

Р.В. Чубик, І.Д. Зелінський, І.А. Деревенько
Національний університет "Львівська політехніка"

СПОСІБ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНО ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО ПОЛЯ АДАПТИВНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ПІД-РЕГУЛЯТОРА

© Чубик Р.В., Зелінський І.Д., Деревенько І.А., 2021

Мета. Розробка оптимального способу керування динамічними параметрами віброприводів адаптивних вібраційних технологічних машин (АВТМ). **Методика.** Робота базується на створенні прямої нейромережевої моделі АВТМ та застосуванні технології гібридного нейро-ПІД управління для формування коригуючого впливу на основі пропорційно-інтегрально-диференційного закону на кожному такті керування, для мінімізації помилки зворотного зв'язку по амплітуді коливань робочого органу вібромашини. **Результати.** Розроблено спосіб керування який дозволяє забезпечувати резонансний режим роботи АВТМ завдяки постійній корекції частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу, при даному способі керування на резонансній частоті АВТМ проводиться стабілізація питомої роботи вібраційного поля АВТМ шляхом автоматичної корекції амплітуди коливань робочого органу за допомогою нейромережевого ПІД-регулятора із самонастройкою на основі прямого нейроемулатора АВТМ. **Наукова новизна.** Вперше отримано структурну схему, математичну модель та проведено моделювання роботи гібридного нейромережевого ПІД-контролера на основі прямого нейроемулатора АВТМ для стабілізації питомої роботи вібраційного поля вібромашин на резонансній робочій частоті. **Практична значущість.** Запропонований спосіб стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля дозволяє забезпечити мінімальні енергозатрати на вібропривод при стабільних технологічно оптимальних параметрах вібраційного поля адаптивної вібраційної технологічної машини на протязі всього технологічного циклу віброобробки.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, нейрокерування, ПІД-регулятор, система гібридного нейро-ПІД управління, адаптивна вібраційна технологічна машина, керований вібропривод.

Вступ

На даному етапі розвитку вібраційної техніки та технологій відомо багато методів для керування параметрами вібраційного поля та засобів для їх реалізації які докладно описані в роботі [1]. Зокрема відомий спосіб управління параметрами вібраційного поля вібромашин [2], в якому в процесі роботи адаптивної вібраційної технологічної машини (АВТМ) система керування контролює два параметри – частоту та амплітуду коливань робочого органу і в випадку зміни завантаження робочого органу або при необхідності зміни режиму роботи машини система керування коректує частоту та амплітуду вимушуючих коливань приводу робочого органу, до частоти котра близька до резонансної частоти пружної системи вібромашини при заданому завантаженні робочого органу і амплітуду коливань на резонансній частоті так, що б вона відповідала оптимальному режиму технологічного процесу.

Одним із основних недоліком такого методу стабілізації технологічних параметрів вібраційного поля АВТМ є те, що один і той же самий рівень амплітуди коливань робочого органу АВТМ на різних частотах дасть різну продуктивність. Це обумовлюється тим, що якщо наприклад вібромашина працювала на частоті 50 Гц із амплітудою у 3 мм, а в силу зміни маси завантаження робочого органу перейшла на нову резонансну частоту 52 Гц забезпечивши ту ж саму амплітуду у 3 мм не зможе забезпечити попередньої продуктивності АВТМ. Це пояснюється тим, що у першому випадку за 1 с АВТМ робила 50 повних коливань де за кожне коливання виконувалась певна корисна робота, а в другому випадку АВТМ уже робитиме 52 повні коливання при тій же самій амплітуді коливань робочого органу. І як наслідок у другому випадку матимемо більшу

продуктивність або більшу інтенсивність віброобробку в залежності від того що робитиме вібромашина.

Аналіз літературних джерел

Найбільш близьким по технічній суті є [3], це способі стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин, в якому система керування віброприводом, відслідковуючи власну частоту коливань механічної коливної системи W_d , підтримує режим роботи адаптивної вібраційної технологічної машини близький до резонансного, згідно винаходу, в процесі роботи адаптивної вібраційної технологічної машини система керування контролює два параметри – частоту W_d та A_d амплітуду коливань робочого органу і у випадку зміни завантаження робочого органу або при необхідності зміни режиму роботи адаптивної вібраційної технологічної машини система керування коректує частоту та амплітуду вимушуючих коливань віброприводу робочого органу, до частоти W_d котра близька до резонансної частоти пружної коливної системи вібромашини при заданому завантаженні робочого органу і амплітуду коливань робочого органу A_d на резонансній частоті так, щоб виконувалась умова $A_d = \frac{W_z^2 \times A_z^2}{W_d^2}$, де W_z та A_z задані технологічно оптимальні параметри вібраційного поля адаптивної вібраційної технологічної машини.

Основним недоліком такого методу стабілізації технологічних параметрів вібраційного поля АВТМ є те, що він не є прив'язаним до інерційних та дисипативних характеристик АВТМ. Тобто в даному способі керування регулятор амплітуди циклічної вимушуючої сили розводячи та зводячи дебаланси відпрацьовуючи тим самим корекцію амплітуди коливань робочого органу АВТМ A_d на резонансній частоті не враховує інерційних та дисипативних характеристик на робочого органу АВТМ із певною масою його завантаження робочим середовищем (чи штучними заготовками, деталями).

І як наслідок коливна механічна система АВТМ буде мати додаткові затухаючі в часі коливання амплітуди A_D , що будуть більші за розрахункові $A_D > A_d$ (на резонансній частоті) у всіх перехідних процесах (тобто при довантаженні чи відвантаженні робочого органу АВТМ, що є спряжено із послідуною автоматичною корекцією амплітуди циклічної вимушуючої сили віброприводу). Сумування даних додаткових амплітуд A_D на протязі технологічного циклу віброобробки буде причиною незабезпечені рівності $A_k = A_{(D+d)}^2 \times W^2$ [4, 5, 6] питомої роботи вібраційного поля АВТМ при будь якому завантаженні робочого органу і заданим технологічно оптимальним значенням A_k .

Мета

Метою даної роботи є розробка оптимального способу керування динамічними параметрами віброприводів адаптивних вібраційних технологічних машин.

Математична модель

Способі стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою нейромережевого ПИД-регулятора є наступний. На адаптивну вібраційну технологічну машину 1 (див. Рис. 1) діє параметричне збурення 7. АВТМ по інформаційному каналу (W_d) з'єднано із одним із трьох входів блоку синтезу 5, а два інші входи даного блоку синтезу 5 з'єднано із блоком 6 технологічних параметрів. АВТМ по другому

інформаційному каналу (A_d) з'єднано із двома блоками порівняння 12, 2 та двома блоками лінії затримки TDL (Tapped Delay Line) 10 і 11. Вихід блоку синтезу 5 (A_N) з'єднано із другим входом блоку порівняння 2, а вихід блоку порівняння 2 (ΔA) з'єднано із одним із трьох входів блока штучної нейронної мережі 9 та із одним із чотирьох входів ПІД-регулятора 3. Другий вхід блока штучної нейронної мережі 9 з'єднано із виходом блока лінії затримки TDL 10. Блок штучної нейронної мережі 9 своїми трьома виходами (k_p , k_i , k_d) з'єднаний із трьома входами ПІД-регулятора 3. Вихід блоку ПІД-регулятора 3 ($u(k)$) з'єднано із керованим віброприводом 12 та одним із трьох входів блока прямого нейроемулятора 8. Вихід блока лінії затримки TDL 11 з'єднано із другим входом блока прямого нейроемулятора 8. Керований вібропривод 12 з'єднано ($\pm \left| \frac{u(k)}{DF} \right|$) із адаптивною вібраційною технологічною машиною 1. Один із двох виходів блоку прямого нейроемулятора 8 ($\hat{A}_d(k+1)$) з'єднано із другим входом блоку порівняння 12, і вихід блоку порівняння ($e(k+1)$) з'єднано із третім входом прямого нейроемулятора 8, а другий вихід блоку порівняння ($e(k+1)$) з'єднано із входом блоком штучної нейронної мережі 9.

За допомогою блоку введення технологічно оптимальних параметрів віброобробки 6, проводиться ввід заданих W_z та A_z з технологічної точки зору оптимальних параметрів вібраційного поля АВТМ 1. Завдяки тому, що на АВТМ 1 діє параметричне збурення 7 виникає зміна власної резонансної частоти АВТМ 1, попри дане параметричне збурення 7 на АВТМ 1 можуть діяти інші чинники наприклад в'язке тертя яке змінне в часі, жорсткість пружної підвіски коливної механічної системи АВТМ 1 і т. д.

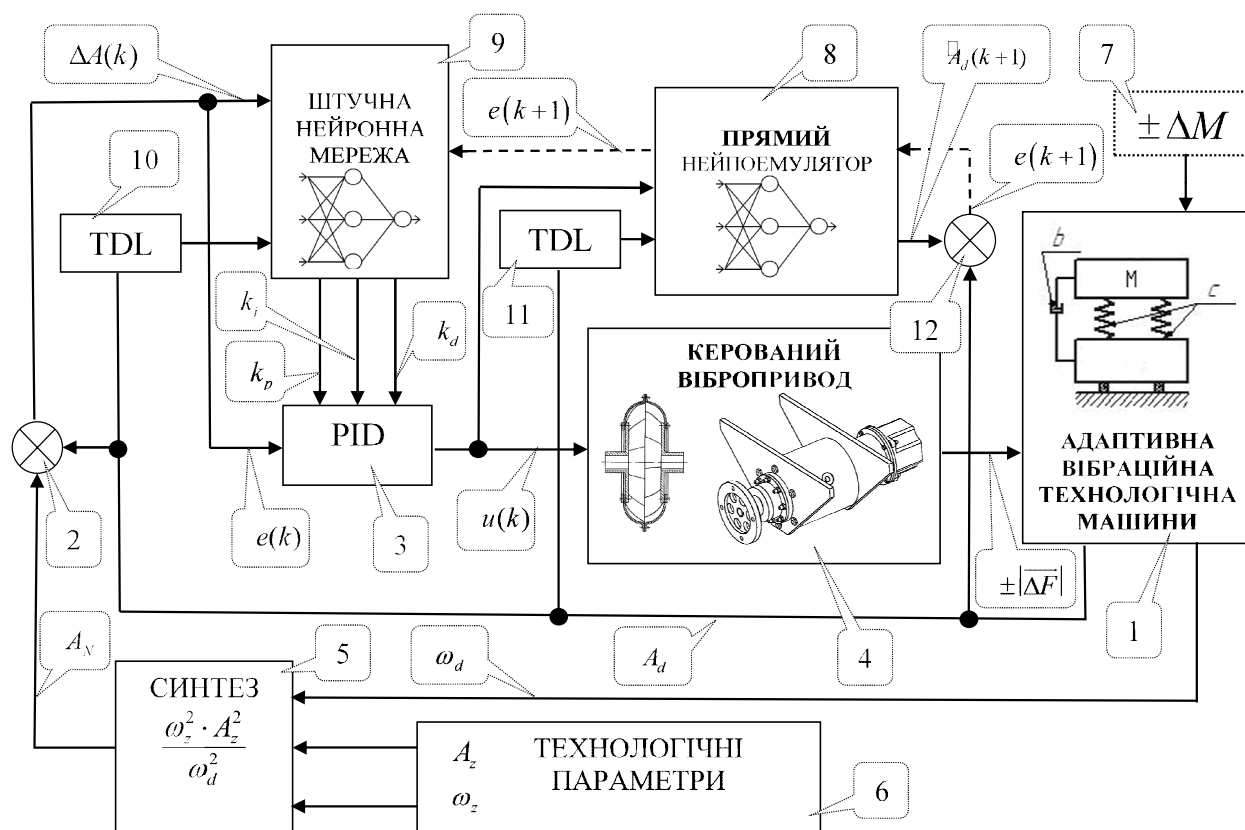


Рис.1. Способи стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою нейромережевого ПІД-регулятора.

Fig. 1 Methods of stabilization of technologically optimal parameters of vibration field of adaptive vibrating technological machines by means of neural network PID-controller.

Як наслідок із аналізу основного диференційного рівняння, що описує динаміку коливного руху АВТМ [7, 8] всі ці чинники в кінцевому результаті будуть приводити до зміни власної резонансної частоти АВТМ 1. В результаті чого виникає зміна амплітуди коливань робочого органу АВТМ 1 яка обумовлюється переміщенням амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) АВТМ по осі частот в ліву чи праву сторони залежності від напрямку зміни 7 параметричного збурення $\pm DM$. Для її корекції застосовується зміна частоти циклічної вимушуючої сили керованого віброприводу з метою забезпечення постійного резонансного режиму роботи АВТМ 1. В результаті реалізації даного способу керування роботою машини із коливними рухами робочих органів та розробленого на його основі алгоритму функціонування АВТМ 1 виникає зміна технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля, на сам перед частоти, із оптимальної заданої W_z на дійсну робочу W_d власну резонансну частоту АВТМ 1. В роботі [3] запропоновано враховувати власну резонансну частоту АВТМ 1 W_d та технологічно оптимальні параметри вібраційного поля АВТМ W_z та A_z , завдяки чому в блоці синтезу 5 проходить обчислення A_N необхідного значення амплітуди коливань робочого органу АВТМ при W_d дійсній власній резонансній частоті АВТМ так, щоб оптимальне значення питомої роботи вібраційного поля $Ak_z = A_z^2 \times W_z^2$ залишилось незмінним при новому дійсному значенню W_d власної резонансної частоти АВТМ 1. Тобто в блоці синтезу 5 проходить визначення A_N необхідного значення амплітуди коливань робочого органу АВТМ виходячи із наступної рівності:

$$A_z^2 \times W_z^2 = A_N^2 \times W_d^2 \quad (1)$$

Необхідна величина A_N амплітуди коливань робочого органу котра забезпечує задане технологічно оптимальне значення питомої роботи вібраційного поля при даній масі завантаження робочого органу поступає на блок порівняння 2.

Результати досліджень та їх обговорення

В блоці порівняння 2 проходить співставлення необхідного значення A_N амплітуди коливань робочого органу та дійсного значення A_d амплітуди коливань робочого органу і значення різниці амплітуд коливань робочого органу $DA(k+1)$ на такті k подається в навчену систему гібридного нейро-ПІД управління (NNPID Auto-tuning, Neuromorphic PID Self-tuning [9-14]) зокрема в блок 9 штучної нейронної мережі. В даному способі управління для керування амплітудою коливань робочого органу АВТМ 1, шляхом зміни $\pm \left| \frac{u}{DF} \right|$ амплітуди циклічної вимушуючої сили керованого (дебалансного) віброприводу 12 [15, 16] використовується пропорційно-інтегрально-диференціальний контролер на кожному такті керування, для мінімізації помилки зворотного зв'язку $e(k) = A_N(k) - A_d(k)$. Для чого ПІД контролер формує на кожному такті зважений керуючий сигнал $u(k)$ який є сумою трьох складових k_p , k_i , k_d тобто в часовій формі даний сигнал має наступне представлення

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t), \quad (2)$$

де $u_p(t) = k_p \times (A_N(t) - A_d(t))$ - пропорційна складова до помилки, k_p - коефіцієнт пропорційності,

$u_i(t) = k_i \times \int_0^t (A_N(t) - A_d(t)) dt$ - інтегральна складова пропорційна помилці накопиченій за час t ,

k_i - коефіцієнт інтегрального керування, $u_d(t) = k_d \times \frac{d(A_N(t) - A_d(t))}{dt}$ диференціальна складова

пропорційна похідній помилки, k_d - коефіцієнт диференційного управління. Узагальнено k_p слід розглядати як складову пов'язану із текучою похибкою по амплітуді коливань робочого органу АВТМ 1, k_i дію яка пов'язана із попередньою історією даної похибки, а k_d дію яка пов'язана із майбутньою поведінкою даної похибки.

Після того як на такті k значення різниці амплітуд коливань робочого органу АВТМ 1 поступає в блок 9 штучної нейронної мережі дана штучна нейронна мережа отримує установку $DA(k+1)$ і як наслідок генерує коефіцієнти $k_p(k)$, $k_i(k)$, $k_d(k)$ які поступають на вхід блоку ПД-регулятора 3 разом із значенням миттєвої похибки зворотного зв'язку $e(k) = A_N(k) - A_d(k)$. ПД-регулятор 3 проводить розрахунок керуючого впливу $u(k)$ на керований вібропривод 12 у випадку із дискретним представленням часу то відповідно до [9, 10] за допомогою наступного виразу

$$u(k) = u(k-1) + k_p(k) \times (A_N(k) - A_d(k)) - (A_N(k-1) - A_d(k-1)) + \\ + k_i(k)(A_N(k) - A_d(k)) + k_d(k) \times (A_N(k) - A_d(k)) - 2(A_N(k-1) - A_d(k-1)) + (A_N(k-2) - A_d(k-2)) \quad (3)$$

Навчання штучної нейронної мережі із блоку 9 проходить в реальному масштабі часу по помилці зворотного зв'язку методом найшвидшого спуску

$$Dw(k) = -a (A_N(k) - A_d(k)) \frac{A_d(k+1)}{u(k)} \frac{\nabla u(k)}{\nabla K(k)} \frac{\nabla K(k)}{\nabla w(k)}, \quad (4)$$

де a параметр швидкості навчання штучної нейронної мережі блоку 9, $K(k) = [k_p(k) \ k_i(k) \ k_d(k)]^T$ - вектор виходів штучної нейронної мережі блоку 9, які поступають на ПД-регулятор 3.

$$\frac{\nabla u(k)}{\nabla K_i} = \begin{cases} [A_N(k) - A_d(k)] - [A_N(k-1) - A_d(k-1)] & \text{при } i=1 (k_p) \\ [A_N(k) - A_d(k)] & \text{при } i=2 (k_i) \\ [A_N(k) - A_d(k)] - 2[A_N(k-1) - A_d(k-1)] + [A_N(k-2) - A_d(k-2)] & \text{при } i=3 (k_d) \end{cases} \quad (5)$$

Граденти обчислюються методом зворотного розповсюдження помилки $e(k+1)$ (див. Рис. 1) через прямий нейроемулятор 8 адаптивної вібраційної технологічної машини 1. Для визначення якобіану $\nabla A_d(k+1)/\nabla u(k)$ використовується прямий нейроемулятор 8 АВТМ 1. Прямий нейроемулятор 8 АВТМ 1 (див. Рис. 2) створюють за допомогою прямих та затриманих інформаційних ліній за допомогою блоків затримки TDL 15, 16 та алгоритму зворотного розповсюдження (алгоритму навчання 14 і блоку порівняння 17) таким чином, щоб мінімізувалася помилка e_k між виходом адаптивної вібраційної технологічної машини $(A_d)_k$ та виходом нейромережевої моделі $\hat{A}_d(k)$. Створена таким чином нейромережева модель АВТМ 1 дозволяє записати реакцію коливної механічної системи на циклічну вимушуючу силу керованого

віброприводу 12. Тим самим враховує такі реальні чинники, наприклад в'язке тертя, жорсткість пружної підвіски коливної механічної системи АВТМ 1, та інші інерційні і дисипативні характеристики АВТМ 1 які нам було б важко математично описати та врахувати їх при створенні математичної моделі об'єкту управління і як наслідок потім визначати із даної моделі якобіан об'єкту управління. Створена таким чином нейромодель АВТМ 1 не дозволяє судити про фізичні процеси, що протікають в адаптивній вібраційній технологічній машині 1, але згідно [9, 10] може бути ефективно використана для аналізу та прогнозу поведінки даного об'єкта управління, а також для синтезу системи управління.

ПІД-регулятор 3 провівши розрахунок керуючого впливу $u(k)$ та подавши його (див. Рис 1) на керований вібропривод 12 та прямий нейроемулятор 8 АВТМ1, в результаті чого коливний робочий орган АВТМ 1 отримує нову амплітуду коливань $A_d(k+1)$, а прямий нейроемулятор 8 АВТМ1 згенерує реакцію $\hat{A}_d(k+1)$. Після цього в блоці 12 проводиться обчислення помилки управління $e(k+1) = \hat{A}_d(k+1) - A_d(k+1)$ яка пропускається в зворотному напрямку за правилом зворотного розповсюдження. Вагові коефіцієнти зав'язків прямого нейроемулятора 8 АВТМ 1 при цьому не коректуються. Проїшовши через прямий нейроемулятор 8 АВТМ 1 помилка $e(k+1)$ даліше розповсюджується через штучну нейронну мережу блоку 9, але тепер її проходження супроводжується корекцією вагових коефіцієнтів $Dw(k)$ (4) штучної нейронної мережі блоку 9. І як наслідок цього впливу ми отримуємо автоматичну настройку векторів виходів k_p, k_i, k_d штучної нейронної мережі блоку 9, які поступають на ПІД-регулятор 3. По суті в даному випадку прямий нейроемулятор 8 АВТМ 1 виконує функцію додаткових слоїв штучної нейронної мережі блоку 9 в яких корекція вагових коефіцієнтів не проводиться.

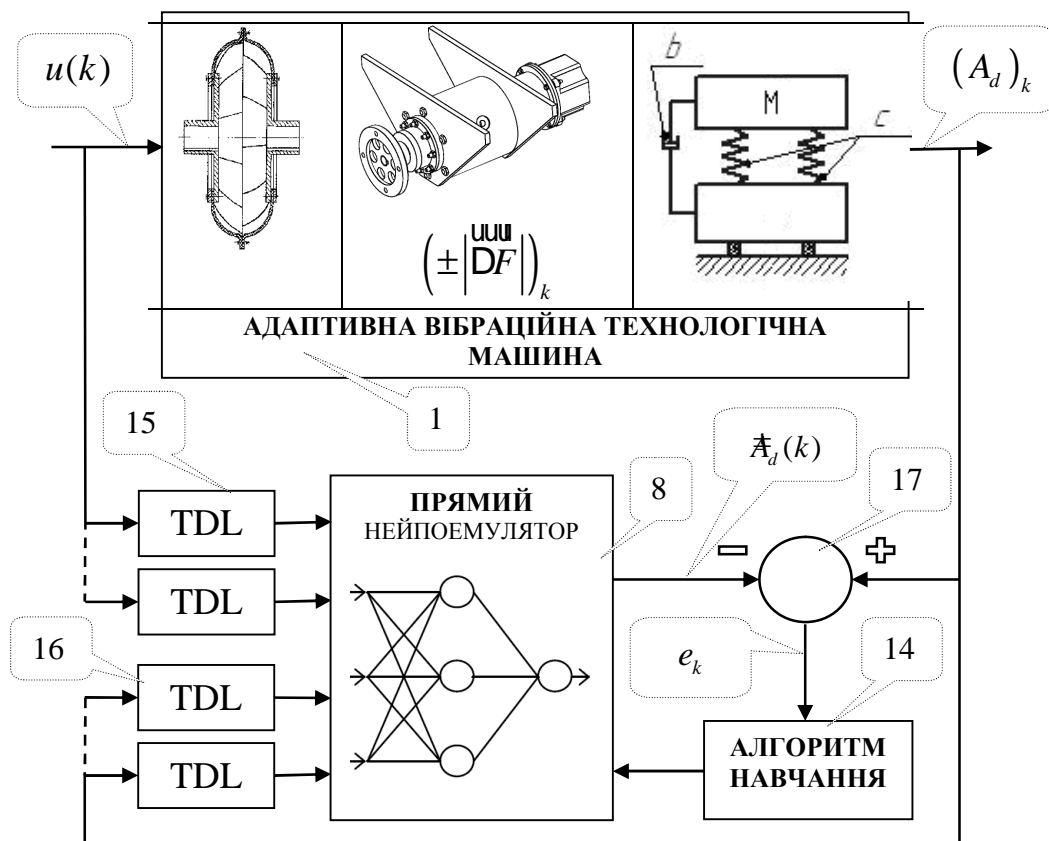


Рис. 2. Принцип створення прямого нейроемулятора адаптивної вібраційної технологічної машини як об'єкту керування в даному способі стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля.

Fig. 2 The principle of creating a direct neuroemulator of an adaptive vibrating technological machine as an object of control in this method of stabilizing the technologically optimal parameters of the vibrating field.

На Рис. 3 а) та б) наведено результати моделювання процесу пуску адаптивної вібраційної технологічної машини в резонансний режим роботи на частоту в 25 Гц за допомогою двох методів, базового [3] та розробленого способу способі стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля за допомогою нейромережевого ПІД регулятора, що ґрунтується на оперативній корекції амплітуди циклічної вимушуючої сили віброприводу в процесі виникнення перехідних процесів в АВТМ. Аналізуючи Рис 3 а) та б) можна побачити, що в моменти перехідних процесів, які будуть визиватися кожен раз корекцією частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу яка в свою чергу буде наслідком постійної адаптації роботи вібромашини до енергоощадного резонансного режиму роботи, будуть виникати ($A_D > A_d$) перерегулювання амплітуди коливань робочого органу АВТМ у випадку із способом керування [3]. А у випадку застосування запропонованого методу синтезу коефіцієнтів $k_p(k)$, $k_i(k)$, $k_d(k)$ які поступають на вхід блоку ПІД-регулятора 3, що базуються на застосуванні прямого нейроемулятора АВТМ який враховує інерційні та дисипативні характеристик АВТМ вдається добитися м'якої корекції амплітуди коливань робочого органу адаптивних технологічних машин без перерегулювань і як наслідок на протязі циклу віброобробки питома робота вібраційного поля A_k по відношенню до оброблюваного об'єкту залишається практично незмінною тому, що на короткий період часу $A_D < A_d$, а у всіх інших випадках $A_D = A_d$. Враховуючи те, що для багатьох типів вібромашин зміна приведеної маси в часі є характерним явищем (наприклад: вібромлини, вібросепаратори, вібаційні бункерні живильники, ...) то застосування даної технології для таких вібромашин зумовить розширення їхніх технологічних параметрів шляхом підвищення точності віброобробки на протязі технологічного циклу.

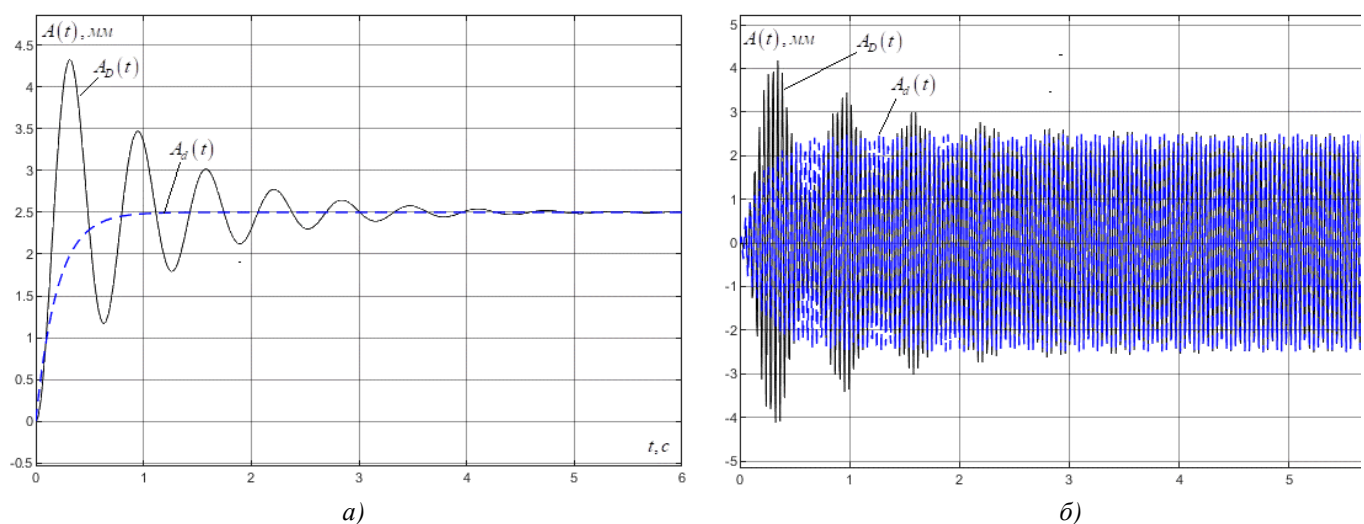


Рис.3 Моделювання процесу пуску адаптивної вібраційної технологічної машини в резонансний режим роботи (25 Гц) допомогою запропонованого нейромережевим ПІД регулятора шляхом корекції циклічної вимушуючої сили віброприводу
Fig. 3 Simulation of the process of starting an adaptive vibrating technological machine in resonant mode of operation (25 Hz) using the proposed neural network PID controller by correcting the cyclic forcing force of the vibratory drive

Висновки

Розроблений метод стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою нейромережевого ПІД-регулятора базується на забезпеченні рівності $A_k = A^2 \cdot \omega^2$ питомої роботи вібраційного поля АВТМ при будь-якому завантаженні робочого органу і заданим технологічно оптимальним значенням A_k . Застосування прямого нейроемулатора адаптивної вібраційної технологічної машини в даному способі керування дозволяє визначити $\|A_d(k+1)\|/\|u(k)\|$ якобіан АВТМ, який по методу зворотного розповсюдження помилки через прямий нейроемулатор АВТМ поступає в штучну нерережу, що використовується для оперативної настройки коефіцієнтів k_p , k_i , k_d звичайного ПІД-контролера. Використання прямого нейроемулатора адаптивної вібраційної технологічної машини в контурі керування амплітудою коливань робочого органу АВТМ дозволяє врахувати інерційні та дисипативні характеристики реальних адаптивних вібромаши (не створюючи точної математичної моделі самого об'єкту керування) та оперативно в реальному масштабі часу врахувати це при синтезі ПІД-контролером миттєвих амплітудних значень відповідних складових (k_p , k_i , k_d) керуючого впливу $u(k)$ на вібропривод. Запропонований метод синтезу параметрів пропорційної, інтегральної та диференціальної складової керуючого впливу $u(k)$ на вібропривод АВТМ забезпечить оптимальний вихід (тобто коливання робочого органу АВТМ при перехідному процесі будуть $A_d < A_d$ коливань робочого органу АВТМ при технологічному циклі віброобробки) амплітуди коливань робочого органу АВТМ на новий технологічно обумовлений рівень і як наслідок у всіх перехідних процесах на протязі технологічного циклу віброобробки рівність питомої роботи вібраційного поля АВТМ $A_k = A_d^2 \cdot \omega_d^2$ буде збережена.

Список літератури

1. Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. Керовані вібраційні технологічні машини: Монографія. – Вінниця.: ВНАУ, 2011. – 355 с. (https://drive.google.com/file/d/1dhHcvhikE1_987PIWYdJMzj7lGaAdsgs/view?usp=sharing)
2. Пат. 10971 А Україна, B65BG27/24. Спосіб керування роботою машини із коливними рухами робочих органів. П.С. Берник, Р.В. Чубик, В.А. Пашистий. (Україна). - № 200502375; Опубл. 15.12.2005; Бюл. № 12, 4 ст. (<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=101215&chapter=description>)
3. Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. Метод стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин // Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський наук.-тех. журнал. - 2008. № 2(51). - С. 57-60. (<http://socrates.vsau.org/repository/card.php?lang=uk&id=2302>)
4. Р.В. Чубик, Ю.Ю. Скварок, І.Д. Зелінський Оптимізація роботи адаптивних вібраційних технологічних машин за критерієм розповсюдження вібрації у віброкип'ячому шарі // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні, Вісник Національного університету "Львівська політехніка" – 2015. – № 822: “– С. 19-23. (<http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4539/chubik.pdf>)
5. Таянов С.А., Чубик Р.В. Аналіз критеріїв для керування адаптивними вібраційними технологічними машинами. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвід. наук.-техн. зб. 2008. – № 43. – С. 99-105. (<http://ena.lp.edu.ua/handle/ntb/4433>)
6. Чубик Р.В. Ідентифікація критеріїв для енергозберігаючого керування віброприводами адаптивних вібромаши / Р.В. Чубик, І.Д. Зелінський // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2015. – № 49. – С. 107-111. (http://nbuv.gov.ua/UJRN/Avtomatyzac_2015_49_14)
7. Хайкин С.Э. Физические основы механики. - М.: Наука, 1971. - 751 с. (<https://e.lanbook.com/book/167705>)
8. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання. - Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2004. – 248 с. (<https://drive.google.com/file/d/13EcENfpJddblQ9IwENNks9A7x22q301/view?usp=sharing>)
9. А.Н. Чернотуб, Д.А. Дзюба Обзор методов нейрорегулирования. // Проблемы програмування. 2011. - № 2. - С. 79-94. (<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/50964>)

10. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейро-управление и его приложения: перевод с англ. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с. (http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/NejpoupravIPriloschenOmatu2000.pdf)
11. D'Emilia G., Marrab A., Natalea E. Use of neural networks for quick and accurate auto-tuning of PID controller // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2007. – Vol. 23. – P. 170 – 179. (<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2006.04.001>)
12. Saiful A., Omatu S. Neuromorphic self-tuning PID controller // *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, San Francisco, USA, 1993. – P. 552 – 557. (<https://doi.org/10.1109/ICNN.1993.298617>)
13. Chang W.D., Hwang R.C., Hsieh J.G. A multivariable on-line adaptive PID controller using auto-tuning neurons // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2003. – Vol. 16, Issue 1. – P. 57 – 63. ([https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(03\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(03)00023-X))
14. Tan Y., De Keyser R. Auto-tuning PID control using neural predictor to compensate large time-delay // *Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Applications*. – 1994. – Vol. 2. – P. 1429 – 1434. (<https://doi.org/10.1109/CCA.1994.381315>)
15. Чубик Р.В., Зрайло Н.М. Симетричний електромеханічний вібропривод для енергозберігаючих адаптивних вібромашин. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (31). – С.61-67. (http://nbuv.gov.ua/UJRN/emezs_2015_3_9)
16. Стадник Н.И., Ярошенко Л.В., Солоня Е. В., Чубик Р.В. Управляемый электромеханический симметричный привод для вибрационных технологических машин. // *Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський наук.-тех. журнал*. 2018. – № 3 (90) – С.117-126. (<http://repository.vsau.org/card.php?lang=en&id=18730>)

R.V. Chubyk, I.D. Zelins'kyi, I.A. Derevenko
Lviv Politechnic National University

METHOD OF STABILIZING TECHNOLOGICALLY OPTIMAL PARAMETERS OF VIBRATION FIELD OF ADAPTIVE VIBRATING TECHNOLOGICAL MACHINES BY MEANS OF NEURAL NETWORK PID REGULATOR

Aim. Development of the optimal method of controlling the dynamic parameters of vibratory drives of adaptive vibrating technological machines (AVTM). **Method.** The work is based on the creation of a direct neural network model of AVTM and the use of hybrid neuro-PID control technology to form a corrective effect based on the proportional-integral-differential law at each control cycle, to minimize feedback error on the amplitude of vibration of the vibrating machine. **Results.** A control method has been developed that allows to ensure the resonant mode of AVTM operation due to constant correction of the cyclic forcing force of the vibrating drive on the basis of a direct AVTM neuroemulator. **Scientific novelty.** For the first time, a block diagram, mathematical model and simulation of a hybrid neuro-boundary PID controller based on a direct AVTM neuro-emulator to stabilize the specific operation of the vibration field of vibrating machines at a resonant operating frequency. **Practical significance.** The proposed method of stabilizing the technologically optimal parameters of the vibration field allows to ensure minimal energy consumption for the vibratory drive with stable technologically optimal parameters of the vibration field of the adaptive vibrating process machine throughout the technological cycle of vibration processing.

Key words: artificial neural network, neurocontrol, PID-regulator, hybrid neuro-PID control system, adaptive vibrating technological machine, controlled vibrating drive.

References

1. Chubyk R.V., Yaroshenko L.V. *Kerovani vibratsiyni tekhnolohichni mashyny [Controlled vibrating technological machines]: monograph*. – Vinnytsya.: VNAU, 2011. – 355 s. [In Ukrainian]
2. P.S. Bernyk, R.V. Chubyk, V.A. Pashystyy. Sposib keruvannya robotoyu mashyny iz kolyvnymy rukhamy robochyykh orhaniv. [“The method of controlling the operation of the machine with oscillating movements of the working bodies”] UA. Patent 10971, January, 2005. [in Ukrainian].
3. Chubyk R.V., Yaroshenko L.V. Metod stabilizatsiyi tekhnolohichno optymal'nykh parametriv vibratsiynoho polya adaptivnykh vibratsiynykh tekhnolohichnykh mashyn [“Method of stabilization of technologically optimal parameters of vibration field of adaptive vibrating technological machines”] // *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh [Vibrations in technique and technologies]*, vol. 2 (51), pp. 57-60, 2008 [in Ukrainian].

4. R.V. Chubyk, YU.YU. Skvarok, I.D. Zelins'kyi Optimizatsiya roboty adaptivnykh vibratsiynykh tekhnolohichnykh mashyn za kryteriyem rozpovsyudzhennya vibratsiyi u vibrokyp'yachomu shari ["Optimization of operation of adaptive vibrating technological machines by the criterion of vibration propagation in the vibrating fluidized bed"] // *Optimizatsiya vyrobnychyykh protsesiv i tekhnichnyy kontrol' u mashynobuduvanni* [Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering], vol. 822, pp. 19-23, 2015, [In Ukrainian].
5. Tayanov S.A., Chubyk R.V. Analiz kryteriyiv dlya keruvannya adaptivnykh vibratsiynykh tekhnolohichnykh mashynamy ["Analysis of criteria for control of adaptive vibrating technological machines "] // *Avtomatyzatsiya vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni* ["Automation of robotic processes in machines"]. vol. 43, pp. 99-105, 2008 [in Ukrainian].
6. Chubyk R.V. Identyfikatsiya kryteriyiv dlya enerhozberihayuchoho keruvannya vibropriyodamy adaptivnykh vibromashy ["Identification of criteria for energy-saving control of vibratory drives of adaptive vibrating machines"] / R.V. Chubyk, I.D. Zelins'kyi // *Avtomatyzatsiya vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni* ["Automation of robotic processes in machines"]: vol. 49, pp. 107-111, 2015 [in Ukrainian].
7. Khaykin S.E. Fizicheskiye osnovy mekhaniki ["Physical foundations of mechanics"]. - M.: Nauka, 1971. - 751 s. [In Russian].
8. Povidaylo V.O. Vibratsiyni protsesy ta obladnannya ["Vibration processes and equipment"]. - L'viv: Vydavnytstvo NU "L'vivs'ka politehnika", 2004. - 248 s [in Ukrainian].
9. A.N. Chernodub, D.A. Dzyuba Obzor metodov neyroupravlennya ["Review of neuromanagement methods"]. // *Problemy prohramuvannya*. 2011. - № 2. - S. 79-94[in Ukrainian].
10. Omatu S., Khalid M., Yusof R. Neyro-upravleniye i yego prilozheniya: per. s angl ["Neurocontrol and its applications: translation from English."]. - M.: IPRZHR, 2000. - 272 s [in Russian].
11. D'Emilia G., Marrab A., Natalea E. Use of neural networks for quick and accurate auto-tuning of PID controller // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. - 2007. - Vol. 23. - P. 170 - 179.
12. Saiful A., Omatu S. Neuromorphic self-tuning PID controller // *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, San Francisco, USA, 1993. - P. 552 - 557.
13. Chang W.D., Hwang R.C., Hsieh J.G. A multivariable on-line adaptive PID controller using auto-tuning neurons // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. - 2003. - Vol. 16, Issue 1. - P. 57 - 63.
14. Tan Y., De Keyser R. Auto-tuning PID control using neural predictor to compensate large time-delay // *Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Applications*. - 1994. - Vol. 2. - P. 1429 - 1434.
15. Chubyk R.V., Zraylo N.M. Symetrychnyy elektromekhanichnyy vibropriyod dlya enerhozberihayuchykh adaptivnykh vibromashyn ["Symmetric electro-mechanical vibrodribe for power-saving adaptive vibro-machines"]. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy* ["Electromechanical and energy saving systems"]. - Kremenichuk: KrNU, vol. 3 (31), pp. 61-67, 2015 [in Ukrainian].
16. Stadnyk N.Y., Yaroshenko L.V., Solona E. V., Chubyk R.V. Upravlyaemyy élektromekhanicheskyi symetrychnyy priyod dlya vybratsyonnykh tekhnolohicheskyykh mashyn ["Controlled electromechanical symmetric drive for vibrating technological machines"]. // *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Vibrations in technique and technologies], vol. 3 (90), pp. 117-126, 2018 [in Russian].