилось від 0 до 2840

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

(об/хв)). Зона **B** – стабільний зарезонансний режим роботи ВТМ. Зона **C** – зупинка ВТМ із плавним вибігом вала електродвигуна. Аналізуючи експериментально отримані результати вібропереміщення при перехідних процесах у ВТМ (рис. 2), можна побачити, що при перехідних процесах амплітуда вібропереміщення у 2,2 раза більша за нормальну робочу. Із рис. 3 видно, що в момент перехідних процесів пікове значення амплітуди віброшвидкості (зона **A**, зона **C**) не перевищує робочого значення амплітуди віброшвидкості, а віброприскорення змінюється майже за експоненціальним законом, і в зонах проходження крізь резонанс зростання амплітуди мізерне.

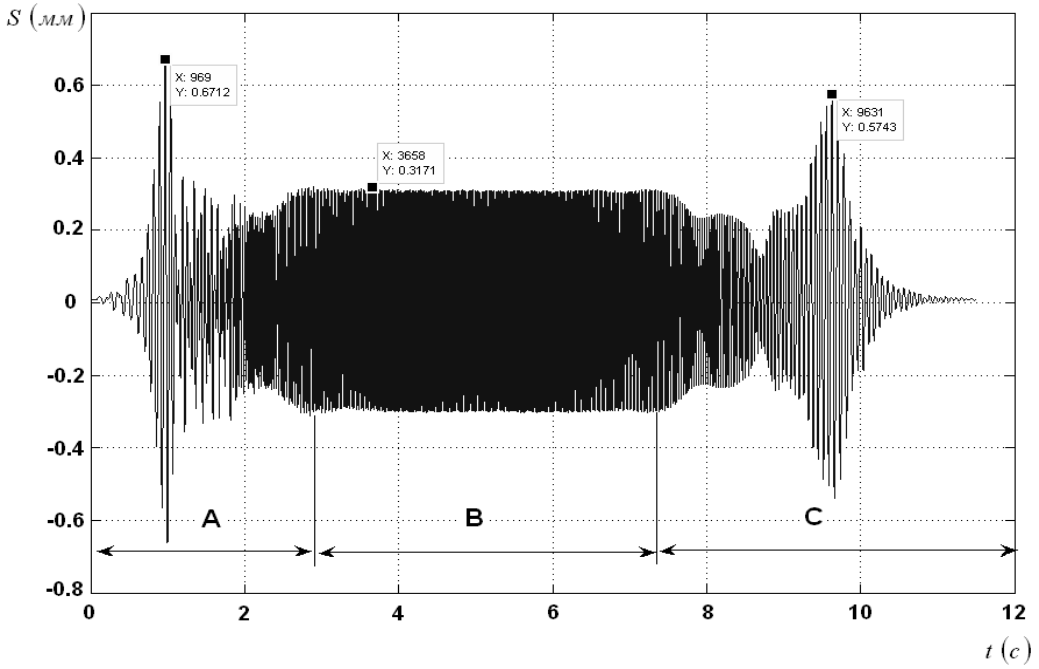

Рис. 2. Експериментально отримана зміна вібропереміщення при перехідних процесах у ВТМ із дебалансним приводом

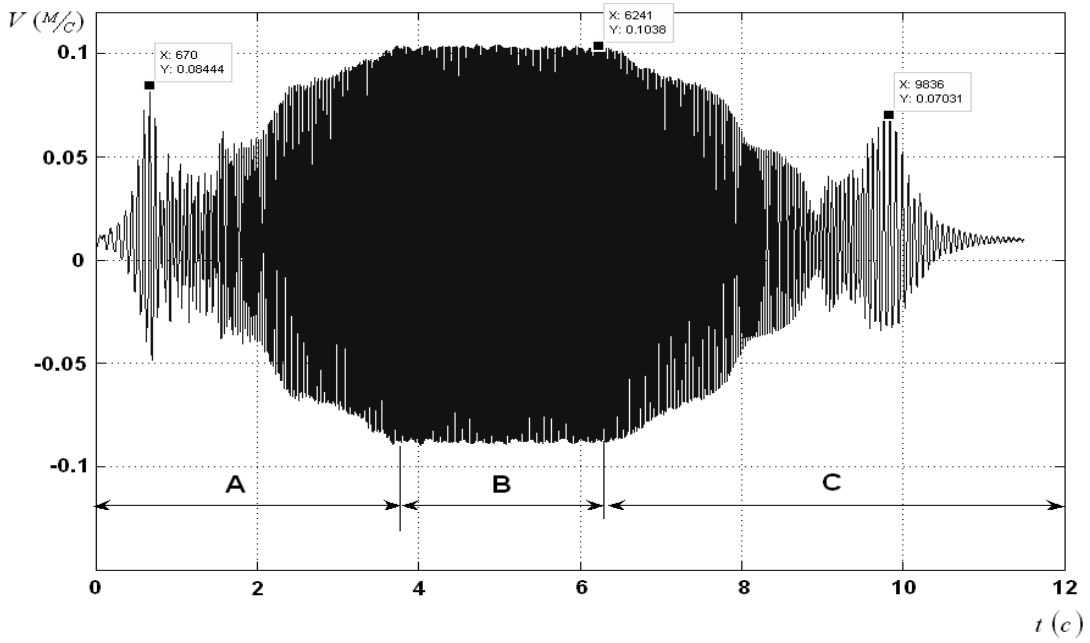

Рис. 3. Експериментально отримана зміна віброшвидкості при перехідних процесах у ВТМ із дебалансним приводом

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

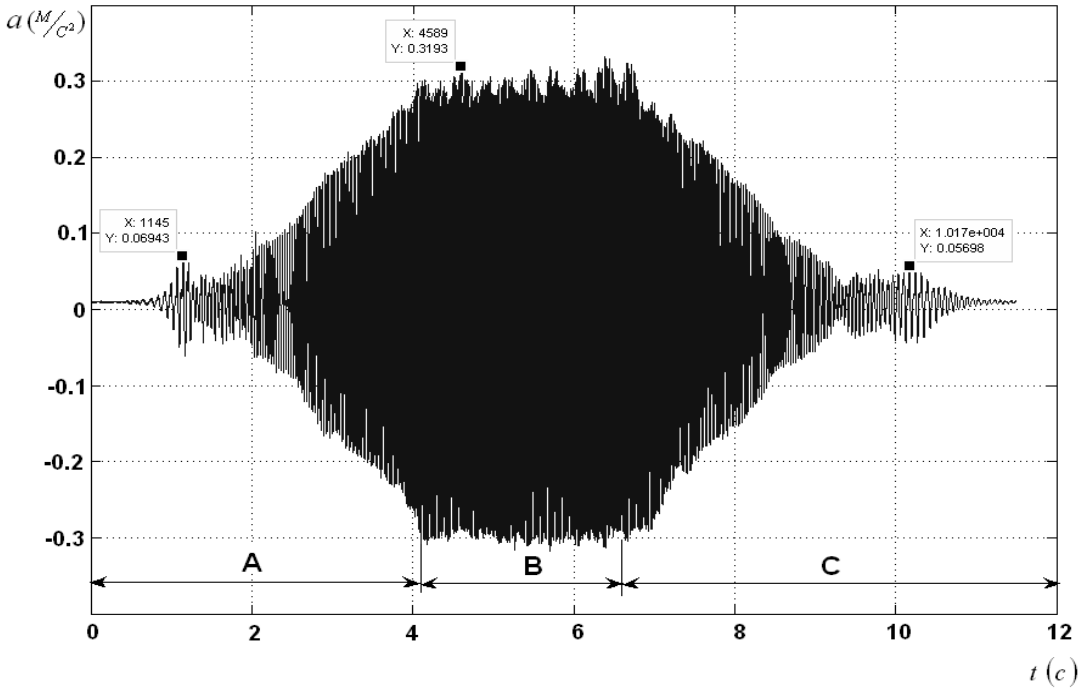

Рис. 4. Експериментально отримана зміна віброприскорення при перехідних процесах у ВТМ із дебалансним приводом

Для повнішого аналізу експериментально отриманих даних доцільно застосувати спектральний аналіз до вищезаписаних масивів ((*s*), (*V*), (*a*)). Для того, щоб порівняти енергетичні характеристики певного параметра у різних зонах, доцільно застосувати спектральну густину потужності, яку визначають за формулою (1) згідно з [6, 7]:

$$Sh_i = \left(|h_i|\right)^2 \tag{1}$$

де і – номер гармоніки, $h_i = |A_k + j \cdot B_k|$, A_k та B_k – коефіцієнти Фур'є для масивів вібропереміщення (*s*), віброшвидкості (*V*), віброприскорення (*a*). За допомогою спектральної густини потужності можна також з'ясувати резонансну (власну) частоту експериментальної установки. Після спектрального аналізу зони **А** (рис. 2) можна сказати, що власна резонансна частота експериментальної установки становить $f_{rez} = 13{,}67\ Гц$. І при плавному запуску в момент проходження частоти циклічної змушувальної сили, крізь (власну) резонансну частоту f_{rez} установки, спектральна густина потужності сигналу на резонансній частоті $Sh = 11.01(B \cdot c^2)$. Як видно на рис. 5, у спектрі пускової характеристики присутні ще додаткові гармоніки, спектральна густина потужності яких у 5 разів менша. Застосувавши спектральний аналіз до зони **В** (рис. 2), можна з'ясувати частоту коливань робочого органа та енергетичну характеристику (спектральну густину потужності сигналу на робочій частоті). Спектральна густина потужності сигналу на робочій частоті $Sh = 8.928(B \cdot c^2)$, що на 20 % менше ніж в режимі запуску (зона **А**) (рис. 6). Частота коливань робочого органу становить $f = 54.69\ Гц$ і в спектрі присутня ще одна гармоніка із частотою $f = 51.76\ Гц$. Беручи до уваги результати, зображені на рис. 5, які свідчать, що власна резонансна частота коливань установки $f_{rez} = 13{,}67\ Гц$, а частота коливань робочого органа $f = 54.69\ Гц$, можна зробити висновок, що експериментальна установка працює на четвертій гармоніці ($13.67\ Гц \times 4 = 54.68\ Гц$).

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

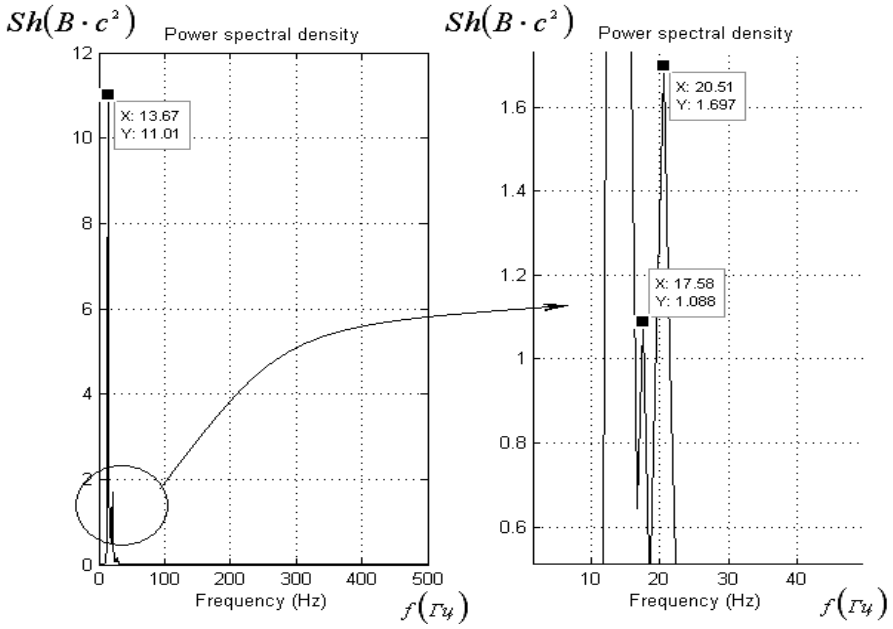

Рис. 5. Спектральний аналіз перехідного процесу при запуску ВТМ із дебалансним приводом

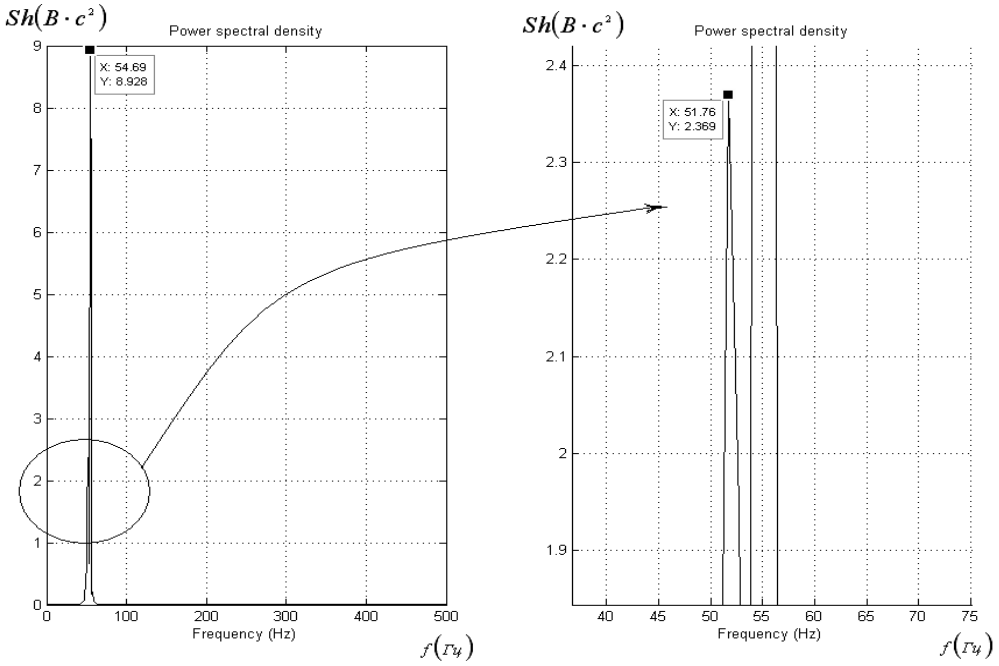

Рис. 6. Спектральний аналіз робочого режиму ВТМ із дебалансним приводом

Щоб зменшити перехідні процеси в момент запуску ВТМ із дебалансним приводом, було випробувано цілий набір потенційних можливостей перетворювача частоти фірми MITSUBISHI FR-E540 0.75K–EC. Зміна характеристики траєкторії розгону (гальмування) із лінійної на S-подібну не приносить бажаних результатів. Перетворювач частоти FR-E540 0.75K – EC має можливість вирізати із робочого діапазону певну гаму частот. На рис. 7 показано методи, якими проводилось вирізання частот в процесі розгону дебалансного приводу ВТМ із дебалансним приводом.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

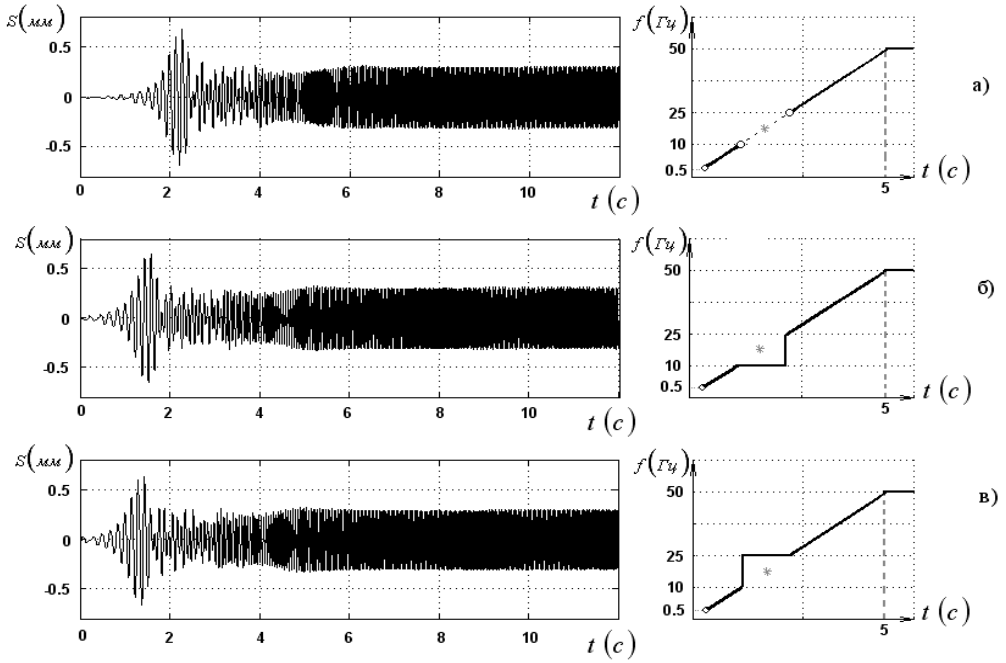

Рис. 7. Експериментально отримані залежності між характеристиками розгону та перехідними процесами у ВТМ із дебалансним приводом

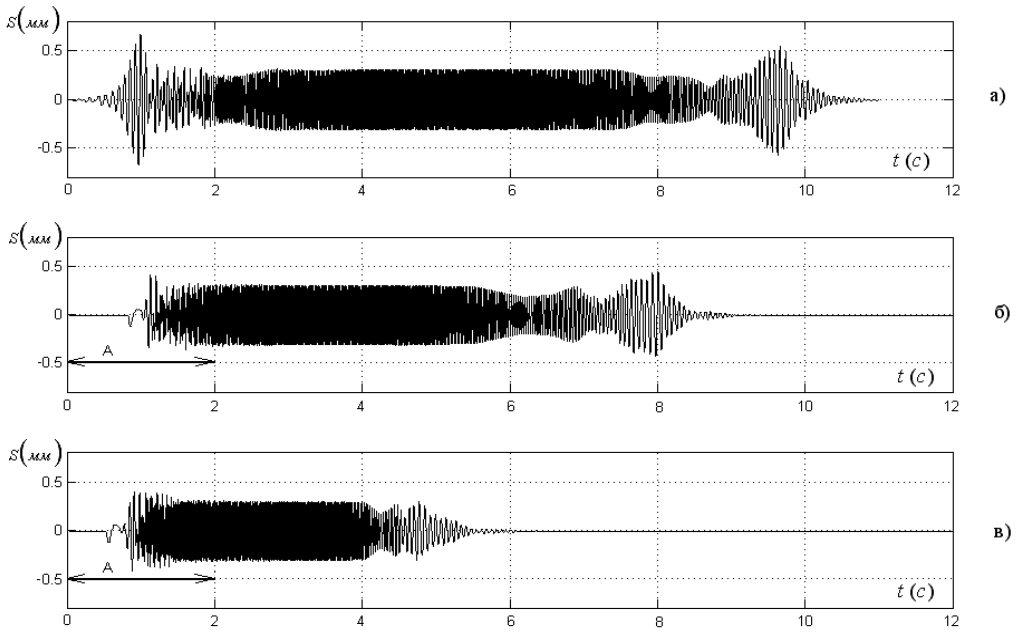

Рис. 8. Експериментально отримані віброграми перехідних процесів у ВТМ із дебалансним приводом при різних параметрах перетворювача частоти

На рис. 7, а показано, що діапазон частот із 10 по 25 Гц був вирізаний в момент розгону. Саме такий діапазон вирізаних частот обумовлений резонансною частотою, яка знаходиться в середині. На рис. 7, б, в, показано інші варіанти виключення резонансної частоти із робочого діапазону частот при розгоні (гальмуванні). Як видно із результатів, зображених на рис. 7, амплітуда перехідних процесів в момент запуску не змінилася, це обумовлено тим, що дебалансний привід під час розгону мусить пройти крізь частоту $f_{rez} = 13{,}67\,Гц$.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

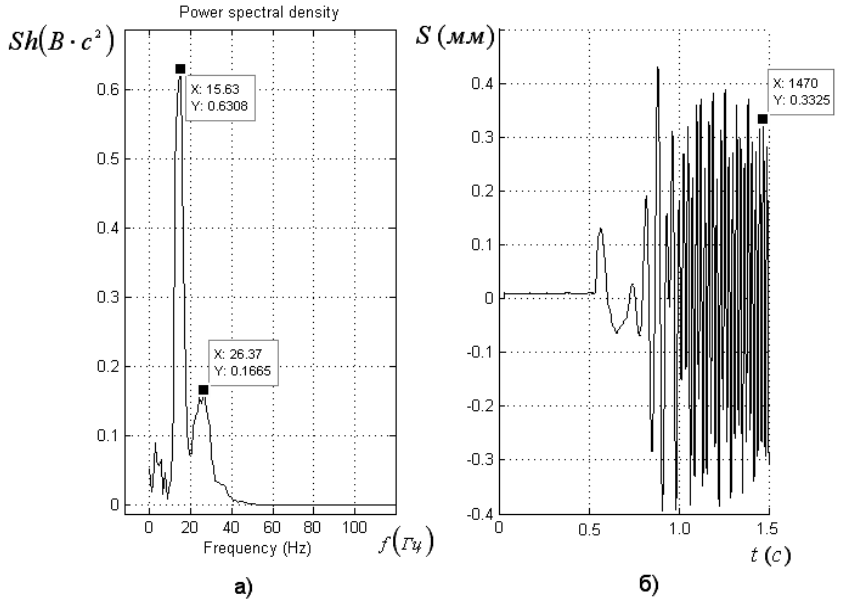

Рис. 9. Спектральний аналіз перехідного процесу у ВТМ із дебалансним приводом при запуску із частоти $\approx 3\times f_{rez}$

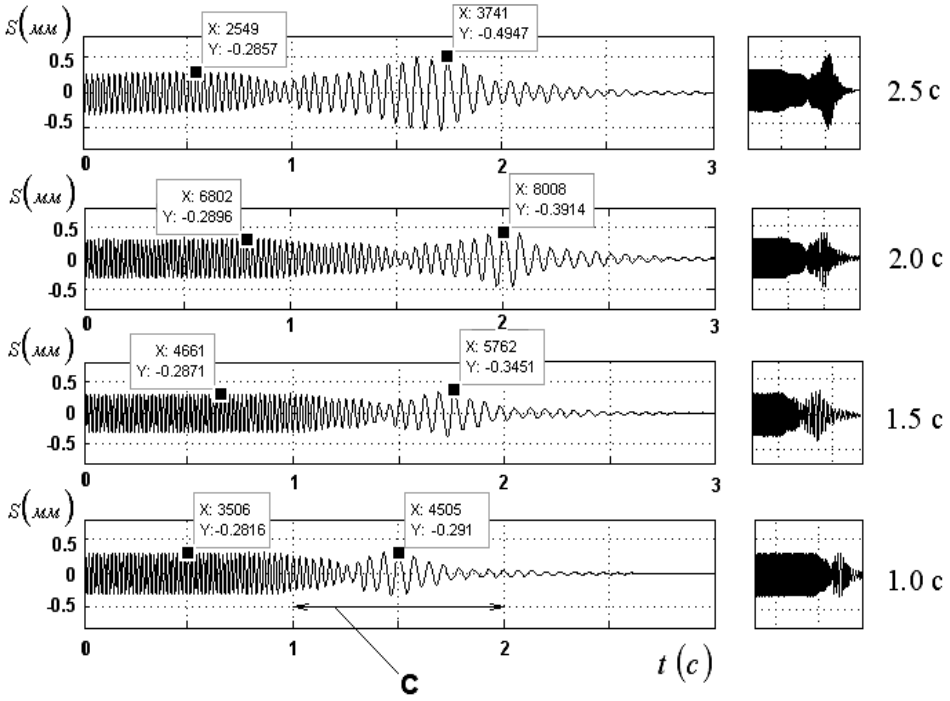

Рис. 10. Експериментально отримані віброграми перехідних процесів у ВТМ із дебалансним приводом при гальмуванні постійним струмом

Ураховуючи добротність системи ($Q = S_{динамічне} / S_{статичне}$), можна зробити висновок, що мала змушувальна сила на даній частоті (резонансній) спричиняє дуже великі відхилення робочого органу. На рис. 8, б, в показано віброграми перехідних процесів при запуску із частот, вищих за

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

резонансні у 2-3 рази. В такому випадку механічна система в процесі розгону дуже швидко проходить стан резонансу, але через свою інертність (масу) накопичує надлишок енергії, який виплескується у поодинокі піки вібропереміщення дещо більше за робоче. Тому проводити запуск треба із частот, які менші за робочі (у нашому випадку < 50 Гц), але більші за резонансні мінімум у 2 рази, для того щоб старт не був дуже різким і в процесі подальшого короткого розгону система динамічно урівноважилась. Провівши спектральний аналіз розгону із частоти, яка дорівнює трьом частотам резонансним $\approx 3 \times f_{rez}$ (зона **A** із рис. 8, б або рис. 9, б), можна побачити, що пік спектральної густини потужності спостерігається на частоті, близькій до резонансної, але його значення ($Sh = 0.6308(B \cdot c^2)$) у 8 разів менше порівняно із робочим. Аналізуючи рис. 9, а можна побачити, що потужність розподілилася по усьому низькочастотному спектрі, наступний сплеск є на частоті 26.37 Гц при $Sh = 0.1665(B \cdot c^2)$. Завдяки тому, що уся потужність не припадає на якусь певну гармоніку, а розподілена у діапазоні від 0 Гц до пускової частоти ($\approx 3 \times f_{rez}$; 40 Гц), то вдається суттєво зменшити перехідний процес при запуску, а в деяких випадках і взагалі усунути.

На рис. 10 зображено віброграми перехідних процесів у ВТМ із дебалансним приводом при гальмуванні умовно постійним струмом упродовж 2.5, 2.0, 1.5, 1.0 (с) відповідно. Частота струму гальмування дорівнює 3 Гц, напруга при гальмуванні становила 30 % напруги мережі. Як видно із віброграм, при перепрограмуванні перетворювача частоти за вищевказаним параметрами вдається цілком усунути перехідні процеси при зупинці ВТМ із дебалансним приводом.

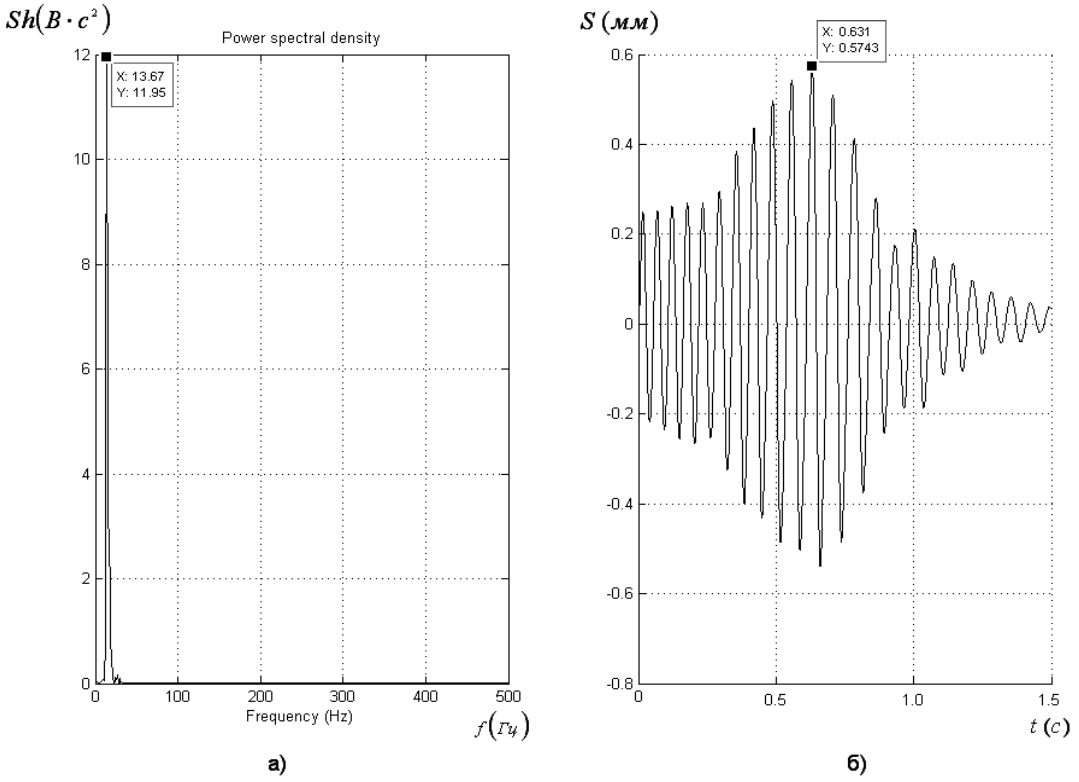

Рис. 11. Спектральний аналіз перехідного процесу при зупинці із плавним вибігом вала електродвигуна ВТМ із дебалансним приводом

Для того, щоб порівняти перехідні процеси при зупинці ВТМ із дебалансним приводом при стандартному вимкненні та гальмуванні, необхідно провести спектральний аналіз зони **C** (рис. 2) та зони **C** (рис. 10).

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

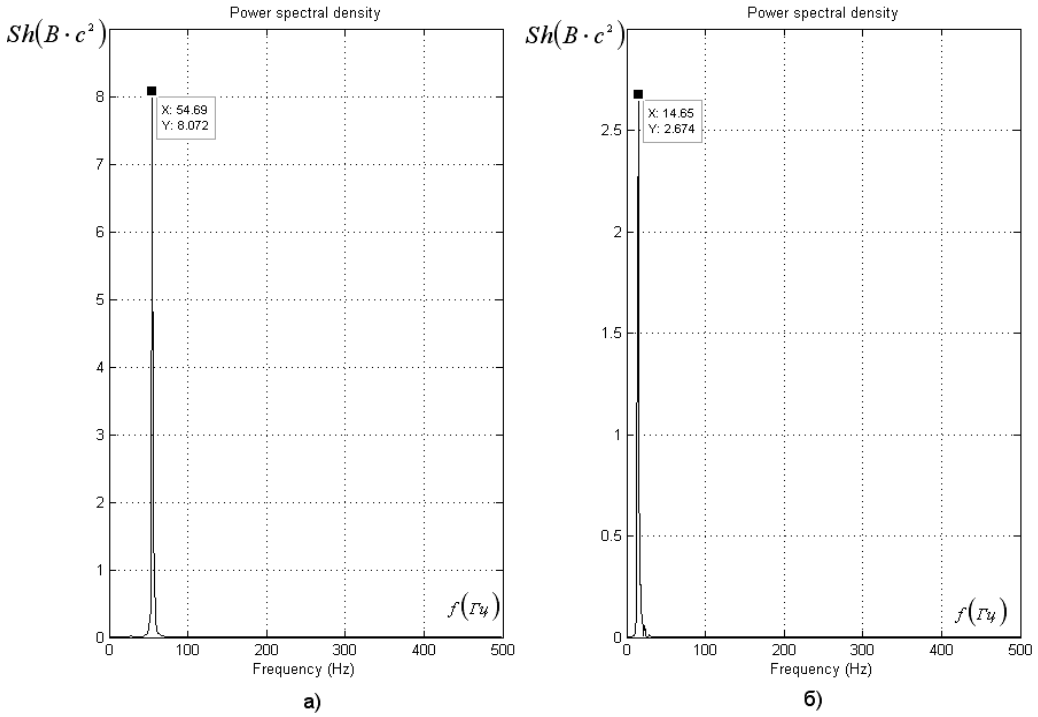

Рис. 12. Спектральний аналіз перехідного процесу при зупинці ВТМ із дебалансним приводом за допомогою гальмування постійним струмом

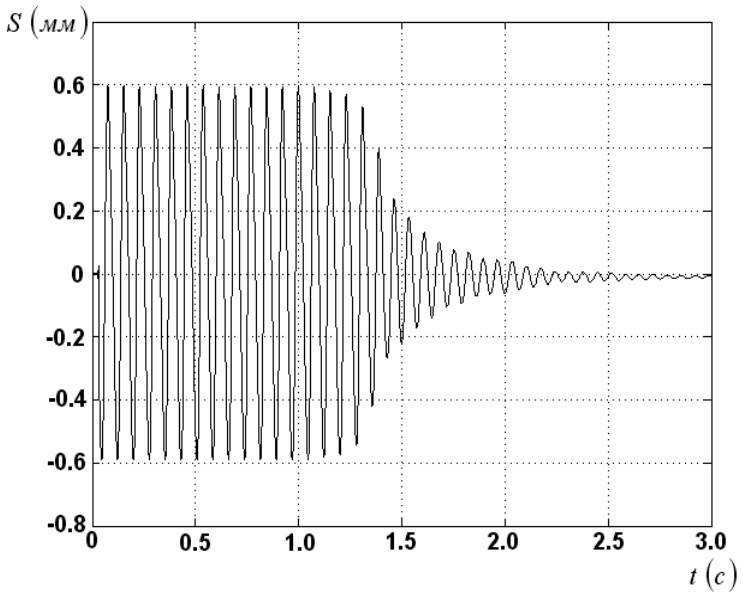

Рис. 13. Експериментально отримані зміни вібропереміщення при перехідних процесах у АВТМ із дебалансним приводом

Результати спектрального аналізу перехідного процесу (рис. 11, б, рис. 2, зона **С**) при зупинці ВТМ із дебалансним приводом зображено на рис.11, а. Можна сказати, що спектральна густина потужності перехідного процесу (рис. 11, б) при зупинці така сама, як і при запуску ($Sh = 11.01(B\cdot c^2)$ рис. 11, а, на рис. 5 $Sh = 11.95(B\cdot c^2)$. А сплеск амплітуди вібропереміщення відбувається на тій самій частоті, що і при запуску ($f_{rez} = 13{,}67\,Гц$), і це є ще одним

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

підтвердженням правильного визначення резонансної частоти. Провівши спектральний аналіз аналогічного процесу (рис. 10, зона **С**) при зупинці ВТМ із дебалансним приводом за допомогою гальмування постійним струмом, можна побачити (рис. 12, б), що сплеск амплітуди вібропереміщення відбувається на частоті, близькій до резонансної ($f = 14{,}65\,Гц$ при $f_{rez} = 13{,}67\,Гц$). Спектральна густина потужності цього перехідного процесу (рис. 10, зона **С**) дорівнює $Sh = 2.674(B \cdot c^2)$ (рис. 12, б), тобто в 4 рази менша за Sh при плавному запуску (рис. 2, зона **А**) та зупинці ВТМ із плавним вибігом вала електродвигуна (рис. 11, а) і в 3 рази менша за Sh при робочому режимі (рис. 12, а).

На рис. 13 зображено зміну вібропереміщення при зупинці адаптивної вібраційної технологічної машини із дебалансним приводом зі свобідним вибігом вала електродвигуна. Проаналізувавши перехідні процеси у ВТМ із дебалансним приводом та беручи до уваги експериментально отриману залежність (рис. 13), можна зробити висновок, що АВТМ із дебалансним приводом цілком позбавлені недоліків, які притаманні ВТМ із дебалансним приводом.

Висновок. Застосовуючи перетворювачі частоти адаптивних вібраційних технологічних машинах, можна цілком усунути негативні явища, які виникають у ВТМ при перехідних процесах в момент запуску та зупинки. При необхідності роботи АВТМ в резонансному режимі, обумовленому деякими технологічними процесами, можна цілком позбутися сплесків вібропереміщення при зупинці ВТМ за допомогою пригальмовування постійним струмом та зменшення часу зупинки електродвигуна дебалансного приводу. При запуску АВТМ у резонансний режим роботи, щоб позбутися значних сплесків вібропереміщення, необхідно проводити запуск електродвигуна із частоти, яка у 2 – 3 рази більша за резонансну, але менша за робочу частоту в резонансному режимі роботи.

1. Божко А.Е., Пермяков В.И., Пушня В.А. Методы проектирования электромеханических вибро – возбудителей. – Киев: Наук. думка, 1989. 2. П.Д. Денисов, П.С. Берник Регулируемые вибраторы // Вибрации в технике и технологиях. – 2005. – № 1 (3). – С. 41-47. 3. Берник П.С., Чубик Р.В. Алгоритм функціонування адаптивної системи керування приводом вібраційних технологічних машин // Вибрации в технике и технологиях. – 2006. – № 1 (43). – С. 4-10. 4. Чубик Р.В., Сіденко П.В. "Оптимізація частотно-силових параметрів електродинамічного приводу вібраційних технологічних машин" // Зб. наук. праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава, 2005. – Вип. 16. – С. 305-312. 5. "Частотный преобразователь FR – E 540", Инструкция по эксплуатации, "MITSUBISHI ELEKTRIK", 02/2003, 185 ст., (http:// www.mitsubishi-automation.com). 6. Божко А.Е., Урецкий Я.С. Системы формирования спектра случайных вибраций. К.: Наукова думка, 1979. 7. Марпл. – мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. 8. А.И. Дрыга, И.А. Луценко, А.Н. Беш, Адаптивная система управления процессом виброобработки деталей // Вибрации в технике и технологиях" – 2006. – № 1 (43). – С. 30-32. 9. Виброизмерительный комплекс ROBOTRON 00 100 Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – ГДР, Дрезден: Народное предприятие Роботрон-Мессэлектроник „ Отто Шен'', 1988.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua