

ІНОСОВ С. В., к.т.н., доцент (Київський національний університет будівництва і архітектури),  
 ІЛЛАРІОНОВ В. М., к.т.н., доцент,  
 САБАЛАЄВА Н. О., к.т.н., доцент (Київський електромеханічний фаховий коледж)



## Автоматичне каскадне регулювання амплітуди коливань резонансного віброживильника з дебалансним збуджувачем

Широке розповсюдження отримали віброживильники для управління подаванням сипких і гранульованих матеріалів у процесах дроблення, грохочення, дозування тощо. Найбільш продуктивні і потужні віброживильники використовують дебалансні збуджувачі коливань і резонансну механічну коливальну систему. Простим і надійним засобом регулювання інтенсивності вібрації резонансних віброживильників із дебалансним віброзбуджувачем є управління швидкістю обертання електропривода. Незначні зміни швидкості обертання електропривода (до 15 %) дають змогу змінювати амплітуду коливань у декілька разів. Але такий об'єкт регулювання дуже складний для управління. Резонансна вібромашина за параметричного управління частотою є сильно нелінійним і нестационарним об'єктом регулювання, динамічні властивості якого суттєво змінюються під час технологічного процесу. У роботі пропонують і перевіряють на комп'ютерній моделі алгоритм автоматичного регулювання резонансним віброживильником із дебалансним віброзбуджувачем за каскадною схемою, у якій основний контур негативного зворотного зв'язку підтримує задану амплітуду вібрації за рахунок зміни завдання підлеглому контуру регулювання. Останній у свою чергу підтримує заданий зсув за фазою між збуджуючою силою і вібрацією за рахунок управління швидкістю обертання електропривода. Регулятор стабільно підтримує резонансний режим, якщо задана амплітуда коливань дорівнює або перевищує резонансну амплітуду, за рахунок оптимального вибору швидкості обертання віброзбуджувача. В іншому випадку стабільно підтримана задана амплітуда за рахунок управління розстроюванням від резонансу за частотою. Є можливість програмного управління амплітудою вібрації під час технологічного процесу (за заданим графіком або під зовнішнім управлінням), навіть за нестабільності резонансної частоти і коефіцієнта резонансного підсилення віброживильника.

**Ключові слова:** автоматизація, віброживильник, дебалансний збуджувач, резонанс, регулювання, мікроконтролер, частотний інвертор, акселерометр, динамічна модель

### Постановка проблеми

Широке розповсюдження отримали віброживильники для управління подаванням сипких і гранульованих матеріалів у процесах дроблення, грохочення, дозування тощо. За допомогою них можна регулювати продуктивність подавання в широкому діапазоні за рахунок зміни інтенсивності вібрації [1]. Найбільш продуктивні і потужні віброживильники використовують дебалансні збуджувачі коливань і резонансну механічну коливальну систему. Резонансна коливальна система енергетично дуже вигідна, оскільки можна значно збільшити амплітуду коливань за рахунок ефекту резонансного підсилення. Але точне настроювання на резонанс пов'язане з рядом проблем (дуже висока чутливість амплітуди коливань до нестабільності власної частоти і частоти збудження, можливість втрати стійкості системи з випадковим переходом у зарезонансний режим і т. п.).

© ІНОСОВ С. В., ІЛЛАРІОНОВ В. М., САБАЛАЄВА Н. О., 2025

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Простим і надійним засобом регулювання інтенсивності вібрації резонансних вібромашин із дебалансним віброзбуджувачем є управління швидкістю обертання електропривода [2]. Оскільки в найближчому частотному околі резонансного режиму амплітуда коливань дуже сильно залежить від частоти збудження [3], то навіть незначні зміни швидкості обертання електропривода (до 10 – 15 %) дають змогу змінювати амплітуду коливань у декілька разів.

### Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Вибраний об'єкт регулювання дуже складний для управління. Найпростіша одноконтурна система регулювання амплітуди коливань за рахунок управління швидкістю обертання взагалі не спроможна підтримувати резонансний режим, бо амплітудно-частотна характеристика вібромашини має екстремум [4, 7]. Випадковий перехід у зарезонансний режим призведе до втрати стійкості.

Крім того, резонансна вібромашина за параметричного управління частотою є сильно нелінійним і нестационарним об'єктом регулювання [5], динамічні властивості якого суттєво змінюються під час технологічного процесу.

#### Формулювання цілей статті (постановка завдання)

У роботі синтезовано і перевірено на комп'ютерній моделі каскадну схему автоматичного регулювання амплітуди і фази вібрацій резонансного віброживильника з дебалансним віброзбуджувачем для виконання таких завдань:

1. Система автоматичного регулювання (САР) має стабільно підтримувати резонансний режим, якщо задана амплітуда коливань дорівнює або перевищує резонансну амплітуду, за рахунок оптимального вибору швидкості обертання віброзбуджувача (тобто частоти збуджуючої сили).

2. В іншому випадку САР має стабільно підтримувати задану амплітуду за рахунок управління розстроюванням від резонансу за частотою в діапазоні від 0 до 15 %.

3. САР має забезпечувати можливість зміни амплітуди під час технологічного процесу (за заданим графіком або під зовнішнім управлінням) у діапазоні від 20 до 100 % резонансної амплітуди, навіть за нестабільності резонансної частоти (за рахунок зміни маси транспортованого матеріалу) до 5 % і коефіцієнта резонансного підсилення (за рахунок зміни втрат енергії на перемішування матеріалу) до 30 %.

#### Виклад основного матеріалу

На рис. 1 наведено функціональну схему автоматизації пропонованого резонансного віброживильника. Об'єктом регулювання є двомасовий резонансний віброживильник із дебалансним збуджувачем коливань. Регульованою величиною є амплітуда віброприскорення. На об'єкті встановлено два датчики: основний датчик вібрації VE (акселерометр) і допоміжний датчик кутového положення дебалансу віброзбуджувача GE (дискретної дії, із двійковим виходом - 0 або 1).

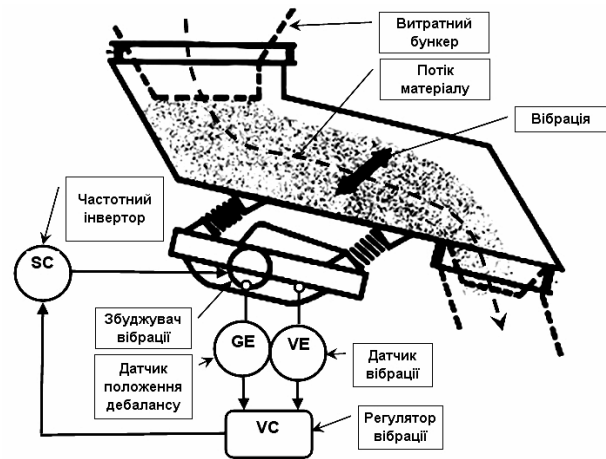


Рис. 1. Функціональна схема автоматизації резонансного віброживильника

Керуючим впливом є зміна швидкості обертання електропривода дебалансного віброзбуджувача. Швидкість обертання трифазного асинхронного електродвигуна керована частотним інвертором SC за рахунок зміни частоти напруги живлення. Завдання частотному інвертору видає основний регулятор амплітуди вібрації VC, який реалізовано програмно на мікроконтролері.

Алгоритм регулювання (більш детально розглянуто на рис. 6) реалізований за каскадною структурною схемою, у якій основний контур негативного зворотного зв'язку підтримує задану амплітуду вібрації за рахунок зміни завдання підлеглому контуру. Останній у свою чергу підтримує заданий зсув за фазою між збуджуючою силою і вібрацією за рахунок зміни швидкості обертання електропривода. Допоміжний датчик кутového положення дебалансу саме і потрібний для визначення вказаного зсуву за фазою. Така структурна схема забезпечує стійкість і хорошу якість регулювання у всьому робочому діапазоні частот і амплітуд (рис. 7).

Динамічні властивості об'єкта регулювання вивчали на комп'ютерній моделі (рис. 3) у програмному середовищі Visual Simulation у реальному часі.

Хоча вібрації механічної резонансної коливальної системи віброживильника адекватно описані лінійною і стаціонарною моделлю, об'єкт регулювання, на думку спеціаліста з автоматики, є суттєво нелінійним і нестационарним [5].

Для ілюстрації нелінійності на рис. 2 наведено амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики резонансної коливальної системи. Наш об'єкт регулювання – це «чорний ящик», у якому виходом (регульованою величиною) є амплітуда віброприскорення, а входом (керуючим впливом) є зміна частоти збуджуючої сили. Фактично на рис. 1 зображені «статичні характеристики» нашого об'єкта регулювання. Термін взято в лапки, бо механічні вібрації всередині цього «чорного ящика» зовсім нестатичні.

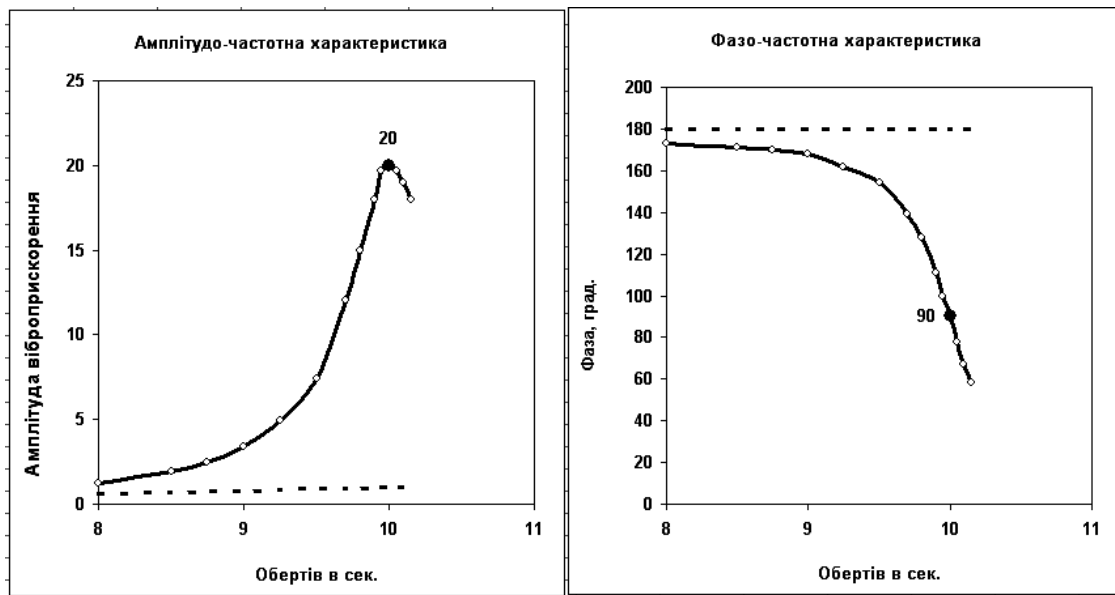


Рис. 2. «Статичні» характеристики резонансного віброживильника як об'єкта регулювання

Наведені графіки суттєво нелінійні. На частоті резонансу (10 Гц, що відповідає 10 обертам на секунду) амплітудно-частотна характеристика має екстремум за рахунок 20-кратного резонансного підсилення, а фазо-частотна характеристика дорівнює 90 градусам. Це наш основний робочий режим (помічено жирною крапкою).

Крім того, наш об'єкт вельми інерційний. На рис. 4 наведено перехідний процес резонансного розгойдування з раптовим збільшення частоти збудження з 8.5 до 10 Гц. Перехідний процес триває 20 періодів вібрації, тобто 2 с. При цьому амплітуда вібрацій (Amplitude) експоненційно зростає, а фаза вібрацій (Phase) експоненційно зменшується.

Більш того, наш об'єкт нестационарний, його динамічні властивості можуть суттєво змінюватися під час технологічного процесу. На рис. 5 наведено перехідний процес зменшення амплітуди віброприскорення з раптовим зменшення частоти збудження з 10 до 9 Гц. На відміну від рис. 4, амплітуда і фаза віброприскорення змінюються коливально. Це відоме явище «биття» вимушених і власних коливань.

Інерційність, нелінійність і нестационарність суттєво ускладнюють управління таким об'єктом.

Осцилограми на рис. 4, 5 отримані за допомогою динамічної моделі, структурна схема якої наведена на рис 3.

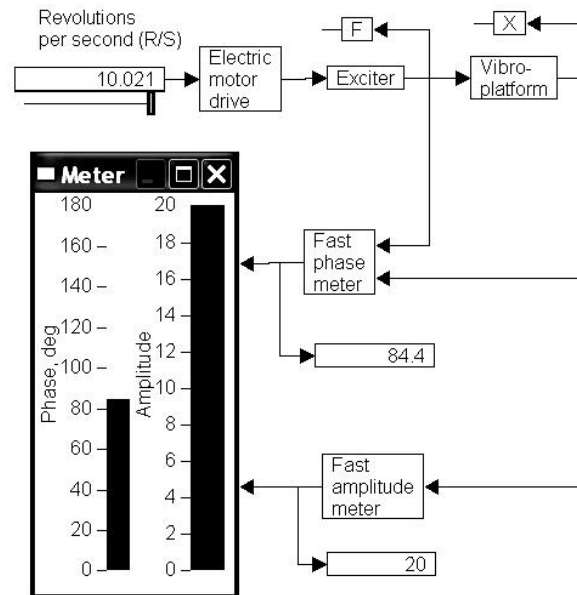


Рис. 3. Моделювання процесу регулювання резонансного віброживильника в ручному режимі

Блок Vibro platform моделює динаміку механічної резонансної коливальної системи. Входом є збуджуюча сила F, а виходом – віброприскорення X.

Блок Exciter моделює дебалансний збуджувач вібрації. Входом є швидкість обертання, а виходом – збуджуюча сила F. Швидкість обертання, оберт/с (Revolutions per second), задають вручну віртуальним реостатом.

Для наочності і універсальності висновків деякі змінні масштабовано. Резонансну частоту прийнято 10 Гц,

номінальну амплітуду збурюючої сили прийнято за одиницю, резонансну амплітуду віброприскорення – 20, що відповідає коефіцієнту резонансного підсилення.

Проміжний блок Electric Motor Drive моделює електромеханічну інерційність електропривода зі сталою часу 0.2 с.

Блок Fast phase meter вимірює плинний зсув за фазою Phase між збурюючою силою F і віброприскоренням X. Значення результату, град, відображено на цифровому дисплеї (84.4).

Блок Fast amplitude meter вимірює плинну амплітуду Amplitude віброприскорення X. Значення результату (безрозмірне) відображено на цифровому дисплеї (20 – це резонансне підсилення).

Останні два вимірювальних блоки повинні мати максимально можливу швидкодю, щоб не зменшувати запас стійкості і не погіршувати якість регулювання. Вони реалізують періодичну вибірку значень два рази за період вібрації і не мають згладжувальних інерційних фільтрів. Тому їх називають Fast (швидкий).

Плинні значення фази і амплітуди відображено віртуальними вимірювальними приладами Meter.

Осцилограми збурюючої сили F і віброприскорення X реєстровані верхнім віртуальним осцилографом (рис. 4, 5). Осцилограма зміни фази Phase реєстрована нижнім віртуальним осцилографом.

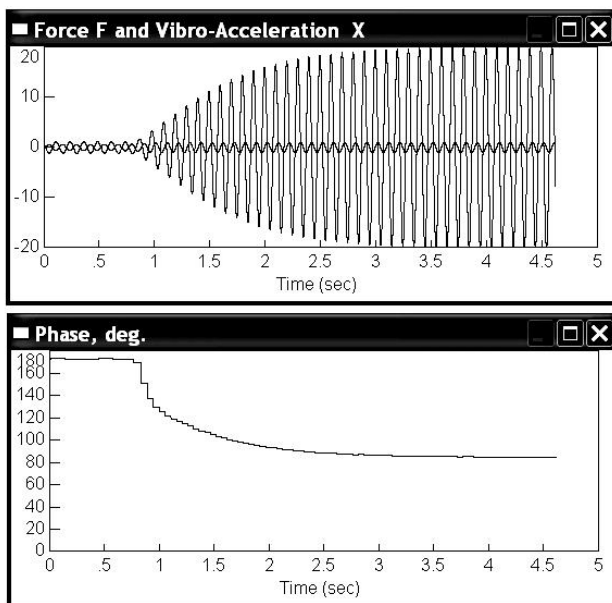


Рис. 4. Перехідний процес резонансного розгойдування віброживильника за раптового збільшення частоти збудження з 8.5 до 10 Гц

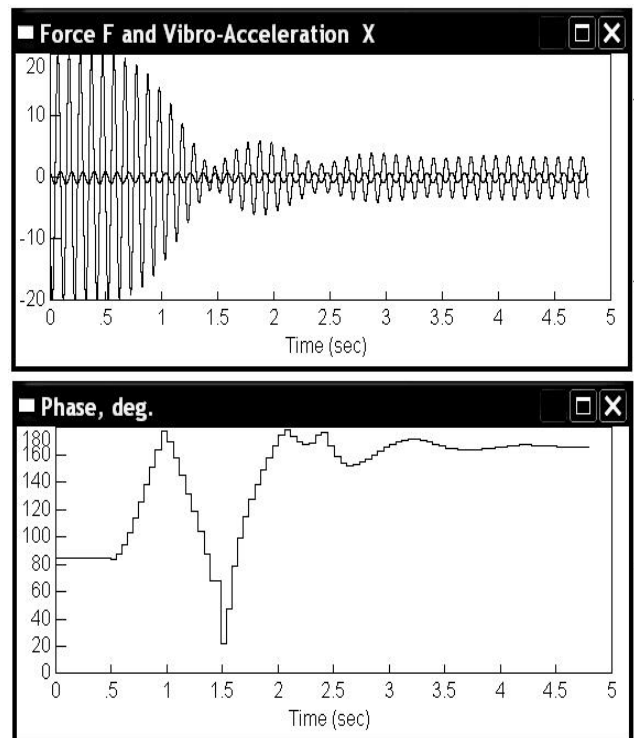


Рис. 5. Перехідний процес зменшення амплітуди віброприскорення за раптового зменшення частоти збудження з 10 до 9 Гц

Алгоритм регулювання реалізовано за каскадною структурною схемою (рис. 6). Задана амплітуда (Amplitude) віброприскорення встановлена віртуальним реостатом Amplitude set point. Основний регулятор (Master controller) підтримує задану амплітуду вібрації за рахунок зміни завдання підлеглому регулятору фази (Slave controller). Останній у свою чергу підтримує заданий зсув за фазою (Phase set point) між збурюючою силою і вібрацією в діапазоні від 15 до 90° за рахунок управління швидкістю обертання електропривода Revolutions per second (R/S). Обидва регулятори реалізують універсальний Пропорційно-Інтегрально-Диференціальний (ПІД) алгоритм регулювання [6]. Але в основному регуляторі диференціюючий канал відключено через сильну зашумленість вимірювального каналу віброприскорення [7]. Параметри настроювання регуляторів оптимізовано за мінімумом часу регулювання.

Така структурна схема забезпечує стійкість і хорошу якість регулювання у всьому робочому діапазоні частот і амплітуд в околі резонансного режиму, незважаючи на сильну нелінійність і нестационарність об'єкта регулювання. На віртуальному осцилографі відображено перехідні процеси зміни амплітуди (Amplitude) коливальних віброприскорення за ручних маніпуляцій (стрибків) заданою амплітудою в реальному часі. Як бачимо, система забезпечує

стійкість і якість регулювання на всіх робочих режимах. Час регулювання складає 2 с.

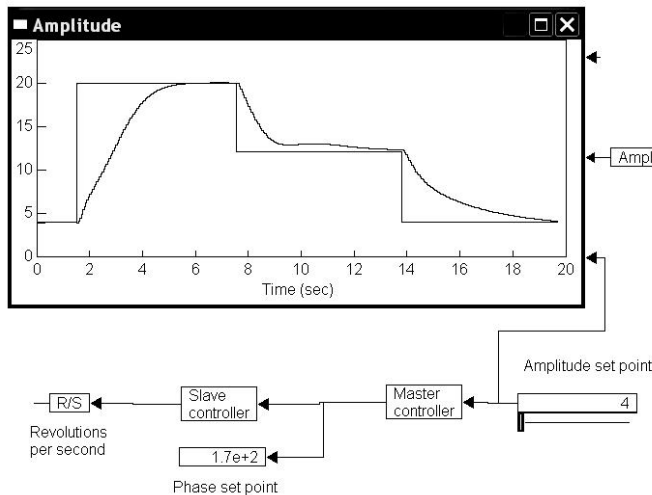


Рис. 6. Моделювання каскадного напівавтоматичного регулювання амплітуди віброприскорення

Рис. 7 ілюструє вплив нестабільності параметрів віброживильника на процес автоматичного програмного регулювання амплітуди віброприскорення. На відміну від рис. 6, замість ручного задавача використано програмний задавач, який змінює задану амплітуду віброприскорення  $Amplitude\ set\ point$  за певним графіком у часі (ламана лінія). На віртуальному осцилографі відображено перехідні процеси зміни амплітуди  $Amplitude$  коливань віброприскорення за програмної зміни заданої амплітуди в реальному часі. Другий графік відповідає сценарію «пустий лоток віброживильника», коли резонансна частота збільшується до 10.5 Гц (через зменшення маси лотка), а резонансне підсилення збільшується до 25 (через зменшення втрат енергій на перемішування транспортного матеріалу). Як бачимо, система забезпечує стабільне і якісне регулювання незалежно від нестабільності параметрів об'єкта регулювання.

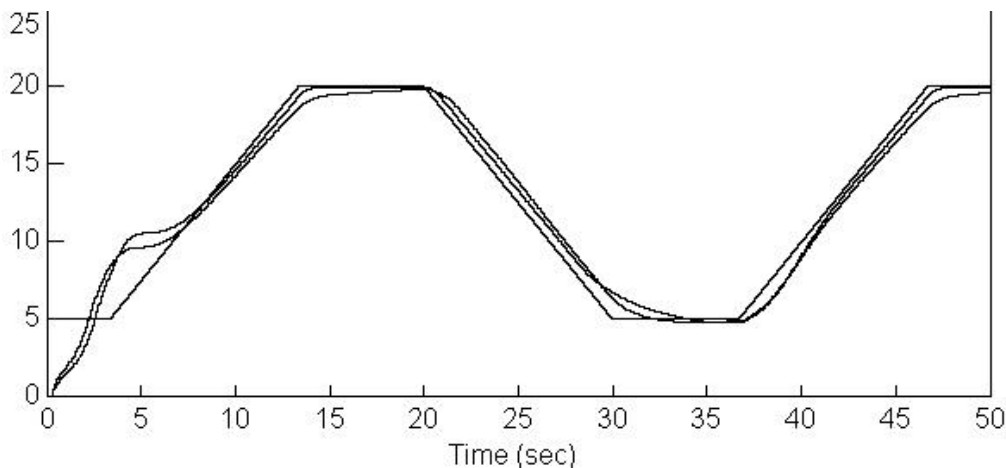


Рис. 7. Вплив нестабільності параметрів віброживильника на процес автоматичного програмного регулювання амплітуди віброприскорення

### Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Простим і зручним засобом регулювання амплітуди вібрації резонансного віброживильника з дебалансним збуджувачем є управління швидкістю обертання електропривода. Зміна частоти збуджуючої сили в діапазоні 100 – 85 % резонансної частоти дає змогу змінювати амплітуду коливань у декілька разів.

2. Рекомендовано використовувати алгоритм регулювання, реалізований за каскадною структурною схемою, у якій основний контур негативного зворотного зв'язку підтримує задану амплітуду вібрації за рахунок зміни завдання підлеглому контуру регулювання. Останній у свою чергу підтримує заданий зсув за фазою між збуджуючою силою і вібрацією за рахунок управління швидкістю обертання електропривода. Такий алгоритм забезпечує стійке і якісне регулювання у всьому робочому діапазоні частот і амплітуд, незалежно від нестабільності резонансної частоти і

коефіцієнта резонансного підсилення віброживильника.

3. У перспективі передбачено програмну реалізацію запропонованого алгоритму на мікроконтролері і тестування його на лабораторному макеті резонансного віброживильника.

### Список використаних джерел

1. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання : навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2004. 248 с.
2. Ярошевич О. М., Забронець І. П., Мартинюк В. Л., Ярошевич М. П. Коливання привода вібраційних машин із дебалансними збудниками. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2018. Вип. 52. С. 114–128.
3. Ланець О. С. Високоєфективні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні

- основи та практика створення). Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. 324 с.
4. Ланець О. С. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин: навч. посіб. Кн. 1: Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органу. Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка». 2008. 600 с.
  5. Попович М., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
  6. Іносов С. В., Корнієнко В. М. Оптимізація алгоритму автоматичного регулювання тепловими процесами. *Управління розвитком складних систем*. 2013. № 13. С. 104 – 108.
  7. Іносов С. В., Бондарчук О. В. Зв'язок похибок вимірювання температури з динамікою регулювання теплового об'єкту. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 35. С. 162–166.
  8. Željko V. Despotović, Milan Lečić, Milan R. Jović, Ana Djuric. Vibration Control of Resonant Vibratory Feeders With Electromagnetic Excitation. Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia. *FME Transaction*. December 2014. Vol. 42, No 4. P. 281-289.

**Inosov S., Illarionov V., Sabalaeva N. Automatic cascade regulation of the amplitude of vibrations of a resonant vibrator with an unbalanced exciter.**

**Abstract.** Vibrating feeders have become widely used to control the supply of loose and granular materials in the processes of crushing, screening, dosing, etc. The most productive and powerful vibrating feeders use unbalanced vibration exciters and a resonant mechanical vibration systems. A simple and reliable means of regulating the vibration intensity of resonant vibrating feeders with an unbalanced vibration exciter is to control the speed of rotation of the electric drive. Minor changes in the speed of rotation of the electric drive (up to 15 %) allow changing the amplitude of vibrations several times. But this control object is extremely difficult to control. A resonant vibratory machine, with parametric frequency control, is a highly nonlinear and non-stationary control object, the dynamic properties of which change significantly during the technological process. In this work, an algorithm for automatic control of a resonant vibration feeder with an unbalanced vibration exciter according to a cascade scheme is proposed and tested on a computer model, in which the main negative feedback loop maintains a given vibration amplitude by changing the task for the subordinate control loop. The latter, in turn, maintains a given phase shift between the disturbing force and vibration by controlling the speed of rotation of the electric drive. The controller stably maintains the resonant mode, if the given amplitude of oscillations is equal to or exceeds the resonant amplitude, by optimally

choosing the speed of rotation of the vibration exciter. Otherwise, the given amplitude is stably maintained by controlling the detuning from resonance by frequency. There is a possibility of programmed control of the vibration amplitude during the technological process (according to a given schedule or under external control), even with instability of the resonant frequency and resonant gain coefficient of the vibration feeder.

**Keywords:** automation, vibration feeder, unbalanced exciter, resonance, regulation, microcontroller, frequency inverter, accelerometer, dynamic model.

*Іносов С. В., к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна.* <https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>, [Inosov.sv@knuba.edu.ua](mailto:Inosov.sv@knuba.edu.ua),

*Ілларіонов В. М., к.т.н., доц., Київський електромеханічний фаховий коледж, Київ, Україна.* <https://orcid.org/0000-0002-6952-9290>, [infcentr@i.ua](mailto:infcentr@i.ua),

*Сабалаєва Н. О., к.т.н., доц., Київський електромеханічний фаховий коледж, Київ, Україна.* <http://orcid.org/0000-0002-7015-1811>, [natsab152@gmail.com](mailto:natsab152@gmail.com)

*Serhiy Inosov, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine.* <https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>, [Inosov.sv@knuba.edu.ua](mailto:Inosov.sv@knuba.edu.ua)

*Valerii Illarionov, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv Electromechanical Vocational College, Kyiv, Ukraine.* <https://orcid.org/0000-0002-6952-9290>, [infcentr@i.ua](mailto:infcentr@i.ua)

*Nataliya Sabalaeva, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv Electromechanical Vocational College, Kyiv, Ukraine.* <http://orcid.org/0000-0002-7015-1811>, [natsab152@gmail.com](mailto:natsab152@gmail.com)