

В. Ю. НОЖЕНКО, асист., Кременчуцький національний університет;
О. П. ЧОРНИЙ, докт. техн. наук, проф., Кременчуцький національний університет;
Д. Й. РОДЬКІН, докт. техн. наук, проф., Кременчуцький національний університет;
В. В. ЧЕНЧЕВОЙ, канд. техн. наук, асист., Кременчуцький національний університет

КЕРУВАННЯ ПУСКОМ ЗАРЕЗОНАНСНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ З ДЕБАЛАНСНИМИ ВІБРОЗБУДЖУВАЧАМИ

Вступ. На сьогодні одним із питань покращення функціонування вібраційних машин (ВМ) з дебалансними віброзбуджувачами, які працюють у зарезонансній зоні, є вирішення проблеми пуску. Під час пуску при проходженні резонансної зони, виникають значні коливання робочого органу ВМ, що супроводжуються суттєвим динамічним навантаженням на конструкційні елементи, опори ВМ, ротори приводних двигунів та призводять до поломок пружних елементів, руйнування комунікацій, збільшення струму в обмотках статора, перевищення допустимих норм шуму та можливого «застрягання» роторів приводних двигунів. Для швидкого подолання резонансної зони приводні електродвигуни встановлюють із завищеною потужністю майже у 2÷5 разів або з підвищеним пусковим моментом, які, як правило, мають порівняно низьке значення ККД. Існує низка способів, які використовуються для зменшення резонансних коливань [1–3], але не всі вони дозволяють замінити приводні двигуни зарезонансних ВМ менш потужними. До того ж, розвиток технологій виробництва в тій чи іншій області потребує розвитку обладнання, зокрема, вібраційних систем, які б могли забезпечити раціональні технологічні режими. Вирішення комплексу вказаних проблем зарезонансних вібраційних машин можливе за допомогою застосування регульованого асинхронного електроприводу (ЕП).

Постановка проблеми. Застосування регульованого ЕП до зарезонансних ВМ передбачає, по-перше, зміну параметрів віброколивань ВМ в усталеному технологічному режимі, що дозволяє розширити функціональні можливості ВМ; по-друге, керування процесом пуску, а саме швидке проходження зони резонансу. Керування пуском ЕП ВМ доцільно здійснювати при заміні приводних двигунів на менш потужні, це надасть можливість підвищити енергоефективність ЕП. Слід відмітити, що швидке подолання резонансної зони можливе лише за умови, коли значення моменту двигуна буде більше, ніж максимальне значення вібраційного моменту в резонансі [4]. Враховуючи, що використання двигунів меншої потужності призводить до зменшення їх моменту в процесі пуску, регульований ЕП повинен забезпечити збільшення моменту двигуна при переході резонансної зони. Зазначену вимогу можна реалізувати шляхом збільшення напруги живлення приводних двигунів при підході до зони резонансу, коли вібраційний момент ще не почав стрімко зростати, після проходження резонансу керуючий вплив на збільшення напруги живлення може бути відмінений. Оскільки, існуючі скалярні закони частотного керування не дозволяють керувати напругою зазначеним чином, тому виникає необхідність їх удосконалення відповідно до особливостей роботи зарезонансних ВМ.

Метою роботи є синтез скалярного закону керування частотою регульованого ЕП зарезонансної ВМ для швидкого подолання резонансної зони. Досягнення поставленої мети дозволить також вирішити актуальну задачу зменшення потужності приводних двигунів та підвищення енергоефективності їх роботи.

Матеріали і результати досліджень. Як зарезонансна ВМ розглядалась вібраційна площадка (ВП) із двовальними дебалансними віброзбуджувачами блочної конструкції типу СМЖ–187А для ущільнення жорстких бетонних сумішей у формі [1]. Вібраційна площадка забезпечує гармонічні вертикально направлені коливання робочого органу за рахунок синхронного обертання валів із дебалансами в протилежні напрямки. Електроприводом такої ВП служать два ідентичні нерегульовані асинхронні двигуни (АД), жорстко зв'язані між собою.

Дослідження процесу пуску зарезонансної ВП проводилось шляхом математичного моделювання. Математична модель ВП детально наведена в [5] з конструкційними параметрами: повна приведена маса коливань частин ВМ із формою і бетонною сумішшю $m_{pl} = 9000$ кг; коефіцієнт жорсткості опор ВМ $c_0 = 1,268 \cdot 10^8$ Н/м; коефіцієнт демпфування $b_0 = 30600$ Нс/м; відстань дебаланса від осі обертання $r = 0,1$ м; маса дебаланса $m_0 = 18$ кг. Математична модель АД була побудована в трифазній системі координат [6]. Асинхронні двигуни потужністю 30 кВт кожен мають паспортні дані: $P_n = 30$ кВт; $n_0 = 1500$ об/хв; $\lambda_p = 1,4$; $\lambda_k = 2,3$; $s_n = 1,9\%$; $s_k = 14,0\%$; $k_i = 6,5$; $\eta = 91\%$; $J_d = 0,23$ кг·м² [7]. Аналіз отриманих результатів математичного моделювання прямого пуску ЕП ВП підтверджує вищезазначені теоретичні положення, а саме: пуск приводних двигунів здійснюється швидко, без «застрягання», проте в усталеному режимі АД працюють із суттєвим недовантаженням.

Необхідно зазначити, що дана ВП використовується для формування залізобетонних виробів різної конфігурації, що може призвести до зміни m_{pl} [1]. Так, максимальне значення m_{pl} становить 11000 кг, а мінімальне, коли m_{pl} складається тільки з маси коливань частин ВП та маси форми, становить 5000 кг. Відповідно до повної приведеної маси коливної частини ВП змінюють статичний момент маси дебалансів для забезпечення амплітуди віброколивань в усталеному технологічному режимі у межах $0,2 \cdot 10^{-3} \div 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

При застосуванні частотно–регульованого ЕП до ВП було замінено приводні АД потужністю 30 кВт на АД потужністю 11 кВт кожен із 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 [7].

Як відомо з [8], характер частотних перехідних процесів у розімкнутій системі частотного керування при заданому моменті навантаження, моменті інерції, а також законі регулювання напругою визначається темпом зміни частоти. При цьому для отримання найбільш якісного перехідного процесу необхідним є визначення часу зміни (розгортки) частоти t_r , оскільки для різних типів двигунів та різного навантаження дана величина може змінюватись. Так, при часі розгортки, приблизно $0,3 \div 0,5 t_r$, час частотного пуску може бути мінімальним та на $20 \div 50\%$ меншим за час прямого пуску. Тому дослідження пуску ВМ із частотно–регульованим ЕП (зміна напруги та частоти регулювалась за законом $U/f = const$) проводились для різного часу розгортки частоти, що дозволить визначити найбільш оптимальну, яка забезпечить швидке проходження резонансної зони. Час розгортки частоти змінювався від 0,7 с до 1,8 с. Як показник оптимального часу розгортки частоти обрано максимальне переміщення робочого органу ВМ (y_{max}) при проходженні резонансної зони, оскільки саме величина y_{max} спричиняє появу вібраційного моменту.

Знаходження оптимального t_r виконувалось для різних значень повної приведеної маси коливних частин ВМ (m_{pl}) від 6000 до 11000 кг, оскільки, як зазначалося вище, m_{pl} може змінюватись.

У результаті досліджень методом найменших квадратів були отримані залежності $y_{max} = f(t_r)$ для різних значень m_{pl} , які апроксимуються функцією

$$y_{max}(t_r) = a_0 + a_1 t_r + \frac{a_2}{t_r^2}, \quad (1)$$

де a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти апроксимації, які приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів моделі

Маса ВМ, кг	a_0	a_1	a_2	$t_{r,opt}$
6000	-0,010241422	0,012185142	0,0028657407	0,778
7000	-0,0088222798	0,010047459	0,0030741384	0,849
8000	-0,01367811	0,012072015	0,0055803353	0,974
9000	-0,011032831	0,0097534978	0,0054104016	1,035
10000	-0,0066913061	0,0066119557	0,0046264985	1,119
11000	-0,00060557591	0,0027314914	0,002755625	1,264

На рис. 1 наведено залежності максимального переміщення ВП від часу розгортки частоти для різних значень m_{pl} .

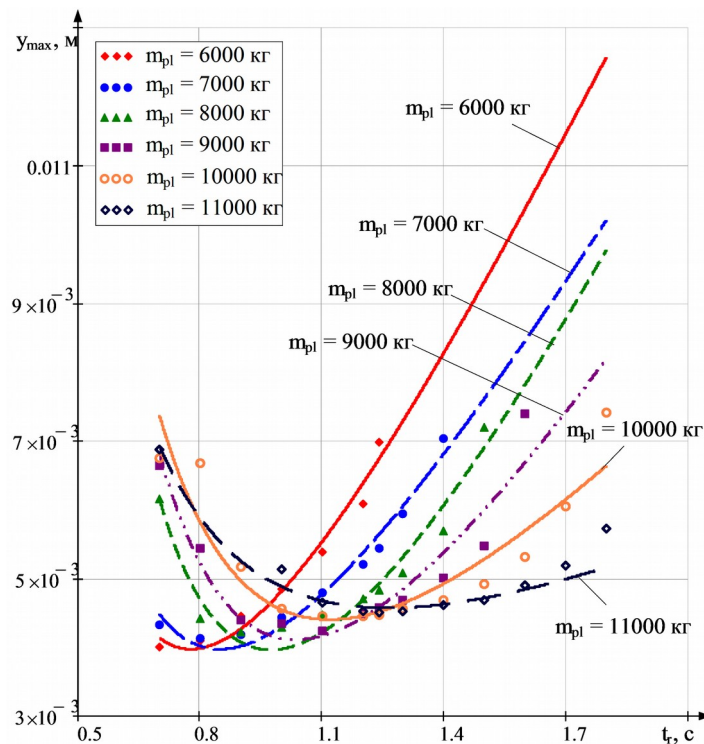


Рис. 1. Залежність максимального переміщення ВМ від часу розгортки частоти

Аналіз результатів показав, що отримані залежності мають явно виражений екстремум – мінімум функції, час, коли амплітуда переміщення мінімальна. Також із залежностей витікає, що зі збільшенням m_{pl} мінімум функції зміщується вправо, тобто спостерігається при більшому значенні часу розгортки частоти.

Мінімум функції $y_{max} = f(t_r)$ визначається з умови, що $y_{max} \rightarrow \min$, при $\frac{dy_{max}}{dt_r} = 0$, тоді $\frac{dy_{max}}{dt_r} = a_1 - \frac{2a_2}{t_r^3}$, звідси

оптимальний час розгортки частоти:

$$t_{r,opt} = \sqrt[3]{2a_2/a_1}. \quad (2)$$

Як видно з табл. 1, коефіцієнти моделі a_1 і a_2 змінюються залежно від m_{pl} , тому були отримані рівняння апроксимації у вигляді $a_1 = f(m_{pl})$ та $a_2 = f(m_{pl})$.

Для коефіцієнта моделі a_1 рівняння апроксимації має вигляд:

$$a_1(m_{pl}) = k_0 + k_1 m_{pl} + k_2 m_{pl}^2, \quad (3)$$

де $k_0 = -0,012927361$; $k_1 = 7,2071756 \cdot 10^{-6}$; $k_2 = -5,2461248 \cdot 10^{-10}$ – коефіцієнти апроксимації.

Для коефіцієнта моделі a_2 рівняння апроксимації:

$$a_2(m_{pl}) = l_0 + l_1 m_{pl} + l_2 m_{pl}^2, \quad (4)$$

де $l_0 = -0,026069407$; $l_1 = 7,263631 \cdot 10^{-6}$; $l_2 = -4,2065635 \cdot 10^{-10}$ – коефіцієнти апроксимації.

Тоді, відповідно до (2) залежність оптимального часу розгортки від повної приведенної маси коливних частин ВМ виглядатиме як

$$t_{r,opt}(m_{pl}) = \sqrt[3]{\frac{2(l_0 + l_1 m_{pl} + l_2 m_{pl}^2)}{k_0 + k_1 m_{pl} + k_2 m_{pl}^2}}. \quad (5)$$

Криву оптимального часу розгортки від повної приведенної маси коливних частин розглянутої ВП приведено на рис. 2.

Для перевірки ефективності застосування частотно-регульованого ЕП, з урахуванням оптимального часу розгортки частоти, були проведені дослідження частотного пуску ВП при максимальній m_{pl} , оскільки в даному випадку навантаження на приводні двигуни є найбільшим. Відповідно до рис. 2, оптимальний час розгортки частоти для АД потужністю 11 кВт при $m_{pl} = 11000$ кг становить 1,2683 с.

На рис. 3 приведено часові залежності швидкості та моменту АД при прямому пуску ($\omega_p(t)$, $M_p(t)$) та при частотному з оптимальним часом розгортки частоти ($\omega_{opt}(t)$, $M_{opt}(t)$).

Аналіз отриманих результатів показав, що при прямому пуску АД спостерігається «застрягання» двигуна, що унеможливає вихід ВМ в усталений технологічний режим. Застосування частотно-регульованого ЕП дозволяє усунути «застрягання» приводних двигунів, але при проходженні резонансної зони спостерігається зменшення прискорення приводних двигунів. Це пов'язано з тим, що при резонансі значення моменту опору, який діє на АД, а саме вібраційного моменту, близьке або дорівнює значенню моменту двигуна.

Для наглядного порівняння моментів у резонансі на рис. 4 зображено динамічні характеристики АД при прямому пуску $\omega(M_p)$, оптимальній розгортці частоти $\omega(M_{opt})$ та характеристика вібраційного моменту $\omega(M_v)$, з яких витікає, що при прямому пуску в резонансній зоні вібраційний момент перевищує момент АД на 64,64%, а при частотному з оптимальним часом розгортки частоти – на 16,286%. Таким чином, щоб повністю уникнути «застрягання» приводних двигунів при проходженні резонансної зони, момент АД повинен бути більшим за вібраційний.

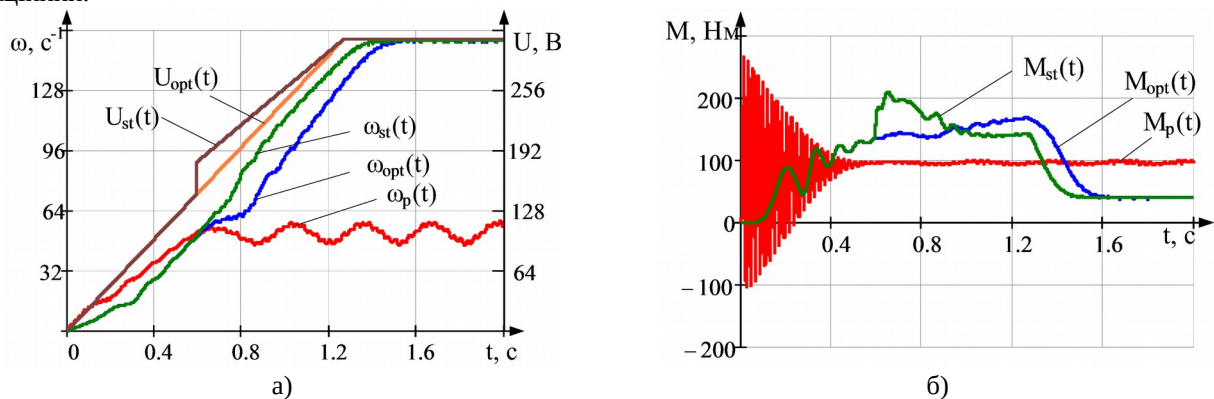


Рис. 3. Часові залежності: а) напруги живлення та швидкості двигуна ВП; б) моменту двигуна ВП

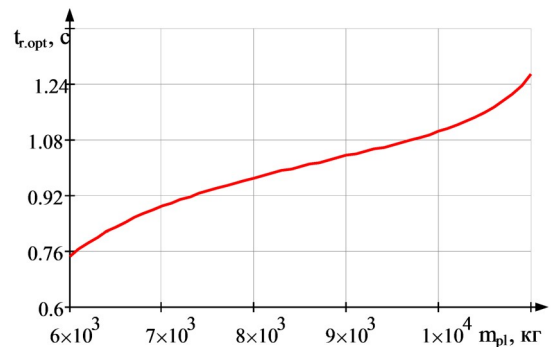


Рис. 2. Залежність оптимального часу розгортки частоти від повної приведенної маси коливних частин ВМ

Виходячи з виразу визначення електромагнітного моменту АД [6], де M_{em} прямо пропорційно залежить від напруги, збільшення M_{em} можливо досягти шляхом стрибкоподібної зміни напруги при підході до резонансної частоти.

За допомогою математичного моделювання для розглянутої ВП виконано дослідження частотного пуску АД з оптимальним часом розгортки частоти та із стрибкоподібною зміною напруги. Слід зазначити, що подачу стрибка напруги необхідно здійснювати при підході до резонансної частоти, до моменту стрімкого зростання вібромоменту. З рис. 4 видно, що максимальна величина вібраційного моменту в резонансній зоні лежить у вузькому діапазоні $50 \div 60 \text{ c}^{-1}$.

На рис. 3 наведено криві напруги: при оптимальному часі розгортки частоти $U_{opt}(t)$, коли U змінюється лінійно, та при стрибкоподібній її зміні – $U_{st}(t)$. Збільшення U виконувалось при $\omega = 50 \text{ c}^{-1}$ на 11 %. Аналіз кривих швидкості $\omega_{st}(t)$ та моменту двигуна $M_{st}(t)$, приведених на рис. 3, показав, що подача стрибком напруги в процесі пуску дозволяє збільшити момент двигуна при проходженні зони резонансу (рис. 3,б), уникнути «застрягання» АД (рис. 3,а) та зменшити час пуску. Відповідно, розглядаючи динамічну характеристику АД при стрибкоподібній зміні напруги $\omega(M_{st})$ та вібромоменту $\omega(M_v)$, видно, що збільшення напруги в резонансній зоні дозволяє момент двигуна перевищити вібромомент.

Висновки. Проведені дослідження пуску ВМ при заміні приводних двигунів потужністю в три рази меншою за номінальну та застосування частотно-регульованого ЕП дозволили визначити залежність оптимального часу розгортки частоти АД від повної приведеної маси коливних частин ВМ.

Приведено результати математичного моделювання розгону ВМ при застосуванні приводних АД меншої потужності для двох випадків: прямого пуску АД та регульованого з урахуванням оптимального часу розгортки частоти, які показали, що у другому випадку «застрягання» роторів приводних двигунів усувається порівняно з прямим пуском, але спостерігається зменшення їх прискорення через перевищення вібраційного моменту над моментом АД.

Для збільшення моменту двигуна запропоновано стрибкоподібну зміну напруги живлення при підході до резонансної зони, коли вібраційний момент починає стрімко зростати, що дозволяє повністю усунути «застрягання» приводних двигунів зарезонансної ВМ, зменшити навантаження на конструкційні елементи ВМ, збільшити термін служби обладнання, підвищити надійність вібраційної системи в цілому.

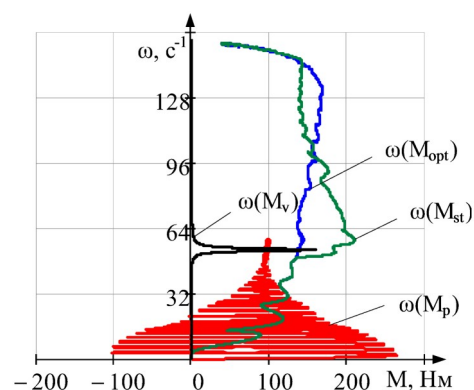


Рис. 4. Динамічні характеристики АД та статична характеристика вібраційного моменту

Список літератури: 1. Вибрации в технике : справочник в 6 т. – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 4 : Вибрационные машины и процессы. – 509 с. 2. Дмитриев В. Н. Переходные процессы зарезонансных вибрационных машин / В. Н. Дмитриев, Е. Н. Гаврилов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – № 4. – С. 52–55. 3. Tomchin D. I. Controlled passage through resonance for flexible vibration units / D. I. Tomchin, O. P. Tomchina, A. L. Fradkov // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/839105/>. – Дата звертання : 30 травня 2017. 4. Ярошевич Н. П. Динамика пуска вибрационных машин с дебалансным приводом / Н. П. Ярошевич, И. П. Забродец, А. В. Силивонюк [и др.] // Вибрації в техніці та технологіях. – 2015. – № 4 (80). – С. 113–120. 5. Ноженко В. Ю. Особенности пуска зарезонансных дебалансных машин с дебалансными вибровозбудителями / В. Ю. Ноженко, Д. И. Родькин, В. В. Ченчевой // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Тематический выпуск: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 12 (1121). – С. 218–223. 6. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с. 7. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с. 8. Сандлер А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М. : Энергия, 1974. – 328 с. 9. Андреев В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vibratsii v tekhnike: spravochnik. Vol. 4. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. Print. 2. Dmitriyev, V. N. and Gavrilov, Ye. N. "Perekhodnyye protsessy zarezonansnykh vibratsionnykh mashin". *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya*. No. 4. 2011. 52–55. Print. 3. Tomchin, D. I., Tomchina, O. P. and Fradkov, A. L. "Controlled passage through resonance for flexible vibration units." *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Web. 30 May 2017 <<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/839105/>> 4. Yaroshevich, N. P., et al. "Dinamika puska vibratsionnykh mashin s debalansnym privodom." *Vibratsiyy v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*. No. 4.80. 2015. 113–120. Print. 5. Nozhenko, V. Yu., Rodkin, D. I. and Chenchevoy, V. V. "Osobennosti puska zarezonansnykh debalansnykh mashin s debalansnymi vibrovobuditelnyami." *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «Kharkovskiy politekhnicheskiy institut». Tematicheskyy vypusk: Problemy avtomatizirovannogo yelektroprivoda. Teoriya i praktika*. No. 12.1121. 2015. 218–223. Print. 6. Kopylov, I. P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin*. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. Print. 7. Kravchik, A. E., et al. *Asinkhronnyye dvigateli seriyi 4A : spravochnik*. Moscow: Energoizdat, 1982. Print. 8. Sandler, A. S. and Sarbatov, R. S. *Avtomaticheskoye chastotnoye upravleniye asinkhronnyimi dvigatelyami*. Moscow: Energiya. 1974. Print. 9. Andreyev, V. P. and Sabinin, Yu. A. *Osnovy elektroprivoda*. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat. 1963. Print.

Надійшла 12.06.2017