

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО НАЛАШТУВАННЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ПРИВОДА

Ю. О. Ромасевич, доктор технічних, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net

Анотація. Асинхронні електроприводи значної кількості машин і механізмів обладнуються частотними перетворювачами (ЧП). Останні дають змогу значно підвищити регульовальні, енергетичні та динамічні властивості привода. Однак, нині не існує єдиного підходу до вирішення задачі опційних налаштувань ЧП, що викликає необхідність вироблення такого підходу з позиції оптимальності. Ця науково-прикладна задача знайшла своє вирішення у цій публікації. Метою дослідження є розробка методу оптимального налаштування привода з ЧП, який би був досить загальним та давав змогу легко відшукувати чисельні значення опційних параметрів ЧП. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань: провести постановку задачі оптимального налаштування ЧП, звести задачу до задачі безумовної оптимізації та надати рекомендації щодо вибору методу її розв'язання, навести приклад застосування розробленого методу для механізму підйому вантажу мостового крана. Для вирішення задачі були застосовані математичні методи моделювання асинхронних електричних машин, оптимізаційні і чисельні методи. Для реалізації оптимального налаштування ЧП розроблено методуку зведення вихідної задачі до задачі мінімізації складної нелінійної цільової функції, яка пов'язує чисельні значення опцій ЧП та обраний критерій оптимальності, а також обмеження на енергетичні показники частотно-керованого пуску асинхронного двигуна. Аналіз отриманих результатів проведено за комплексом динамічних та енергетичних показників. У результаті проведених досліджень встановлено, що обмеження постановочної частини задачі виконані, а критерій оптимізації набув мінімуму. Графіки функцій підтвердили прийнятність результатів та довели застосовність розробленого методу для вирішення прикладних задач налаштування ЧП. Перспективами подальших досліджень є розширення класу механізмів, для яких виконується оптимальне налаштування ЧП, та врахування інших значимих факторів у постановочній частині подібних задач.

Ключові слова: частотно-керований привод, налаштування, оптимізація, механізм підйому вантажу

Актуальність. Сучасний стан розвитку промислового виробництва, будівництва, транспорту, сільського господарства характеризується значним використанням асинхронних електроприводів. Їхні низькі регульовальні властивості компенсуються надійністю, економічністю, дешевизною та простотою експлуатації.

Для того, щоб отримати високі регульовальні властивості асинхронні електроприводи обладнують ЧП [1], які мають значну кількість опційних налаштувань. Досить часто інженерний персонал не в змозі раціонально налаштувати ЧП, оскільки для цього необхідно знати динамічні параметри об'єкта керування (механізм чи машина, яка приводиться в рух асинхронним приводом), особливості її експлуатації, параметри ЧП та діапазони їхнього варіювання. Крім того, спеціаліст повинен володіти методикою, яка ув'язує вихідну інформацію щодо машини з бажаним результатом. Відсутність такої методики досить часто робить процес налаштування непослідовним та не дозволяє отримати високі характеристики частотно-керованого приводу. Разом з тим, бажано отримувати оптимальні в деякому сенсі налаштування і враховувати обмеження на характеристики системи „машина – привод – ЧП”. Враховуючи все вище зазначене, задача оптимального налаштування ЧП є надзвичайно актуальною. Вона виходить за рамки інженерних розрахунків і становить науково-прикладну задачу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті [2] акцент зроблено на мінімізації пульсацій електромагнітного моменту двигуна, що досягнуто шляхом застосування ПІ-регулятора. Останній налаштовано із використанням методу чисельної оптимізації PSO. У публікації [3] застосовано каскадне регулювання за силою струму (внутрішній контур) та швидкістю приводу (зовнішній контур). Із застосуванням ПІ-регулятора така схема дає змогу отримати кращу швидкість відновлення динамічної системи. У роботі [4] проведено огляд стратегій покращення гармонійного складу струму на виході ЧП. Проведено огляд відомих підходів та вказано, що оптимальне рішення залежить від конкретного технологічного процесу, в який залучено частотно-керований привод.

У роботі [5] розроблено метод налаштування пристрою плавного пуску приводу стрічкового конвеєра, який дозволяє мінімізувати енерговитрати при забезпеченні обмежень на величини зусилля у стрічці та струму двигуна. У статті [6] описано методику оптимального налаштування ЧП для механізму зміни вильоту вантажу баштового крана. Тут проведена мінімізація силових та енергетичних критеріїв якості, однак поза увагою залишились обмеження зі сторони механічної та

електричної сторони системи. Дослідження, які наведені у цій роботі у значній мірі спираються на підхід, який є подібним до тих, що застосовані в роботах [5, 6].

Мета дослідження – розробка методу оптимального налаштування привода з ЧП, який би був досить загальним та давав змогу легко відшукувати чисельні значення опційних параметрів ЧП. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань: 1) провести постановку задачі оптимального налаштування ЧП; 2) звести задачу до задачі безумовної оптимізації та надати рекомендації щодо вибору методу її розв'язання; 3) навести приклад застосування розробленого методу для механізму підйому вантажу мостового крана.

Матеріали та методи дослідження.

Для проведення досліджень оберемо математичну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (АДКЗ). Його моделювання базується на основі рівнянь узагальненої асинхронної електричної машини [7], які можна отримати, використовуючи фундаментальні електричні закони: Ампера, Ленца та другий закон Кірхгофа. Використана у подальшому модель АДКЗ отримана із використанням таких припущень [7]: магнітна система машини не насичена; втрати в сталі відсутні; фазні обмотки машини симетричні й зміщенні одна відносно одної строго на 120° (для трифазних машин); магніторушійні сили обмоток і магнітні поля розподілені уздовж повітряного зазору між статором і ротором за синусоїдальним законом; величина повітряного зазору постійна; ротор машини симетричний; реальна розподілена обмотка замінена еквівалентною зосередженою, що створює ту ж магніторушійну силу. Запишемо систему диференціальних рівнянь (модель АДКЗ) [7], яка доповнена рівнянням динамічної рівноваги машини:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{1\alpha}}{dt} &= \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\
 \frac{di_{1\beta}}{dt} &= \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1 - k_r e_{2\beta}); \\
 \frac{di_{2\alpha}}{dt} &= \frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) k_s + e_{2\alpha}); \\
 \frac{di_{2\beta}}{dt} &= \frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) k_s - e_{2\beta}); \\
 M &= \frac{3}{2} p L_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}); \\
 M - M_0 &= J \frac{d\omega_{\delta\epsilon}}{dt},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму статора на нерухомі ортогональні координатні осі α і β ; $i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму ротора на ортогональні координатні осі α і β ; L_1, L_2 – індуктивності статорної та роторної обмоток; L_{12} – взаємоіндуктивність; k_r, k_s – коефіцієнти магнітного зв'язку ротора та статора відповідно ($k_r=L_{12}L_2^{-1}$; $k_s=L_{12}L_1^{-1}$); M – електромагнітний момент двигуна; p – кількість пар полюсів електричної машини; $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора напруги статора на координатні осі α і β ($u_{1\alpha}=U_{\max} \cos(2\pi \int f dt)$, $u_{1\beta}=U_{\max} \sin(2\pi \int f dt)$); U_{\max} – амплітуда фазної напруги живлення двигуна; f – частота напруги живлення двигуна; $e_{2\beta}, e_{2\alpha}$ – ЕРС, що індукуються потокозчепленнями ротора по осях α і β відповідно ($e_{2\alpha}=p\omega_{\delta\epsilon}(L_2 i_{2\beta}+L_{12} i_{1\beta})+i_{2\alpha} R_2$, $e_{2\beta}=p\omega_{\delta\epsilon}(L_2 i_{2\alpha}+L_{12} i_{1\alpha})+i_{2\beta} R_2$); R_1 – активний опір статорної обмотки; R_2 – зведений до статора активний опір роторної обмотки; X_1 – індуктивний опір статорної обмотки; X_2 – зведений до статора індуктивний опір роторної обмотки; δ – коефіцієнт розсіювання ($\delta=1-(1+X_1(2\pi f L_{12})^{-1}(1+X_2(2\pi f L_{12})^{-1})^{-1}$); M_0 – момент сил опору машини; $\omega_{\delta\epsilon}$ – кутова швидкість двигуна.

Як відомо [8], сучасні ЧП мають задані характеристики наростання та спадання частоти напруги живлення. У даному дослідженні будемо розглядати чотири з них:

лінійну f_l , S-подібну f_s , U-подібну f_u , подвійну S-подібну f_{2s} . Вказані характеристики описуються такими залежностями:

$$\begin{aligned} f_l &= f_0 + (f_{ном} - f_0) \frac{t}{T}; \\ f_s &= T^{-3} (f_0 (t - T)^2 (2t - T) + f_{ном} t^2 (3T - 2t)); \\ f_u &= T^{-2} (f_0 (t - T)^2 - f_{ном} t (t - 2T)); \\ f_{2s} &= T^{-5} (f_{ном} t^2 (15T^3 - 50tT^2 + 60t^2T - 24t^3) + f_0 (t - T)^2 \times \\ &\times (T^3 + tT^2 (2 + T) - 60t^2T (3 + T) + 4t^3 (6T))), \end{aligned} \quad (2)$$

де T – тривалість наростання частоти напруги живлення; $f_{ном}$ та f_0 – номінальна ($f_{ном}=50$ Гц) та початкова частоти напруги живлення АДКЗ під час його пуску. На рис. 1 зображено профілі вказаних характеристик при умові, що $f_0=5$ Гц.

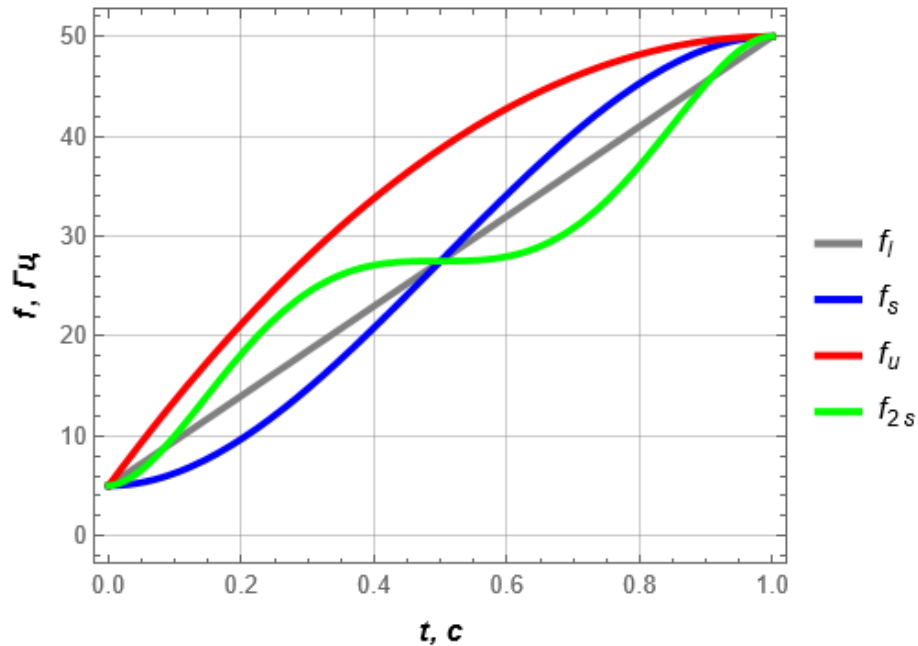


Рис. 1. Графіки наростання частоти напруги живлення АДКЗ

Крім того, для забезпечення перевантажувальної здатності АДКЗ при скалярному керуванні необхідно разом із частотою напруги змінювати її амплітуду:

$$U = U_0 + (U_{ном} - U_0) \frac{f}{f_{ном}}, \quad (3)$$

де U_0 – початкове значення напруги живлення; $U_{ном}$ – номінальна напруга живлення двигуна ($U_{ном}=380$ В).

У подальшому прийемо, що початковим станом системи „машина – двигун – ЧП” є стан спокою. Тоді початкові умови руху системи:

$$\begin{cases} i_{1\alpha}(0) = i_{1\beta}(0) = i_{2\alpha}(0) = i_{2\beta}(0) = 0; \\ \omega_{\partial\sigma}(0) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Задача Коші (1)-(4) не може бути розв'язана в аналітичному вигляді, оскільки рівняння (1) є нелінійними. Тому для інтегрування диференціальних рівнянь (1) було використано чисельні методи Рунге-Кутта [9].

Таким чином, будемо розглядати чотири параметри ЧП, які необхідно налаштувати: характеристику наростання частоти напруги живлення АДКЗ (2) (режимний параметр); початкове значення напруги U_0 та частоти f_0 живлення і тривалість наростання частоти до номінального значення T .

У задачу налаштування ЧП введемо такі обмеження:

$$\begin{cases} \omega_{\partial\sigma}(T) \geq \omega_{ном}; \\ \max(P) \leq P_{ном}; \\ 6^{-2} \max(i_{1\alpha}) \leq i_{ном}, \end{cases} \quad (5)$$

де $\omega_{ном}$, $P_{ном}$, $i_{ном}$ – номінальні величини кутової швидкості двигуна, його потужності та сили струму. Обмеження (5) задають вимоги щодо обов'язкового досягнення АДКЗ номінальної швидкості при пуску, неперевищені номінальної потужності та величини двократного номінального струму двигуна.

Критерієм оптимальності налаштування ЧП є такий вираз:

$$Cr = T + \frac{\int_0^T (R_1(i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2) + R_2(i_{2\alpha}^2 + i_{2\beta}^2)) dt}{\int_0^T (U_{1\alpha}i_{1\alpha} + U_{1\beta}i_{1\beta}) dt}, \quad (6)$$

який на компромісній основі враховує вимогу мінімізації тривалості наростання частоти напруги живлення та показник відносної енергоефективності (відношення витрат енергії до витрат енергії протягом пуску АДКЗ).

Задача (1)-(6) є досить складною, вона нелінійна в силу нелінійності моделі (1) та критерію (6), а наявність обмежень (5) значно ускладнює її розв'язання. Для того, щоб отримати розв'язок задачі зведемо її до задачі безумовної оптимізації:

$$\begin{aligned}
 f_{OF} &= Cr + P_1\delta_1 + P_2\delta_2 + P_3\delta_3, \\
 &0, \text{ якщо } \omega_{об}(T) \geq \omega_{ном}; \\
 P_1 &= \frac{\omega_{ном} - \omega_{об}(T)}{\omega_{ном}}, \text{ якщо } \omega_{об}(T) < \omega_{ном}; \\
 &0, \text{ якщо } \max(P) \leq P_{ном}; \\
 P_2 &= \frac{\max(P) - P_{ном}}{P_{ном}}, \text{ якщо } \max(P) > P_{ном}; \\
 &0, \text{ якщо } 6^2 \max(i_{1\alpha}) \leq i_{ном}; \\
 P_3 &= \frac{6^2 \max(i_{1\alpha}) - i_{ном}}{i_{ном}}, \text{ якщо } 6^2 \max(i_{1\alpha}) > i_{ном},
 \end{aligned} \tag{7}$$

де P_1, P_2, P_3 – штрафні функції, які відображають вимоги виконання обмежень (5); $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – вагові коефіцієнти, величини яких підібрані таким чином, щоб сформувати потрібну топологію цільової функції f_{OF} ($\delta_1=10^{10}$, $\delta_2=10^6$, $\delta_3=10^4$).

Для того, щоб отримати величину f_{OF} необхідно: 1) чисельно проінтегрувати систему рівнянь (1) при заданій характеристиці наростання частоти напруги живлення (2) та чисельних значень параметрів U_0, f_0, T ; 2) визначити величину критерію (6); 3) розрахувати величини штрафних компонентів (7) та отримати величину цільової функції (7).

Таким чином, вихідну задачу (1)-(6) вдалось звести до задачі безумовної оптимізації:

$$\arg \min_{c, U_0, f_0, T} f_{OF}(c, U_0, f_0, T), \tag{8}$$

де c – номінальна змінна, яка визначає характеристику наростання частоти напруги живлення АДКЗ:

$$f = \begin{cases} f_1, & \text{якщо } c \approx 0; \\ f_s, & \text{якщо } c \approx 1; \\ f_u, & \text{якщо } c \approx 2; \\ f_{2s}, & \text{якщо } c \approx 3. \end{cases} \tag{9}$$

Для відшукування мінімуму цільової функції (7) застосуємо модифікацію методу рою часточок VCT-PSO [10], яка володіє досить потужними пошуковими

властивостями. При цьому задамо розмірність рою 20 частинок, кількість ітерацій 50, а параметр $RC=5$.

Результати досліджень та їх обговорення.

Передусім вкажемо параметри, які обрані для розрахунку (таблиця 1).

1. Параметри механізму підйому вантажу мостового крана

Параметр	Одиниця виміру	Величина
$\omega_{ном}$	рад/с	60,2
$P_{ном}$	кВт	60
$i_{ном}$	А	90,1
p	-	5
M_0	Нм	1569,7
J	кгм ²	25970
R_1	Ом	0,06
R_2	Ом	0,033
X_μ	Ом	1,31
X_1	Ом	0,136
X_2	Ом	0,133

Будемо розглядати випадок, коли при пуску механізму підйому вантаж на гаку відсутній. Такі випадки досить часто зустрічаються при виконанні циклів навантажувально-розвантажувальних операцій. Тоді механічні перехідні процеси (пружні коливання вантажу на канаті, коливання мостової конструкції) не мають значимого впливу і ними можна знехтувати. У цьому випадку система рівнянь (1) описує пуск АДКЗ із одним приєднаним елементом, який володіє інерційними властивостями.

Області значень аргументів цільової функції (7) вказані в таблиці 2.

2. Області значень аргументів цільової функції

Аргумент	Область значень
c	0...3
U_0	0...380
f_0	0...50
T	0,1...3

Результати мінімізації цільової функції (7) зображені на рис. 2. З рис. 2 видно, що при роботі алгоритму VCT-PSO відбулося два різких зменшення цільової

функції. Вони асоціюються із перетворенням у нуль відповідних штрафних компонентів цільової функції: перший „зрив” f_{OF} виник на 21-й ітерації алгоритму (коли $P_2=0$), а другий на 33-й ітерації ($P_3=0$). Штрафний компонент P_1 з першої ж ітерації був рівний нулю.

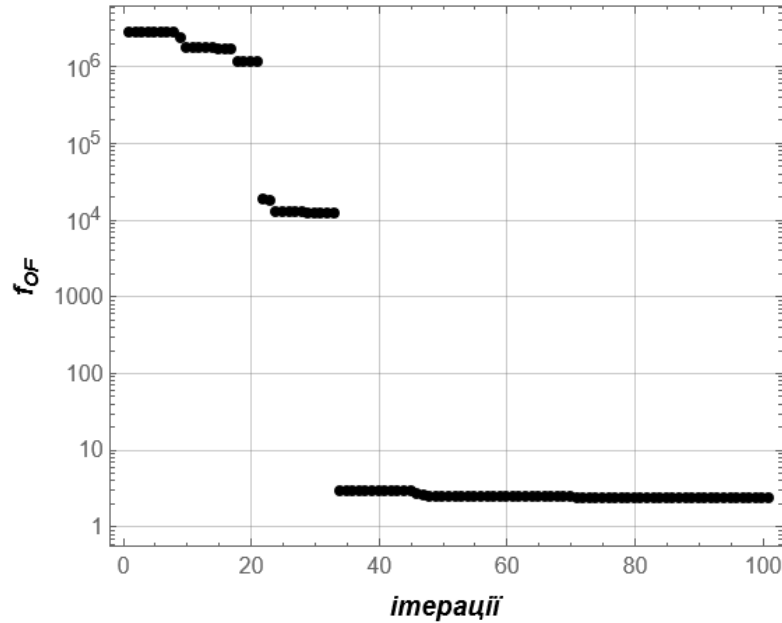
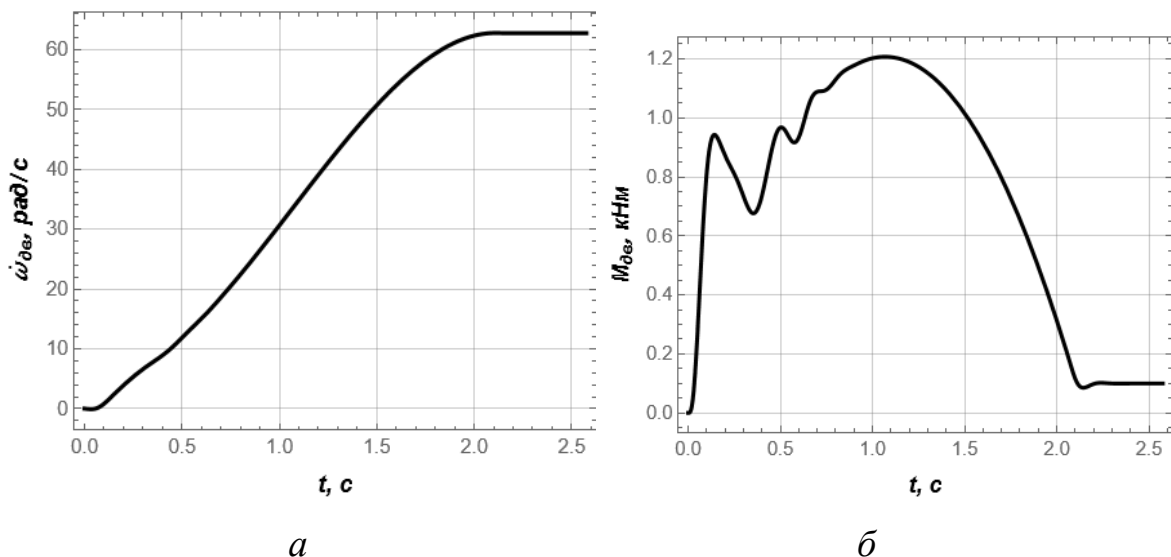


Рис. 2. Графік зменшення цільової функції (7) при застосуванні методу VCT-PSO (вісь ординат логарифмічна)

У результаті отримано чисельні значення аргументів цільової функції, на яких вона набуває мінімуму і які є оптимальними налаштуваннями ЧП: $c=1$ (S-подібна характеристика наростання частоти), $U_0=2,9$ В, $f_0=3,8$ Гц, $T=2,1$ с.

Для аналізу отриманих результатів наведемо графічні залежності (рис. 3).



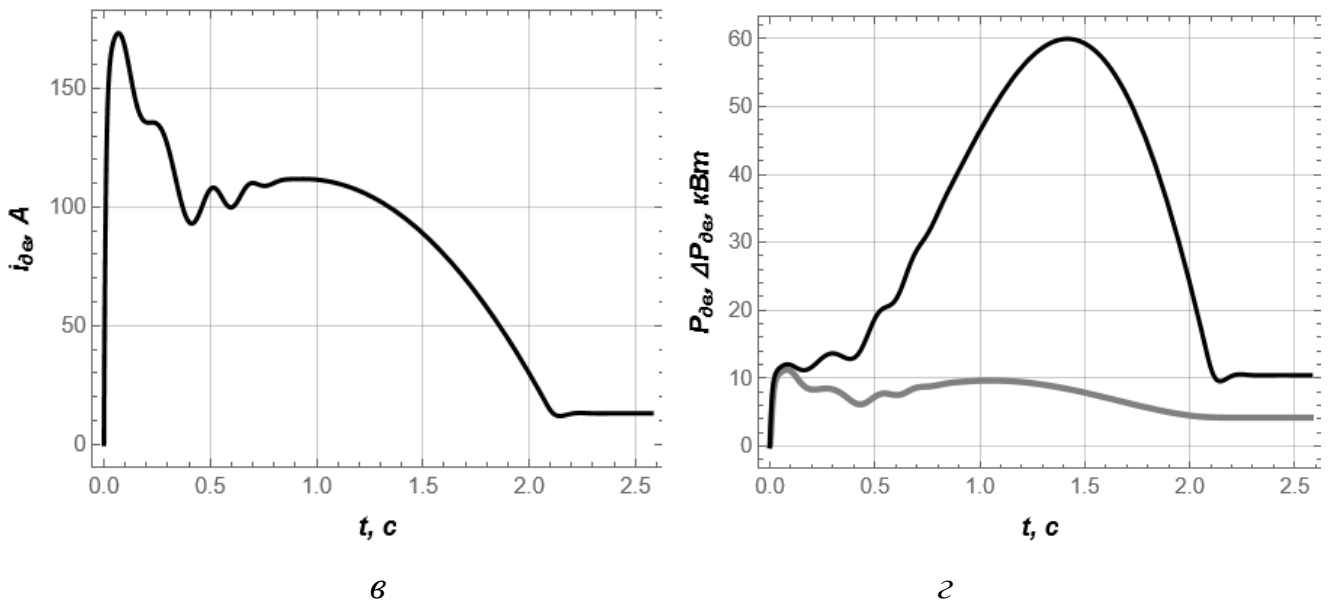


Рис. 3. Графіки характеристик частотно-керованого пуску АДКЗ механізму підйому вантажу при оптимальних налаштуваннях ЧП:

a – кутова швидкість АДКЗ; *б* – зведений електромагнітний момент АДКЗ; *в* – сила струму АДКЗ; *г* – споживана потужність (чорна крива) і втрати потужності (сіра крива) АДКЗ

Аналіз графічних залежностей, які наведено на рис. 3 показав, що оптимальний частотно-керований пуск АДКЗ відбувається за S-подібною характеристикою. Електромагнітний момент двигуна (рис. 3, б) має явно виражений екстремум. У постановці задачі (1)-(7) його величина не була врахована. Тому в деяких випадках така величина крутного моменту може викликати поломки в механічних елементах привода. Для того, щоб цього не сталося, необхідно враховувати вимогу неперевикнення граничного значення моменту у постановочній частині задачі. Це є перспективою подальших досліджень у даному напрямку. Пік сили струму АДКЗ (рис. 3, г) припадає на 0,1 с – в момент, коли не відбувається рух ротора. При цьому струм наростає з нульового значення до моменту, коли ротор АДКЗ починає рух і у його обмотках з'являється ЕРС, яка зменшує наростання струму. Для цього ж періоду часу характерна відносно низька енергоефективність АДКЗ. Дійсно вся енергія, яка підводиться до привода, перетворюється в джоулеву теплоту. У подальшому частина енергії перетворюється в кінетичну енергію руху ротора АДКЗ та приєднаних елементів (зубчастих коліс, муфт, канатного барабана механізму

підйому вантажу тощо) і перерозподіл енергетичних потоків змінюється: енергоефективність привода зростає.

Крім якісного аналізу, проведемо аналіз чисельних оціночних показників оптимального режиму пуску АДКЗ (таблиця 3).

3. Оціночні показники оптимального режиму пуску АДКЗ

Показник	Одиниця виміру	Величина
Максимальний електромагнітний момент	кНм	1,206
Середньоквадратичне значення електромагнітного моменту	кНм	0,841
Максимальна потужність	кВт	59,97
Середньоквадратичне значення потужності	кВт	36,24
Максимальне значення сили струму привода	А	173,3
Витрати енергії	кДж	79,79
Втрати енергії	кДж	18,36

Аналіз показників, які наведені в таблиці 3, показує, що обмеження щодо неперевиконання максимальної сили струму та номінальної потужності АДКЗ витримані. Середнє (за весь період пуску) значення ККД рівне 77 %. Зазначимо, що при відсутності обмежень можна досягнути більшого значення ККД, що є перспективою подальших досліджень (звісно, що такі дослідження повинні спиратися на обґрунтовану відсутність обмежень щодо сили струму, потужності, електромагнітного моменту тощо).

Висновки і перспективи. Результати проведеного дослідження дають підстави зробити такі висновки:

1. Розроблено метод пошуку оптимальних налаштувань частотно-керованого привода, який забезпечує обмеження, що накладаються за умовами виконання пуску АДКЗ, та мінімізує критерій якості. Останній може бути заданим довільно у сенсі своєї фізичної суті (енергетичний, електричний, динамічний, кінематичний тощо) та математичної форми (нелінійний, недиференційовний, розривний тощо). Таким чином, можна вважати, що метод є досить загальним. Для його застосування

необхідно мати параметри АДКЗ, для якої виконується оптимальне налаштування ЧП.

2. Наведений у роботі приклад розрахунку оптимальних параметрів ЧП для АДКЗ механізму підйому вантажу мостового крана дає підстави вважати, що отримані результати повністю задовольняють поставленим вимогам. Дійсно, максимальні значення потужності (59,97 кВт) та сили струму (173,31 А) не перевищують встановлені граничні значення. Середнє значення ККД АДКЗ при пуску рівне 77 %, тривалість пуску рівна 2,1 с.

3. Реалізацію методу пропонується виконати в формі прикладного програмного забезпечення, яке буде зручним для використання інженерами, що виконують налаштування та експлуатацію частотно-керованих електроприводів. Це визначає перспективи подальших прикладних досліджень у цьому напрямку.

Список використаних джерел

1. Variable frequency drives energy efficiency reference guide. Natural Resources Canada. Режим доступу: <https://www.cranebuzz.com/Allied%20Products/ConductorControlsEquipmentHandlingSystems/VariableFrequencyDrivesTechnicalGuide.pdf>
2. Mudundi, R., Malligunta, K. K. (2019) Variable frequency drive optimization using torque ripple control and self-tuning PI controller with PSO. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 9(2), 802-814. Available at: <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i2.pp802-814>
3. Dave, R., Tilva, V. (2018). Development of Cascaded PI Tuning of Variable Frequency Drive. *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*. Available at: <https://doi.org/10.1109/icirca.2018.8597175>
4. Wallace, I. (2021). Harmonic Mitigation Strategies in Variable Frequency Drive Applications. *ASHRAE Transactions*, 127(1).
5. Romasevych, Y. Loveikin, V., Bakay, B., Rudko, I. (2023) Optimal tuning of belt conveyor soft-starter via PSO-Rot-Ring method. *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest, Series D*, 85(2) 73-84.
6. Romasevych, Yu., Loveikin, V., Stekhno, O. (2024). Parametric optimization of frequency-controlled start-up of dynamic system "trolley-load" of tower crane trolley movement mechanism. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 20(3). Available at: [https://doi.org/10.31548/dopovidy.3\(109\).2024.018](https://doi.org/10.31548/dopovidy.3(109).2024.018)
7. Razik, H. (2011) Handbook of asynchronous machines with variable speed. 1st ed – London: John Wiley & Sons, Inc. 409 p.

8. Instruction Manual. Inverter FR-F800. Art. no.: 292550. Available at: https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/inv/uk_292550/M_FR-F800_B_UK_292550.pdf

9. Chapra, S. C., Canale, R. P. (2010) Numerical methods for engineers. 6th ed. McGraw-Hill, 994 p.

10. Romasevych, Y., Loveikin, V., Loveikin, Y. (2022). Development of a PSO modification with varying cognitive term. *In 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* 1-5. Kharkiv: IEEE. Available at: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916413>.

References

1. Variable frequency drives energy efficiency reference guide. Natural Resources Canada. Available at: <https://www.cranebuzz.com/Allied%20Products/ConductorControlsEquipmentHandlingSystems/VariableFrequencyDrivesTechnicalGuide.pdf>

2. Mudundi, R., Malligunta, K. K. (2019). Variable frequency drive optimization using torque ripple control and self-tuning PI controller with PSO. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 9(2), 802-814. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i2.pp802-814>

3. Dave, R., Tilva, V. (2018). Development of Cascaded PI Tuning of Variable Frequency Drive. *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*. Available at: <https://doi.org/10.1109/icirca.2018.8597175>

4. Wallace, I. (2021). Harmonic Mitigation Strategies in Variable Frequency Drive Applications. *ASHRAE Transactions*, 127(1).

5. Romasevych, Y., Loveikin, V., Bakay, B., Rudko, I. (2023). Optimal tuning of belt conveyor soft-starter via PSO-Rot-Ring method. *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest, Series D*, 85(2) 73-84.

6. Romasevych, Yu., Loveikin, V., Stekhno, O. (2024). Parametric optimization of frequency-controlled start-up of dynamic system "trolley-load" of tower crane trolley movement mechanism. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 20(3). Available at: [https://doi.org/10.31548/dopovid.3\(109\).2024.018](https://doi.org/10.31548/dopovid.3(109).2024.018)

7. Razik, H. (2011) Handbook of asynchronous machines with variable speed. 1st ed – London: John Wiley & Sons, Inc. 409 p.

8. Instruction Manual. Inverter FR-F800. Art. no.: 292550. Available at: https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/inv/uk_292550/M_FR-F800_B_UK_292550.pdf

9. Chapra, S. C., Canale, R. P. (2010) Numerical methods for engineers. 6th ed. McGraw-Hill, 994 p.

10. Romasevych, Y., Loveikin, V., Loveikin, Y. (2022). Development of a PSO modification with varying cognitive term. *In 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* 1-5. Kharkiv: IEEE. Available at: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916413>

DEVELOPMENT OF A METHOD OF A VARIABLE FREQUENCY DRIVE OPTIMAL TUNING

Y. Romasevych

Abstract. *Asynchronous electric drives of a significant number of machines and mechanisms are equipped with frequency inverters (FI). The latter make it possible to significantly increase the control, energy and dynamic properties of the drive. However, at present there is no single approach to solving the problem of optional tunings of the FI, which necessitates the development of such an approach from the standpoint of optimality. This scientific and applied problem has found its solution in this publication. The purpose of the research is to develop a method for optimal tuning of the drive with FI, which would be quite general and would allow to easily find the numerical values of the optional parameters of the FI. Achieving the set purpose involves solving the following tasks: to state the problem of optimal tuning of the FI, to reduce the problem to an unconstrained optimization problem and to provide recommendations on the choice of a method for its solution, to give an example of the application of the developed method for the hoisting mechanism of a bridge crane. To solve the problem, mathematical methods of modeling asynchronous electric machines, optimization and numerical methods were used. To implement optimal tuning of FI, a method of reducing the initial problem to the problem of minimizing a complex nonlinear objective function was developed, which connects the numerical values of the FI options and the selected optimality criterion, as well as constraints on the energy indicators of the variable frequency start of an asynchronous motor. The analysis of the obtained results was carried out according to a complex of dynamic and energy indicators. As a result of the conducted research, it was established that the constraints of the statement part of the problem are met, and the optimization criterion has reached a minimum. The plots of the functions confirmed the acceptability of the results and proved the applicability of the developed method for solving applied problems of FI tuning. Prospects for further research are to expand the class of mechanisms for which optimal tuning of the FI is performed, and to take into account other significant factors in the statement part of such problems.*

Key words: *variable frequency drive, tuning, optimization, hoist mechanism*