

Академік НАН України Г. Г. Півняк, В. І. Кириченко,
В. В. Кириченко, Р. О. Боровик

Комплектний синхронний електропривід з програмним керуванням

Algorithms of the program control over the feed source of an engine are proposed. The feed source includes gages and two regulators, and the microprocessor control system has two channels for the realization of the algorithms and the compensation of the instability of parameters of the electric drive, respectively.

Невиправдано значне споживання електроенергії у промисловості зумовлене низкою чинників, серед яких нераціональні режими роботи потужних синхронних двигунів. Причиною значних витрат електроенергії є неповне використання встановленої потужності двигунів у сталих режимах. Для ряду потужних механізмів, зокрема гірничорудної промисловості, запас встановленої потужності нерідко перевищує 15–30% і навіть більше. Це пояснюється дискретністю існуючої шкали номінальних потужностей двигунів і її невідповідністю до конкретних механізмів, труднощами попереднього визначення моменту статичного навантаження, необхідністю забезпечення успішного самозапуску. Вагомим значення набула проблема погіршення к. к. д. двигуна. З економічної точки зору згадані обставини зумовлюють невиправдане зростання вартості як власне електроприводу, так і експлуатаційних витрат при його використанні.

Серед відомих напрямів поліпшення ситуації можна виділити такі: по-перше, більш ретельне визначення необхідної потужності двигуна; по-друге, для промислових установок, для яких експериментально встановлені режими використання, доцільна розробка більш раціональної шкали серійних двигунів. На значну увагу заслуговує розробка нових джерел живлення і методів керування ними для підвищення надійності у сталих та динамічних режимах потужних синхронних двигунів.

На сьогодні відомі розробки, що спрямовані на більш ефективне використання існуючих нереверсивних збудників шляхом застосування циклічного керування [1]. Однак динамічні навантаження електромеханічної системи при цьому зростають. Перспективніше використовувати програмне керування реверсивним збудником [2]. Розроблені алгоритми забезпечують підвищення середньої складової моменту при одночасному обмеженні періодичної. Останнє особливо важливе для двомасових систем з пружністю, для яких характерним є виникнення нестационарного резонансного режиму з високими динамічними навантаженнями і навіть руйнуванням елементів приводу. Програмне керування реверсивним збудником поліпшує умови асинхронного пуску, однак мало впливає на рівень навантажень самозапуску. І для їх зниження слід регулювати напругу статора в момент її відновлення [3].

Таким чином, можна зробити досить виважений висновок про доцільність розробки електроприводу із програмно-керованим джерелом живлення обмоток двигуна. Алгоритми функціонування повинні враховувати тип електромеханічної системи (одно- або двомасова), вимоги щодо пускового струму і рівня напруги на обмотках.

У Національному гірничому університеті впродовж останніх років виконано обсяг робіт з обґрунтування алгоритмів програмного керування джерелом живлення обмоток синхрон-

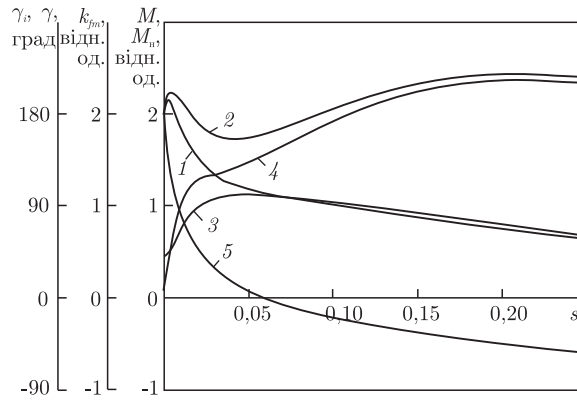


Рис. 1. Вплив програмного керування напругою збудника з коефіцієнтом форсування 2 для підвищення середнього моменту: 1 — результуюча амплітуда періодичної складової моменту; 2 — результуючий середній момент; 3 — амплітуда періодичної складової за відсутності збудника; 4 — середній момент за відсутності збудника; 5 — розрахунковий кут двигуна

них двигунів. Узагальнені результати досягнень у напрямі створення програмно керованого комбінованого джерела живлення синхронних двигунів наступні.

Модель електромагнітного моменту. Для квазістаціонарного режиму миттєвий електромагнітний момент на i -й ділянці керування отримано у вигляді

$$m_{ei} = u_{mi}^2 f_{11i} - \frac{u_{mi} u_{fi}^m \sin \gamma_i}{2 f_{31i}} + \left[u_{mi} \sqrt{u_{mi}^2 f_{21i}^2 + \frac{u_{fi}^m}{4 f_{31i}^2} - f_{21i} \frac{u_{mi} u_{fi}^m}{f_{31i}} \cos(\gamma_i - \gamma)} \right] \sin(2\Theta + \alpha_{ni}). \quad (1)$$

Перші два доданки визначають середню складову електромагнітного моменту, а третій — амплітуду і частоту його періодичної складової (f_{11i} , f_{21i} , f_{31i} — функції параметрів двигуна і ковзання; γ_i , γ , α_{ni} — кути керування і розрахунковий кут, фаза періодичної складової моменту). Модель дозволяє формувати бажану форму механічної характеристики двигуна з оптимізацією періодичної складової моменту.

Важкий пуск одномасової системи. Мета програмного керування у цьому режимі — забезпечення якомога більшого середнього моменту або підтримка його на достатньому рівні в процесі розганяння до ковзання $s = 0$ включно. Встановлено, що для цього режиму доцільне регулювання із номінальною напругою статора, кутом керування $\gamma_i = -\pi/2$ та найбільшим рівнем форсування напруги збудника (за необхідності можливе обмеження періодичної складової електромагнітного моменту). Встановлено, що у зоні значних ковзань підвищення середньої складової електромагнітного моменту та зменшення періодичної — незначні. Результати програмного керування реверсивним збудником двигуна СДМЗ-24-59-80УХЛ4 з номінальною потужністю 4 МВт і швидкістю обертання 75 об/хв подано на рис. 1 у вигляді кривих.

Напруга на обмотці збудження під час пуску не перевищує 1000 В. При номінальному навантаженні достатній коефіцієнт форсування напруги збудника слід визначати як

$$k_f^{\min} = \frac{2 f_{31} (u_m^2 f_{11} - M_H / M_{\text{баз}} k_3)}{u_{f_{\text{ном}}} u_m \sin(-\pi/2)}, \quad (2)$$

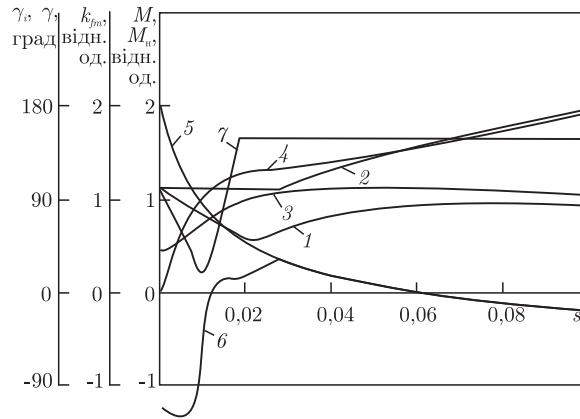


Рис. 2. Вплив програмного керування при додатковому опорі у колі збудження 3,2 Ом та коефіцієнті форсування напруги збудника 1,75: 1 — результуюча амплітуда періодичної складової; 2 — підсумковий середній момент; 3 — амплітуда періодичної складової без використання збудника; 4 — середній момент від живлення статора; 5 — розрахунковий кут двигуна; 6 — кут керування; 7 — коефіцієнт форсування

де k_3 — коефіцієнт запасу за моментом; M_n , $M_{баз}$ — номінальний і базовий моменти; $u_{fном}$ — зведена номінальна напруга збудника.

Мінімізація періодичної складової. Для важких умов запуску напруга живлення статора номінальна, а система керування забезпечує достатній середній момент за умови можливо меншої амплітуди періодичної складової. Мінімуму її амплітуди відповідає кут керування напругою збудника $\gamma_i = \gamma$, причому амплітуда зменшується при підвищенні коефіцієнта форсування. Доведено, що таке керування можливе при ковзаннях, коли середній момент не знизиться до рівня мінімально допустимого для розганяння до ковзання $s = 0$. При менших ковзаннях і насиченому збуднику кут керування

$$\gamma_{i3} = + \arcsin \left(\frac{2f_{31}(u_m^2 f_{11} - m_3)}{u_m u_{f3}^m} \right), \quad (3)$$

де m_3 — мінімальний рівень середнього моменту.

Для ненасиченого режиму амплітуду періодичної складової напруги збудника слід вибирати за виразом

$$u_{f3} = \frac{2f_{31}(u_m^2 f_{11} - m_3)}{u_m \sin \gamma_i}, \quad (4)$$

а кут керування визначати як

$$\gamma_i = \arctg \left(\frac{u_m^2 f_{11} - m_3}{u_m^2 f_{21} \cos \gamma} \right). \quad (5)$$

Ефективність розробленого алгоритму ілюструють криві на рис. 2, розраховані при обмеженні мінімуму середнього моменту на рівні $1,3M_n$.

Керування легким пуском. Особливість режиму — у використанні наперед заданої залежності статичного моменту від ковзання, причому на значній ділянці ковзань він значно менший за номінальний. Прийнято, що для успішного розганяння досить коефіцієнта запасу середнього моменту $k_3 = 1,1 \dots 1,3$. Враховано можливість одночасного регулювання обох

напруг живлення обмоток двигуна, необхідність мінімізації періодичної складової моменту. Мінімальний рівень напруги статора визначено як

$$u_{mi} = \frac{u_{fi}^m \sin \gamma_i}{4f_{31}f_{11}} + \sqrt{\left(\frac{u_{fi}^m \sin \gamma_i}{4f_{31}f_{11}}\right)^2 + \frac{m_{cm}k_3}{f_{11}}}, \quad (6)$$

де m_{cm} — момент статичного навантаження.

Вираз для повного струму двигуна на i -й ділянці програмного керування напругами обмоток отримано у вигляді

$$i_i^m = \sqrt{\left[\left(\frac{u_{mi}}{x_{dm}}\right)^2 + \left(\frac{u_{fi}^m}{f_{31}}\right)^2 - 2\frac{u_{mi}}{x_{dm}}\frac{u_{fi}^m}{f_{31}}\cos(\alpha_p + \gamma_i)\right]\sin^2\alpha_{di} + \left(\frac{u_{mi}}{x_{dm}}\right)^2\cos^2\beta_p}, \quad (7)$$

де x_{dm} , α_p , β_p , α_{di} — розрахункові модуль опору за поздовжньою віссю та кути як функції ковзання.

Керування самозапуском двомасової системи. При розробці алгоритму враховано початкові умови. Встановлено, що після відновлення живлення миттєвий момент повинен бути не нижчим за момент статичного навантаження. Напругу живлення статора запропоновано змінювати від початкового рівня u_{ms} до заданого $u_m^{\text{зад}}$ відповідно до вимог щодо якості перехідного процесу. За $u_m^{\text{зад}}$ слід брати номінальну напругу. Після відновлення напруги її слід змінювати за виразом:

$$u_{mt} = u_m^{\text{зад}} - (u_m^{\text{зад}} - u_{ms})e^{-t/\tau},$$

де τ — постійна часу. При розробці алгоритму керування враховано рівняння для пружного моменту m_y [3]:

$$m_y''\frac{T}{c} + \frac{\beta}{c}\left(\frac{T_M + Ti^2}{T_M}\right)m_y' + \left(\frac{T_M + Ti^2}{T_M}\right)m_y = \frac{iT}{T_M}m_{cm} + m_e - \frac{T\omega}{i}i', \quad (8)$$

де T , T_M , c , i , m_{cm} , m_e , ω — моменти інерції двигуна і механізму, жорсткість пружного зв'язку, миттєве передаточне число зачеплення, моменти статичного навантаження та електромагнітний і кутова частота обертання двигуна відповідно.

В результаті розв'язання рівняння (8) отримано пружний момент вигляду

$$m_y(t) = q_1(t) + u_m^2\frac{c}{T}[f_{11}q_2(t) + f_{21}q_3(t)] - u_m u_f^m\frac{c}{2Tf_{31}}[\sin\gamma q_2(t) + q_3(t)], \quad (9)$$

де $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$ — функції часу, ковзання і параметрів електроприводу.

За необхідності забезпечити бажаний характер пружного моменту у вигляді $m_y^{\text{баж}}(t)$ напругу живлення статора слід визначати за виразом:

$$u_{m_{1,2}}^{\text{баж}} = \frac{u_f^m u_1(t)}{2} \pm \sqrt{\frac{u_f^{m^2} u_1^2(t)}{4} - u_2(t)}. \quad (10)$$

Тут

$$u_1(t) = \frac{\sin\gamma q_2(t) + q_3(t)}{2f_{31}[f_{11}q_2(t) + f_{21}q_3(t)]}, \quad u_2(t) = \frac{T[q_1(t) - m_y^{\text{баж}}(t)]}{c[f_{11}q_2(t) + f_{21}q_3(t)]}.$$

Особливості функціональної схеми. У складі програмно-керованого джерела живлення — реверсивний тиристорний збудник і регулятор напруги статора, датчики струмів, електромагнітного моменту та кута обертання ротора. Для компенсації негативного впливу нестабільності параметрів електромеханічної системи використано додатковий канал керування на основі методів нечіткої логіки. Покращення форми електромеханічних характеристик двигуна можливе за рахунок використання спеціальної обмотки збудження або зовнішніх конденсаторів [4].

На закінчення зробимо такі висновки.

1. Перспективний напрям удосконалення синхронних приводів — одночасне програмне формування напруги живлення обмоток статора і збудження в асинхронних режимах. При цьому підвищується середній момент двигуна, зменшується його періодична складова та пусковий струм. На основі вимог до приводу відпрацьовані алгоритми керування комбінованим джерелом живлення обмоток двигуна. Для важких умов алгоритми забезпечують середній момент, достатній для плавного розганяння двигуна до синхронної швидкості. Для легкого запуску досягнуто істотне зниження споживаного із мережі струму і значне зменшення періодичної складової моменту, що обмежує резонансні навантаження електроприводу.

2. Для найбільш важкого з точки зору динамічних навантажень режиму самозапуску відпрацьовано алгоритм формування напруги статора з метою їх обмеження на заданому рівні. Враховано, що на момент її відновлення електромагнітний момент не повинен бути меншим за момент статичного навантаження, а плавний перехід на алгоритми керування звичайним пусковим режимом повинен забезпечити регулювання напруги статора. Для виконання цих вимог отримано відповідні аналітичні залежності.

3. Виконаний комплекс досліджень і розроблені алгоритми програмного керування спрямовані на створення нового типу синхронного електроприводу підвищеної надійності, що дасть змогу знизити встановлену потужність синхронних двигунів приводу з відповідним зниженням їх маси і ціни. Одночасно за рахунок цього зросте к. к. д. двигуна, а його підвищення лише на 1% для гірничозбагачувального комбінату потужністю 20 млн т дасть економію споживаної електроенергії близько 2,8...4,34 млн. кВт·год.

1. *Промышленные испытания устройства циклической ресинхронизации на синхронном двигателе газового компрессора / А. М. Кременецкий, Т. И. Жучкина, С. Н. Станкевич и др // Промышл. энергетика. — 1982. — № 7. — С. 38–40.*
2. *Пивняк Г. Г., Школа Н. И., Кириченко В. В. Роль программного управления в обеспечении надежности многомассовых систем с синхронными электроприводами // Металлургич. и горно-обогатит. пром-сть. — 2002. — № 3. — С. 81–87.*
3. *Влияние начальных условий на динамику самозапуска и ресинхронизации привода мельниц с упругой связью / Г. Г. Пивняк, В. И. Кириченко, Р. А. Боровик и др. // Вісн. Кременч. держ. політехн. ун-ту. — Кременчук: Вид. КДПУ, 2006. — Вип. 4/2006 (39). Ч. 1. — С. 8–11.*
4. *Пивняк Г. Г., Кириченко В. В. Энерго- та ресурсозбереження гірничо-металургійного комплексу України // Збагачення корисних копалин. — 2001. — Вип. 11(52). — С. 3–9.*

Національний гірничий університет, Дніпропетровськ

Надійшло до редакції 12.02.2007