

ЧАСТОТНИЙ ПУСК ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗАРЕЗОНАНСНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

¹Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Розглянуто зарезонансну вібраційну машину з двовальними дебалансними віброзбуджувачами для ущільнення жорстких бетонних сумішей у формі. Зазначено, що для таких вібраційних машин зазвичай застосовують нерегульований електропривод із завищеною потужністю приводних двигунів. Це дозволяє швидко подолати резонансну зону у процесі пуску, але в усталеному режимі приводні двигуни працюють з суттєвим недовантаженням, що погіршує енергетичні показники двигунів. Для можливої заміни приводних двигунів завищеної потужності на менш потужні досліджено пуск зарезонансної вібраційної машини за використання частотно-регульованого електроприводу. За допомогою математичного моделювання проведено дослідження впливу основних законів частотного керування на подолання резонансної зони під час пуску. Вплив законів частотного керування визначався за допомогою порівняння максимального переміщення робочого органа вібромашини і пускового струму двигуна під час частотного та прямого пуску. Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що основні закони частотного керування не забезпечують зменшення амплітуди коливань робочого органа вібромашини і динамічних навантажень під час подолання резонансної зони у процесі пуску, якщо час частотного пуску буде більшим за час прямого. Подальші дослідження проводилися за оптимального часу розгортки частоти для цієї вібраційної машини та заміни приводних двигунів на менш потужні для таких чотирьох випадків: у разі лінійного закону частотного керування, у разі стрибкоподібного збільшення напруги живлення та лінійної зміни частоти, у разі одночасного стрибкоподібного збільшення напруги та частоти, у разі стрибкоподібного збільшення частоти та лінійної зміни напруги. Стрибкоподібне збільшення напруги та частоти живлення виконувалося у момент, коли значення частоти живлення асинхронного двигуна дорівнювало заданій резонансній частоті вібраційної машини. Показано, що у разі лінійної зміни напруги і частоти живлення спостерігається зменшення прискорення приводних двигунів у резонансній зоні, а стрибкоподібне збільшення частоти викликає «застрягання» роторів приводних двигунів вібраційної машини. Зазначено, що для подолання резонансної зони в процесі частотного пуску асинхронних двигунів зарезонансних вібраційних машин доцільно застосовувати тільки стрибкоподібне збільшення напруги, що дозволить встановлювати приводні двигуни потужністю, необхідною для усталеного режиму.

Ключові слова: частотно-регульований електропривод, асинхронний двигун, частотний пуск, вібраційна машина, резонансна зона.

Вступ

Зарезонансні вібраційні машини (ВМ) широко використовуються під час виконання багатьох технологічних процесів, таких як транспортування насипного вантажу, ущільнення бетонних сумішей, подрібнення залізобетонних плит і феросплавів та ін. [1], [2]. Вони оснащені дебалансними віброзбуджувачами та працюють у зарезонансному режимі. Основними перевагами таких ВМ є: простота конструкції, стабільність роботи в усталеному режимі у разі зміни навантаження, велика вантажопідйомність. Проте основний недолік таких ВМ пов'язаний з виникненням значних резонансних коливань робочого органу під час пуску, що викликає значні динамічні навантаження на елементи конструкцій ВМ та, як наслідок, швидкого виходу з ладу обладнання [3]—[5]. Для швидкого подолання резонансної зони і виключення можливого «застрягання» зазвичай встановлюють нерегульовані двигуни завищеної потужності, що є економічно недоцільним. Існуючі способи зменшення резонансних коливань [6]—[8] прийнятні більше для негабаритних ВМ малої вантажопідйомності та не всі вони дозволяють встановлювати приводні двигуни меншої потужності. Таким чином, вирішення проблеми пуску зарезонансних вібраційних машин середньої та великої

вантажопідйомності за допомогою сучасних систем електроприводу (ЕП) є своєчасною та важливою задачею.

Метою роботи є дослідження подолання резонансної зони у процесі пуску зарезонансних вібраційних машин при використанні частотно-регульованого електроприводу та формуванні додаткових керуючих впливів задля встановлення приводних двигунів меншої потужності.

Результати досліджень

Для дослідження частотного пуску та подолання резонансної зони розглядалася зарезонансна вібраційна машина з двовальними дебалансними віброзбуджувачами блочної конструкції (рис. 1) [1], [2]. Вібраційна машина використовується для об'ємного ущільнення жорстких бетонних сумішей у формі під час виробництва широкої номенклатури збірних залізобетонних виробів і конструкцій висотою до 0,3...0,8 м. За рахунок синхронного і синфазного обертання дебалансів у протилежні напрямки виникають вертикальні коливання робочого органу ВМ. Форма з бетонною сумішшю кріпиться до віброблоків за допомогою електромагнітів. Технічні параметри ВМ такі: повна приведена маса коливних частин ВМ — 11000 кг; маса дебалансів — 22 кг; відстань дебалансної маси від осі обертання — 0,1 м; сумарна жорсткість опор ВМ — $1,268 \cdot 10^8$ Н/м; коефіцієнт демпфування — 30600 Нс/м; частота коливань — 50 Гц; амплітуда коливань — 0,2...0,6 мм.

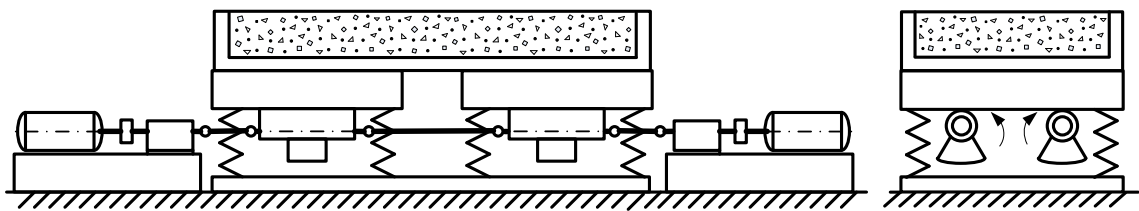


Рис. 1. Зарезонансна вібраційна машина з дебалансними віброзбуджувачами

До розглянутої зарезонансної ВМ зазвичай застосовують нерегульований ЕП з метою забезпечення швидкого проходження резонансної зони без «застрягання» роторів приводних двигунів у процесі пуску. Для цієї ВМ встановлюють саме два асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором потужністю 30 кВт кожний, які жорстко пов'язані між собою. Однак в усталеному режимі АД працюють з істотним недовантаженням. Це викликає погіршення енергетичних показників АД: коефіцієнт корисної дії дорівнює 0,286, а коефіцієнт потужності — 0,575.

Основними вимогами у разі використання регульованого ЕП до зарезонансних ВМ є те, що ЕП має характеризуватися простотою, низькою вартістю, надійністю, оскільки застосування складних і недешевих систем регульованого ЕП не завжди є доцільним з огляду економії. До того ж, використання регульованого ЕП передбачає заміну приводних двигунів ВМ на менш потужні, щоб в усталеному режимі не спостерігалася їхнього недовантаження.

З урахуванням цього проведено дослідження впливу основних законів частотного керування $\left(\frac{U}{f} = \text{const} ; \frac{U}{f^2} = \text{const} ; \frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const} \right)$ [9] на процес пуску ВМ для визначення найприйнятнішого,

який у подальшому може бути використаний для забезпечення гарантованого подолання резонансної зони без «застрягання» роторів приводних АД.

Дослідження пускових режимів вібраційної системи, яка складається з двох АД і вібраційної машини з двовальними дебалансними віброзбуджувачами, проводилися за допомогою математичного моделювання у пакеті Matlab. Модель АД з короткозамкненим ротором виконана у трифазній системі координат [10], [11]. Модель ВМ описана системою диференціальних рівнянь, які відображають рух ВМ вертикально спрямованої дії згідно з [11].

Вплив законів частотного керування на процес пуску ВМ визначався способом порівняння максимального переміщення робочого органу ВМ (y_{max}) і пускового струму двигуна (I_p) під час частотного та прямого пуску АД ВМ.

Максимальні значення переміщення робочого органу ВМ і пускового струму АД під час проходження резонансної зони у разі використання трьох законів частотного керування для різних значень часу розгортки частоти (1,5 с; 1,75 с; 2 с; 2,25 с; 2,5 с; 2,75 с; 3 с) показано на рис. 2.

Отримані результати досліджень (рис. 2) доводять, що зі збільшенням часу розгортки частоти збільшується амплітуда коливань робочого органу ВМ у резонансній зоні за всіма трьома закона-

ми частотного керування, порівняно з прямим пуском у 1,5...2,5 рази, порте при цьому величина максимальної амплітуди менша ніж під час стаціонарного резонансу. Відповідно, зі збільшенням амплітуди коливань робочого органа ВМ у резонансній зоні зростає і вібраційний момент (рис. 3) [3], [12], який діє на приводні АД, що може призвести до зтяжнього процесу пуску із «застряганням» роторів АД.

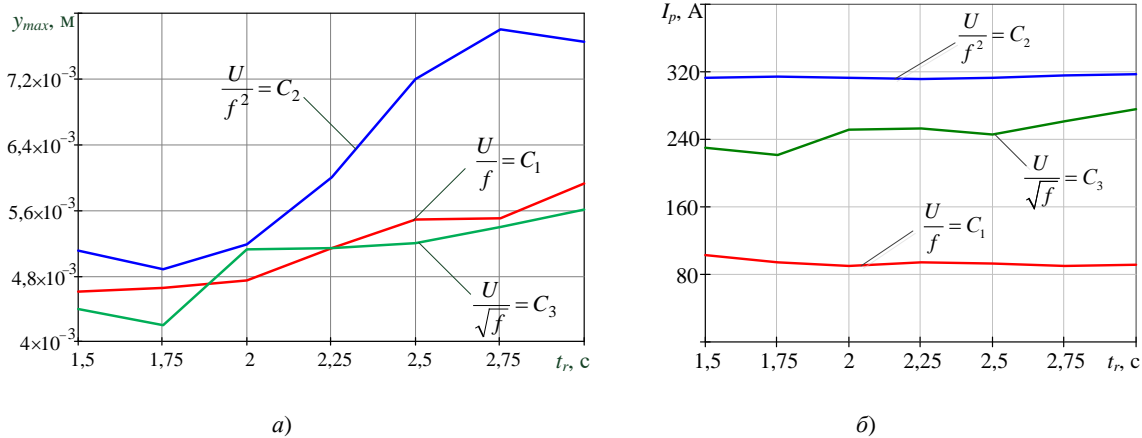


Рис. 2. Залежності: *a* — максимального значення переміщення робочого органа ВМ у резонансній зоні; *б* — пускового струму АД, — від часу розгортки частоти для трьох законів частотного керування

Аналіз кривих (рис. 2) показав, що найгірші показники за максимальним значенням переміщення робочого органа ВМ спостерігаються з використанням закону частотного керування $\frac{U}{f^2} = \text{const}$, а найкращі — коли $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}$. Водночас у разі $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}$ двигун має як переваження за струмом, так і значну величину моменту під час переходу через резонансну зону (рис. 4).

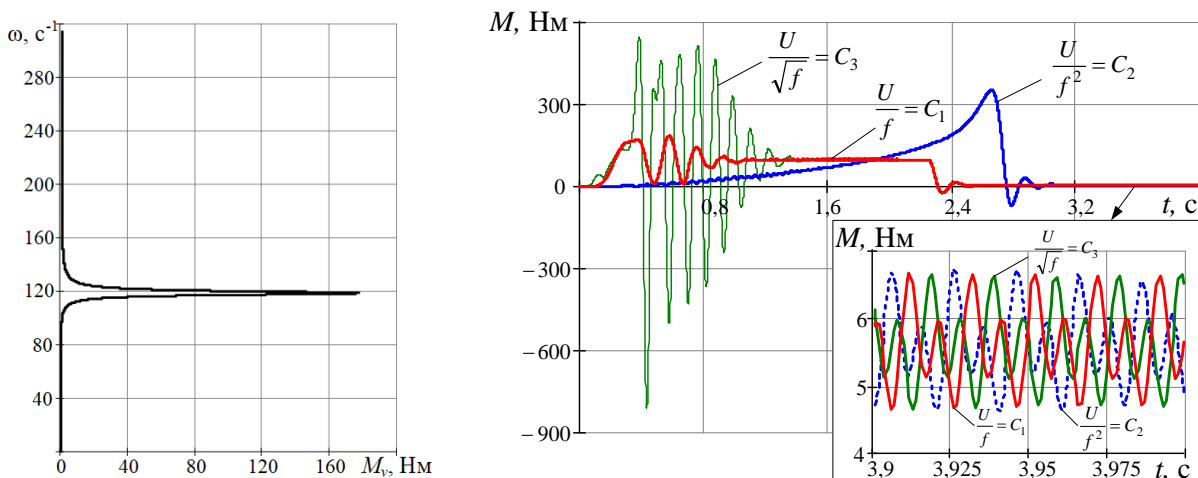


Рис. 3. Вібраційний момент

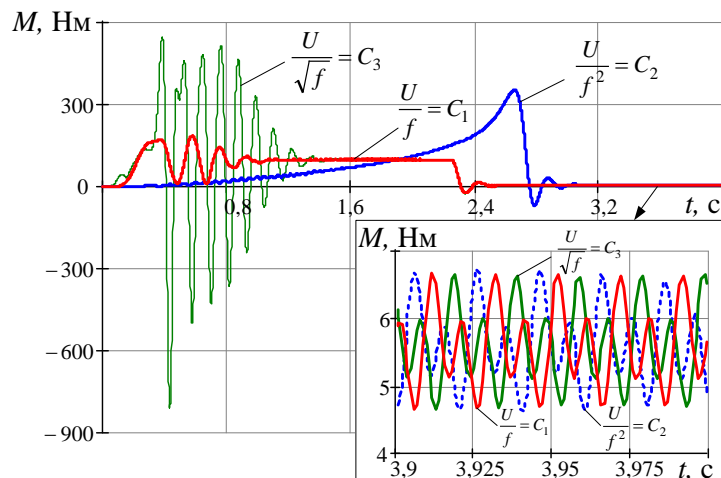


Рис. 4. Криві моменту асинхронного двигуна ВМ з використанням трьох законів частотного керування

Отримані результати підтверджують дослідження подолання резонансної зони, які описані у [2], [13], а саме те, що чим з більшим прискоренням ЕП впливає на ВМ, тим меншою буде амплітуда коливань робочого органа ВМ під час переходу через резонанс, і навпаки.

Отже, аналіз проведених досліджень показав, що основні закони частотного керування не забезпечують зменшення амплітуди коливань робочого органа ВМ і динамічних навантажень під час подолання резонансної зони у процесі пуску, якщо час частотного пуску буде більшим за час прямого пуску АД. При цьому встановлено, що закон частотного керування $U/f = \text{const}$ забезпечує прийнятні струмові та механічні навантаження, тому є підстави вважати, що зменшення резонансних коливань ВМ в пусковому режимі у разі заміни приводних АД на менш потужні можливе шляхом формування завдання частотного пуску на основі цього закону керування.

Відповідно для подальших досліджень приводні АД потужністю 30 кВт замінено на АД потуж-

ністю 11 кВт кожен з такими паспортними даними: $P_n = 11$ кВт; $n_0 = 1500$ об/хв; $\lambda_p = 2,2$; $\lambda_k = 3,0$; $s_n = 2,8$ %; $s_k = 19,5$ %; $k_i = 7,5$; $\eta = 87,5$ %; $J_d = 0,04$ кг·м².

Згідно з дослідженнями, описаними у [12], для забезпечення подолання резонансної зони в момент пуску час частотного пуску має бути мінімальним та на 20...50 % меншим за час прямого пуску.

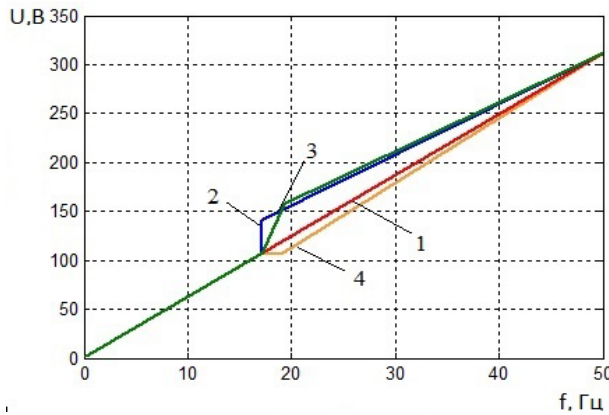


Рис. 5. Вольт-частотні характеристики: 1 — у разі лінійного закону частотного керування; 2 — у разі стрибкоподібного збільшення напруги живлення та лінійній зміні частоти; 3 — у разі одночасного стрибкоподібного збільшення напруги та частоти; 4 — у разі стрибкоподібного збільшення частоти та лінійної зміни напруги

Згідно з залежностями оптимального часу розгортки частоти АД від повної приведеної маси коливних частин ВМ [12] задаємо час розгортки частоти 1,268 с.

Подальші дослідження пуску зарезонансної ВМ з використанням частотно-регульованого електроприводу проводилися для чотирьох випадків, а саме: 1 — у разі лінійного закону частотного керування, 2 — у разі стрибкоподібного збільшення напруги живлення та лінійній зміні частоти, 3 — у разі одночасного стрибкоподібного збільшення напруги та частоти, 4 — у разі стрибкоподібного збільшення частоти та лінійній зміні напруги. Вольт-частотні характеристики для зазначених чотирьох випадків показано на рис. 5.

Відповідно до [3] під час пуску вібросистеми максимальне значення амплітуди коливань робо-

чого органа ВМ виникає не в момент збігу частоти примусової сили з частотою власних коливань, а дещо пізніше, тобто максимум амплітуди коливань зміщається у бік високих частот. Відповідно збільшення напруги та частоти живлення для випадків 2—4 (рис. 5) виконувалося, коли значення частоти живлення АД дорівнювало заданій резонансній частоті ВМ.

Стрибокподібне збільшення напруги на величину ΔU для випадків 2 та 3 (рис. 5) варто виконувати, за умови $I_1 = k_i I_{n1}$, де I_1 — поточне значення струму статора; k_i — перевантажувальна здатність АД за струмом; I_{n1} — номінальний струм статора АД [14]. Для випадку 2 (рис. 5) U становить 11 %, для випадку 3 (рис. 5) — 16 %.

Стрибокподібне збільшення частоти живлення на величину Δf для випадків 3 і 4 (рис. 5) виконувалося з урахуванням статичної характеристики вібраційного моменту ВМ, яка подана в [14]. Оскільки значний вплив вібраційного моменту спостерігається у вузькому діапазоні власних частот, то величина f вибиралася, коли значення вібраційного моменту є максимальним, тобто Δf становить 4 %.

Формування завдання частотного пуску ідентичне для обох асинхронних двигунів ВМ, тому дослідження пускових режимів електроприводу ВМ проводилося для одного АД.

Результати математичного моделювання частотного пуску асинхронного двигуна зарезонансної ВМ показано на рис. 6, де номери кривих кутової швидкості та моменту АД відповідають номерам позначень кривих вольт-частотних характеристик (рис. 5).

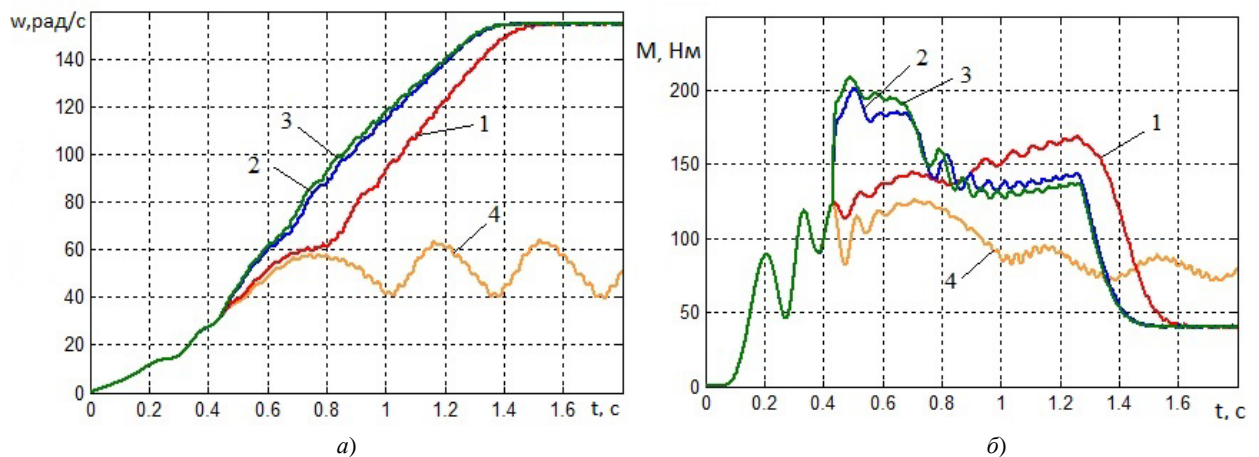


Рис. 6. Часові залежності: а — кутової швидкості обертання АД; б — моменту АД

Аналіз кривих кутової швидкості АД ВМ, поданих на рис. 6а показав, що у разі лінійної зміни напруги і частоти живлення (крива 1) спостерігається зменшення прискорення приводних АД. Це обумовлено тим, що під час резонансу значення моменту опору, який діє на приводний АД, а саме вібромоменту, близьке або дорівнює значенню моменту АД.

З рис. 6б видно, що подача стрибком тільки напруги живлення (крива 2) і одночасна подача стрибком напруги та частоти (крива 3) при подоланні резонансної зони дозволяє збільшити момент двигуна на 76 Нм і 81 Нм порівняно з випадком, коли частотний пуск здійснюється за лінійним законом (крива 1). Відповідно збільшення моменту усуває зменшення прискорення приводних АД в резонансі і дозволяє зменшити час пуску приблизно на 0,1 с.

У разі стрибкоподібного збільшення частоти та лінійній зміні напруги (крива 4) спостерігається зменшення моменту двигуна (рис. 6б) при підході до резонансної зони, що призводить до «застрягання» роторів приводних АД ВМ (рис. 6а) і не дозволяє їм розігнатися.

Таким чином, аналіз проведених досліджень показав, що для проходження резонансної зони в процесі частотного пуску АД ВМ доцільно застосовувати стрибкоподібне збільшення напруги, а також одночасне стрибкоподібне збільшення напруги і частоти. Проте подача стрибком тільки напруги живлення простіша в реалізації.

Висновки

Проведені дослідження пуску зарезонансної ВМ показали, що із застосуванням основних законів частотного керування зменшення амплітуди коливань робочого органа ВМ у резонансній зоні не спостерігається, оскільки час частотного пуску має бути меншим порівняно з прямим.

Результати математичного моделювання частотного пуску АД ВМ з лінійним законом керування, оптимальною розгорткою частоти та стрибкоподібним збільшення напруги та частоти у різних варіантах показали, що при проходженні зони резонансу під час пуску ВМ доцільно стрибкоподібно збільшувати тільки напругу живлення. Це забезпечить усунення «застрягання» у разі використання приводних двигунів потужністю меншою порівняно з нерегульованим електроприводом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. Ланець, «Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин,» Книга 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органа: навч. посіб. Львів, Україна: вид-во Львівської політехніки, 2018.
- [2] I. I. Blekhman, *Vibration Mechanics*. Singapore: World Scientific, 2000.
- [3] В. Ю. Ноженко, Д. Й. Родькін, і О. П. Чорний, «Пускові режими асинхронного електропривода зарезонансної вібраційної машини,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4 (133), с. 58-64, 2017.
- [4] М. П. Ярошевич, і Т. С. Ярошевич, *Динаміка розбігу вібраційних машин з дебалансним приводом*, моногр. Луцьк, Україна: ЛНТУ, 2010.
- [5] R. Markert, and M. Seidler, "Analytically based estimation of the maximum amplitude during passage through resonance," *International Journal of Solids and Structures*, no. 38, pp. 1975-1992, 2001.
- [6] C. Zhao, H. Zhu, R. Wang, et al., "Synchronization of two non-identical coupled exciters in a nonresonant vibrating system of linear motion. Part I: Theoretical analysis," *Shock and Vibration*, no. 16, pp. 505-515. 2009.
- [7] Т. С. Ярошевич, А. В. Селивонюк, і М. В. Петухов, «Спосіб пуску вібраційної машини з дебалансним приводом,» *Патент України В24В 31/067. № 38199*, 25.12.2008.
- [8] I. I. Blekhman, V. B. Vasil'kov, and N. P. Yaroshevych, "On Some Opportunities for Improving Vibration Machines with Self-Synchronization Inert," *Vibration Exciters Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, no. 42 (3), pp. 192-195, 2013.
- [9] І. М. Голодний, Ред., *Регульований електропривод*. Київ, Україна: ТОВ «ЦП «Компринт», 2015.
- [10] О. І. Толочко, *Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2016.
- [11] V. Nozhenko, O. Bialobrzheskyi, D. Rodkin, V. Druzhynina, and S. Yakymets, "The System of Forming the Control Mode of the Electric Drive During the Start-Up of the Vibration Machine," *World Science*, no. 7 (68), 2021. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30072021/7639.
- [12] В. Ю. Ноженко, О. П. Чорний, Д. Й. Родькін, і В. В. Ченчевой, «Керування пуском зарезонансної вібраційної машини з дебалансними віброзбуджувачами,» *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, вип. 27 (1249), с. 384-387, 2017.
- [13] М. О. Азаренков, В. О. Гірка, В. І. Лапшин, і В. І. Муратов, *Теорія коливань та хвиль*. Харків, Україна, 2005.
- [14] V. Nozhenko, D. Rodkin, and K. Bohatyrov, "Control of Passing the Resonance Zone During Start-up of Above Resonance Vibration Machine," in *2019 IEEE International conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Conference Proceedings*, Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 146-149. <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896625>.

Ноженко Вікторія Юріївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки, e-mail: nozhenkovika@gmail.com.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук

V. Yu. Nozhenko¹

Frequency Starting of the Electric Drive of the Above Resonance Vibration Machine

¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

An above resonance vibration machine with two-shaft unbalanced vibrators for compaction of rigid concrete mixtures in the form is considered. It is noted that for such vibration machines, an unregulated electric drive with an overestimated power of the drive motors is usually used. This enables to quickly overcome the resonant zone during start-up, but in steady state, the drive motors operate with significant underload, which leads to a deterioration in the energy performance of the motors. For the possible replacement of drive motors of excessive power with less powerful ones, the start-up of a resonant vibration machine using a frequency-controlled electric drive was investigated. Using mathematical modelling, a study was conducted to investigate the influence of the basic laws of frequency control on overcoming the resonant zone during start-up. The influence of the laws of frequency control was determined by comparing the maximum displacement of the working body of the vibration machine and the starting current of the motor during frequency and direct start-up. Analysis of the obtained simulation results showed that the basic laws of frequency control do not provide a reduction in the amplitude of oscillations of the working body of the vibration machine and dynamic loads when overcoming the resonant zone during the start-up process, if the frequency start-up time is greater than the direct time. Further studies were carried out with the optimal frequency sweep time for this vibration machine and replacing the drive motors with less powerful ones for the following four cases: with a linear frequency control law, with a stepwise increase in the supply voltage and a linear change in frequency, with a simultaneous stepwise increase in voltage and frequency, with a stepwise increase in frequency and a linear change in voltage. The stepwise increase in the voltage and frequency of the supply was performed at the moment when the value of the supply frequency of the induction motor was equal to the specified resonant frequency of the vibration machine. It is shown that with a linear change in the voltage and frequency of the supply, a decrease in the acceleration of the drive motors in the resonant zone is observed, and a stepwise increase in the frequency leads to "jamming" of the rotors of the drive motors of the vibration machine. It is noted that to overcome the resonant zone during the frequency start-up of induction motors of above resonant vibration machines, it is advisable to use only a step-like increase in voltage, which will allow setting the drive motors with the power required for steady-state operation.

Keywords: frequency-controlled electric drive, induction motor, frequency start, vibration machine, resonant zone.

Nozhenko Viktoriia Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering, e-mail: nozhenkovika@gmail.com