

Академік НАН України Г. Г. Півняк, В. І. Кириченко,  
В. В. Кириченко

## Перспективи удосконалення потужних синхронних приводів

*Запропоновано перспективний напрямок проектування потужних синхронних двигунів і систем керування ними. Напрямок забезпечує успішний запуск і синхронізацію двигуна з номінальним навантаженням за зниженої напруги мережі живлення, зниження динамічних навантажень елементів приводу. Використання методу підвищує кількість запусків підряд завдяки використанню програмного керування джерелами живлення двигуна.*

Відомі потужні приводи, як правило, базуються на використанні синхронних двигунів із явно вираженими полюсами. До найбільш несприятливих для їх надійності слід віднести зниження напруги живлення в пускових режимах, резонансні явища при збігу частоти змінної складової електромагнітного моменту з частотою власних коливань системи двигун — робоча машина, режими синхронізації і самозапуску. Відомі пристрої керування синхронними приводами нерідко застарілі або потребують значних коштів. Проблема успішного запуску приводу за зниженої напруги статора нерідко зумовлює завищений запас потужності і навіть використання частотного перетворювача. І хоча такий варіант вирішення проблеми є успішним внаслідок розганяння двигуна зі збудженим ротором (практично на перевантажувальній здатності), він має таку суттєву ваду як значна вартість перетворювача. Значно меншої потужності — до 3...5% від потужності двигуна потребує впровадження програмного керування збудником, однак метод ефективний лише в зоні малих ковзань, коли забезпечується плавне входження двигуна в синхронізм без подачі стрибком напруги збудника при ковзанні 5%. В зоні значних ковзань відчутного підвищення середнього моменту двигуна цей метод не забезпечує. При використанні пускових реакторів не вирішується проблема надійного запуску двигуна з номінальним навантаженням, оскільки при цьому для обмеження пускового струму рівень напруги статора знижується зі зниженням моменту двигуна на 28...36%. А це вимагає підвищеного запасу встановленої потужності приводу і зумовлює його роботу у сталому режимі не з номінальним навантаженням. Зростають маса і ціна двигуна та його пусковий струм.

В Національному гірничому університеті відпрацьовані нові принципи створення потужних програмно керованих синхронних приводів підвищеної надійності в пусковому та економічності в сталому режимі. Ідея розробки — в оптимізації співвідношення між моментами від пускової обмотки та обмотки збудження при програмному формуванні напруги збудника, що забезпечує необхідну якість асинхронних режимів двигуна із номінальним навантаженням навіть за умови істотно зниженої напруги статора. В основі пропозицій гіпотеза, що в асинхронних режимах додатково підвищити надійність приводу з програмно керованим збудником можливо, якщо ще на етапі проектування двигуна так підвищити активний опір пускової обмотки, що паспортний пусковий момент забезпечується за пони-

женої (наприклад, через використання пускових реакторів або при слабкій мережі живлення) напруги статора. За традиційного керування це автоматично знижує пусковий струм і вхідний момент, однак завдяки програмному керуванню збудником — яке найбільш ефективно в зоні малих ковзань — середній момент двигуна достатній для розганяння двигуна до синхронної швидкості включно навіть за важких умов запуску із номінальним навантаженням. А це дозволяє вибирати потужність двигуна із мінімальним запасом, що на практиці означає зниження його маси та ціни на 10...20% і забезпечує роботу в сталому режимі з близьким до номінального ККД. Сприяє поліпшенню пускових властивостей привода і часткове або повне регулювання розрядного опору в колі збудження впродовж всього терміну розганяння двигуна.

Зазвичай проектування електричного двигуна складне, багатоваріантне завдання і в цілому зводиться до багатократного розрахунку залежностей між основними показниками у вигляді системи формул, емпіричних коефіцієнтів та графічних залежностей, які розглядаються як рівняння для проектування. Однак універсального критерію оптимальності не існує. Підвищення надійності і терміну служби електричних машин нерідко дають більший економічний ефект порівняно із підвищенням ККД та коефіцієнта потужності. Можна зробити цілком виважений висновок, що удосконалення двигуна та системи керування ним повинне базуватися не тільки на бажанні отримати техніко-економічні переваги, а й на безумовному підвищенні або збереженні його надійності. Тому, розробляючи комплектний синхронний електропривод, слід враховувати, які саме техніко-економічні переваги можливо отримати від нових рішень та як вони вплинуть на надійність приводу порівняно із досягнутою на сьогодні.

Нові підходи до проектування синхронних двигунів та систем керування ними базуються на тому, що розрахунок обмотки статора залишається незмінним, а зміни стосуються лише вибору параметрів пускової обмотки та збудника і алгоритму керування ним, вибору чи регулюванню розрядного опору у колі збудження. Вибір параметрів пускової обмотки зводиться до визначення кількості і розмірів стрижнів та короткозамикальних сегментів. Для механізмів з важкими умовами пуску параметри пускової обмотки вибирають з урахуванням вимог до кратностей пускових моменту  $\mu_n$  і струму  $i_n$ , а також вхідного моменту  $\mu_{вх}$ . За незмінних розмірів підвищити активні опори пускової обмотки і  $\mu_n$  можливо за рахунок вибору для стрижнів та кілець матеріалу з більшим питомим опором. Однак при цьому зменшується  $\mu_{вх}$  і це слід враховувати при керуванні збудником та розрядним опором у колі збудження (зазвичай розрядний опір вибирають на рівні до 10-кратного відносно власного активного опору обмотки збудження).

Аналіз особливостей пускового режиму дозволив сформулювати перспективні напрямки вибору параметрів пускової обмотки та системи керування синхронним двигуном, а саме:

активний опір пускової обмотки повинен забезпечити необхідну кратність пускових моменту і струму за мінімального рівня напруги статора;

найбільший опір розрядного резистора у колі збудження обмежений допустимим рівнем напруги на затискачах обмотки збудження, а найменший — вимогою щодо плавного розганяння двигуна до синхронної швидкості;

коефіцієнт форсування напруги програмно керованого реверсивного збудника повинен вибиратися з урахування вимог щодо плавного розганяння двигуна із номінальним навантаженням до синхронної швидкості, обмеження коефіцієнта динамічності та максимального зниження напруги статора.

Згідно з зазначеними положеннями, паспортні пускові момент та струм двигуна слід забезпечити за найменшого (допустимого) зниження  $\delta_{\max}$  рівня напруги статора. При цьому вимоги щодо вхідного моменту не враховуються як зайві при використанні програмно керованого збудника. Таким чином, є можливість зберегти традиційну послідовність визначення параметрів пускової обмотки з урахуванням зниження напруги на статорі до рівня  $u_{\min} = 1 - \delta_{\max}$ . А це означає, що при проектуванні двигуна із номінальною напругою живлення підвищену кратність пускового моменту  $\mu_{\text{п max}}$  слід вибрати як

$$\mu_{\text{п max}} = \frac{\mu_{\text{п}}}{(1 - \delta_{\max})^2}. \quad (1)$$

Що стосується паспортної кратності пускового струму за номінальної напруги живлення, то її можна залишити незмінною. В результаті розрахунків опори пускової обмотки зростуть до

$$r_{kd}^{\max} = \frac{r_{kd}}{(1 - \delta_{\max})^2} \quad (2)$$

за поздовжньою віссю та до

$$r_{kq}^{\max} = \frac{r_{kq}}{(1 - \delta_{\max})^2} \quad (3)$$

за поперечною віссю. Реактивні опори підсиленої пускової обмотки за незмінних геометричних розмірів стрижнів не змінюються і це призводить до відомого зменшення деяких постійних часу двигуна.

Оцінку ефективності відпрацьованих нових принципів створення комплектного приводу досліджено на прикладі серійного синхронного двигуна СДМЗ 2-24-59-80УХЛ4 з номінальною потужністю 4 МВт, швидкістю обертання 75 об/хв та опором розрядного резистора у колі збудження 1,6 Ом. Враховано, що за рахунок живлення обмотки статора створюється середня складова електромагнітного моменту двигуна [1]

$$m_{ec} = \frac{u_{mi}^2}{2} \left( \frac{\sin \alpha}{x_{dm}} + \frac{\sin \beta}{x_{qm}} \right), \quad (4)$$

а за рахунок живлення обмотки збудження від програмно керованого збудника — додатковий середній момент

$$m_{ei} = -\frac{u_{mi} u_{fi}^m \sin \gamma_i}{2f_{31}}. \quad (5)$$

Позначення в одержаних виразах відповідають роботі [2]. При розрахунках механічної характеристики для врахування підвищених активних опорів пускової обмотки постійні часу  $T_{d0}''$ ,  $T_q''$ ,  $T_d'$  слід помножити на  $(1 - \delta_{\max})^2$ . За номінальної напруги статора механічна характеристика має вигляд залежності 1 на рис. 1 і цілком відповідає паспортним даним двигуна.

Вплив постійного (незалежного від ковзання  $s$ ) зниження  $\delta_{\max} = 0,15$  напруги статора ілюструє залежність 2 (див. рис. 1). Видно, що моменти пускової механічної характеристики знизилися в 1,34 рази і паспортні кратності пускового і вхідного моментів не забезпечуються. Очевидно, що за номінального навантаження двигуна його пуск і синхронізація неможливі.

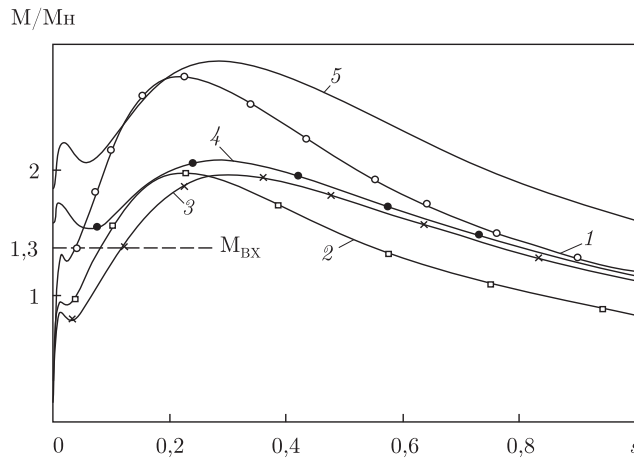


Рис. 1. До визначення ефективності використання нових принципів проектування комплектного синхронного електропривода нового покоління:

1 — механічна характеристика за номінальної напруги статора; 2 — те саме при  $\delta_{\max} = 0,15$ ; 3 — при  $\delta_{\max} = 0,15$  і підсиленій пусковій обмотці; 4 — при підсиленій пусковій обмотці,  $\delta_{\max} = 0,15$  і керуванні збудником; 5 — при підсиленій пусковій обмотці,  $\delta_{\max} = 0$  і керуванні збудником

Для поліпшення форми механічної характеристики активні опори пускової обмотки збільшені згідно з виразами (2) та (3), в результаті чого отримана нова форма механічної характеристики (залежність 3 на рис. 1). Таким чином, підвищений опір пускової обмотки фактично забезпечив паспортний пусковий момент, однак при цьому критичний і вхідний моменти зменшилися, а успішна синхронізація лишилася неможливою. Для вирішення цієї проблеми використане живлення обмотки збудження змінною за знаком і частотою напругою, що створює в асинхронному режимі додаткову складову середнього моменту двигуна. Результати розрахунку із врахуванням ефекту від використання програмно керованого збудника одержані у вигляді залежності 4 на рис. 1 і свідчать про перспективність запропонованого методу поліпшення форми механічної характеристики. Навіть за зниженої на 15% напруги статора за рахунок оптимізації розрядного опору та використання програмно керованого збудника з коефіцієнтом форсування напруги 1,75 форма характеристики забезпечує паспортні кратності пускового та вхідного моментів, причому розганяння двигуна до синхронної швидкості забезпечене.

Для номінального рівня напруги живлення підсилена пускова обмотка та збільшений до 6,5 Ом розрядний опір зменшують термін розганяння приводу із відповідним зниженням нагрівання обмоток (залежність 5 на рис. 1). Кратність пускового та найменшого моментів зросла до 1,6 і 2,1 відповідно, що свідчить про підвищену надійність запуску та синхронізації двигуна з номінальним навантаженням. Слід звернути увагу на те, що коефіцієнт форсування напруги збудника залишився незмінним (1,75), хоча збудник став реверсивним, а розрядний опір у колі обмотки збудження оптимізовано.

Доказом перспективності відпрацьованих принципів проектування комплектного електроприводу нового покоління є результати дослідження динаміки пуску і самозапуску млина самоподрібновання ММС-90 × 30 із досліджуванним синхронним двигуном із звичайною системою живлення його обмоток за номінальної напруги живлення та зниженої на 15% із запропонованими удосконаленнями (рис. 2). Із отриманих залежностей 1–3 видно, що за номінальних напруги статора і навантаження двигун успішно синхронізується,

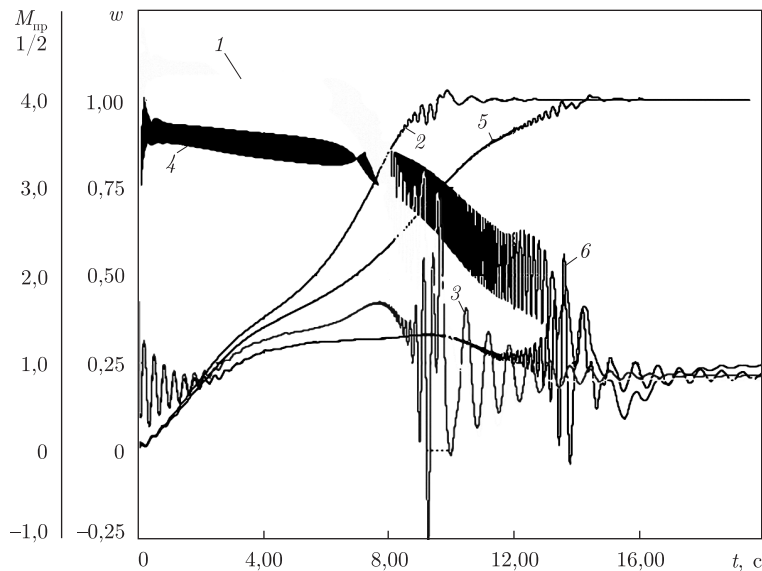


Рис. 2. Пуск приводу млина з номінальним навантаженням за номінальної напруги статора (залежності 1–3) та її зниженні на 15% із підсиленою пусковою обмоткою та реверсивним збудником: 1, 4 — струм статора за номінальної напруги і зниженої на 15%; 2, 5 — швидкість двигуна за тих же умов; 3, 6 — пружний момент за тих же умов

однак коефіцієнт динамічності пружного моменту та пусковий струм становлять 3,38 та 9 відповідно. Однак при традиційному використанні пускових реакторів за зниженої напруги на статорі двигун із номінальним навантаженням не синхронізується.

Із залежностей 4–6 рис. 2 випливає, що використання нових підходів до створення комплексного електропривода забезпечує успішний запуск і синхронізацію двигуна із номінальним навантаженням при зниженні напруги статора на 15% і більше з пропорційним зниженням пускового струму. Одночасно коефіцієнт динамічності пружного моменту знижується з 3,38 до 2,6. Зниження напруги статора забезпечує використання пускових реакторів або регулятора напруги статора. За номінального рівня напруги двигун розганяється значно швидше, однак, динамічні навантаження приводу зростають.

На закінчення зробимо такі висновки.

1. Для підвищення надійності потужного синхронного приводу в пускових режимах слід поєднати можливості програмного формування механічної характеристики в зоні малих ковзань та підвищення пускових моментів за рахунок збільшення активного опору пускової обмотки.

2. Вибір розрядного опору кола збудження та опору пускової обмотки вимагає оптимізації їх співвідношення та коефіцієнта форсування напруги збудника з метою зменшення запасу встановленої потужності приводу, нагрівання обмоток двигуна та зменшення коефіцієнта динамічності у пусковому режимі з допустимим зниженням напруги статора.

1. Пивняк Г. Г., Школа Н. И., Кириченко В. В. Роль програмного управління в забезпеченні надійності многомасових систем з синхронними електроприводами // *Металлург. и горноруд. пром-ть.* – 2002. – № 3. – С. 81–87.

*Національний гірничий університет,  
Дніпропетровськ*

*Надійшло до редакції 22.12.2008*

Academician of the NAS of Ukraine **G. G. Pivnyak, V. I. Kyrychenko,  
V. V. Kyrychenko**

### **Prospects of improvement of powerful synchronous drives**

*A perspective direction of the planning of powerful synchronous engines and the control system is offered. This direction provides a successful start, the synchronization of an engine with the nominal loading under a low voltage of the power line, and a decrease of the dynamic loadings of elements of a drive. The use of the method increases the number of starts in succession due to the use of the program management of feeding sources of an engine.*