

**Ярошенко Л. В.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Чубик Р. В.**

к.т.н., доцент

Деревенько І. А.

к.т.н., доцент

**Національний
університет «Львівська
політехніка»****Yaroshenko L.**PhD of Engineering, Associate
Professor**Vinnitsia National Agrarian
University****Chubyk R.**PhD of Engineering, Associate
Professor**Derevenko I.**PhD of Engineering, Associate
Professor**Lviv Polytechnic National
University****УДК 621.8:681.5; 004.75****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3-6****ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ
ДЕБАЛАНСНИМ ВІБРОПРИВОДОМ
ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН НА ОСНОВІ
ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ**

У статті проаналізовано та запропоновано підхід щодо побудови системи керування електромеханічним дебалансним віброприводом вібраційних машин на основі штучної нейронної мережі. У результаті аналізу різних методів для управління динамічними об'єктами зроблено висновок, що найбільш відповідним і досконалим для даного типу машин є нейрокерування методом прогнозуючого модельного нейрокерування, який дозволяє розширити функціональні можливості даних вібраційних машин, та значно зекономити енергозатрати на вібропривод їхніх коливань. Для прогнозування майбутньої поведінки коливної механічної системи вібраційної технологічної машини і розрахунку помилок використовується прямий нейромулятор. Важливою особливістю застосованого у запропонованому способі керування роботою вібраційних технологічних машин за допомогою штучної нейронної системи прогнозуючого модельного нейроуправління є те, що в ньому відсутній нейроконтролер який необхідно навчати, його місце займає оптимізаційний алгоритм.

Застосування запропонованого способу керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою штучної нейронної мережі дозволить оптимізувати процес керування електромеханічним дебалансним віброприводом вібраційних машин та забезпечити оптимальний резонансний режим роботи віброприводу (який є вигідний з енергетичної точки зору) при всіх технологічних режимах роботи вібраційних машин. Техніко-економічні характеристики за даного способу керування додатково покращуються завдяки тому, що в запропонованому способі керування застосована технологія прогнозуючого модельного нейроуправління і в результаті чого постійно проводиться розрахунок (прогнозування) на декілька тактів наперед та визначається найкраща стратегія управління зміною частоти вимушуючої циклічної сили віброприводу. Внаслідок чого механічна система вібраційних машин менше часу перебуває у не-резонансному режимі роботи. Даний спосіб керування також зводить до мінімуму тривалість перехідних процесів при зміні маси завантаження робочого органу вібраційних чи зміні режиму роботи вібраційних та параметрів їхнього технологічного процесу.

Ключові слова: вібропривод, вібраційна технологічна машина, нейроуправління, нейронна мережа.



Постановка проблеми. Керування динамічними об'єктами за допомогою нейромереж є відносно новим та доволі перспективним напрямком, який знаходиться на стику таких дисциплін, як автоматичне керування, нейрофізіологія, штучний інтелект, робототехніка. Нейронним мережам притаманні унікальні властивості, які перетворюють їх у потужний інструмент що дозволяє створити системи керування, які здатні навчатися на узагальненні даних та прикладах, адаптуватися до змін властивостей керованого об'єкта та навколишнього середовища, дозволяють синтезувати нелінійні регулятори, що з огляду на наперед закладений в архітектуру нейромереж паралелізм, мають високу стійкість до пошкоджень їхніх складових елементів.

Нейронні мережі мають багато особливих властивостей, які роблять їх потужним інструментом для створення керуючих систем для динамічних об'єктів: здатність до навчання на прикладах, здатність до гладкої інтерполяції і екстраполяції даних на раніше невидимих нейромережею прикладах, можливість синтезу нелінійних контролерів, здатність адаптації до постійно змінюваних властивостей об'єкта управління та зовнішнього середовища в режимі реального часу, велика порівняно з класичною фон-Нейманівською архітектурою стійкість до пошкоджень своїх елементів в силу спочатку закладеного в нейромережеву архітектуру паралелізму.

Ці унікальні властивості нейронної мережі дозволяють вирішувати в рамках нейрокерування завдання будь-якого рівня складності. При цьому структура нейрорегулятора і час його навчання багато в чому визначається структурою об'єкту управління.

Доцільно використовувати різні методи нейрокерування, оскільки вони вирішують проблеми ідентифікації об'єкта, синтезу систем управління, їх аналізу та апаратної реалізації.

Особливо актуальним постає питання застосування нейромереж для керування такими динамічними об'єктами як вібраційна техніка зокрема вібраційними технологічними машинами, що застосовуються в таких галузях, як промислове та сільськогосподарське машинобудування для автоматичного керування електроприводами цих машин і механізмів для поліпшення їх динамічних показників регулювання, а також техніко-економічних показників у цілому.

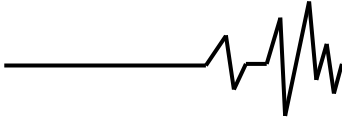
В результаті аналізу різних методів для управління динамічними об'єктами можна зробити висновок, що найбільш відповідним і досконалим для даного типу машин є

нейрокерування методом прогнозуючого модельного нейрокерування.

Основна ідея методу прогнозуючого модельного нейрокерування - це мінімізація функціоналу вартості інтегральної помилки, яка прогнозується на кілька тактів наперед, що покращує якість управління, оскільки властивість запізнювання майже не проявляється, як в системах управління зі зворотним зв'язком, і немає пере-регулювання, оскільки нейроконтролеру не потрібно мінімізувати помилку і вхідний сигнал не матиме дуже великої різниці у значеннях. У цьому методі використовується прямий нейроемулятор, навчений за методом зворотного поширення, але не використовується нейроконтролер, замість якого використовують оптимізаційний модуль, який працює в режимі реального часу і використовується симплекс-метод або квазі-Ньютонівський алгоритм. Оптимізаційний модуль постійно отримує цільову траєкторію руху об'єкта на кілька тактів наперед або ж дублює поточне значення. Після розрахунків на внутрішньому циклі системи оптимізаційний модуль може подати на вхід нейроемулятора серію різних впливів, варіанти подальшої поведінки, розраховується функція вартості і визначається найкраща стратегія. В результаті динамічному об'єкту подається керуючий сигнал, з розрахунком мінімальної вартості функції і стратегія перераховується наново у наступному такті.

Однак, якщо система змінює свій стан дуже часто, тобто має велику частоту дискретизації, оскільки для розрахунків стратегії необхідно час, то система не зможе знаходити найкращу стратегію подальшого руху за один такт. Тому застосування нейромереж для керування такими динамічними об'єктами як вібраційна техніка зокрема вібраційні технологічні машини потребує подальшого доопрацювання.

Аналіз останніх досліджень. З науково-технічної літератури присвяченій розвитку вібраційної технології та техніки для її реалізації відомо достатньо багато методів для керування параметрами коливного руху робочих органів вібраційних технологічних машин (ВТМ), які досить детально описані зокрема у роботі [1]. Так відомий цілий ряд методів підтримки технологічних параметрів роботи ВТМ у режимах наближених до резонансних. Зокрема, досить часто використовується метод керування параметрами коливних рухів робочих органів вібротехніки [2], у яких під час роботи ВТМ система управління постійно контролює два головні параметри – амплітуду та частоту коливань робочих органів і у разі зміни роботи



вібромашини чи завантаження робочого органу (що призводить до зміни частоти його вільних коливань), система керування виробляє керуючу дію направлену на зміну частоти та амплітуди вимушуючої сили віброзбуджувача, що призводить до зміни частоти яка близька до резонансної частоти пружної підвіски робочого органу вібромашини при зміненому завантаженні робочого органу а після цього коректує амплітуду його коливань на новій резонансній частоті так, що б вона була оптимальною відповідно до заданого технологічного режиму.

Даний метод керування дозволяє постійно підтримувати енергоощадний резонансний режим роботи ВТМ та автоматизувати процес налагодження частоти і амплітуди циклічних вимушених коливань робочого органу ВТМ при зміні його завантаження або у разі зміни режиму роботи вібромашини. Вібромашини, що реалізують такий метод керування отримали назву адаптивних вібраційних технологічних машин (АВТМ) [3] у ході їх роботи проводиться постійна адаптація параметрів роботи віброприводу до нових параметрів коливної механічної системи вібромашин та забезпечуються мінімальні енергозатрати на вібропривод коливань їх робочих органів.

Вказаний метод керування роботою АВТМ заснований на алгоритмі пошуку екстремуму амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) АВТМ, який має певну невизначеність внаслідок того що висновок про напрям зміщення частоти власних вільних коливань робочого органу АВТМ можливо зробити лише за проаналізувавши реакцію механічної коливної системи АВТМ на корегувальні дії адаптивної системи керування. У разі, якщо екстремальна адаптивна система керування утримувала коливний робочий орган АВТМ на екстремумі його амплітудно-частотної характеристики (резонансній частоті) при амплітуді коливань 5 мм і коли внаслідок різних технологічних впливів (розвантаження або довантаження) амплітуда його коливань

змінилася та стала рівною 4 мм, то у цьому випадку виникає питання, у якому напрямку необхідно здійснювати корекцію частоти вимушуючої циклічної сили віброприводу, щоб знову досягнути екстремального значення амплітуди коливань робочого органу АВТМ і забезпечити його резонансний режим роботи. Отже у даному разі необхідно постійно аналізувати реакцію коливної системи робочого органу АВТМ на зміну частоти вимушуючої циклічної сили віброприводу, і якщо при збільшенні її частоти відбувається подальше зменшення амплітуди коливань робочого органу АВТМ то необхідно проводити цю зміну у протилежному напрямі, а отже зменшувати частоту вимушуючої циклічної сили віброприводу. Внаслідок додаткових затрати час на визначення необхідного напрямку корекції такий метод керування, не забезпечуватиме необхідної точності та якості керування і не забезпечуватиме мінімальних енергозатрат на вібропривод коливань робочого органу АВТМ, що є наслідком тимчасової роботи АВТМ у не резонансному режимі.

Серед інших відомих методів керування роботою АВТМ можна відмітити метод [4], (див. рис. 1) коли система керування віброприводом коливань робочого органу АВТМ, постійно відслідковує зсув фаз $\pm \Delta\varphi$ між амплітудою вимушуючої циклічної сили віброприводу та амплітудою коливань робочого органу АВТМ, підтримує резонансний режим її роботи і у разі зміни завантаження робочого органу або при необхідності зміни режиму роботи АВТМ система керування коректує частоту ν_p вимушуючої циклічної сили віброприводу до частоти, що близька до резонансної частоти ν_0 пружної системи робочого органу АВТМ при новому завантаженні робочого органу таким чином, щоб фаза амплітуди вимушуючої циклічної сили віброприводу випереджала амплітуду коливань робочого органу АВТМ на кут рівний $\varphi = \pi/2$.

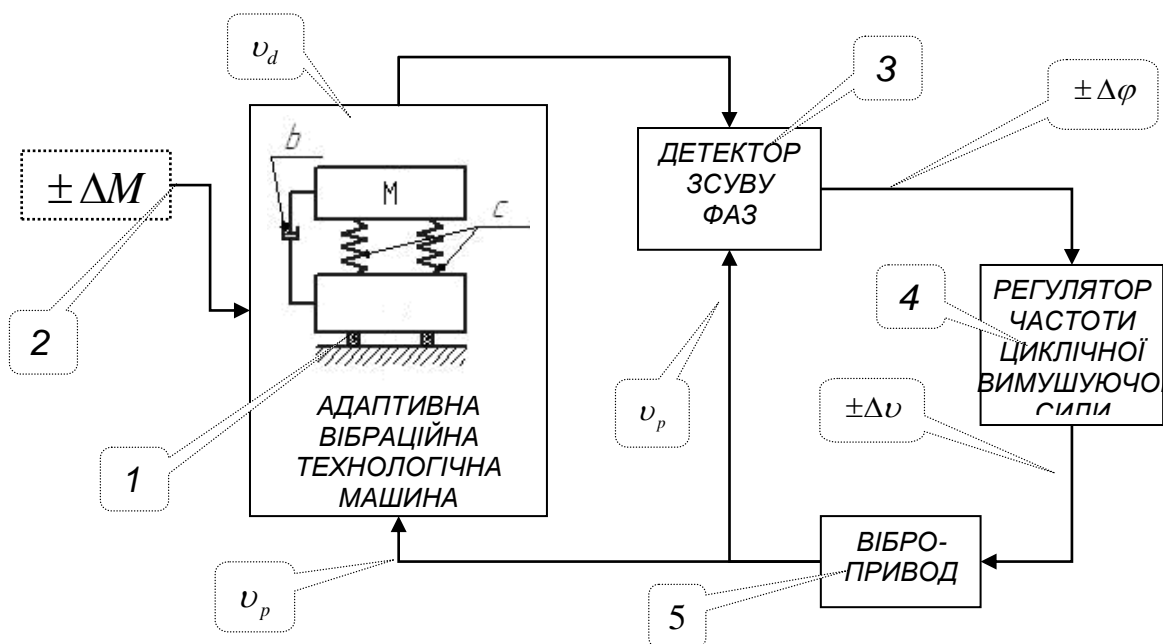
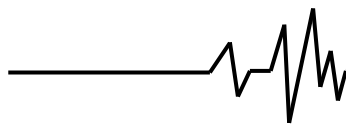


Рис. 1 Функціональна схема системи керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин

Застосування цього методу керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин дозволяє оптимізувати процес керування ними та забезпечує оптимальні режими роботи при мінімальних затратах енергії на вібропривод.

Цей метод керування заснований на визначенні кута зсуву фаз між амплітудою вимушеної циклічної сили керованого дебалансного віброприводу та амплітудою коливань робочого органу АВТМ і керування проводиться за цим кутом, однак у конструкції цього віброприводу відсутній жорсткий кінематичний зв'язок між приводним електродвигуном 1 (див. рис. 2) та дистанційно керованими рухомими інерційними масами (дебалансами) 2 що розміщені на приводному валу 3 який за допомогою підшипників 4 встановлений на робочому органі 5 АВТМ. Тобто керований дебалансний вібропривод [5, 6, 7] являє собою двох масну електромеханічну систему із пружним зв'язком. В якому еластична муфта 6 тобто пружний зв'язок [8, 9] використовується для компенсації руху робочого органу АВТМ в процесі її роботи відносно валу приводного електродвигуна 1, який жорстко встановлюється на рамі вібромашини.

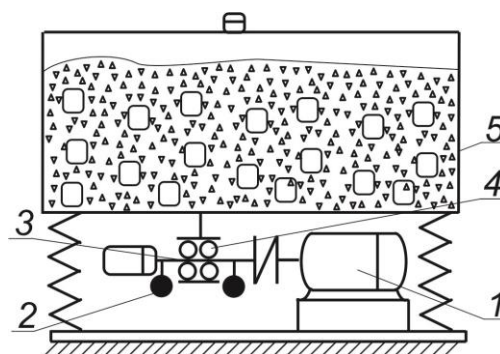
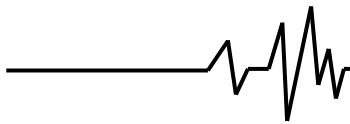


Рис. 2 Конструктивна схема адаптивної вібраційної технологічної машини

В процесі роботи АВТМ (а особливо в режимах довантаження та відвантаження, які характерні для більшості технологічних процесів роботи АВТМ та для в усіх їхніх перехідних режимів) кути повороту валу електродвигуна 1 та валу 3 дебалансного віброприводу будуть різними (тобто, як правило, коливатимуться один відносно одного) і величина їх різниці (тобто даного люфту) залежатиме від цілого ряду факторів серед яких наприклад момент інерції дебалансів 2, сили тертя у підшипниках 4 і т. д.. Однак, момент інерції дебалансів 2 віброприводу керується дистанційно одним із контурів самої системи керування що регулює амплітуду коливань робочого органу АВТМ, а це може призвести до того що такому способі керування сама система керування зможе ще й негативно впливати сама на себе (що може призвести до



зменшення стійкості її роботи). Отже у даному разі, відсутність жорсткого кінематичного зв'язку між приводним електродвигуном 1 і валом 3 з дебалансами та керування за зсувом фаз може бути причиною досить тривалої роботи АВТМ у деякому біля резонансному (не економічному) режимі.

Постановка задачі. У зв'язку з цим обґрунтування та розробка методу керування роботою АВТМ з використанням прогнозуючого модельного нейрокерування на базі нейромереж для розширення функціональних можливостей даних вібраційних машин, який дозволяє значно економити енергозатрати на вібропривод їхніх коливань представляє актуальну задачу, вирішення якої і становить зміст даної роботи..

Виклад основного матеріалу. Як показали попередні дослідження, вказаної мети можна досягнути якщо у вище вказаному способі керування роботою АВТМ застосувати штучну нейронну мережу, яка підтримуватиме резонансний режим роботи АВТМ, і при цьому відслідковуватиме зсув фаз між амплітудою коливань робочого органу АВТМ та амплітудою вимушуючої циклічної сили віброприводу і у разі зміни завантаження робочого органу вібромашини або при необхідності зміни режиму її роботи дана система керування коректуватиме частоту вимушуючої циклічної сили віброприводу, наблизитиме її до частоти, що є близькою до частоти власних коливань пружної системи робочого органу АВТМ, таким чином, щоб

коливання вимушуючої циклічної сили віброприводу випереджали по фазі коливання робочого органу АВТМ на кут $\varphi = \pi/2$. При цьому, системою керування на кожному такті, для корегування частоти вимушуючої циклічної сили віброприводу на основі принципу прогнозуючого модельного нейроуправління враховуватиметься величина реального кута зсуву фаз φ між коливаннями робочого органу АВТМ та коливаннями вимушуючої циклічної сили віброприводу і проводитиметься розрахунок, прогнозування та вибір найкращої стратегії для зміни частоти вимушуючої циклічної сили віброприводу.

Такий спосіб керування роботою АВТМ з метою забезпечення постійного резонансного режиму її роботи, дозволяє за допомогою штучної нейронної мережі у разі зміни параметрів технологічного процесу або зміни маси завантаження робочого органу АВТМ, завдяки застосуванню технології прогнозуючого модельного нейроуправління оптимально вибирати стратегію корекції частоти вимушуючої циклічної сили віброприводу.

На рис. 3 зображено функціональну схему системи керування роботою вібраційною технологічною машиною що має електромеханічний дебалансний вібропривод коливань робочого органу за допомогою штучної нейронної мережі.

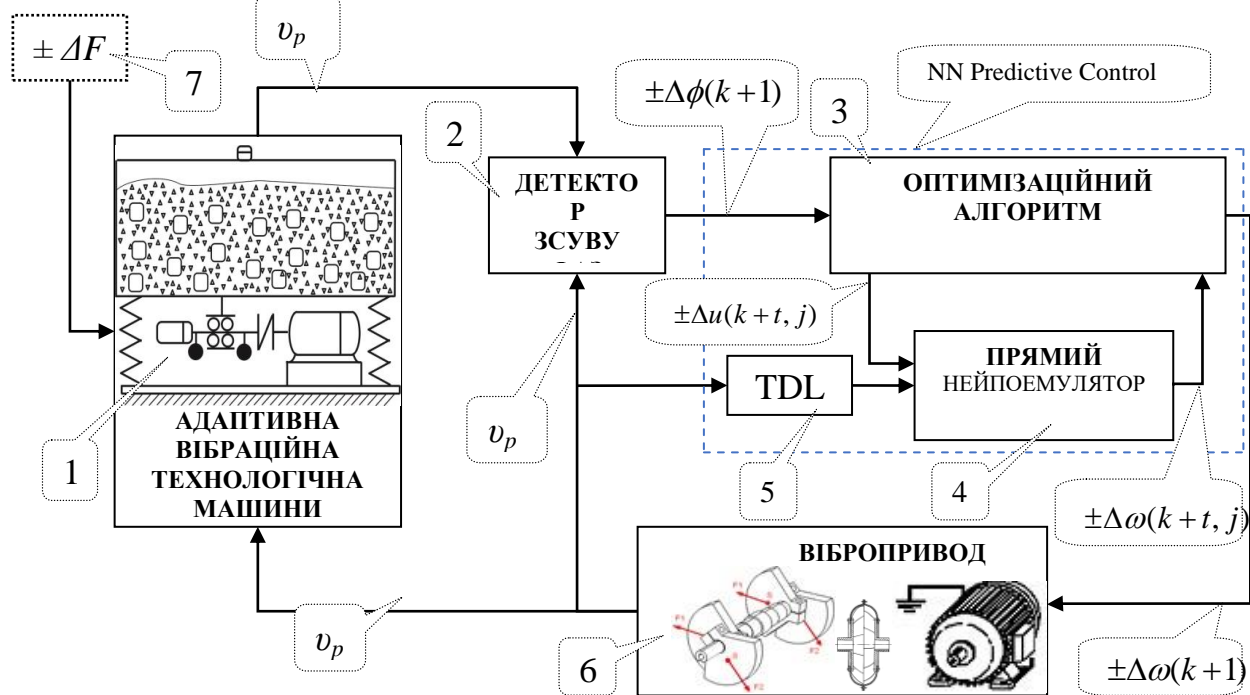


Рис. 3 Функціональна схема системи керування роботою вібраційною технологічною машиною що має електромеханічний дебалансний вібропривод коливань робочого органу за допомогою штучної нейронної мережі



Вібраційна технологічна машина електромеханічним дебалансним віброприводом 1 (із власною резонансною частотою коливань $u_0 = 25$ Гц) через зворотній зв'язок по частоті u_d коливань робочого органу з'єднана із одним із двох входів детектора зсуву фаз 2. На інший вхід детектора зсуву фаз 2 надходить сигнал, що прямо-пропорційний частоті u_p вимушуючої циклічної сили віброприводу. Вихід детектора зсуву фаз 2 з'єднаний із одним із двох входів оптимізаційного алгоритму 3. Оптимізаційний алгоритм 3 одним із двох своїх виходів та другим своїм входом з'єднаний із одним із двох входів прямого нейроемулятора 4 (який є навчений по методу зворотного розповсюдження помилки). Другий вхід прямого нейроемулятора 4 з'єднано через блок лінії затримки 5 TDL (Tapped Delay Line) із сигналом, що прямопропорційний частоті u_p вимушуючої циклічної сили віброприводу. Оптимізаційний алгоритм 3 другим своїм виходом безпосередньо з'єднаний із віброприводом 6, а вібропривод 6 із адаптивною вібраційною технологічною машиною 1 на яку діє 7 збурюючий фактор $\pm \Delta F$ зміни маси завантаження робочого органу АВТМ 1.

На рис. 4 зображено залежність кута зсуву фаз φ між переміщенням робочого органу АВТМ [1] (що має власну (резонансну) частоту коливань $u_0 = 25$ Гц) та вимушуючою циклічною силою віброприводу від частоти коливань f на робочій ділянці АЧХ.

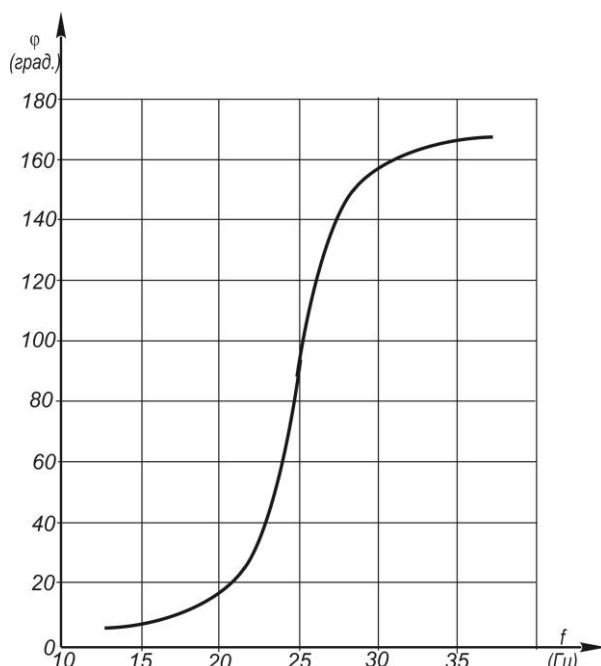


Рис. 4 Залежність кута зсуву фаз φ між переміщенням робочого органу АВТМ та вимушуючою циклічною силою віброприводу від частоти коливань f .

На рис. 5 зображено залежність коефіцієнта підсилення k механічної коливної системи даної АВТМ [1] від частоти коливань f на робочій ділянці АЧХ (при $\lambda = u/u_0 = 2$).

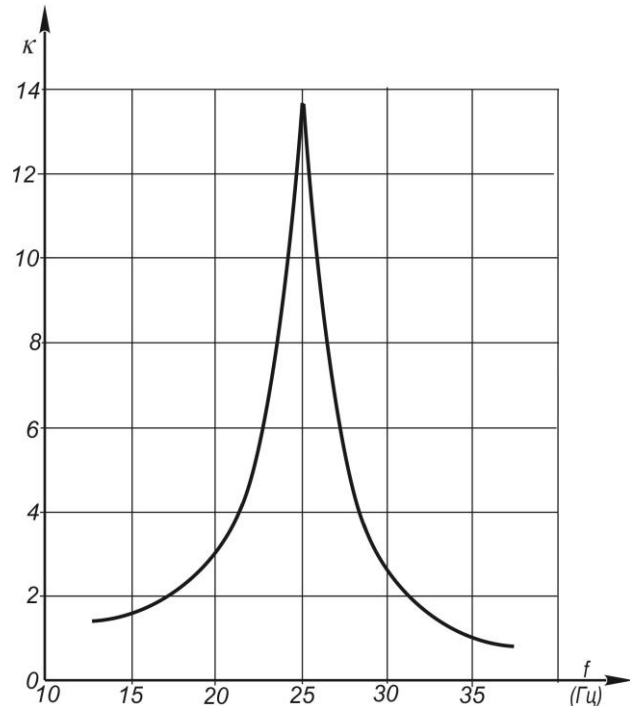


Рис. 5 Залежність коефіцієнта підсилення k механічної коливної системи даної АВТМ від частоти коливань f

Запропонований спосіб керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою штучної нейронної мережі так само як і спосіб керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин [4], базується на аналізі розв'язку основного диференційного рівняння руху механічних коливних систем, згідно [11] розв'язком диференційного рівняння є вираз (1)

$$A(t) = A \cdot \sin(u \cdot t - \varphi), \quad (1)$$

де A - переміщення робочого органу АВТМ; φ - зсув фаз між переміщенням робочого органу АВТМ із власною резонансною частотою коливань $u_0 = 25$ Гц та циклічною вимушуючою силою віброприводу, який на робочій ділянці АЧХ і має вигляд представлений на рис. 3. і може бути розрахований [1] за формулою:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\delta \cdot v}{-M \cdot v^2 + c}\right) = \arctan\left(\frac{2 \cdot v \cdot a}{v_0^2 - v^2}\right) = \arctan\left(\frac{\gamma \cdot \frac{v}{v_0}}{1 - \frac{v}{v_0}}\right),$$



де M - приведена маса коливних частин АВТМ, $\delta = -f/A$ (f – коефіцієнт тертя, опору повітря, ...), c - жорсткість пружної системи АВТМ, $\lambda = u/u_0$ - коефіцієнт відлагодження фізичний зміст якого, це відношення частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу u до власної u_0 (резонансної) частоти АВТМ, γ – коефіцієнт дисипативних втрат; F - амплітуда вимушуючої циклічної сили віброприводу, κ - коефіцієнт підсилення, даний коефіцієнт характеризує динамічні властивості АВТМ на робочій ділянці АЧХ і має вигляд представлений на рис. 4. і може бути розрахований [1] за формулою:

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{v_0^2}\right)^2 + \gamma^2 \cdot \frac{v^2}{v_0^2}}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \gamma^2 \cdot \lambda^2}}$$

Загальне рівняння руху, що пов'язує рух робочого органу АВТМ із циклічною вимушуючою силою віброприводу на робочому амплітудно-частотному діапазоні має вигляд:

$$A(t) = \frac{F}{c} \cdot \kappa \cdot \sin(v \cdot t - \varphi), \quad (2)$$

У зоні резонансу ($0,9 \leq \lambda \leq 1,1$) як показано у роботі [4], існує дуже різка зміна фазового кута і при резонансі спостерігається відставання вимушених коливань робочого органу АВТМ від циклічної вимушуючої сили віброприводу на чверть періоду ($\pi/2$) (дивись рис.4) та обґрунтовано доцільність керування параметрами віброприводу по даному критерію із метою забезпечення та підтримування в часі резонансного режиму роботи АВТМ. Аналіз форми траєкторії коефіцієнта підсилення κ коливної механічної системи АВТМ показує, що коливна система є доволі чутлива (вибіркова) до частоти зовнішнього впливу і зміна частоти циклічної вимушуючої сили на декілька Гц призведе до суттєвої зміни коефіцієнта підсилення κ коливної механічної системи АВТМ. Наприклад (див рис. 5) якщо $u \approx u_0 \approx 25$ Гц то $\kappa \approx 14$ і коли $u \approx 30$ Гц то $\kappa \approx 3$, тобто зміна частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу в 5 Гц зумовлює зміну коефіцієнта підсилення κ коливної механічної системи АВТМ майже у п'ять раз, а це зумовить зміну амплітуди коливань робочого органу АВТМ у відповідну кількість разів (відповідно до виразу 2). Тому як бачимо утримування системи на піку при $\kappa \approx 14$ (для даного прикладу) є задачею яка вимагає виваженого прийняття рішень при корекції частоти віброприводу для того, щоб забезпечити

постійне перебування системи в енергетично вигідному резонансному режимі.

На рис. 6 зображено принципову схему створення прямого нейроемулатора, тобто процес застосування нейромережевої моделі для ідентифікації адаптивної вібраційної технологічної машини як об'єкту керування.

Керування частотою циклічної вимушуючої сили віброприводу де мінімізується відхилення поточного стану об'єкта управління від установки ($u \approx u_0$) для кожного такту, не завжди забезпечує найкращу інтегральну якість управління, яка оцінюється виразом:

$$I = \sum_{n=1}^N [\Delta\varphi(n) - \Delta v(n)]^2.$$

Серед причин цього є те, що якість управління погіршується через властивість запізнюватися мінімум на один такт у систем управління із зворотнім зв'язком та у випадку якщо для досягнення цільового положення (наприклад $\kappa \approx 14$ для даного АВТМ) потрібно буде декілька тактів, система керування намагаючись мінімізувати поточну помилку, може видати надмірно сильний керуючий вплив у вигляді різкого приросту частоти $\pm \Delta u$, то це може призвести до пере-регулювання.

При використанні способу керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою штучної нейронної мережі система керування функціонує наступним чином: завдяки зміні приведеної маси 7 (див. рис. 3) $\pm \Delta F$ у АВТМ 1 відбувається зсув фази між вимушуючими та вимушеними коливаннями. В детекторі зсуву фаз 2 постійно в робочому режимі проходить порівняння та визначення відставання або випередження між двома гармонійними сигналами, u_d амплітудою коливань робочого органу адаптивної вібраційної технологічної машини та u_p амплітудою циклічної вимушуючої сили віброприводу. Зсув фаз $\pm \Delta\varphi(n+1)$ (де n , це умовний n -тий такт) в процесі роботи поступає в блок 3 оптимізаційного алгоритму системи прогнозуючого модельного нейроуправління (на рис. 3 вказано штрих пунктирною лінією NN Predictive Control, яка відома також як Model Predictive Control, або Neural Generalized Predictive Control) [11-15]. Дана система (NN Predictive Control) мінімізує функціонал вартості інтегральної помилки, прогнозованої на $L = \max(L_2, L_3)$, $0 \leq L_1 \leq L_2$ тактів вперед [11]:

$$Q(k) = \sum_{i=L_1}^{L_2} e(n+i)^2 + \rho \sum_{i=0}^{L_2} [u(n+i) - u(n+i-1)]^2, \quad (3)$$



де e - помилка виходу системи на задану траєкторію, ρ - внесок зміни керуючого сигналу $\pm \Delta u(n)$ в загальний функціонал вартості Q .

Для прогнозування майбутньої поведінки коливної механічної системи адаптивної вібраційної технологічної машини і розрахунку помилок використовується прямий нейроемулятор. На рис. 6 зображено процес створення прямого нейроемулятора, тобто застосування нейромережевої моделі для ідентифікації адаптивної вібраційної технологічної машини як об'єкту керування. Відповідно до [16] число блоків ліній затримок TDL 2 на входах штучної нейронної мережі (ШНМ) прямого нейроемулятора 3 приблизно повинно відповідати порядку об'єкту (в нашому випадку об'єкт є коливна ланка то кількість TDL рівна 2). В процесі створення прямого нейроемулятора 3 адаптивної вібраційної технологічної машини 1 (див. рис. 6) за допомогою (алгоритму навчання 4) алгоритму зворотного розповсюдження повинна мінімізуватися помилка між виходом адаптивної

вібраційної технологічної машини $\pm \Delta \varphi_n$ та виходом нейромережевої моделі $\pm \Delta \varphi_n^m$. Отримана таким чином нейромережева модель є «чорним ящиком». Вона не дозволяє судити про фізичні процеси, що протікають в адаптивній вібраційній технологічній машині 1, але згідно [11, 13, 16] може бути ефективно використана для аналізу та прогнозу поведінки даного об'єкта управління, а також для синтезу системи управління.

Важливою особливістю застосованого у запропонованому способі керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою штучної нейронної системи прогнозуючого модельного нейроуправління є те, що в ньому відсутній нейроконтролер якій необхідно навчати. Його місце займає оптимізаційний алгоритм 3 (див. рис. 3), що працює в режимі реального часу, в якому може бути використаний сіплекс-метод [17] або квазі-ньютонівський алгоритм [18]. Оптимізаційний алгоритм 3 отримує на n -ному такті цільову траєкторію ($\varphi = \pi/2$) на L тактів наперед.

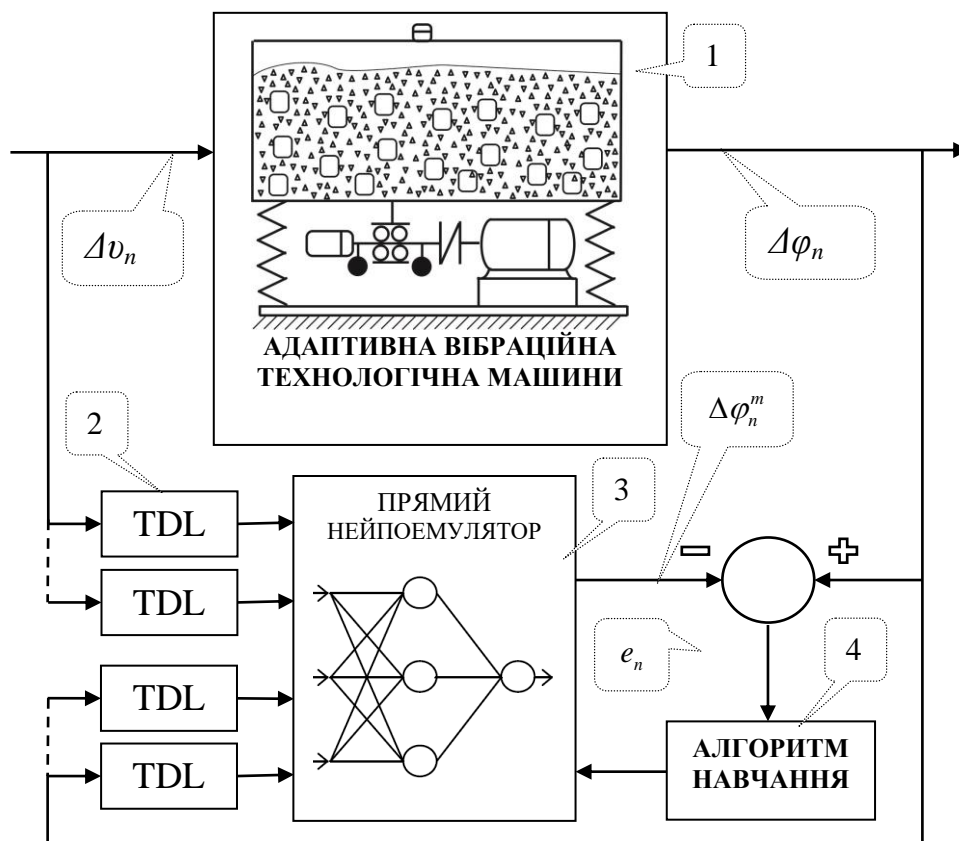


Рис. 6 Процес створення прямого нейроемулятора

Далі, для вибору оптимального керуючого впливу $\pm \Delta u$, обчислення відбуваються у внутрішньому циклі системи нейроуправління (його ітерації позначені як j).

За час одного такту управління оптимізаційний алгоритм 3 подає на вхід прямого нейроемулятора 3 (див. рис. 6) серію різних



впливів $\pm\Delta u(n+t, j)$, де t - глибина прогнозування, $0 \leq t \leq L-1$, та отримує у відповідь різні варіанти поведінки коливної механічної системи адаптивної вібраційної технологічної $\pm\Delta v(n+t, j)$, на основі чого оптимізаційний алгоритм 3 (див. рис. 3) розраховує функцію вартості за формулою (3) і визначає найкращу стратегію управління

$$A = \left\{ \pm\Delta u(n, j_1) \pm\Delta u(n+1, j_2) \dots \pm\Delta u(n+L-1, j_L) \right\}$$

в сенсі мінімізації функціоналу вартості (3). Завдяки тому, що ділянка траєкторії коефіцієнта підсилення k коливної механічної системи АВТМ на своєму піку є дуже стрімкою, то важливо (за допомогою ρ -внесок зміни керуючого сигналу $\pm\Delta u(n)$) оптимізувати е-помилку виходу системи на задану траєкторію для того щоб коливна механічна система АВТМ різко не завалювалась із за-резонансної зони у до-резонансну і навпаки. У підсумку, на вібропривод 6 (див. рис. 3) подається керуючий сигнал $\pm\Delta v(n) = \pm\Delta v(n+t, j)$. На наступному такті стратегія А-корекції частоти вимушуючої циклічної сили віброприводу 5 розробляються заново. Даний приріст $\pm\Delta v$ частоти вимушуючої циклічної сили через вібропривод 5 впливає на АВТМ 1 та зводить заданий зсув фаз між вимушуючими та вимушеними коливаннями до оптимального значення ($\varphi = \pi/2$). Таким чином відбувається адаптація вібромашини до нової маси завантаження робочого органу та забезпечується резонансний режим роботи АВТМ.

Висновок. Застосування запропонованого способу керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою штучної нейронної мережі дозволить оптимізувати процес керування електромеханічним дебалансним віброприводом вібраційних машин та забезпечити оптимальний резонансний режим роботи віброприводу (який є вигідний з енергетичної точки зору) при усіх технологічних режимах роботи АВТМ. Техніко-економічні характеристики за даного способу керування додатково покращуються завдяки тому, що в запропонованому способі керування застосовано технологію прогнозуючого модельного нейроуправління і в результаті чого постійно проводиться розрахунок (прогнозування) на декілька тактів наперед та визначається найкраща стратегія управління зміною частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу. Внаслідок чого механічна система АВТМ менше часу перебуває у нерезонансному режимі роботи. Даний спосіб керування також зводить до мінімуму

тривалість перехідних процесів при зміні маси завантаження робочого органу АВТМ чи зміні режиму роботи АВТМ та параметрів технологічного процесу.

Список використаних джерел

1. Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. Керовані вібраційні технологічні машини: Монографія. Вінниця.: ВНАУ, 2011. 355 с.
2. Спосіб керування роботою машини із коливними рухами робочих органів. пат. 10971 А Україна, МПК В65ВG27/24. П.С. Берник, Р.В. Чубик, В.А. Пашистий. № а 200502375; заявл. 16.03. 2005 опубл. 15.12 .2005; Бюл. № 12.
3. Чубик Р.В. Адаптивна система керування режимами резонансних вібраційних технологічних машин: Автореф. дис... канд. тех. наук. Львів, 2007. 20 с.
4. Спосіб керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин. пат. 87776 А Україна, МПК В65G27/00.. Середа Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. № а 200803685; заявл. 24.03. 2008 опубл. 10.08.2009; Бюл. № 15.
5. Керований симетричний дебалансний збуджувач коливань. пат. 112137 Україна, МПК В06В 1/16 (2006.1) Чубик Р.В., Ярошенко Л.В., Мокрицький Р.Б., Зрайло Н.М. № а 2015 05483; заявл. 04.06. 2015 опубл. 25.07.2016; Бюл. № 14.
6. Керований вібропривод напрямленої дії зі спареними дебалансами. пат. 116418 Україна, МПК В06В 1/16 (2006.1) Чубик Р.В., Ярошенко Л.В., Бандура В. М., Томчук В. В., Зрайло Н.М. № а 2016 09034; заявл. 25.08. 2016 опубл. 12.03. 2018; Бюл. № 5.
7. Керований симетричний дебалансний вібропривод напрямленої дії. пат. 117630 Україна, МПК В06В 1/16 (2006.1) Чубик Р.В., Ярошенко Л.В., Зрайло Н.М. № а 2017 00984; заявл. 03.02. 2017 опубл. 27.08.2018; Бюл. № 16.
8. Пружна муфта. пат. 43813 А Україна, МПК F 16D3/4. П.С. Берник, П.Д. Денісов, О.В. Солоня. №99116344; заявл. 23.11.99; опуб. 17.12.2001. Бюл. №11.
9. Еластична муфта. пат. 43814 А Україна, МПК F 16D3/74. П.С. Берник, П.Д. Денісов, О.В. Солоня. №99116345; заявл. 23.11.99; опуб. 17.12.2001. Бюл. №11.
10. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 751 с.
11. А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба Обзор методов нейроуправления. *Проблеми програмування*. 2011. № 2. С. 79-94.
12. Яковенко Т. В., Сакало Е. С., Ткачєва Т. С. Исследование динамических объектов с помощью нейронных сетей. *Збірник наукових*



праць Харківського університету Повітряних сил. 2012. Вип. 3. С. 130-133.

13. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения: пер. с англ. М.: ИПРЖР, 2000. 272 с.

14. Rossiter J.A. Model-based Predictive Control: a Practical Approach CRC Press, 2003. 318 с.

15. Lendaris G.G. A Retrospective on Adaptive Dynamic Programming for Control *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Atlanta, USA, June 14-19, 2009*. P. 1750 – 1757.

16. Бураков, М. В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.

17. Takahashi Y. Adaptive Predictive Control of Nonlinear Time-Varying System using Neural Network *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. Na-goya, Japan, 25 – 29 October, 1993. Vol. 3. P. 1464 – 1468.

18. Soloway D., Haley P.J. Neural Generalized Predictive Control *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*. 15 – 18 September 1996. P. 277 – 281.

References

1. Chubyk R.V., Yaroshenko L.V. Kerovani vibratsiyini tekhnolohichni mashyny. Vinnytsya.: VNAU, 2011. 355 s.

2. Sposib keruvannya robotoyu mashyn iz kolyvnymy ruhamy robochych organiv. pat. 10971 A Ukraina, MPK B65BG27/24. Bernyk P.S., Chubyk R.V., Pashystyy V.A. № a 200502375; zayavl. 16.03. 2005 opubl. 15.12.2005; Byul. № 12.

3. Chubyk R.V. Adaptivna systema keruvannya regymamy rezonansnyh vibratsiynyh tehnologichnyh mashyn: Avnoref. dys... kand. teh. nauk. Lviv, 2007. 20 s.

4. Sposib keruvannya robotoyu adaptivnyh vibratsiynyh tehnologichnyh mashyn. pat. 87776 A Ukraina, MPK B65G27/00.. Sereda L.P., Chubyk R.V., Yaroshenko L.V. № a 200803685; zayavl. 24.03. 2008 opubl. 10.08.2009; Byul. № 15.

5. Kerovannyi symmetrychnyy debalansnyy zbudguvach kolyvan. pat. 112137 Ukraina, MPK B06B 1/16 (2006.1) Chubyk R.V., Yaroshenko L.V., Mokrytskyi R.B., Zraylo N.M. № a 2015 05483; zayavl. 04.06. 2015 opubl. 25.07.2016; Byul. № 14.

6. Kerovannyi vibropriyvod napryamlenoyi diyi zi sparenymy debalansamy. pat. 116418 Ukraina, MPK B06B 1/16 (2006.1) Chubyk R.V., Yaroshenko L.V., Bandura V. M., Tomchuk V. V., Zraylo N.M. № a 2016 09034; zayavl. 25.08. 2016 opubl. 12.03. 2018; Byul. № 5.

7. Kerovannyi symmetrychnyy debalansnyy vibropriyvod napryamlenoyi diyi. pat. 117630 Ukraina, MPK B06B 1/16 (2006.1) Chubyk R.V., Yaroshenko L.V., Zraylo N.M. № a 2017 00984; zayavl. 03.02. 2017 opubl. 27.08.2018; Byul. № 16.

8. Prugna mufta. pat. 43813 A Ukraina, MPK F 16D3/4. Bernyk P.S., Denisov P.D., Solona O.V. №99116344; zayavl. 23.11.99; opub. 17.12.2001. Byul. №11.

9. Elastychna mufta. pat. 43814 A Ukraina, MPK F 16D3/74. Bernyk P.S., Denisov P.D., Solona O.V. №99116345; zayavl. 23.11.99; opubl. 17.12.2001. Byul. №11.

10. Haykin S.E. Phizicheskiye osnovy mehaniki. M.: Nauka, 1971. 751 s.

11. Chernodub A.N., Dzyuba D.A. Obzor metodov neyroupravlyeniya. *Problemy programuvannya*. 2011. № 2. С. 79-94.

12. Yakovenko T.V., Sakalo Y.S., Tkachova T.S. Issledovaniye dynamicheskikh jbyektov s pomotshyu neyronnyh setey. *Zbirnyk naukovykh prats Harkivskogo universytetu Povitryanyh syl*. 2012. Vyp. 3. С. 130-133.

13. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его прилогиения: пер. с англ. М.: ИПРЖР, 2000. 272 с.

14. Rossiter J.A. Model-based Predictive Control: a Practical Approach CRC Press, 2003. 318 с.

15. Lendaris G.G. A Retrospective on Adaptive Dynamic Programming for Control *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Atlanta, USA, June 14-19, 2009*. P. 1750 – 1757.

16. Burakov, M. V. Neyronnyye seti i neyrokontrollery: ucheb. posobiye. Spb.: GUAP, 2013. 284 с.

17. Takahashi Y. Adaptive Predictive Control of Nonlinear Time-Varying System using Neural Network *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. Na-goya, Japan, 25 – 29 October, 1993. Vol. 3. P. 1464 – 1468.

18. Soloway D., Haley P.J. Neural Generalized Predictive Control *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*. 15 – 18 September 1996. P. 277 – 281.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕСКИМ ДЕБАЛАНСНЫМ ВИБРОПРИВОДОМ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В статье проанализирован и предложен подход к построению системы управления электромеханическим дебалансным виброприводом вибрационных машин на основе искусственной нейронной



сети. В результате анализа различных методов для управления динамическими объектами сделан вывод, что наиболее подходящим и совершенным для данного типа машин является нейроуправление методом прогнозирующего модельного нейроуправления, который позволяет расширить функциональные возможности данных вибрационных машин, и значительно экономить энергозатраты на вибропривод их колебаний. Для прогнозирования будущего поведения колеблющейся механической системы вибрационной технологической машины и расчета ошибок используется прямой нейроэмулятор. Важной особенностью примененного в предложенном способе управления работой вибрационных технологических машин с помощью искусственной нейронной системы прогнозирующего модельного нейроуправления является то, что в нем отсутствует нейроконтроллер которой необходимо обучать, его место занимает оптимизационный алгоритм.

Применение предлагаемого способа управления работой адаптивных вибрационных технологических машин с помощью искусственной нейронной сети позволит оптимизировать процесс управления электромеханическим дебалансным виброприводом вибрационных машин и обеспечить оптимальный резонансный режимы работы вибропривода (который является наиболее выгодным с энергетической точки зрения) при всех технологических режимах работы вибрационных машин. Техничко-экономические характеристики при данном способе управления дополнительно улучшаются благодаря тому, что в предложенном способе управления применены технологии прогнозирующего модельного нейроуправления в результате чего постоянно проводится расчет (прогнозирование) на несколько тактов вперед и определяется лучшая стратегия управления изменением частоты циклической вынуждающей силы вибропривода. В результате механическая система вибрационных машин меньше времени находится в нерезонансном режиме работы. Данный способ управления также сводит к минимуму продолжительность переходных процессов при изменении массы загрузки рабочего органа вибрационных машин или изменении режима работы вибрационных машин и параметров технологического процесса.

Ключевые слова: вибропривод, вибрационная технологическая машина, нейроуправление, нейронная сеть.

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF THE CONTROL SYSTEM OF ELECTROMECHANICAL DEBALANCE VIBRODRIVE OF VIBRATION MACHINES ON THE BASIS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

The article analyzes and proposes an approach to the construction of a control system for electromechanical debalance vibrodrive for vibration machines based on an artificial neural network. As a result of the analysis of various methods of managing dynamic objects it is concluded that the most appropriate and perfect for this type of machine is neurocontrol method of predictive model neurocontrol, which allows to expand the functionality of these vibrating machines and significantly save energy for vibratory drive of their oscillations. A direct neuro-emulator is used to predict the future behavior of the oscillating mechanical system of the vibration technological machines and to calculate errors. An important feature of the predictive neurocontrol model in the proposed method of controlling the operation of vibrating technological machines using an artificial neural system is that there is no neurocontroller that needs to be trained, its place is taken by the optimization algorithm.

Applying the proposed method of controlling operation of adaptive vibration technology machines using artificial neural network will optimize the electromechanical control of debalanced vibration drive of vibrating machines and provide optimal resonant modes of its operation (which is energy efficient) in all technological modes of vibrating operation. The technical and economic characteristics of this control method are further improved due to the fact that the proposed control method uses the technology of predictive model neurocontrol and as a result is constantly calculated (forecasted) several cycles in advance and determines the best strategy to control the frequency of forced cyclic vibration. As a result, the mechanical system of vibration machines spends less time in non-resonant mode. This method of control also minimizes the duration of transients when changing the load mass of the working body vibration or changing the mode of vibration parameters and the parameters of their technological process.

Key words: vibrodrive, vibration technological machine, neurocontrol, neural network.

**Відомості про авторів**

Ярошенко Леонід Вікторович кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету, Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com

Ярошенко Леонид Викторович кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Винницкого национального аграрного университета, Служебный адрес: г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com

Yaroshenko Leonid Victorovich candidate of technical sciences, associate professor of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa national agrarian university, Service address: Vinnitsa, st. Sonyachna 3, VNAU 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com

Чубик Роман Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри опору матеріалів та будівельної механіки Національного університету «Львівська політехніка», Службова адреса: м. Львів 79013, вул. С. Бандери 12, e-mail: Roman.V.Chubyk@lpnu.ua

Чубик Роман Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и строительной механики Национального университета «Львовская политехника», Служебный адрес: г. Львов 79013, ул. С. Бандеры 12, e-mail: Roman.V.Chubyk@lpnu.ua

Chubyk Roman Vasyliovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Resistance of Materials and Structural Mechanics, Lviv Polytechnic National University, Office address: Lviv 79013, vul. S. Banderi 12, e-mail: Roman.V.Chubyk@lpnu.ua

Деревенько Ірина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри опору матеріалів та будівельної механіки Національного університету «Львівська політехніка», Службова адреса: м. Львів 79013, вул. С. Бандери 12, e-mail: iryana.a.derevenko@lpnu.ua

Деревенько Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и строительной механики Национального университета «Львовская политехника», Служебный адрес: г. Львов 79013, ул. С. Бандеры 12 e-mail: iryana.a.derevenko@lpnu.ua

Derevenko Iryna Anatoliivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Material Resistance and Structural Mechanics, Lviv Polytechnic National University, Office address: Lviv 79013, vul. S. Banderi 12, e-mail: iryana.a.derevenko@lpnu.ua