

## ВСТУП

Вібраційними є дискретні та континуальні механічні системи, що здійснюють коливальні рухи з корисною метою. Тому вібраційними машинами<sup>1</sup> є згадані системи технологічного призначення, коливальних рух робочого органа яких здійснює технологічну дію над оброблюваним середовищем. Наукова популярність “вібраційної” тематики зумовлена тим, що вона, ґрунтуючись на фундаментальних науках – теорії коливань, пружності, математичній фізиці, електротехніці, динаміці машин – має надзвичайне прикладне застосування у вирішенні різноманітних завдань практично в усіх галузях народного господарства та промисловості, де застосовують вібротехнології. Напрями технологічного використання вібраційних машин, питання їхньої енергоефективності, покращення динамічних і технологічних якостей машин і процесів розвивають наукові школи динаміки та міцності машин, машинознавства, гірничих машин, обробки матеріалів, машин для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій, машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва та інші.

Визначних здобутків у розробленні та дослідженні широкого класу вібраційних технологічних машин і засобів вібраційного оброблення досягли А. П. Бабічев [8, 38], І. І. Биховський [10, 28], І. І. Блехман [16], П. С. Берник [13, 39], Л. А. Вайсберг [29], В. Д. Варсанов’єв [30], І. Х. Гончаревич [47–50, 144, 201], Б. В. Гусев [53], П. М. Заїка [58], В. О. Кононенко [79], Ю. Р. Копилов [80], Е. Е. Лавендел [88], В. О. Повідайло [125, 126], Г. Я. Пановко [120], В. М. Потураєв [128, 129, 177], А. Д. Рудін, В. Й. Сівко [138], Р. І. Сілін [141], А. О. Співаковський [144], А. П. Субач, М. В. Хвінгія [113, 157–159], Ю. Ф. Чубук [171] та ін.

Сьогодні переважно високотехнологічні розробки основані на наноматеріалах та високоефективних технологіях. Відомо, що віброоброблення є одним із можливих засобів забезпечення високої якості зовнішніх поверхонь, нанесення зовнішніх покриттів та модифікації внутрішніх приповерхневих шарів (англ. – *nano-finishing techniques*). Зміст та ефективність реалізації процесів ґрунтуються на

---

<sup>1</sup> Вибрация. Термины и определения: ГОСТ 24346-2010. – М. : Стандартинформ, 2010. – 25 с.

різноманітних перетвореннях у матеріалах. Рушієм відповідних структурно-фазових процесів є різноманітні чинники, переважно це ударно-хвильові явища, тиск, температура, хімічні перетворення та інше. Одночастотні (гармонійні) вібраційні машини технологічного призначення мають нижчу ефективність у процесах над середовищами складної фізико-механічної структури. Для цього застосовують системи, що реалізують полічастотні режими, основані на нелінійних системах. Реалізація полічастотних коливань у вібраційних машинах дозволяє суттєво інтенсифікувати нанотехнологічні процеси поверхневого зміцнення матеріалів (англ. – *vibrohardening*), розділення, сепарації, подрібнення, ущільнення (пресування, трамбування) різноманітних матеріалів, особливо дрібнодисперсних. Утім поширення вібротехнологій немає обмежень, про що свідчить поява таких нових технологічних процесів, як віброкавітація та ін.

Безпосередньо у напрямі віброударних та полічастотних машин і систем відомі дослідження таких вчених, як: П. М. Алабужев [1, 176], В. К. Асташев, В. І. Бабіцький [6, 7, 184], В. А. Баженов [187], О. Є. Божко [18–23, 132], О. О. Борщевський [25], А. Ф. Булат [27], Я. А. Віба [33], М. В. Закржевський [59], А. С. Кобринський [73], В. Л. Крупенін [83], Б. І. Крюков [85, 86], Е. Е. Лавендел [88], Е. А. Логвиненко [94], В. С. Ловейкін [92, 93], О. Г. Маслов [98–100], В. П. Надутий [104, 105, 128], І. І. Назаренко [106–110, 119], М. П. Нестеренко [112], В. М. Потураєв [57, 128–131, 177], К. М. Рагульскіс [134, 135], В. Л. Рагульскене [134], М. П. Ряшенцев [136, 176], М. А. Ткачук [41, 151], В. П. Франчук [128, 156], Р. Д. Іскович-Лотоцький [42, 66, 67], О. Ф. Іткін [62–64], Ю. В. Човнюк [168, 169], С. Л. Цифанський [160–162], Г. А. Шевченко [173, 174] та ін.

До розвитку методів динамічного аналізу долучилися видатні учені-механіки та математики. Основам та удосконаленню обчислювальних і аналітичних методів у нелінійних динамічних системах присвячено наукові праці К. В. Аврамова [154], А. А. Аліфова [2], М. М. Боголюбова та Ю. О. Митропольського [17], М. В. Василенка [31], В. Л. Вейца [32], І. І. Вульфсона [44], В. С. Гапонова, О. Ф. Дашенка [167], М. І. Казакевича [68], В. М. Карабана [69], М. З. Коловського [77], В. О. Кононенка [79], Д. Р. Меркіна [102], В. А. Остапенка [116, 117], Я. Г. Пановка [121], П. Я. Пукача [133], І. І. Сидоренка [139], Б. І. Сокола, З. А. Стоцька, В. Б. Струтинського [148], Г. Б. Філімоніхіна, К. Ф. Фролова, В. М. Шатохіна [172], М. П. Ярошевича [178] та ін.

Треба зауважити, що задачі аналізу коливальних процесів у вібраційних машинах зводяться до задач у галузі електромеханічних систем. Тут варті уваги наукові праці Л. Й. Глухівського [46], О. Г. Леонтєва [91], Г. І. Мельнікова [101], Д. Ю. Скубова [142], Л. П. Смольнікова [143], Дж. Теллера, К. Ш. Ходжаєва [35,

142], В. Й. Чабана [163, 164], що уособлюють методи та прикладні дослідження систем із аналогічними за структурою нелінійними (релейними) характеристиками.

Безумовно, методики проектування згаданих систем ґрунтуються безпосередньо на задачах динаміки, синтезу, оптимізації параметрів та розрахунку міцності деталей машин і механізмів, визначені діяльністю таких вчених, як: І. А. Біргер [15], Ю. С. Воробйов, С. С. Гутиря [54], А. П. Зінковський, В. П. Когаєв [74, 75], С. М. Кожевніков [76], М. С. Комаров, В. С. Кравчук [82], І. В. Кузьо [87], Б. І. Кіндрацький [71, 72], В. О. Малашенко, Я. Т. Кінницький, П. Л. Носко [114], С. Д. Пономарьов [127], Г. С. Писаренко [123, 124, 146], Ю. М. Работнов, В. Т. Трощенко [152], А. П. Філіппов, Л. Я. Будіков [26], С. П. Тимошенко, S. S. Manson [213], Moon Seong-In [218], J. E. Shigley [227] та ін.

У закордонних публікаціях тематика контролю, динаміки та аналізу нелінійних вібраційних машин і систем поширена у дослідженнях таких авторів, як Z. Despotovic [195, 196], H. Bayroğlu [186], Jee-Hou Ho [204], J. Michalczyk [214–217], V. Ostasevicius [222], E. Pavlovskaja [224], R. Sampaio [208], I. Sokolov [228]. Аналіз динамічної стійкості, хаосу, біфуркацій, що ґрунтується на складних аналітичних методах, займає особливе місце під час розгляду нелінійних віброударних систем. Ці питання розглядали: J. Awrejcewicz [182, 183], G. Luo [209–211, 234], P. Olejnik [221], S. Peter [225], R. H. Rand, I. Raouf [226], K. Stevanović-Hedrih [229], D. J. Wagg [235, 236], Wei-Chan Xie [237], V. Yevstignejev [238] та багато інших дослідників.

З розвитком теоретичних методів аналізу відповідно удосконалюються вібраційні системи. Тому розроблення нових вібраційних машин безпосередньо залежить від появи методів аналізу та розрахунку, удосконалення обчислювальних алгоритмів, що дають змогу встановити закономірності проходження динамічних процесів та якісно їх проаналізувати.

Незважаючи на складність моделей для опису технологічних процесів, сучасні потреби виробництва спонукають розглядати їх у комплексному оцінюванні, сумісно з основними технічними показниками машини. Такий підхід до аналізу вважають найдостовірнішим під час дослідження технологічних систем. Уміння розпізнати роботу машини та описати її технологічний аспект, правильно вибрати метод аналізу є запорукою якісного оцінювання реального процесу, виявлення його закономірностей та реалізації раціональних режимів роботи машин. Початковим етапом дослідження, переважно, є обґрунтування структури та параметрів машин, характеристик приводу для ефективного функціонування з погляду як процесу оброблення, так і роботи машини.

Матеріал монографії є подальшим розвитком наукових досліджень школи резонансних вібраційних машин з електромагнітним приводом Національного університету “Львівська політехніка” і НДЛ-40, що представлена науковими роботами та розробками І. С. Афтаназіва [39], А. Л. Беспалова, В. М. Боровця, О. В. Гаврильченка, О. С. Ланця [89, 90], В. О. Повідайла [125, 126], Б. М. Савчина, В. С. Шенбора, Ю. П. Шоловія, Я. В. Шпака, В. А. Щигеля.

Машини та системи, проаналізовані в монографії, мають більший спектр коливань, зокрема як мінімум дві робочі гармоніки коливань для двочастотних систем та полічастотні віброударні за використання резонансних режимів роботи. Результати дослідження отримано якісно новим оптимізаційним синтезом за розробленими обчислювальними алгоритмами динамічного аналізу.

Для комплексного оцінювання машин використано енергетичний критерій, де за основу вибрано величину максимального пришвидшення робочої маси. Саме пришвидшенням визначаються технологічні особливості основних процесів оброблення. Зокрема взято до уваги асиметрію пришвидшення робочої маси як фактора, що визначає наявність гармонік різної частоти та амплітудного значення. Проаналізовано один із найважливіших параметрів резонансних вібраційних систем, що визначає їхню технологічну стійкість – ширину резонансної зони. Для аналізу електромагнітних моделей вібраційних технологічних систем використано механічний та технологічний коефіцієнти корисної дії. Також прийнято уточнений частотно-масовий критерій для оптимізаційного синтезу елементів конструкцій не лише вібраційних машин, але й різних динамічно навантажених машинобудівних конструкцій на стадії їхнього проектування.

*Мета* представлених наукових досліджень – формування цілісної концепції оптимізаційного синтезу та багатокритеріального аналізу резонансних (негармонійних) дво- та тримасових вібраційних систем, з обґрунтуванням використання відповідних пружних характеристик, схем і параметрів електромагнітного збудження.

*Проблематика*, що підлягає вирішенню – це відсутність узагальненого підходу у вигляді багатокритеріального аналізу нелінійних резонансних дво- та тримасових вібраційних машин (з їхніми енергетичною та технологічною оцінками), яку використовують для раціонального й оптимізаційного синтезу інерційно-пружних характеристик, конструктивних елементів, схем і параметрів електромагнітного збудження вібраційних машин за технологічними умовами (кінематичними характеристиками) функціонування цих систем.

*Ідея, закладена в роботі* – це використання основних гармонік імпульсного силового електромагнітного збурення та їх узгодження (параметричним синтезом) із пружно-інерційними параметрами коливальної системи для реалізації двочастотних і віброударних систем у енергоощадних резонансних режимах. На основі цього принципу *передбачено*:

– підвищити ефективність резонансних віброударних режимів дво- та тримасових систем з конструктивними нелінійностями та додатково накладеними обмеженнями (енергетичними, кінематичними, технологічними, динамічними);

– забезпечити для тримасових лінійних систем резонансні двочастотні режими параметрами системи за імпульсного електромагнітного збурення.

Прийнято такі *гіпотези*:

– ефективні полічастотні колювання у резонансних режимах роботи вібраційних систем реалізують узгодженням характеристик пружних конструктивних нелінійностей та імпульсного електромагнітного збурення;

– багатокритеріальна оцінка за основними кінематичними та енергетичними показниками є запорукою ефективного вибору параметрів та умов збурення вібраційної системи для раціонального її використання в певному технологічному процесі.

Доцільність використання реалізованих полічастотних імпульсних вібраційних систем обґрунтовано порівняльним аналізом систем за відповідними критеріями.

Прийняті в дослідженнях *припущення* стосуються:

– електромагнітного приводу, зокрема враховано на основі ідеалізованої вольт-амперної характеристики (ВАХ) роботу одно- та двотактного електромагнітного приводу. Приведений опір електромагнітного контуру враховує втрати на тепло, електромагнітний гістерезис та вихрові струми Фуко;

– процесу оброблення, що вилучений з розгляду, оскільки останній спрямований на безпосереднє оцінювання функціонування вібраційної системи та якості реалізації закладеного наперед технологічного режиму з відповідними кінематичними характеристиками. Запропоновані моделі, без сумніву, можна доповнити відомими моделями, що описують конкретні технологічні процеси оброблення.

У *першому* розділі наведено класифікацію схем живлення, сфери застосування та технічні характеристики електромагнітних вібраторів. Наведено диференціальні рівняння основних силових та енергетичних характеристик електромагнітного контуру електромагнітних віброзбуджувачів (ЕМВ) за різних схем вмикання. Окреслено особливості використання імпульсних (однотактних) схем живлення у вібраційних машинах. Подано структурні схеми полічастотних систем (лінійних двочастотних і нелінійних віброударних), засоби реалізації

відповідних режимів, їхні конструктивні та динамічні особливості. Визначено критерії комплексного (технологічного та енергетичного) оцінювання ефективності роботи широкого класу вібраційних систем технологічного призначення та для подальшого оптимізаційного синтезу й порівняльного динамічного аналізу.

*Другий* розділ присвячено задачам синтезу двочастотних резонансних режимів роботи тримасових вібраційних машин. Зокрема визначено формули для встановлення кратного двочастотного резонансного режиму розрахунком пружних параметрів. Розглянуто задачі визначення рівнянь скелетних кривих віброударних систем на основі асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик у двомасових системах. Обґрунтовано силовим та частотним аналізом використання однієї плоскої пружини для реалізації асиметричних пружних характеристик із жорсткими та податливими проміжними упорами. Проаналізовано міцність та довговічність плоскої пружини за умовами роботи віброударної системи.

У *третьому* розділі наведено визначальні підходи до динамічного аналізу нелінійних моделей резонансних вібраційних машин з використанням алгоритмів на основі вбудованих обчислювальних методів аналізу систем нелінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку. Розглянуто задачі синтезу двочастотних резонансних систем, оцінено їхнє функціонування та реалізацію режимів із відповідним гармонійним складом пришвидшення робочої маси. Реалізовано задачу синтезу та динамічного аналізу двочастотних резонансних систем для модернізацією гармонійних машин.

У *четвертому* розділі розглянуто сумісно задачі оптимізаційного синтезу та динамічного аналізу віброударних резонансних систем з електромагнітним приводом. Побудовано принципіві часові та амплітудно-частотні залежності систем з різними видами кусково-лінійних пружних характеристик, визначено критерії оцінювання та здійснено багатокритеріальний аналіз синтезованих систем. Треба зазначити, що представлені нелінійні моделі з огляду на наявність імпульсних умов у електромагнітному та механічному контурах віброударних систем вдалося розв'язати чисельно методами “Radau”, частково “BDF”, “Adams”, “AdamsBDF” (для “жорстких” дифрівнянь та їхніх систем). Здійснено порівняльний аналіз оптимальних віброударних систем з іншими типами машин. Синтезовано багаторежимні віброударні системи, що функціонують як за основним резонансом, так і на субрезонансі. Виявлено додаткові енергетичні та технологічні переваги роботи віброударної системи з реалізацією суперрезонансних коливань. Наведено математичне формулювання віброударної системи рівняннями типу Хілла та Матьє. Проаналізовано динамічну стійкість розв'язку за основною гармонікою з

використанням діаграми Айста-Стретта. Додатково здійснено порівняльний аналіз отриманих розв'язків методом Бубнова–Гальоркіна із встановленим числом гармонік за критерієм збіжності Пірсона. Це дає можливість вибирати потрібну кількість гармонік, що приймається у шуканих розв'язках. Здійснено параметричний синтез тримасових віброударних систем із додатковими обмеженнями на інерційність реактивної маси та з кінематичними обмеженнями. Встановлено їхні переваги над двомасовими віброударними системами за енергетичним критерієм. Загалом узагальнено резонансні системи з проведенням багатокритеріального аналізу, параметричного синтезу та отримано відповідні кількісні показники відносної ефективності.

У *п'ятому* розділі розглянуто оптимізаційні задачі забезпечення високої динамічної жорсткості (стійкості) та зменшення маси елементів конструкцій вібраційних машин за введеним частотно-масовим критерієм. Цей показник доцільно застосовувати для уточненого вибору оптимальних параметрів складних машинобудівних конструкцій (робочі органи машин, стрижневі системи з дискретними та розподіленими параметрами, рами тощо), попередньо розроблених та проаналізованих у прикладних САЕ засобах програмних продуктів SolidWorks, Inventor, Ansys тощо.

У *шостому* розділі наведено прикладні розробки за напрямом досліджуваних вібраційних систем. Реалізовано твердотілі моделі віброударних систем та двочастотних машин, здійснено їхнє математичне моделювання та оцінено якість роботи. Наведено результати експериментальних досліджень двомасового віброударного модуля з імпульсним електромагнітним приводом. В *узагальненнях* висвітлено основні наукові здобутки, показники якості функціонування оцінюваних вібраційних систем. Окреслено особливості та доцільність використання енергетичних та технологічних показників, за якими здійснювали порівняльний аналіз гармонійних і віброударних машин.

Ця монографія може бути корисною для науково-педагогічних працівників, аспірантів та інженерів, котрі займаються питаннями динамічного аналізу, оптимізаційного синтезу нелінійних систем та безпосередньо розробленням машин і пристроїв вібраційного типу.

Автор висловлює щирі вдячність колективу кафедри механіки та автоматизації машинобудування і НДЛ-40 Національного університету “Львівська політехніка” за підтримку під час написання монографії, а також рецензентам за клопітку роботу та поради для покращення якості наукових досліджень.

Зауваження про виявлені у цій монографії недоліки та побажання автор із вдячністю прийме за електронною адресою **vol. gursky@gmail.com**.