

Чубик Р. В.

*Дрогобицький
державний
педагогічний
університет*

Ярошенко Л. В.

Омельянов О. М.

*Вінницький
національний
аграрний
університет*

УДК 621.9.048.6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМУ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ВІБРОПРИВОДІ РЕЗОНАНСНИХ АДАПТИВНИХ ВІБРОМШИН ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ДВОПЛЯРНОЇ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНО МОДУЛЬОВАНОЇ НАПРУГИ ДЛЯ ЙОГО ЖИВЛЕННЯ

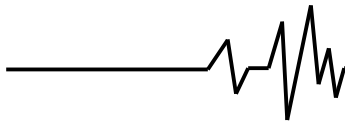
Установлена аналитическая связь между параметрами двухполюсного широтно-импульсно модулируемого напряжения и током, в электромагнитном вибропроводе резонансных вибрационных машин, наличие данной связи позволит в совершенстве исследовать ход электромеханических процессов и разработать новые методы расчета управляемых электромагнитных вибропроводов.

Analytical connection is set between the parameters of latitudinal the impulsively modulated tension and by a current, in the electromagnetic vibrooccasion of resonance oscillation machines, the presence of this connection will allow to perfection to investigate motion of electromechanics processes and work out the new methods of calculation of the guided electromagnetic vibrooccasions.

Постановка проблеми. Одним із основних критеріїв будь якого технологічного обладнання є його питомі енергозатрати. У випадку із вібромашинами та вібротехнологіями мінімальні енергозатрати на вібропривод можливі лише при резонансному режимі роботи вібромашини. Для забезпечення резонансного режиму роботи при змінних параметрах технологічного процесу застосовуються адаптивні системи керування віброприводом [1] які забезпечують мінімальні енергозатрати при заданих технологічно оптимальних параметрах вібраційного поля вібромашини. Для живлення віброприводу вібромашини із електромагнітним віброприводом і керування параметрами віброполя використовується двополярна широтно-імпульсно модульована (ШІМ) напруга. Розробка нових та вдосконалення існуючих методів розрахунку конструктивних та електричних параметрів електромагнітного віброприводу при заданих параметрах віброполя вібромашини та ШІМ напруги є

актуальним питанням на даний час, оскільки оптимально розрахований електромагнітний вібропривод дозволяє забезпечити мінімальні енергозатрати при заданих технологічно оптимальних параметрах віброполя.

Аналіз останніх публікацій. В роботі [2] показано зв'язок в електромагнітному віброприводі між струмом та ШІМ напругою, яка модулюється за синусоїдальним законом шириною прямокутного імпульсу. Даний зв'язок не є аналітичним, бо отриманий за допомогою числового методу Рунге-Кутта з адаптованим кроком про те, дозволяє встановити зв'язок між основними параметрами електромагнітного віброприводу та параметрами ШІМ напруги і параметрами віброполя. В роботі [3] показано простіші за технологією отримання форми ШІМ напруги для живлення ВТМ, що не вимагають високочастотних силових ключів в блоці керування електромагнітним віброприводом. Відмова від технології де застосовується ШІМ модулювання по синусоїдальному закону



шириною прямокутного імпульсу дозволяє зменшити вартість системи керування віброприводом, отже доцільним є встановлення аналітичного зв'язку між технологічно простішими формами ШІМ напруги [3] та розрахунковими параметрами електромагнітного віброприводу.

Метою даної роботи є встановити аналітичний зв'язок між параметрами двополярної широтно-імпульсно модульованої напруги та струмом, що протікає в електромагнітному віброприводі резонансних адаптивних вібраційних технологічних машин

(АВТМ) для подальшого використання даного аналітичного зв'язку при розрахунку та інженерному проектуванні керованих електромагнітних віброприводів АВТМ.

Для встановлення аналітичного зв'язку між струмом $I(t)$ та динамічними характеристиками робочого органу $x(t)$ АВТМ і параметрами $U(t)$ [3] ШІМ напруги (1), необхідно розглянути коливну електромеханічну систему (див рис. 1) двох масової АВТМ.

$$U(t) = \frac{1.29 \cdot U}{\pi} \cdot \arctan \left(K_a \cdot \left(t - \frac{2 \cdot \text{floor} \left(\frac{\omega \cdot t - \pi}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \pi}{\omega} - \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \right) \right) \cdot \arctan \left(K_a \cdot \left(t - \frac{2 \cdot \text{floor} \left(\frac{\omega \cdot t}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \pi}{\omega} - \frac{\pi}{\omega} \right) \right) \quad (1)$$

де U - амплітуда напруги живлення електромагнітного віброприводу, ω - частота на пруги живлення електромагнітного віброприводу, K_a - коефіцієнт апроксимації, що згладжує прямі кути ШІМ напруги максимально наближуючи математичну

модель (1) до реальної ШІМ напруги.

Система диференціальних рівнянь, що описує поведінку коливної електромеханічної системи двомасової АВТМ згідно [4, 5] має вигляд:

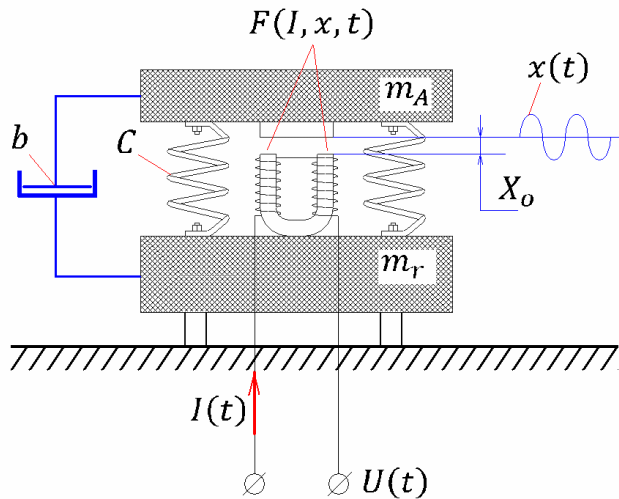
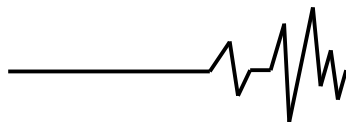


Рис. 1. Структурна схема коливної електромеханічної систему двох масової АВТМ

$$\begin{cases} m_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} + b \cdot \left(\frac{dx_a}{dt} - \frac{dx_r}{dt} \right) + k \cdot (x_a - x_r) = F(I, (x_a - x_r), t) \\ m_r \frac{d^2 x_r}{dt^2} - b \cdot \left(\frac{dx_a}{dt} - \frac{dx_r}{dt} \right) - k \cdot (x_a - x_r) = -F(I, (x_a - x_r), t), \\ \frac{d}{dt} (L(x, I) \cdot I(t)) + R \cdot I(t) = U(t) \end{cases} \quad (2)$$



де m_a - активна маса (робочий орган) АВТМ, m_r - реактивна маса (корпус; рама) АВТМ, x_a та x_r - координати активної та реактивної маси АВТМ, b - коефіцієнт опору $b = -f/x$ (f - коефіцієнт тертя, опору повітря), k - жорсткість пружної системи АВТМ, $F(I, (x_a - x_r), t)$ - вимушуюча сила електромагнітного віброприводу АВТМ, $L(x, I)$ - індуктивність електромагнітного віброприводу АВТМ, R - активний опір котушки електромагнітного віброприводу АВТМ, $I(t)$ - сила струму, що протікає по обмотці електромагнітного віброприводу АВТМ.

Розглядаючи коливання робочого органу АВТМ в одному напрямі та вводячи приведену масу M ($M = m_a \cdot m_r / m_a + m_r$) та відносну координату x ($x = x_a - x_r$) система диференціальних рівнянь, що описує поведінку коливної електромеханічної системи двох масової АВТМ матиме зручніший вигляд:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F(I, x, t) \\ \frac{d}{dt}(L(x, I) \cdot I(t)) + R \cdot I(t) = U(t) \end{cases} \quad (3)$$

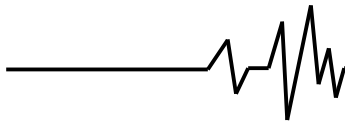
Верхнє диференціальне рівняння системи (3) описує механічні процеси у АВТМ, тобто пов'язує дисипативні процеси у коливній системі і рух робочого органу x із вимушуючою силою віброприводу $F(I, x, t)$ що має електромагнітний характер та частково є функцією від закону переміщення робочого органу $x(t)$. Це зумовлено тим, що зміна зазору між якорем та ярмом електромагнітного віброприводу впливає на силу F із якою вони притягуються. Нижнє диференціальне рівняння системи (3) описує електромагнітні процеси у АВТМ, воно складене на основі рівноваги напруг і враховує: спад напруги на активному опорі котушки віброприводу та електрорушійну силу самоіндукції, що виникає в процесі зміни індуктивності $L(x, I)$ електромагнітного віброприводу АВТМ, яка залежить від закону переміщення робочого органу $x(t)$. Тобто дане рівняння встановлює зв'язок між механічним параметром робочого органу $x(t)$, ШІМ напругою живлення $U(t)$ та силою струму $I(t)$,

що протікає по обмотці електромагнітного віброприводу. Сила струму в обмотці електромагнітного віброприводу $I(t)$ є основним параметром, що впливає на силу $F(I, x, t)$ з якою притягуються якор із ярмом в електромагнітному віброприводі. Встановлення аналітичного зв'язку між законом руху робочого органу $x(t)$ та струмом в обмотці $I(t)$ дозволить проводити розрахунок параметрів котушки електромагнітного віброприводу для забезпечення необхідної сили віброприводу $F(I, x, t)$ з метою отримання заданих технологічно оптимальних параметрів робочого органу $x(t)$ АВТМ. Для встановлення даного зв'язку доцільно розглянути нижні рівняння системи (3), продиференціювавши його отримаємо:

$$L(x, I) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL(x, I)}{dt} + R \cdot I(t) = U(t). \quad (4)$$

Індуктивність L електромагніту в загальному випадку залежить від двох змінних [6]: зазору (див. мал. 1) X_o між ярмом і якорем та струмом $I(t)$ що протікає по його обмотці при насиченому [6] магнітопроводі. Для того, щоб дослідити зміну індуктивності у віброприводі слід врахувати два фактори: зазор між якорем та ярмом в електромагнітному віброприводі не дорівнює нулю ($X_o \neq 0$); даний зазор завжди більший за амплітуду коливань робочого органу АВТМ ($X_o > |x(t)|$), це зумовлено самим принципом роботи віброприводу. Беручи до уваги також робочі обмеження на максимальні значення струму можна повністю виключити насичення магнітопроводу електромагнітного віброприводу [6]. Враховуючи конструктивні особливості електромагнітного віброприводу можна зробити висновок, що його індуктивність не залежатиме від струму в обмотці котушки $I(t)$, а тільки від зміни зазору X_o . Зміна зазору X_o безпосередньо залежить від закону руху $x(t)$ робочого органу АВТМ. У такому випадку, згідно [4, 7, 8] індуктивність електромагнітного віброприводу можна описати наступним виразом:

$$L(x) = L_0 \cdot \left(1 + \frac{x(t)}{X_o}\right)^{-1}, \quad (5)$$



де L_o - індуктивність електромагнітної системи із зазором.

Згідно [9, 7] індуктивність електромагнітної системи із зазором визначається виразом:

$$L_o = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot \varpi^2}{X_0}, \quad (6)$$

де ϖ - кількість витків котушки електромагнітного віброприводу, μ_0 - магнітна

проникність вакууму, S - площа торцевого перетину осереддя електромагнітного віброприводу.

Підставивши вираз (6) в (5), а отриманий результат в диференційне рівняння (4) отримаємо зв'язок між законом руху робочого органу $x(t)$ АВТМ та електромагнітними процесами в електромагнітному віброприводі двох масової АВТМ:

$$\frac{\mu \cdot S \cdot \varpi^2 \left(\frac{d}{dt} i(t)\right)}{X_0 \left(1 + \frac{x(t)}{X_0}\right)} - \frac{i(t) \cdot \mu \cdot S \cdot \varpi^2 \left(\frac{d}{dt} x(t)\right)}{X_0^2 \left(1 + \frac{x(t)}{X_0}\right)^2} + Ri(t) = \frac{1}{\pi} \times$$

$$\times \left(1.29 \cdot U \arctan \left(Kap \cdot \left(t - \frac{2 \cdot \text{floor} \left(\frac{\omega \cdot t - \pi}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \pi}{\omega} - \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \right) \right) \arctan \left(Kap \cdot \left(t - \frac{2 \cdot \text{floor} \left(\frac{\omega \cdot t}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \pi}{\omega} - \frac{\pi}{\omega} \right) \right) \right) \quad (7)$$

Для зручності дане диференційне рівняння можна привести до вигляду:

$$\frac{1}{(X_0 + x(t))^2} \left(\mu \cdot S \cdot \varpi^2 \cdot \left(\frac{d}{dt} i(t)\right) \cdot X_0 + \mu \cdot S \cdot \varpi^2 \left(\frac{d}{dt} i(t)\right) \cdot x(t) - i(t) \cdot \mu \cdot S \cdot \varpi^2 \cdot \left(\frac{d}{dt} x(t)\right) + \right.$$

$$\left. R \cdot i(t) \cdot X_0^2 + 2 \cdot R \cdot i(t) \cdot X_0 \cdot x(t) + R \cdot i(t) \cdot x(t)^2 \right) =$$

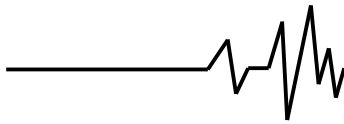
$$\frac{1.29 \cdot U}{\pi} \cdot \arctan \left(Kap \cdot \left(t - \frac{2 \cdot \text{floor} \left(\frac{\omega \cdot t - \pi}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \pi}{\omega} - \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \right) \right) \cdot \arctan \left(Kap \cdot \left(t - \frac{2 \cdot \text{floor} \left(\frac{\omega \cdot t}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \pi}{\omega} - \frac{\pi}{\omega} \right) \right)$$

Для розв'язку рівняння (7) слід з'ясувати закон руху робочого органу. Однозначним є той факт, що робочий орган здійснює гармонійні коливання, що описуються виразом:

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (8)$$

де X - амплітуда коливань робочого органу АВТМ (залежить від дисипативних характеристик ко-ливної системи та коефіцієнта динамічності [10] «відстройки системи»), ω - частота вимушуючої сили, φ - зсув фаз між переміщенням робочого органу та вимушуючої силою [5, 10].

При резонансному режимі існує відставання вимушених коливань робочого органу $x(t)$ АВТМ від циклічної вимушуючої сили віброприводу на чверть періоду [4, 5, 10]. Враховуючи, що фаза сили електромагнітного віброприводу прямо пропорційна фазі сили струму $I(t)$ в його обмотці то у нашому випадку зсув між струмом $I(t)$ та переміщенням $x(t)$ буде рівний $\varphi = -\pi/2$. Частковим розв'язком диференційного рівняння(7) із врахуванням (8) та початкової умови $I(0) = 0$ є вираз:



$$I(t) = e^{\left[\frac{2 \cdot R \cdot \left(X_0 + \arctan \left(\tan \left(\frac{\omega t + \phi}{2} \right) \right) \cdot \tan \left(\frac{\omega t + \phi}{2} \right)^2 + X_0 \cdot \arctan \left(\tan \left(\frac{\omega t + \phi}{2} \right) \right) - X \right)}{\mu \cdot S \cdot \varpi^2 \cdot \omega \cdot \left(\tan \left(\frac{\omega t + \phi}{2} \right)^2 + 1 \right)} \cdot \int_0^t \left(-\frac{129}{100} \cdot \frac{1}{\varpi^2 \cdot \pi \cdot S \cdot \mu} \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \times \left(U \cdot \arctan \left(\frac{1}{\omega} \cdot \left(Kap \cdot \left(-\omega \cdot \tau + 2 \cdot floor \cdot \left(\frac{\omega \cdot \tau - \pi}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \pi + 2\pi \right) \right) \right) \right) \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \times \left[\arctan \left(\frac{1}{\omega} \cdot \left(Kap \cdot \left(-\omega \cdot \tau + 2 \cdot floor \cdot \left(\frac{\omega \cdot \tau}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \pi + \pi \right) \right) \right) \right] \cdot e^{\frac{R \cdot \left(2 \cdot X_0 \cdot \arctan \left(\frac{\sin \left(\frac{\omega \tau + \phi}{2} \right) \right)}{\cos \left(\frac{\omega \tau + \phi}{2} \right) \right) - X \cdot \cos(\omega \tau + \phi) - X}{\omega \cdot \varpi^2 \cdot S \cdot \mu}} \right] \right] d\tau \times$$

$$\left. \left. \times \left(X_0 \cdot \tan \left(\frac{\omega \cdot t}{2} \right)^2 + X_0 \tan \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 + X_0 + X_0 \tan \left(\frac{\omega \cdot t}{2} \right) \tan \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 + 2 \cdot X \tan \left(\frac{\omega \cdot t}{2} \right) - \right. \right.$$

$$\left. \left. - 2 \cdot X \cdot \tan \left(\frac{\omega \cdot t}{2} \right)^2 \cdot \tan \left(\frac{\phi}{2} \right) + 2 \cdot X \cdot \tan \left(\frac{\phi}{2} \right) - 2 \cdot X \cdot \tan \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \cdot \tan \left(\frac{\omega \cdot t}{2} \right) \right) \right)$$

$$\left. \left. \right) \right) \left(\tan \left(\frac{\omega \cdot t}{2} \right)^2 + \tan \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 + 1 + \tan \left(\frac{\omega \cdot t}{2} \right) \cdot \tan \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \right)$$

(9)

де $\tau = 0 \dots t$.

Графічно даний зв'язок зображено на рис. 2. З якого видно, що протягом кожного

півперіоду ШІМ напруги (1) струм поводить себе як у колі із постійною напругою.

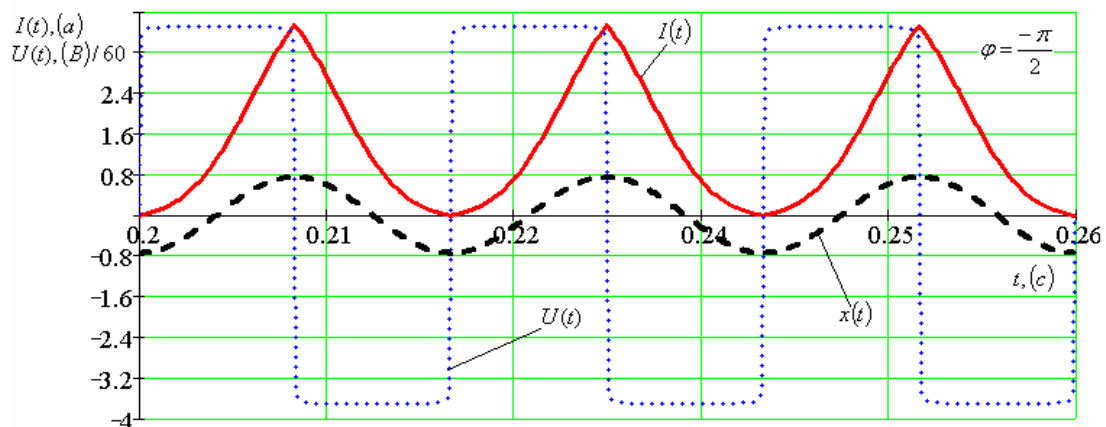
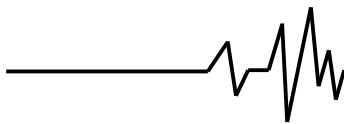


Рис. 2. Зв'язок між струмом в електромагнітному віброприводі та ШІМ напругою

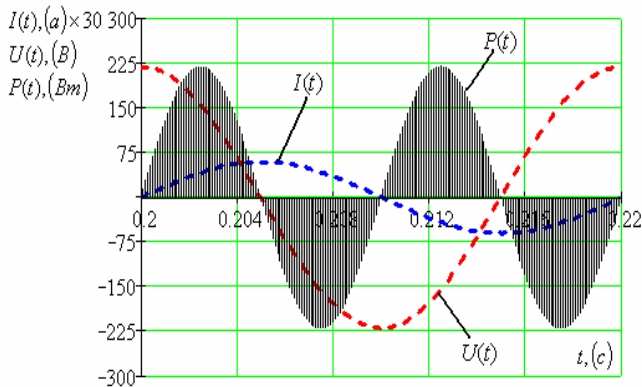


Графічний аналіз виразу (9) при різних зсувах фази показує, що зв'язок між струмом $I(t)$ та зсувом φ вібропереміщення $x(t)$ має фізичний зміст в межах $-\pi/4 \leq \varphi \leq -3\pi/4$.

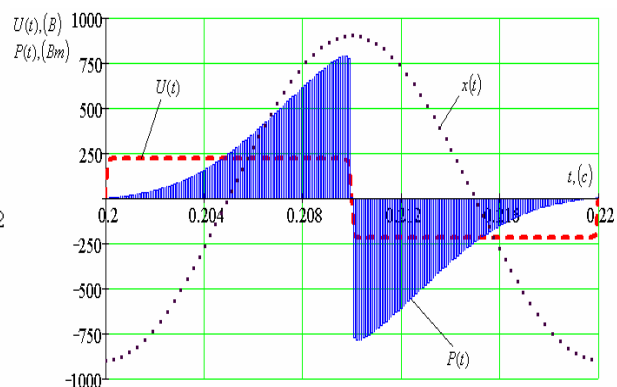
При інших значеннях φ поведінка струму приведе до руйнування електромагнітного віброприводу при перегріванні постійним струмом. Виходячи із фізичного змісту [5] амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик АВТМ такі режими відповідають двом випадкам. Коли частота ω_v ШІМ напруги $U(t)$ буде набагато меншою або набагато більшою за частоту ω_0 власних коливань АВТМ. Цей факт, що мат модель (9) враховує такі випадки свідчить про її адекватність.

Слід окремо зауважити, що у випадку живлення електромагнітного віброприводу від мережі із частотою $f = 50$ Гц, частота коливань робочого органу буде у двічі більшою [10], а у випадку живлення електромагнітного віброприводу ШІМ напругою $U(t)$ (1) частота коливань робочого органу дорівнюватиме частоті ШІМ напруги. Отже, при використанні синусоїдальної напруги в якості джерела живлення електромагнітного віброприводу його

слід розглядати як котушку із індуктивністю L_0 (6), а в колі змінного синусоїдального струму з індуктивним навантаженням існує зсув фаз між напругою та струмом і напруга відстає на $\pi/2$ від струму. Враховуючи даний фактор можна легко знайти миттєву потужність електромагнітного віброприводу $P(t) = U(t) \times I(t)$. Графік потужності електромагнітного віброприводу при живленні його синусоїдальною напругою зображено на рис. 3 а), з якого видно, що за кожний напівперіод виникають два протилежно напрямлені сплески потужності, під час яких і виконується робота з переміщення робочого органу АВТМ. У разі використання в якості джерела живлення ШІМ напруги (1) потужність на робочому органі змінюється відповідно до закону зображеному на рис. 3 б), з якого видно, що у даному випадку зовсім інша ситуація за один період утворюється одна пара протилежно спрямованих сплесків потужності під час чого і виконується робота з переміщення робочого органу АВТМ, тобто за один період ШІМ напруги утворюється одне коливання робочого органу.



а)



б)

Рис. 3. Зв'язок між потужністю та напругою електромагнітного віброприводу АВТМ

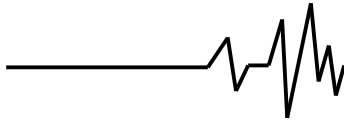
Висновок

В результаті проведеного дослідження встановлено аналітичний зв'язок між параметрами двох полярної ШІМ напруги та струмом $I(t)$ який протікає в електромагнітному віброприводі резонансних АВТМ, наявність даного зв'язку дозволить досконаліше досліджувати перебіг електромеханічних процесів та розробити нові методи розрахунку

керуваних електромагнітних віброприводів при інженерному проектуванні адаптивних вібраційних технологічних машин.

Література

1. Чубик Р. В. Адаптивна система керування режимами резонансних вібраційних технологічних машин Дис... к-та техн. наук. - Львів, 2007. - 266 с.



2. Таянов С.А., Чубик Р.В., Сенів С.Б. Дослідження закону зміни струму та зусилля на електромагніті резонансної вібромашини при живленні її від джерела широтно-імпульсно модульованої напруги. // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Вісник НУ "Львівська політехніка". 2005. - № 535 - С.119-125.
3. Чубик Р.В. Математичні моделі двополярних широтно-імпульсно модульованих сигналів для живлення електромагнітних - адаптивних вібраційних технологічних машин. // Вібращи в техніке и технологиях. Всеукраїнський наук.-тех. журнал. 2007. - № 3 (48) - С.18-22.
4. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве.- М., «Высш. школа», 1977. – 255 с.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики. - М.: Наука, 1971. - 751 с.
6. Под. ред. Бесекаерского В.А. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления. – М., Глав. ред. физикоматематической литературы, 1972. – 587 с.
7. Малкин Д. Д. Д. Теория электромагнитных вибраторов // Труды НИИ Часпрома "Технология часового производства". 1971. - № 3(6) - С.75-85.
8. Ланець О.С. Розробка динамічно зрівноважених торових вібраційних машин з електромагнітним приводом: Дис... канд. тех. наук. - Львів, 2002. - 150 с.
9. Буль Б.К., Буль О.Б., Азанов В.А., Шоффа В.Н. Электромеханические аппараты автоматики. – М., Высш. школа, 1988. -303 с.
10. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання. - Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2004. – 248 с.
11. Патент України № 42383 А, Вібраційна сушарка. Ярошенко Л. В., Бюл. № 9, 2001.
12. Патент України № 79624, Багатофракційний вібраційний сепаратор. Ярошенко Л.В., Серета Л. П. Бюл. № 10, 2007.