УДК 62-503.5

Р. В. Чубик, І. Д. Зелінський, П. М. Луб
Національний університет "Львівська політехніка"
Львівський національний університет природокористування

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНО МОДУЛЬВАНОЇ НАПРУГИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВІБРОПРИВОДУ

© Чубик Р .В., Зелінський І. Д., Луб П. М., 2022

https://doi.org/

Мета. Визначити оптимальні параметри різних типів широтно-імпульсно модульованої (ШІМ) напруги, яка застосовується в системах керування електромагнітним віброприводом для створення резонансних вібромашин та керування параметрами робочого органу вібромашини в резонансному режимі. **Методика.** Робота базується на аналізі спектру основних трьох форм ШІМ сигналів у їх низькочастотній області, на яку реагує коливна механічна система вібромашин. Для оцінки кодованої ШІМ напругою синусоїди, що відповідає власній резонансній частоті вібромашини, використано в часовій області середньоквадратичне відхилення, а в спектральній коефіцієнт нелінійних спотворень (гармонік). **Результати.** Побудовано математичний апарат та встановлено зв'язок між коливною механічною системою вібромашини, параметрами ШІМ наруги та характеристиками кодованого нею синусоїдального сигналу в часовій і спектральній області. **Наукова новизна.** Вперше отримано математичну модель та проведено моделювання впливу параметрів коливної механічної системи вібромашини та несучої частоти широтно-імпульсно модульованої напруги на середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт нелінійних спотворень (гармонік) сигналу, що живить електромагнітний вібропривод. **Практична значущість.** Запропонована методика розрахунку несучої частоти ШІМ синусоїдальної напруги, яка може бути використана для розробки алгоритму керування силовими ключами (транзисторами) та вибору типу силових ключів на етапі проектування силової частини систем керування електромагнітним віброприводом керованих та адаптивних вібромашин.

Ключові слова: широтно-імпульсно модульована напруга, керована вібромашина, адаптивна вібраційна технологічна машина, керований електромагнітний вібропривод.

Вступ

Застосування засобів та методів, які ґрунтовно описані в роботі [1], для оперативного керування параметрами вібраційного впливу робочого органу вібромашин на робоче середовище чи оброблювані деталі дозволяють у процесі реалізації того чи іншого вібраційного технологічного процесу реалізовувати не тільки задані технологічно оптимальні параметри вібраційного впливу, але й резонансні режими роботи. У випадку із вібраційними технологічними машинами (ВТМ) із електромагнітним віброприводом для забезпечення керування динамічними параметрами робочого органу, зокрема як показано в роботах [2, 3], доцільно застосовувати широтно-імпульсно модульовану синусоїдальну напругу [4]. У випадку застосування ШІМ для живлення електромагнітного вібропривоу частота кодованої синусоїди методом широтно-імпульсної модуляції повинна відповідати частоті власних коливань коливної механічної системи, щоб забезпечити резонансний режим роботи ВТМ, а завдяки введенню шпаристості в ШІМ сигнал добиваються керування амплітудою коливань робочого органу вібромашини на власній резонансній частоті. Завдяки даній особливості ШІМ сигнал знайшов своє застосування не тільки в керованих ВТМ, але й у адаптивних ВТМ (АВТМ) [5, 6], тобто у вібромашинах, здатних самостійно настроюватись на резонансний режим роботи та підтримувати його упродовж всього циклу віброобробки. Як показано в роботах [7, 8], даний клас машин (АВТМ) завдяки постійному скануванню зсуву фаз між циклічною вимушуючою силою електромагнітного вібропривоу та переміщенням робочого органу

і завдяки автоматичній корекції частоти ШІМ синусоїдальної напруги, що живить електромагнітний вібропривод, забезпечує резонансний режим роботи та кут зсуву фаз $\pi/2$. І на резонансній частоті, застосовуючи зміну ширини прямокутного імпульсу, як в роботі [9], проводить коригування тягових зусиль електромагнітного віброприводу АВТМ.

Аналіз літературних джерел

Внаслідок широкого застосування ШІМ синусоїдальної напруги у вібраційних керованих та адаптивних технологічних машинах, у роботах [10-12] показано, що виникає питання оцінки якісних та кількісних характеристик кодованої по синусоїдальному закону методом широтно-імпульсної модуляції напруги, частота якої дорівнює власній резонансній частоті коливної механічної системи вібромашини. Застосування високочастотних транзисторів (ключів) у силовій частині системи керування при створенні ШІМ синусоїдальної напруги буде призводити до подорожання силової частини та збільшення теплових втрат через часті перехідні процеси у напівпровідниках та електромагнітному віброприводі. У випадку застосування у силовій частині системи керування електромагнітним віброприводом низькочастотних транзисторів ми не зможемо за певний період часу сформувати достатню кількість прямокутних імпульсів і, як наслідок, із даною обмеженою кількістю прямокутних імпульсів ми обмежені в кількостях градацій при кодуванні методом широтно-імпульсної модуляції. Тому ми отримаємо похибки у формі кодованої синусоїди, тобто частоти циклічної вимушуючої сили та плюс паразитні гармоніки в спектрі. Для можливості врахування вище наведених впливів на якісні та кількісні характеристики ШІМ сигналу в роботах [13, 14] створено математичну модель двохполярної широтно-імпульсно модульованої напруги та розроблено швидкий алгоритм її формування силовими ключами системи керування електромагнітним віброприводом. Проте,судячи із аналізу вище наведених робіт та й зокрема [15], залишається невирішеним питання вибору оптимальної несучої частоти комутуючих силових транзисторів для системи керування електромагнітним віброприводом. Правильний вибір даної частоти дозволить отримати оптимальну кількість градацій широт імпульсів щоб кодувати сигнал рівний власній резонансній частоті вібромашини із мінімальними спотвореннями в часовій та спектральній області.

Мета

Метою статті є визначити оптимальні параметри різних типів ШІМ напруги, яка застосовується в системах керування електромагнітним віброприводом для створення резонансних вібромашин та керування параметрами робочого органу вібромашини в резонансному режимі.

Побудова математичних моделей

Переважно для живлення електромагнітних віброприводів керованих та адаптивних вібромашин застосовують $U^{Д\,ШІ}$ двохполярну упродовж кожного півперіоду ШІМ напругу (рис. 1, а), $U^{О\,ШІ}$ однополярну упродовж кожного півперіоду ШІМ напругу (рис. 1, б) та $U^{О\,П}$ однополярну упродовж цілого періоду ШІМ напругу (рис. 1, в). Тому доцільно буде з'ясувати для даних трьох основних форм ШІМ напруг оптимальні параметри несучої частоти комутуючих силових транзисторів для системи керування електромагнітним віброприводом. Сучасні мікроконтролери, що використовуються для реалізації систем керування електромагнітним віброприводом, дозволяють реалізовувати ШІМ розрядністю до $\Delta j = 2^{10} = 1024$ у діапазоні несучих частот f_{pwm} від 3 до 20 кГц, і до $\Delta j = 2^8$ при несучій частоті f_{pwm}, близькій 80 кГц та до $\Delta j = 2^7$ при несучій частоті f_{pwm}, близькій 155 кГц. В нашому випадку, враховуючи інертність коливної механічної системи і те, що вона не відреагує на такі високочастотні гармоніки, будемо розглядати процес формування ШІМ із несучою частотою у діапазоні частот f_{pwm} від 3 до 20 кГц, тому для нас розрядність ШІМ

становитиме $\Delta j = 1024$. Для усіх трьох форм ШІМ сигналів ($U^{Д\,ПП}$, $U^{О\,ПП}$ та $U^{О\,П}$) кількість елементів K, якими кодується методом широтно-імпульсної модуляції синусоїдальний сигнал, частота f якого рівна власній резонансній частоті вібромашини, визначатиметься таким виразом:

$$K = floor\left(\frac{f_{pwm}}{f}\right), \tag{1}$$

де $floor$ – ціла частина від числа.

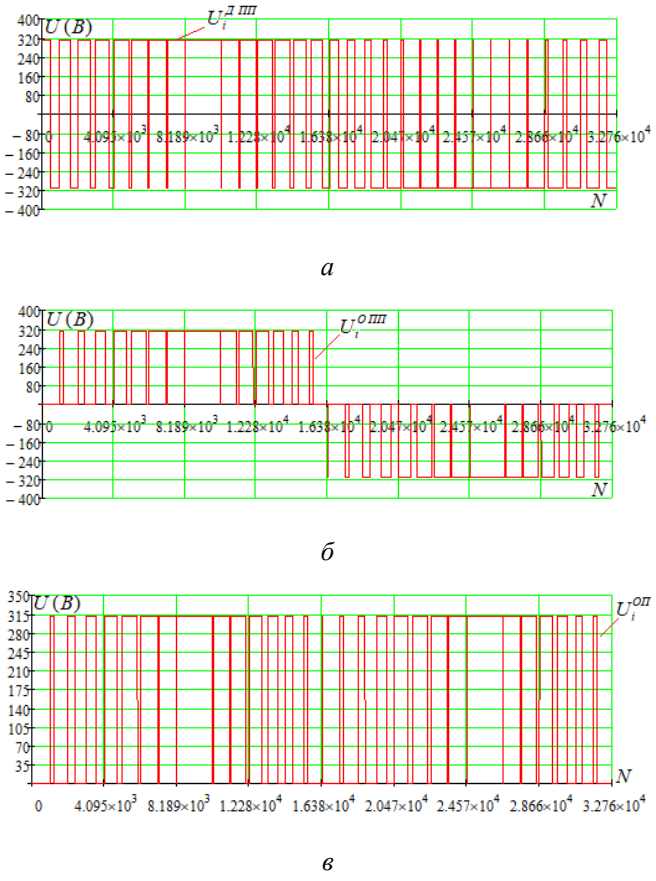


Рис. 1. ШІМ сигнали для живлення електромагнітних вібропривoдів, представлені в дискретній формі

Fig. 1. PWM signals for powering electromagnetic vibratory drives are presented in discrete form

Для того, щоб мати змогу дослідити спектральне наповнення ШІМ сигналів $U^{Д\,ПП}$, $U^{О\,ПП}$ та $U^{О\,П}$ при зміні їх несучої частоти f_{pwm} в діапазоні від 3 до 20 кГц, використовуючи дискретне перетворення Фур'є, необхідно забезпечити формування в кожному із сигналів ($U^{Д\,ПП}$, $U^{О\,ПП}$ та $U^{О\,П}$) кількість точок, рівну N при кожній довільній кодованій ними частоті f живлення сигналу електромагнітного віброприводу вібромашини на відповідній несучій частоті f_{pwm} кратність 2^n, яка визначатиметься таким виразом:

$$N = 2^{floor(\log[K\cdot\Delta j,2])}. \tag{2}$$

В такому випадку реальна розрядність ШІМ для сигналів $U^{Д\,ПП}$, $U^{О\,ПП}$ та $U^{О\,П}$, які живитимуть електромагнітний вібропривод, буде становити:

$$\Delta j = floor\left[\frac{N}{K} + 0.5\right]. \tag{3}$$

З огляду на те саме міркування (2), необхідно забезпечити кратність 2^n відлікам у масиві із тестовим сигналом U із синусоїдальною напругою, відносно якого будемо вираховувати середньоквадратичне відхилення між кодованою за допомогою ШІМ технології синусоїдальною напругою, що живить електромагнітний вібропривод, та тестовим сигналом U, частота якого рівна власній резонансні частоті вібромашини. Тому для кожної довільної резонансної частоти f кількість точок у масиві тестового сигналу буде визначатись таким виразом:

$$U_i = 220\cdot\sqrt{2}\cdot\sin\left(\frac{2\cdot\pi}{N-1}\cdot i\right),\ i = 0\ldots N-1. \tag{4}$$

Математична модель дискретного сигналу $U_i^{Д\,ПП}$, який є двохполярною уподовж кожного півперіоду ШІМ напругою, що зображена на рис.1, а, описується виразом (5). Для формування двохполярної упродовж кожного півперіоду ШІМ напруги $U^{Д\,ПП}$ із заданою частотою, що відповідає власній резонансній частоті f коливної механічної системи керованої

$$U_i^{Д\ ПП} = \left| \begin{array}{c} k \leftarrow floor\left(\dfrac{i}{\Delta j}\right) \\ j \leftarrow i - k \cdot \Delta j \\ \Delta j1_k \leftarrow \left[\dfrac{\Delta j}{2} \cdot \left(\dfrac{U_{k \cdot \Delta j}}{220 \cdot \sqrt{2}} + 1\right) - 0.5\right] \\ 220 \cdot \sqrt{2} \quad if \quad j < \left|\Delta j1_k\right| \\ -220 \cdot \sqrt{2} \quad otherwise \end{array} \right., \ i = 0 \ldots N-1. \tag{5}$$

вібромашини із заданою несучою частотою ШІМ f_{pwm} використовується розрахована розрядність ШІМ за допомогою виразу (3), враховуючи співвідношення кратності точок 2^n у вихідному масиві $U_i^{Д\ ПП}$. За допомогою змінної $\Delta j1_k$ у виразі (5) на основі даних із тестового масиву $U_i = U_{k \cdot \Delta j}$ проводиться розрахунок тривалості позитивного імпульсу в кожному етапі k, коли кодується методом широтно-імпульсної модуляції синусоїдальний сигнал частотою f. Для кожного k-го елемента, кодованого співвідношенням ширини додатного та від'ємного імпульсів, розраховується поточний параметр j, що змінюється $j = 0 \ldots \Delta j - 1$ (змінюється в межах розрахункової розрядності ШІМ для даної частоти f при заданій несучій частоті ШІМ f_{pwm}). У процесі зміни елементів у масиві по $i = 0 \ldots N-1$, в кожнім k-тім широтно-імпульсно модульованім елементі дискретного сигналу $U_i^{Д\ ПП}$ розрядність Δj буде поділена ($+220 \cdot \sqrt{2} / -220 \cdot \sqrt{2}$), відповідно до наявних у змінній $\Delta j1_k$ даних для даного k-го елемента ШІМ синусоїдального сигналу з частотою f.

Для математичного опису і формування дискретного сигналу $U_i^{О\ ПП}$ однополярної упродовж кожного півперіоду ШІМ напруги, що зображена на рис.1, б, застосовується вираз (6):

$$U_i^{О\ ПП} = \left| \begin{array}{c} k \leftarrow floor\left(\dfrac{i}{\Delta j}\right) \\ j \leftarrow i - k \cdot \Delta j \\ \Delta j1_k \leftarrow \left[\dfrac{U_{k \cdot \Delta j}}{220 \cdot \sqrt{2}}\right] \cdot \Delta j \\ 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \dfrac{\Delta j1_k}{\left|\Delta j1_k\right|} \quad if \quad j < \left|\Delta j1_k\right| \\ 0 \quad otherwise \end{array} \right., \ i = 0 \ldots N-1. \tag{6}$$

При формуванні $U^{О\ ПП}$ однополярної упродовж кожного півперіоду ШІМ напруги у виразі (6) використовують співвідношення $\Delta j1_k / \left|\Delta j1_k\right|$ для визначення знаку імпульсів на виході силової частини в кожному півперіоді. У випадку математичного представлення $U^{О\ П}$ однополярної упродлвж цілого періоду ШІМ напруги, що зображена на рис.1, в, використовують вираз (7). В даному випадку визначення тривалості додатного імпульсу аналогічне до $U^{О\ ПП}$ однополярної упродож кожного півперіоду ШІМ напруги (6), але відсутня зміна полярності імпульсів.

$$U_i^{О\ П} = \left| \begin{array}{c} k \leftarrow floor\left(\dfrac{i}{\Delta j}\right) \\ j \leftarrow i - k \cdot \Delta j \\ \Delta j1_k \leftarrow \left[\dfrac{U_{k \cdot \Delta j}}{220 \cdot \sqrt{2}}\right] \cdot \Delta j \\ 220 \cdot \sqrt{2} \quad if \quad j < \left|\Delta j1_k\right| \\ 0 \quad otherwise \end{array} \right., \ i = 0 \ldots N-1. \tag{7}$$

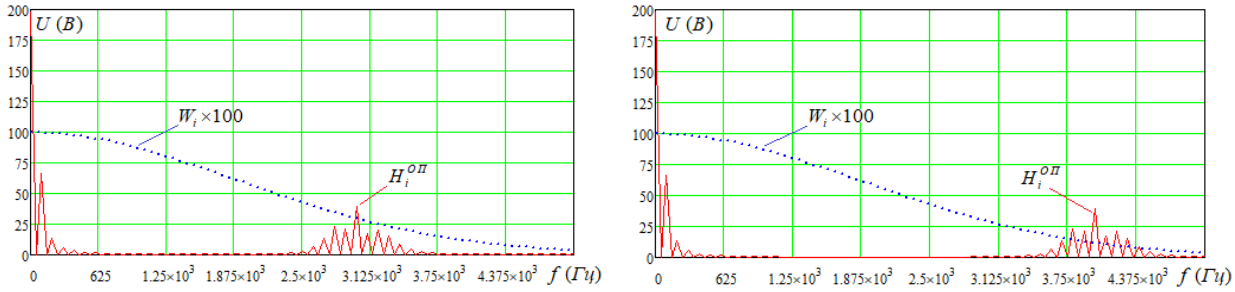
Для оцінки оптимальних параметрів, зокрема несучої частоти f_{pwm} трьох основних типів ШІМ напруг $U^{Д\,ПП}$, $U^{О\,ПП}$ та $U^{О\,П}$, які застосовують у системах керування електромагнітним віброприводом адаптивних та керованих вібромашин, достатньо буде розглядати та оцінювати наповнення нижнього спектру в даних сигналах. Необхідно врахувати те, що коливна механічна система вібромашин не зможе відреагувати на високочастотні гармоніки в спектрі даних сигналів, і той факт, що всі гармоніки є кратні основній частоті f, яку кодують транзистори в силовій частині блоку керування віброприводом методом широтно-імпульсної модуляції і дана частота f, рівна власній частоті коливної механічної системи вібромашини. Тому коливна механічна система вібромашини буде відзиватись (тобто реагувати) на певну кількість гармонік які кратні її власній резонансній частоті f. Кількість даних гармонік, на які буде реагувати вібромашина, залежатиме від дисипативних характеристик її коливної механічної системи. Тому для моделювання вібромашини доцільно застосувати спектральне вікно (або спектральний фільтр), який буде пропускати чітко визначені нами гармоніки низького спектру та обрубувати гармоніки високого спектру, бо коливна система АВТМ на них і так не реагує. Наприклад, якщо власна резонансна частота коливань АВТМ рівна 50 Гц, то частота 100 гармоніки становитиме 5 кГц, тому для аналізу цілком достатньо брати 100 перших гармонік у спектрах трьох основних ШІМ напруг $U^{Д\,ПП}$, $U^{О\,ПП}$ та $U^{О\,П}$. Враховуючи той факт, що кількість точок у вихідних масивах напруг $U^{Д\,ПП}$, $U^{О\,ПП}$ та $U^{О\,П}$ постійно розраховується, враховуючи співвідношення кратності точок 2^n у вихідному масиві, і ця кількість точок постійно змінна, тому ваговий коефіцієнт Wf спектрального фільтра (8) для обрізання фільтром довільної частоти в спектрі необхідно визначати при максимальній несучій частоті $f_{pwm}MAX$ та заданій довільній f власній резонансній частоті коливань АВТМ. При ваговому коефіцієнті $Wf = 1500$ характеристику фільтра, що відображає реакцію АВТМ на гармоніки, видно на рис. 2, а, б.

$$W_i = \exp\left[-\left[(i+1)\cdot \frac{Wf}{2^{floor\left(\log\left(floor\left(f_{pwm}MAX/f\right)\cdot 2^{10},2\right)\right)}} \right]^2 \Big/ 0.1 \right],\ i = 0\ldots N/2. \qquad (8)$$

Застосовуючи дискретне перетворення Фур'є до вихідних масивів напруг $U_i^{Д\,ПП}$, $U_i^{О\,ПП}$ та $U_i^{О\,ПП}$, ми отримаємо спектри даних сигналів $\sum_{i=0}^{N-1} H_i^{Д\,ПП}$, $\sum_{i=0}^{N-1} H_i^{О\,ПП}$ та $\sum_{i=0}^{N-1} H_i^{О\,П}$, що є сумою кратних гармонік $\left(a_i \cdot \cos(i\cdot\omega\cdot t) + b_i \cdot \sin(i\cdot\omega\cdot t)\right)$, де $i\cdot\omega = i\cdot 2\cdot\pi\cdot f$, а це і є кратна гармоніка до власної резонансної частоти коливань коливної механічної системи АВТМ. Застосувавши спектральний фільтр (8) до спектрів сигналів $H_i^{Д\,ПП}$, $H_i^{О\,ПП}$ та $H_i^{О\,П}$, ми отримаємо спектри даних сигналів $h_i^{Д\,ПП} = H_i^{Д\,ПП}\cdot W_i$, $h_i^{О\,ПП}$ та $h_i^{О\,П}$ в низькочастотному діапазоні із кратними до резонансу коливної системи гармоніками, на які реагує коливна система вібромашини. Застосувавши зворотне перетворення Фур'є до спектральних характеристик даних сигналів $h_i^{Д\,ПП}$, $h_i^{О\,ПП}$ та $h_i^{О\,П}$, можна оцінити середньоквадратичне відхилення форми кодованої синусоїди в часовій області та нелінійні спотворення даної кодованої синусоїди в спектральній області при різних значеннях несучої частоти f_{pwm} при формуванні ШІМ синусоїдальної напруги.

Результати досліджень та їх обговорення

Візьмемо для аналізу 100 гармонік, кратних до власної резонансної частоти АВТМ, і дослідимо зміну в спектральних характеристиках $H_i^{Д\,ПП}$, $H_i^{О\,ПП}$ та $H_i^{О\,П}$, що відповідають масивам дискретних напруг $U_i^{Д\,ПП}$, $U_i^{О\,ПП}$ та $U_i^{О\,ПП}$ на електромагнітному віброприводі при зміні несучої частоти f_{pwm} із 3 кГц до 4 кГц. Дослідження показують (рис. 2, а, б), що зміна зміні несучої частоти f_{pwm} ШІМ зумовлює зсув високочастотних гармонік у верхньому спектрі. Як наслідок, коливна система вібромашини меш інтенсивніше реагуватиме кратні до резонансної частоти високочастотні гармоніки в спектрі сигналу. Проте наявність високочастотних складових в сигналі призводить до втрат на нагрівання (теплових) та вимагає дорогих транзисторів у силовій частині системи керування. Тому доцільно буде провести оцінку оптимального значення верхньої межі несучої частоти f_{pwm} ШІМ для живлення електромагнітного віброприводу, застосувавши оцінку в часовій та спектральній області. Для цього на основі даних $h_i^{Д\,ПП}$, $h_i^{О\,ПП}$ та $h_i^{О\,П}$ про спектральну характеристику дискретних сигналів $U_i^{Д\,ПП}$, $U_i^{О\,ПП}$ та $U_i^{О\,ПП}$, які несуть інформацію про низькочастотний діапазон, що складається із 100 кратних гармонік до резонансу коливної системи на частоті f, необхідно методом зворотного перетворення Фур'є відтворити відповідні їм синусоїдальні сигнали $u^{Д\,ПП}$, $u^{Д\,ОП}$, та $u^{О\,П}$ із частотою f, які кодувалися методом ШІМ при зміні несучої частоти f_{pwm} ШІМ у діапазоні від 3 до 20 кГц. Відтворені синусоїдальні сигнали $u^{Д\,ПП}$, $u^{Д\,ОП}$, та $u^{О\,П}$ (в данім діапазоні зміни несучої частоти f_{pwm} ШІМ) порівнюються із тестовим сигналом U, який береться за основу (1) у математичній моделі при розрахунку кожного дискретного сигналу $U_i^{Д\,ПП}$, $U_i^{О\,ПП}$ та $U_i^{О\,ПП}$.



а *б*

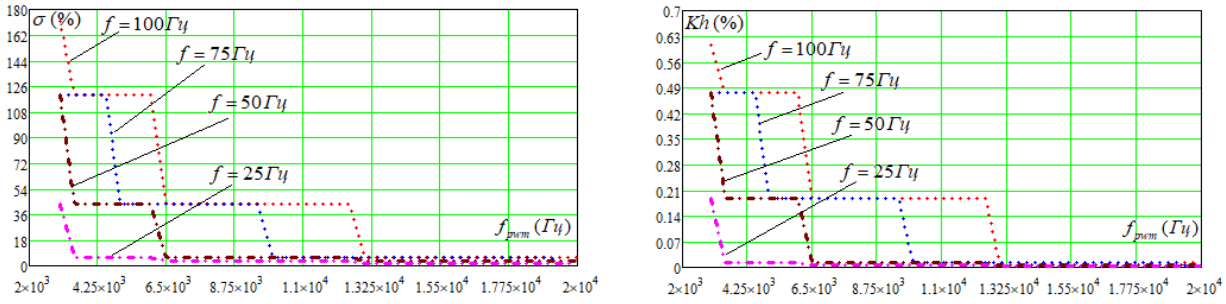
Рис. 2. Зміна в спектрі однополярної упродовж кожного півперіоду ШІМ напруги при зміні несучої частоти f_{pwm} ШІМ із 3 кГц до 4 кГц

Fig. 2. Change in the unipolar spectrum during each PWM half-cycle when the PWM carrier frequency f_{pwm} changes from 3 kHz to 4 kHz

Для порівняння застосовується середньоквадратичне відхилення σ відтворених синусоїдальних сигналів $u^{Д\,ПП}$, $u^{Д\,ОП}$, $u^{О\,П}$ від тестового сигналу U. Результати такого дослідження наведено на рис. 3, а для різних f власних резонансних частот АВТМ. Для оцінки зміни спектрального наповнення відтворених синусоїдальних сигналів $u^{Д\,ПП}$, $u^{Д\,ОП}$, $u^{О\,П}$ в діапазоні

зміни несучої частоти f_{pwm} ШІМ використано коефіцієнти нелінійних спотворень (гармонік) $Kn^{Д\ ПП}$, $Kn^{Д\ ОП}$ та $Kn^{О\ П}$, які визначаються за допомогою виразу (9), що, в нашому випадку, даний коефіцієнт є відношенням середньоквадратичної суми гармонік $h_i^{Д\ ПП}$, $h_i^{О\ ПП}$ та $h_i^{О\ П}$ в спектрі кожного сигналу, окрім першої основної гармоніки, частота якої рівна частоті коливної механічної системи до середньоквадратичної суми гармонік усього спектру кожного із ШІМ сигналів $u^{Д\ ПП}$, $u^{Д\ ОП}$, $u^{О\ П}$, які живлять електромагнітний вібропривод керованої чи адаптивної вібромашини. Результат дослідження зміни коефіцієнта нелінійних спотворень (гармонік) наведено на рис. 3, б.

$$Kn^{Д\ ПП} = \sqrt{\sum_{i=2}^{100}\left|h_i^{Д\ ПП}\right|^2} \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{100}\left|h_i^{Д\ ПП}\right|^2} \tag{9}$$



а *б*

Рис. 3. Зв'язок між несучою частотою f_{pwm} ШІМ синусоїдальної напруги та її характеристиками в часовій та спектральній області

Fig. 3. The relationship between the carrier frequency of the PWM sinusoidal voltage and its characteristics in the time and spectral domains

Із аналізу рис. 3 видно, що для вібромашин, власна резонансна частота яких знаходиться в межах 25 Гц. при проектуванні силової частини блоку керування за оптимальне значення несучої частоти f_{pwm} ШІМ треба брати частоту біля 4 кГц. Для 50 Гц вібромашин; комутуючі транзистори в силовій частині повинні працювати із несучою частотою f_{pwm} ШІМ біля 6,5 кГц. Відповідно, для високочастотних вібромашин із робочою частотою в 75 Гц оптимальна несуча частота f_{pwm} ШІМ мусить бути біля 9 кГц, а для 100 Гц вібромашин біля 13,5 кГц. Проведені дослідження середньоквадратичного σ відхилення та коефіцієнта нелінійних спотворень (гармонік) Kn для трьох основних форм напруг $U^{Д\ ПП}$, $U^{О\ ПП}$ та $U^{О\ П}$, які використовують для живлення електромагнітних вібропривідів керованих та адаптивних вібромашин, показують те, що для усіх трьох форм сигналів дані два параметри (σ та Kn) практично співрозмірні по величині.

Висновки

На основі аналізу сигналу в часовій та спектральній області запропонована методика визначення оптимальної несучої частоти ШІМ напруги, що використовується для живлення електромагнітного віброприводу керованих та адаптивних вібромашин. Завдяки даній методиці можна на стадії проектування силової частини системи керування електромагнітним вібропривідом підібрати вихідні транзистори і їх робочу частоту. Завдяки визначенню оптимальної несучої

частоти за допомогою даної методики можна позбутись зайвих високочастотних струмів, що є причиною теплових втрат в електромагнітному вібропривода, та дешевити силову частину, завдяки застосуванню низькочастотних вихідних транзисторів – оптимальних для даної резонансної вібромашини у силовій частині блоку керування.

Список літератури

1. Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. Керовані вібраційні технологічні машини : монографія. Вінниця : ВНАУ, 2011. 355 с.

2. Зелінський І. Д. Система керування електромагнітним віброзбудником // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник. 2003. Вип. 37. С. 3-7.

3. Z. Despotovic A. R. The increasing energy efficiency of the vibratory conveying drives with electromagnetic excitation // International Journal of Electrical and Power Engineering. 2012. № 6 (1). P. 38-42.

4. Чубик Р. В. Математичні моделі двополярних широтно-імпульсно модульованих сигналів для живлення електромагнітних вібропривода адаптивних вібраційних технологічних машин. // Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський наук.-тех. журнал. 2007. № 3 (48). С. 18-22.

5. Chubyk R. Optimal ruling system of electromagnetic vibrodrive of adaptive vibrational technological machines. // Vibroengineering. Proceedings of the 8th International Conference. Klaipeda. Lithuania. September 16-18. 2009. P. 10-14.

6. Chubyk R., Zelinsky I., Cherno O. Neurocontroller for vibrodrive control of adaptive vibration technological machines // IEEE 2nd KhPI Week on Advanced technology: conference proceedings. Kharkiv, 13-17 September. 2021. P. 278-282. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570058.

7. A. A. Cherno. Control of electromagnetic vibratory drive using a phase difference between current harmonics // Journal of automation and information sciences,. 2017. Vol. 49. Issue 7. P. 58-76.

8. V. Sinik, Z. Despotovic, I. Palinkas. Optimization of the operation and frequency control of electromagnetic vibratory feeders // Elektronika ir Elektrotechnika. 2016. №1. Vol. 22. P. 24-30.

9. Chubyk R. Investigation of current parameter in electro-magnettic drive of resonance adaptive vibromachines while using the duopolar latitude-impulsive voltage for its power supply // VIBROENGINEERING. Journal Of Vibroengineering. 2011. Vol. 13. Issue 2. P. 295-301.

10. Гаврильченко О. В., Таянов С. А., Чубик Р. В. Аналіз похибки форми та частоти при формуванні синусоїдального сигналу з допомогою ШІМ для системи керування вібротранспортером. // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні .2003. № 480. С. 47-52.

11. Гаврильченко О. В., Таянов С. А., Чубик Р. В. Аналіз коефіцієнту нелінійних спотворень синусоїдального сигналу системи керування ШІМ вібротранспортером при відсутності фільтрів живлення // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2004. Вип. 38. С. 104-109.

12. Гаврильченко О. В., Таянов С. А., Чубик Р. В. Аналіз коефіцієнту нелінійних спотворень синусоїдального сигналу при керуванні амплітудою ШІМ синусоїди за допомогою зміни шпаристості // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. 2004. № 506. С. 183-187.

13. Берник П. С., Чубик Р. В., Таянов С. А. Математична модель сигналу на виході силової частини системи керування на базі ШІМ вібраційними технологічними машинами. // Вібрації в техніці та технологіях. 2005. № 1 (39). С. 1-7.

14. Зелінський І. Д. Швидкий алгоритм формування ШІМ-коду для системи керування електромагнітним віброзбудником // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. 2010. № 679. С. 98-101.

15. Таянов С. А., Чубик Р. В. Дослідження закону руху адаптивної вібраційної технологічної машини при використанні прямокутної широтно-імпульсно модульованої циклічної вимушуючої сили для її збурення. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2008. Вип. 42. С. 174-185.

R. V. Chubyk, I. D. Zelinskyy, P. M. Lub
Lviv Politechnic National University
Lviv national environmental university

DETERMINATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE PULSE-WIDTH MODULATED VOLTAGE FOR POWERING THE ELECTROMAGNETIC VIBRATION DRIVE

Goal. To determine the optimal parameters of various types of pulse-width modulated (PWM) voltage, which is used in the control systems of the electromagnetic vibration drive to create resonant vibrating machines and control the parameters of the working body of the vibrating machine in the resonant mode. **Method.** The work is based on the analysis of the spectrum of the main three forms of PWM signals in their low-frequency region, to which the oscillating mechanical system of vibrating machines responds. To estimate the PWM-encoded sine wave corresponding to the resonant frequency of the vibrating machine, the mean square deviation was used in the time domain, and the nonlinear distortion coefficient (harmonic) was used in the spectral domain. **Results.** The results. A mathematical apparatus was built and a connection was established between the oscillating mechanical system of the vibrating machine, the external PWM parameters and the characteristics of the sinusoidal signal encoded by it in the time and spectral domains. **Scientific novelty.** For the first time, a mathematical model was obtained and the influence of the parameters of the oscillating mechanical system of the vibrating machine and the carrier frequency of the pulse-width modulated voltage on the root-mean-square deviation and the coefficient of nonlinear distortions (harmonics) of the signal feeding the electromagnetic vibration drive was simulated. **Practical significance.** A technique for calculating the carrier frequency of the PWM sinusoidal voltage is proposed, which can be used to develop an algorithm for controlling power switches (transistors) and choosing the type of power switches at the stage of designing the power part of control systems with an electromagnetic vibration drive of controlled and adaptive vibration machines.

Key words: pulse-width modulated voltage, controllable vibration machine, adaptive vibration technological machine, controllable electromagnetic vibration drive.

References

1. Chubyk R. V., Yaroshenko L. V. (2011). Kerovani vibratsiyni tekhnolohichni mashyny : monograph. Vinnytsya : VNAU. 355 p. [In Ukrainian].

2. Zelinskyy I. D. (2003). Systema keruvannya elektromahnitnym vibrozbudnykom. Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni: ukrayinskyy mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk, Vol. 37, Pp. 3-7 [In Ukrainian].

3. Z. Despotovic, A. Ribic. (2012). The increasing energy efficiency of the vibratory conveying drives with electromagnetic excitation. International Journal of Electrical and Power Engineering, №6 (1), Pp. 3-42.

4. Chubyk R. V. (2007). Matematychni modeli dvopolyarnykh shyrotno-impulsno modulovanykh syhnaliv dlya zhyvlennya elektromahnitnykh vibropryvodiv adaptyvnykh vibratsiynykh tekhnolohichnykh mashyn. Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh, Vol. 3 (48), Pp. 18-22 [In Ukrainian].

5. Chubyk R. (2009). Optimal ruling system of electromagnetic vibrodrive of adaptive vibrational technological machines. Vibroengineering, Proceedings of the 8th International Conference, Klaipeda, Lithuania, September 16-18, Pp. 10-14.

6. Chubyk R., Zelinsky I., Cherno O. (2021). Neurocontroller for vibrodrive control of adaptive vibration technological machines. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced technology: conference proceedings, Kharkiv, 13-17 September, P. 278-282.

7. A. A. Cherno. (2017). Control of electromagnetic vibratory drive using a phase difference between current harmonics. Journal of automation and information sciences, Vol. 49, Issue 7, Pp. 58-76.

8. V. Sinik, Z. Despotovic, I. Palinkas. (2016). Optimization of the operation and frequency control of electromagnetic vibratory feeders. Elektronika ir Elektrotechnika, №1, Vol. 22. Pp. 24-30.

9. Chubyk R. (2011). Investigation of current parameter in electro-magnettic drive of resonance adaptive vibromachines while using the duopolar latitude-impulsive voltage for its power supply. VIBROENGINEERING. Journal Of Vibroengineering, Vol. 13, Issue 2, P. 295-301.

10. Havrylchenko O. V., Tayanov S. A., Chubyk R. V. (2003). Analiz pokhybky formy ta chastoty pry formuvanni synusoyidalnoho syhnalu z dopomohoyu SHIM dlya systemy keruvannya vibrotransporterom. Optymizatsiya vyrobnychykh protsesiv i tekhnichnyy kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni engineering, Vol 480, Pp. 47-52 [In Ukrainian].

11. Havrylchenko O. V., Tayanov S. A., Chubyk R. V. (2004). Analiz koefitsiyentu neliniynykh spotvoren synusoyidalnoho syhnalu systemy keruvannya SHIM vibrotransporterom pry vidsutnosti filtriv zhyvlennya. Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni, Vol. 38. Pp. 104-109 [In Ukrainian].

12. Havrylchenko O. V., Tayanov S. A., Chubyk R. V. (2004). Analiz koefitsiyentu neliniynykh spotvoren synusoyidalnoho syhnalu pry keruvanni amplitudoyu SHIM synusoyidy za dopomohoyu zminy shparystosti. Teploenerhetyka. Inzheneriya dovkillya. Avtomatyzatsiya, Vol 506, Pp. 183-187 [In Ukrainian].

13. Bernyk P. S., Chubyk R. V., Tayanov S. A. (2005). Matematychna model syhnalu na vykhodi sylovoyi chastyny systemy keruvannya na bazi SHIM vibratsiynymy tekhnolohichnymy mashynamy. Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh, Vol. 1 (39), Pp. 1-7, 2005 [In Ukrainian].

14. Zelinskyy I. D. (2010). Shvydkyy alhorytm formuvannya SHIM-kodu dlya systemy keruvannya elektromahnitnym vibrozbudnykom. Optymizatsiya vyrobnychykh protsesiv i tekhnichnyy kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni, Vol. 679, Pp. 98-101 [In Ukrainian].

15. Tayanov S. A., Chubyk R. V. (2008). Doslidzhennya zakonu rukhu adaptyvnoyi vibratsiynoyi tekhnolohichnoyi mashyny pry vykorystanni pryamokutnoyi shyrotno-impulsno modulovanoyi tsyklichnoyi vymushuyuchoyi syly dlya yiyi zburennya // Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni, Vol. 42, Pp. 174-185 [In Ukrainian].