Наука та інновації. 2006. Т 2. № 3. С. 28–37.

ПРОГРАМНО КЕРОВАНИЙ ЗБУДНИК ДЛЯ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

В. І. Кириченко, М. І. Школа, В. В. Кириченко, Р. О. Боровик
Національний гірничий університет, Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 28.03.06

Резюме: Показана доцільність використання методу програмного керування напругою збудника для зниження динамічних навантажень в перехідних режимах. Наведені функціональні схеми пристроїв для керування напругою збудження у випадках одно- та дводвигунного синхронного приводу барабанного млина.

Ключові слова: алгоритм, збудник, привод, момент, режим, показники.

В. И. Кириченко, М. И. Школа, В. В. Кириченко, Р. А. Боровик. ПРОГРАММНО УПРАВЛЯЕМЫЙ ВОЗБУДИТЕЛЬ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

Резюме: Показана целесообразность использования метода программного управления напряжением возбудителя для снижения динамических нагрузок в переходных режимах. Приведены функциональные схемы устройств для управления напряжением возбуждения в случаях одно- и двухдвигательного синхронного привода барабанной мельницы.

Ключевые слова: алгоритм, возбудитель, привод, момент, режим, показатели.

V. I. Kirichenko, M. I. Shkola, V. V. Kirichenko, R. O. Borovik. THE PROGRAMMATIC GUIDED EXCITER OF SYNCHRONOUS MOTORS.

Abstract: Expedience use method of programmatic management by voltage of exciter for the lowering dynamic loads in transient states is shown. Resulted functional schemes of devices for the management by voltage of excitation in case of one- and two-motor synchronous drive of rattler.

Keywords: algorithm, exciter, drive, moment, mode, indexes.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ІДЕЇ РОЗРОБКИ

Значна частина собівартості продукції гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) зумовлена вартістю затраченої електроенергії (зокрема, в процесах подрібнювання). На собівартість впливає багато чинників, один з яких – перевищення запасу встановленої потужності приводних синхронних двигунів (СД) на 15–30 %, а іноді і більше. Це пояснюється дискретністю шкали номінальних потужностей та частот обертання СД і типорозмірів млинів, труднощами запуску їх після тривалої перерви в роботі, синхронізації тощо. Підвищенням встановленої потужності привідних двигунів часто вирішують і проблему вирівнювання навантажень віток приводу при багатопотоковій передачі обертального моменту. Зазначені особливості синхронних приводів безпосередньо впливають на ступінь використання встановленої потужності двигунів. Однак при суттєвому недовантаженні коефі-

© НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ. 2006

цієнт корисної дії (ККД) двигуна знижується. А при підвищенні ККД двигунів на 1 % кожні 20 млн т продукції ГЗК дадуть йому залежно від властивостей руди економію близько 2,8–4,34 млн кВт·год електроенергії. Тому важливим у напрямку економії електричної енергії на ГЗК є забезпечення якомога кращого співвідношення потужностей сталого та номінального режимів.

Оскільки одним із важливих чинників, які впливають на вибір потужності привідного синхронного двигуна, є успіх його входження в синхронізм (особливо після перерви у живленні), то надійне вирішення цієї проблеми при номінальному (і навіть більшому) навантаженні двигуна є запорукою можливості знизити його встановлену потужність на 10–15 % з відповідною економією вартості приводу та зростанням ККД двигуна (в діючих приводах з підвищеним запасом потужності двигунів можливе більш повне її використання). Додаткова перевага від зменшення встановленої потужності двигунів полягає у зниженні динамічних навантажень елементів електромеханічної системи (ЕМС) власне двигуна та шестірень відкритого зачеплення, особливо в нестаціонарних резонансних режимах та під час синхронізації і ресинхронізації двигунів після перерви у живленні. Зниження динамічних навантажень підвищує надійність та термін використання елементів приводу. За рахунок зниження коефіцієнта динамічності пружного моменту $K_д$ дає змогу зменшити їх розміри, масу і вартість. Коефіцієнтом динамічності пружного моменту є відношення максимального значення до

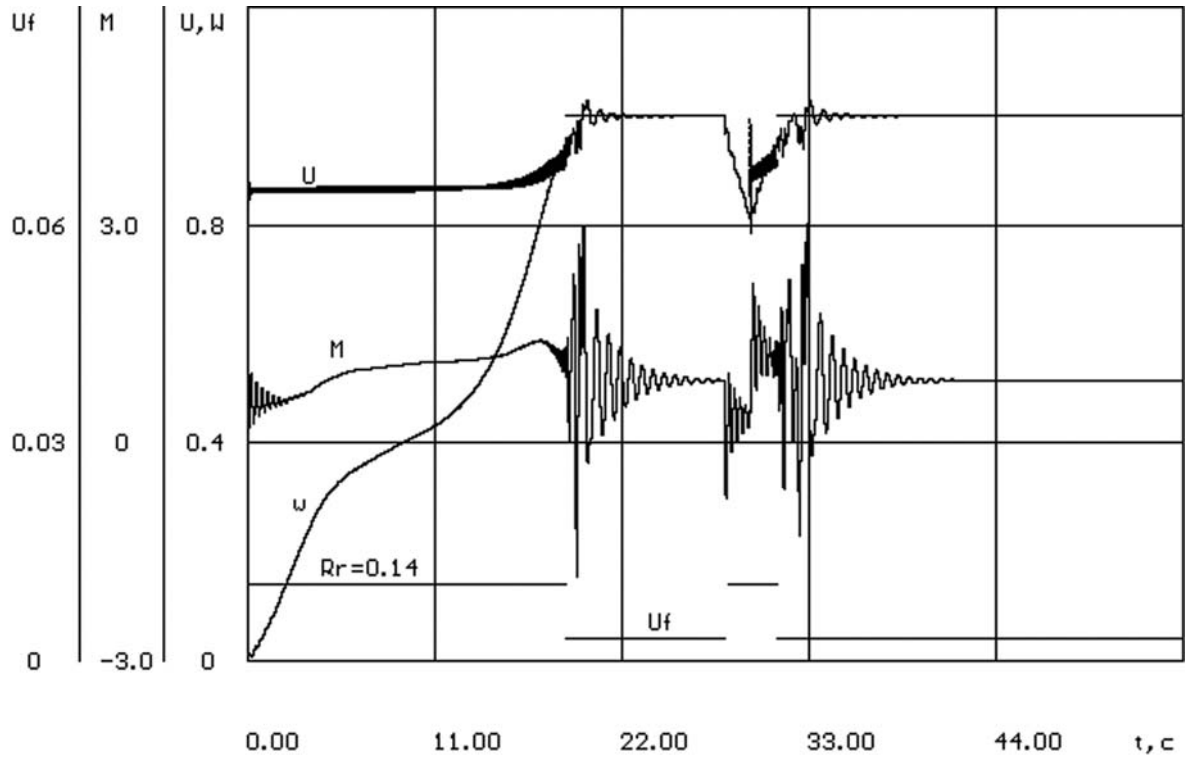

Рис. 1. Осцилограма пуску та ресинхронізації після перерви у живленні протягом 1,5 с (у відносних одиницях): *U* – напруга на обмотці статора; *M* – пружний момент; *W* – частота обертання двигуна в частках синхронної; U_f – номінальна напруга обмотки збудження

номінального моменту двигуна. Досягти зазначених переваг можна шляхом формування такої асинхронної механічної характеристики двигуна, яка у зоні малих ковзань має середній момент не нижче моменту статичного навантаження. Завдяки цьому синхронний привод розганяється до синхронної частоти обертання плавно, практично без динаміки входження в синхронізм, а динамічні навантаження виникають лише за рахунок проходження зони нестаціонарного резонансного режиму.

2. ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ

Для ілюстрації переваг програмного формування напруги збудника в асинхронному режимі на рис. 1 наведені вихідні дані щодо динаміки пружного моменту приводу млина самоподрібнювання ММС-90х30 з синхронним двигуном СДМЗ-24-59-80УХЛ4 номінальною потужністю 4 МВт та швидкістю 75 об/хв у традиційних режимах пуску, синхронізації та ресинхронізації після перерви у живленні тривалістю 1,5 с.

Враховано опір пускового реактора Rr = 14 Ом та розрядний опір у колі обмотки збудження $R_{доб}$ = 3,2 Ом. При перерві у живленні термін розмикання кола обмотки статора 0,2 с. Досліджено режим роботи двигуна із номінальним навантаженням ($M = Mн$ = 0,853 відн. од.) як найбільш важкий (на рис. 1 йому відповідає рівень сталого пружного моменту M, відн. од.). За традиційного запуску реактор Rr у колі статора та розрядний опір $R_{доб}$ у колі

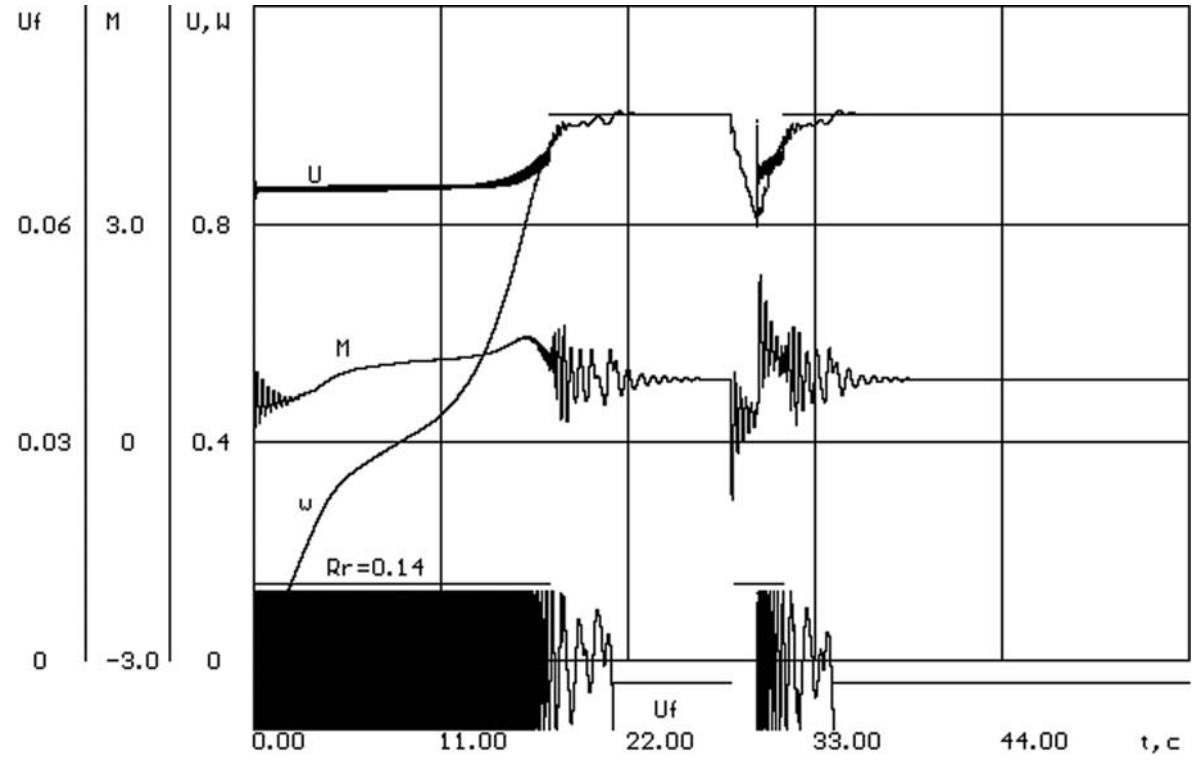

Рис. 2. Осцилограма пуску та ресинхронізації після перерви у живленні протягом 1,5 с з використанням програмного формування напруги збудника: U – напруга на обмотці статора; M – пружний момент; U_f – номінальна напруга обмотки збудження (все у відносних одиницях); W – частота обертання двигуна в частках синхронної

обмотки збудження виводяться при досягненні двигуном ковзання $s = 0{,}05$ в момент подачі на обмотку збудження номінальної напруги її живлення. При перерві у живленні двигуна реактор і розрядний опір вводяться у відповідні кола, а при його відновленні і повторному досягненні двигуном ковзання $s = 0{,}05$ процес входження в синхронізм повторюється. Завдяки використанню реактора пусковий струм і напруга U на статорі двигуна під час пуску зменшуються. Із збільшенням обертів W двигуна струм його статора зменшується і напруга на статорі зростає (див. рис. 1). Те ж саме відбувається і в процесі відновлення живлення.

Із рис. 1 видно, що в процесі синхронізації та ресинхронізації пружний момент зубчастого зачеплення досягає 3 відн. од., що відповідає вельми значному коефіцієнту динамічності $K_д = 3 / 0{,}853 = 3{,}51$. До того ж відбувається розмикання зазорів у передачі, яке за несприятливих умов може призвести навіть до руйнування шестірень. Близькі навантаження виникають і в режимі ресинхронізації. Ця обставина змушує розробників млина підвищувати модуль зачеплення, що призводить до зростання його розмірів, маси і вартості.

З метою зниження $K_д$ для елементів зубчастої передачі і відповідного зменшення її розмірів і маси в НГУ була запропонована ідея повнішого використання можливостей тиристорного збудника, зокрема програмного формування його напруги, для отримання більш сприятливої форми електромагнітного

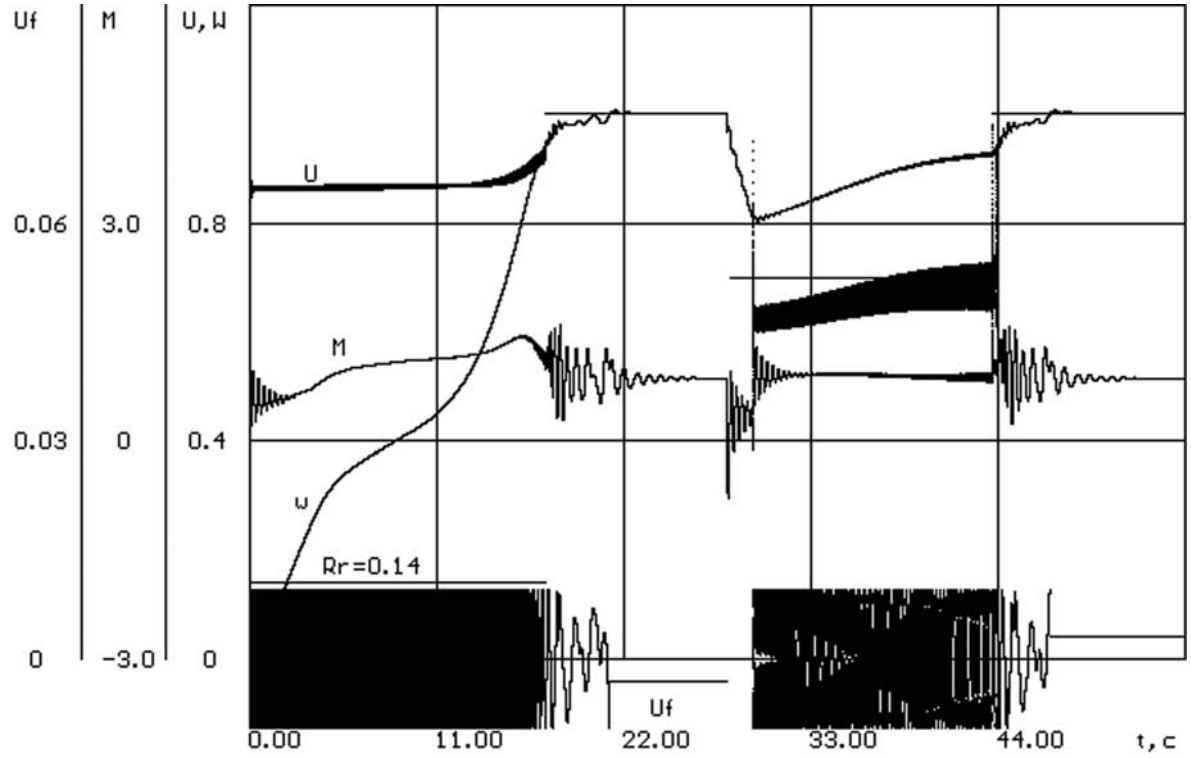

Рис. 3. Осцилограма запуску та ресинхронізації після перерви у живленні протягом 1,5 с з використанням програмного формування напруги збудника та введенням додаткового реактора в коло статора в момент відновлення напруги статора: U – напруга на обмотці статора; M – пружний момент; U_f – номінальна напруга обмотки збудження (все у відносних одиницях); W – частота обертання двигуна в частках синхронної

моменту двигуна в асинхронному режимі [1]. Враховано, що електромагнітний момент m_e має складову m_c від живлення обмотки статора і m_f – від живлення обмотки збудження [1]. В основі пропозиції формування напруги збудження з метою отримання додаткової – бажаної складової електромагнітного моменту. В зоні малих ковзань для зниження $K_д$ запропоновано зменшити вплив явнополюсності двигуна, яка призводить до виникнення періодичної складової електромагнітного моменту і зумовлює резонансні явища, та підвищити середню складову електромагнітного моменту для забезпечення плавного входження двигуна в синхронізм. Для використання методу запропоновано реверсивний збудник із коефіцієнтом форсування напруги 3. В зоні малих ковзань середній момент двигуна перевищує номінальний на 8 %, а перехід від програмно формованої напруги збудника до номінальної із виведенням розрядного опору в колі збудження здійснюється в момент першого досягнення двигуном ковзання $s = 0$. Те ж саме відбувається і при ресинхронізації. Результати використання методу програмного керування збудником з метою найбільшого зменшення періодичної та підвищення середньої складової електромагнітного моменту в зоні малих ковзань двигуна наведені на рис. 2.

З рис. 2 видно, що завдяки використанню теоретично відпрацьованого методу програмного формування електромагнітного моменту синхронного двигуна за допомогою керування напругою збудника досягається скорочення терміну розгону двигуна та різке зниження $K_д$ пружного моменту. Зокрема, в режимі синхронізації останній знизився з 3,51 до 1,8, тобто практично вдвічі. Значно зменшився коефіцієнт динамічності і в режимі ресинхронізації. Замість 3,51 він став близьким до 2,6. Менший вплив програмного формування напруги збудника на момент відновлення живлення пояснюється неповним гасінням поля збудження та перехідними процесами в статорі двигуна.

Зменшує перший пік пружного моменту при відновленні напруги живлення одночасне введення в коло статора реактора із підвищеним опором (рис. 3).

Видно, що завдяки вжитим заходам динамічні навантаження елементів зубчастої передачі порівняно із традиційною системою керування збудником знизилися вдвічі як під час синхронізації, так і під час ресинхронізації. І це при номінальному навантаженні. Додаткова перевага полягає у відсутності в цьому випадку явища розмикання зазорів зачеплення, тобто у найбільш важких режимах приводу (розмикання зазорів під час вимикання напруги живлення двигуна є некерованим через відсутність останньої і не є небезпечним для передачі завдяки незначному рівню навантажень). З метою отримання бажаних характеристик пружного моменту отримано вираз для необхідного електромагнітного, причому із врахуванням нестабільності передаточного числа зачеплення та моменту статичного навантаження. Для визначення статичного навантаження використовувався його спостерігач на основі контролю за швидкостями та кутами повороту двигуна і шестірні за допомогою імпульсних датчиків. Отже, розроблений метод більш повного використання можливостей тиристорних збудників дає реальну можливість істотно знизити запас встановленої потужності (практично до рівня 1) без втрати надійності приводу та з підвищенням ККД двигунів у сталому режимі. А це дає можливість знизити встановлену потужність, зменшити масу і вартість двигунів при проектуванні приводу. Відпрацьований метод програмного керування тиристорним збудником корисний для виробництв із використанням потужних синхронних двигунів.

Серед інших напрямків використання розробленого методу необхідно назвати програмне керування збудником для зменшення рівня коливань пружного моменту в сталому

режимі роботи млина. Рівень коливань навантаження зубчастого зачеплення у сталому режимі в основному визначається збуреннями внаслідок неякісного виготовлення та монтажу зубчастих елементів та коливання статичного навантаження [2]. Ці збурення зумовлюють додаткові шуми і вібрації, скорочують термін служби елементів зачеплення, в результаті чого зростають експлуатаційні витрати, зокрема на ремонт [3]. Похибка радіуса вінця в 1 мм за несприятливої частоти викликає появу змінної складової пружного моменту амплітудою 0,12, а при 6 мм – вже 0,75 від номінального. В свою чергу, коливання моменту статичного навантаження амплітудою 0,3 від середнього зумовлює змінну складову пружного моменту амплітудою 1,18 від номінального. Ще більшою стає амплітуда при збігу частот одночасно існуючих обох типів збурень. При амплітуді похибки радіуса вінця в 6 мм та відхиленнях статичного моменту на 30 % вона зростає до 1,4 від номіналь-

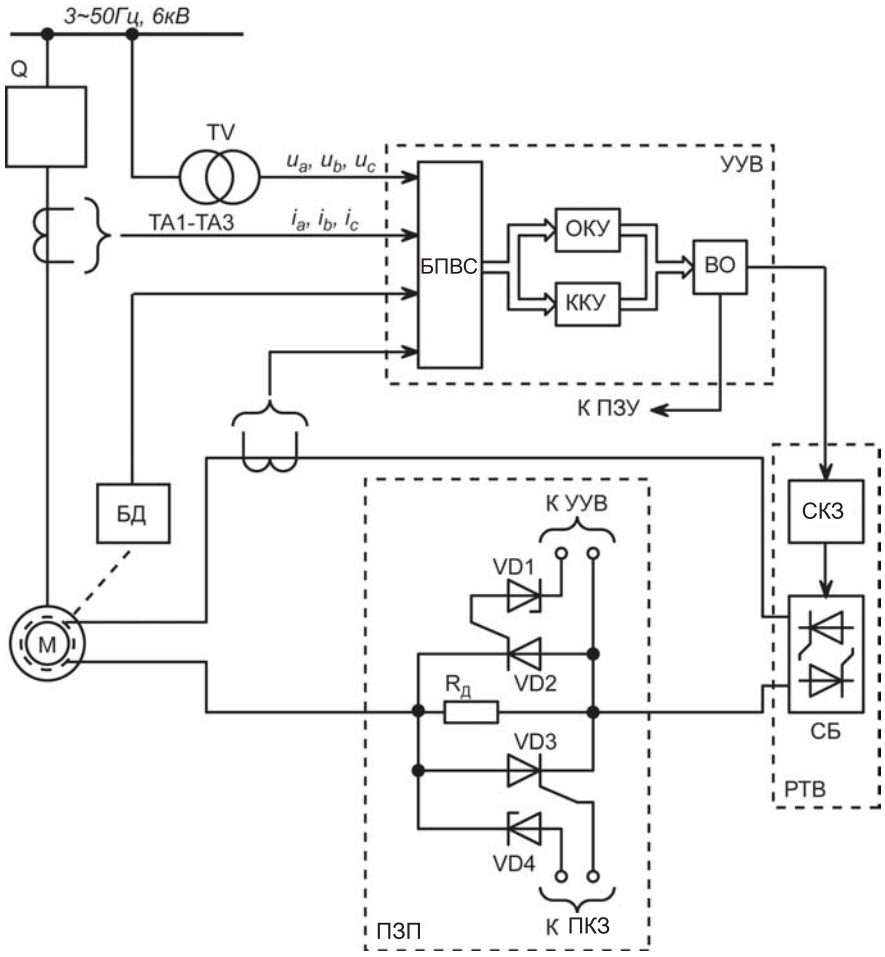

Рис. 4. Функціональна схема збудника із пристроєм програмного керування для одиночного синхронного двигуна: *Q* – масляний вимикач; *TV* – трансформатор напруги; *ТА1–ТА3* – трансформатори струму; *VD1*, *VD4* – стабілітрони; *VD2*, *VD3* – тиристори; $R_д$ – розрядний резистор; *БД* – блок імпульсного датчика; *БПВС* – блок перетворення вхідних сигналів; *ВО* – вихідний орган; *ПЗП* – пускозахисний пристрій; *ПКЗ* – пристрій керування збудником; *СКЗ* – система керування збудником

ного рівня, що значно скорочує термін служби передачі. При номінальній жорсткості муфти та десятикратній частоті кінематичних коливань динамічний коефіцієнт підсилення за рахунок збурення складає 15, а при зміні жорсткості він змінюється майже пропорційно [4]. Встановлено, що для зменшення нестабільності пружного моменту при коливаннях навантаження і передаточного числа зачеплення m_e двигуна повинен дорівнювати сумі середнього статичного моменту і добутку відносної постійної часу двигуна на кутове прискорення привідної шестірні, тобто $m_e^{баж} = m_{c0} + T\frac{d\omega_ш}{dt}$. При цьому кутове прискорення привідної шестірні одночасно враховує вплив кінематичних збурень і нестабільність статичного моменту. Для програмного формування m_e необхідний контроль за прискоренням шестірні і використання спостерігача статичного моменту.

3. ПРИСТРОЇ ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ

У розробленому реверсивному тиристорному збуднику із програмним формуванням напруги були використані відомі рішення щодо визначення m_e за допомогою контролю за миттєвими струмами і напругами обмотки статора. Для оцінки внутрішнього кута двигуна передбачено контроль за струмом збудження у поєднанні з використанням імпульсного датчика і системи опрацювання його сигналів. Контроль за рівнем напруги живильної мережі виконувався шляхом контролю за миттєвою напругою живлення статора. Проблема нестабільності опорів обмоток двигуна частково вирішена завдяки використанню в основному алгоритмі керування опорами нагрітих обмоток. Для компенсації впливу відхилень параметрів електромеханічної системи від введених в алгоритм значень використані контроль за поточним електромагнітним моментом та мікропроцесорна система для реалізації алгоритмів на базі методів фаззі-логіки [5]. Пристрій починає працювати від моменту вмикання двигуна за умови обмеження напруги на обмотці збудження допустимим рівнем. До досягнення ковзання заданого рівня в обмотку збудження подається періодична напруга частоти ковзання. Пуск відбувається з введеним розрядним опором у колі збудження. Після досягнення заданого ковзання розрядний опір вимикається, а на обмотку подається номінальна (або вибрана) постійна напруга. При малому запасі форсування напруги збудника під час пуску надлишковий момент двигуна є збільшеним, а при високому його слід брати меншим для зниження динамічних навантажень приводу.

Функціональна схема збудника із пристроєм програмного керування для одиночного синхронного двигуна наведена на рис. 4. У схемі використано пускозахисний пристрій (ПЗП) з розрядним опором, тиристорами і стабілітронами для його введення і виведення. Реверсивний збудник із силовим блоком формує необхідну періодичну або постійну напругу збудження. Керуючі сигнали для ПЗП і СКЗ формує мікропроцесорна система за допомогою блоку формування сигналів вихідного органу (ВО). На блок перетворення вхідних сигналів (БПВС) надходять напруги від трансформаторів струму і напруги статора та струму збудження. Опрацювання цифрових кодів вхідних величин, а також імпульсів БД кута повороту двигуна здійснюється в основному (ОКК) і коригувальному (ККК) каналах керування. Основний канал формує сигнал керування за розробленим жорстким алгоритмом, а коригувальний – за допомогою методів нечіткої логіки відпрацьовує додатковий сигнал внаслідок відхилення та швидкості зміни відхилення електромагнітного моменту від заданого. Вихідний орган містить елементи керування блоком ПЗП та здійснює захист двигуна від асинхронного режиму.

Програмне керування збудником синхронного двигуна корисне і у випадку приводу із двома синхронними двигунами, що вимагає вирішення проблеми вирівнювання навантажень віток приводу внаслідок кутової розбіжності роторів. Традиційно цю проблему вирішують за допомогою механічних і електричних систем [6]. Використання нової системи керування збудниками дає змогу комплексно вирішити проблему вирівнювання та обмеження динамічних навантажень віток приводу у перехідних режимах.

Значна частина поставлених завдань вирішується за допомогою програмного керу-

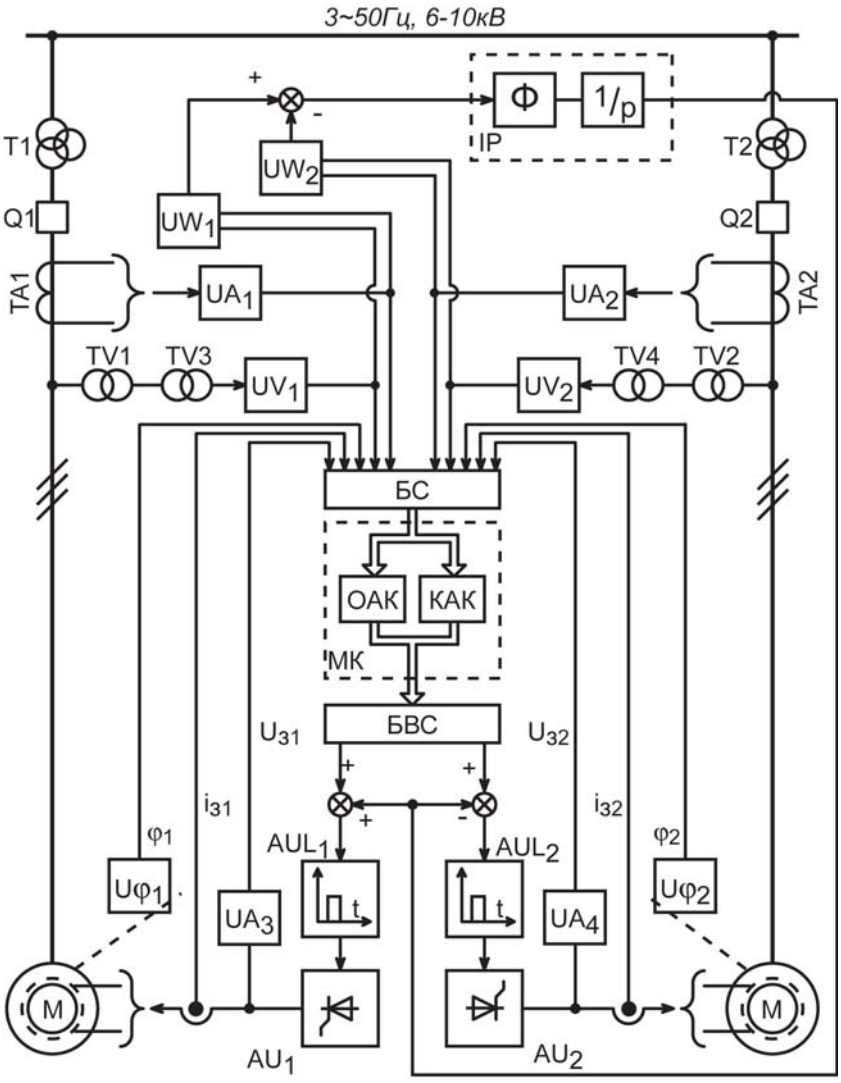

Рис. 5. Функціональна схема мікропроцесорної системи вирівнювання навантажень дводвигунного приводу з СД: *T1*, *T2* – силові трансформатори; *TV3*, *TV4* – роздільні трансформатори; *TA1*, *TA2* – трансформатори струму; *TV1*, *TV2* – трансформатори напруги; *Q1*, *Q2* – масляні вимикачі; UA_1, UA_2 – датчики струму; *БС* – блок спряження; *МК* – мікроконтролер; *БВС* – блок вихідних сигналів; *Ф* – фільтр

вання збудниками окремо для кожного двигуна і у взаємозв'язку з мікропроцесорною системою вирівнювання навантажень (рис. 5). Для найбільш повного вирівнювання середніх навантажень віток приводу в систему керування струмами збудження введені інтегральні складові, пропорційні різниці у споживаних двигунами активних потужностях. Таке вирішення проблеми вирівнювання навантажень сприяє більш рівномірній роботі зубчастих шестірень, підвищує термін їх використання. Контроль активної потужності двигунів здійснюєть за допомогою серійних датчиків потужності трифазних кіл UW_1, UW_2. Для зниження періодичної складової різниці у навантаженнях передбачена компенсація впливу кінематичних збурень. Як датчик кінематичного збурення використовувались імпульсні датчики кутових положень $U\varphi_1$ та $U\varphi_2$ на приводних шестірнях. Різниця кутів повороту шестірень і є кінематичним збурюванням зачеплення. Мікропроцесорний пристрій на основі аналізу спектра кінематичного збурювання формує керуючі сигнали окремо для кожного з тиристорних збудників AU_1, AU_2 із системою фазового-імпульсно-фазового керування AUL_1, AUL_2. Для вирівнювання середніх навантажень до цих сигналів додається сигнал інтегрального регулятора (ІР) з відповідним знаком для кожної вітки приводу. Окрім основного в алгоритмі керування (ОАК) передбачене використання коригувального алгоритму (КАК), призначеного для врахування нестабільності параметрів двигунів. Мікропроцесорний пристрій зі спеціальним алгоритмом керування збудниками вирівнює навантаження віток приводу, поліпшує динамічні властивості електромеханічної системи як для одиничного синхронного двигуна.

4. ВИСНОВКИ

Використання потужних синхронних приводів для барабанних млинів з відкритим зубчастим зачепленням і пружною муфтою супроводжується значними (іноді неприпустимими) динамічними навантаженнями елементів електромеханічної системи. Серед причин високих коефіцієнтів динамічності таких приводів слід назвати наявність періодичної складової електромагнітного моменту двигуна, яка в зоні малих ковзань призводить до виникнення нестаціонарних резонансних коливань пружного моменту. Значні динамічні навантаження виникають у режимах синхронізації і ресинхронізації після перерви живлення двигуна, особливо при неповному гашенні поля збудження. Суттєво впливають на динаміку сталого режиму роботи млина наявні у приводі кінематичні збурення та коливання моменту статичного навантаження. Складнощі зазначених режимів зумовлюють використання в приводах двигунів із значним запасом встановленої потужності, який нерідко перевищує 15–30 % і призводить до зниження ККД двигунів у сталому режимі роботи, як наслідок, до збільшення їх вартості та приводу в цілому.

Для вирішення зазначених проблем стосовно потужних приводів барабанних млинів запропоновано розширити можливості їх тиристорних збудників шляхом цілеспрямованого керування напругою в асинхронних режимах двигунів. Зокрема, для зменшення динамічних навантажень приводу в зоні виникнення нестаціонарних резонансних явищ було запропоноване таке формування напруги збудника, яке зменшує періодичну складову електромагнітного моменту від явнополюсності двигуна. На відміну від відомих методів у цьому режимі обмотку збудження запропоновано живити періодичною змінною напругою, яка окрім зменшення періодичної складової електромагнітного моменту часткового підвищує його середню складову.

Для зниження динамічних навантажень при синхронізації механічна характеристика за рахунок системи керуванням збудником

формується так, що її середнього моменту достатньо для плавного розгону двигуна до синхронної частоти обертання. На відміну від відомих, новий метод одночасно забезпечує максимально досяжний ступінь компенсації періодичної складової моменту. На прикладі млина ММС-90х30 із синхронним двигуном СДМЗ-24-59-80УХЛ4 потужністю 4 МВт встановлено, що навіть без запасу встановленої потужності при коефіцієнті форсування 3 – $K_д$ пружного моменту в режимах синхронізації знизився з 3,51 до 1,75 при відсутності розмикання зазорів. У режимі ресинхронізації для обмеження першого максимуму пружного моменту доречне короткочасне обмеження напруги живлення в момент його подачі на статор двигуна. Це зменшить максимум пружного моменту на рівні, істотно нижчому від критичного. Корисне використання програмного керування збудником і для зниження негативного впливу одночасно існуючих в приводі кінематичних збурень і коливань моменту статичного навантаження, що зумовлюють змінну складову пружного моменту, амплітуда якої за несприятливих умов може перевищувати номінальний момент.

У випадку використання алгоритмів програмного керування режимами пуску, синхронізації та ресинхронізації тиристорні збудники повинні бути реверсивними. Застосовуються також датчики поточних струмів і напруг живлення обмоток двигунів, датчик електромагнітного моменту двигуна та імпульсні датчики кутів обертання привідних шестірень і валу двигуна. У складі системи керування наявні блоки основного і коригувального алгоритмів. Останній призначений для компенсації нестабільності параметрів електромеханічної системи. Для дводвигунного варіанта синхронного приводу в системі програмного керування додатково передбачені датчики споживаної двигунами миттєвої активної потужності.

Виконаний комплекс досліджень і розробка алгоритмів програмного керування збудниками спрямовані на підвищення надійності, зниження встановленої потужності двигунів барабанних млинів на 10–15 % з відповідним зниженням маси і вартості як двигунів, так і зубчастого зачеплення. За рахунок зниження запасу встановленої потужності приводу одночасно підвищується загальний ККД приводу зокрема і млина в цілому.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Півняк Г. Г., Школа М. І., Кириченко В. В.** Роль програмного керування в забезпеченні надійності багатомасових систем з синхронними електроприводами. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 3. – С. 81–87.
2. **Виноградов Б. В.** О динамических нагрузках в приводах рудоразмольных мельниц с синхронными двигателями. // Горная электромеханика и автоматика. – К., 1981. – Вып. 38. – С. 80–85.
3. **Крюков Д. К.** Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий. – М.: Недра, 1966. – 173 с.
4. **Кириченко В. И., Боровик Р. А.** Влияние кинематических возмущений на динамические нагрузки привода барабанной мельницы ММС-90х30. // Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. сб. – 2004. – Вып. 19(60). – С. 43–50.
5. **Яланський О. А., Кириченко В. В., Савенко В. А.** Нестабильность параметров синхронного привода и ее компенсация с помощью фаззи-логики. // Дніпропетровськ: Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 3. – С. 47–51.
6. **Півняк Г. Г., Кириченко В. І.** Електромеханічні системи енергонапружених барабанних млинів. – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.