

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ПОТУЖНІСТЮ 2,5 МВТ ПРИВОДУ БАРАБАННОГО МЛИНА МШРГУ-4500×6000

Вступ. Використання у приводах потужних барабаних млинів синхронних двигунів зумовлене низкою їх переваг, однак існують обмеження які слід враховувати при виборі запасу встановленої потужності приводу. Це, зокрема, зумовлене тим, що заводи виробники потужних синхронних двигунів обмежують найбільшу приєднану масу механізму, за якої двигун успішно розганяється і синхронізується із номінальним навантаженням. Хоча при цьому нерідко виникають труднощі забезпечення успішної синхронізації, що потребує додаткового ускладнення системи керування двигуном. До того ж декларована виготовлювачами здатність двигуна успішно синхронізуватися із номінальним навантаженням при зазначеному моменті інерції механізму на практиці нерідко не відповідає дійсності. Зокрема, двигун СДС 19-56-40 УХЛ4 потужністю 2,5 МВт в одномасовій системі із приєднаним моментом інерції 16250 кг·м² успішно синхронізується лише за момента навантаження 0,83% від номінального. Тому для підвищення надійності приводу запас встановленої потужності нерідко завищують. Так, у приводі барабанного млина МШРГУ-4500×6000 використано двигун СДС 19-56-40 УХЛ4, хоча в сталому режимі споживана ним активна потужність складає лише 2 МВт. До того ж система керування двигуном застаріла і потребує удосконалення, зокрема з точки зору забезпечення умов зниження динамічних навантажень елементів електромеханічної системи, надійності запуску та зниження теплового навантаження обмоток двигуна як засобу підвищення строку його використання та збільшення кількості пусків підряд.

Метою роботи є виявлення можливостей поліпшення умов запуску та синхронізації зазначеного синхронного двигуна за умови вибору більш раціональних параметрів системи керування двигуном, в тому числі і за рахунок повнішого використання обмотки збудження, зокрема при її живленні від програмно керованого збудника [1]. Як метод дослідження обране математичне моделювання пускових режимів електромеханічної системи зазначеного млина із синхронним двигуном СДС 19-56-40 УХЛ4. Для обґрунтування висновків роботи та рекомендацій щодо можливостей вдосконалення системи керування електроприводом досліджені пускові режими для важких умов запуску. Враховані можливість вибору більш раціонального розрядного опору в колі обмотки збудження, оптимізація рівня ковзання, за якого в обмотку збудження подають постійну напругу, особливості програмного керування збудником з метою підвищення середнього асинхронного моменту в зоні малих ковзань та зниження змінної складової електромагнітного і, як наслідок, пружного моменту. При дослідженнях враховані конкретні особливості використання млина в умовах Михайлівського ГЗК.

Підготовчий етап роботи присвячений визначенню статичного моменту внутрішньомлинового завантаження та моментів інерції обертальних мас. Враховано, що моменти статичного навантаження та інерції елементів електромеханічної системи визначаються коефіцієнтом заповнення барабану, насипною щільністю його завантаження, швидкістю і кутом повороту млина. За даними Михайлівського ГЗК маса куль в барабані млина МШРГУ-4500×6000 становить 118 т. Виходячи із споживаної двигуном потужності 2 МВт та коефіцієнту заповнення барабану $\varphi=0,5$ розраховані маса його завантаження та сталий момент $m_c=0,62$ в.о. [2, 3] при традиційній системі базових одиниць для двигуна. Враховано також, що сталий статичний момент млина m_c визначається як масою завантаження барабану, так і втратами в підшипниках його цапф і відкритому зубчастому зачепленні і що одночасно він є нелінійною функцією кута повороту барабану [4]. При «розпушеному» стані завантаженні сталий кут повороту завантаження близький до кута природного укусу. В «слежалому» стані (важкі умови запуску) кут повороту завантаження може сягати $\pi/2$ [4], після чого завантаження обвалюється і він стає близьким до кута природного укусу.

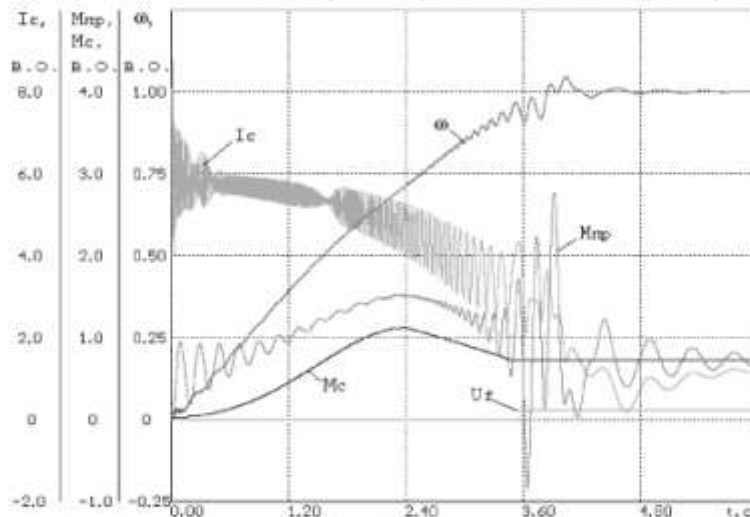


Рис. 1. Пуск млина МШРГУ-4500×6000 з двигуном номінальною потужністю 2,5 МВт, споживаною потужністю у сталому режимі 2 МВт і додатковим опором у колі збудження 1,6 Ом для важкого режиму.

Момент інерції млина визначається сумою двох складових [5]. Перша (постійна) визначається моментом інерції обертальних елементів млина. Згідно [4] приведений момент інерції порожнього барабану млина МШРГУ-4500×6000 складає 12696 кг·м². Друга (змінна) визначається швидкістю та кутом повороту млина, оскільки змінюється маса і положення центру маси, пов'язаної із барабаном. Врахована рекомендація Д.К. Крюкова, який при визначенні моменту інерції завантаження встановив можливість «...з достатньою для практичних розрахунків точністю приймати дещо завищене значення, яке відповідає величині моменту інерції кульового завантаження при повороті барабана до кута природного укосу». Зважаючи на це розрахунковий приведений момент інерції завантаження становить 4861 кг·м², а повний (приведений до валу двигуна) момент інерції млина склав 17557 кг·м². В результаті експериментальних випробувань визначена жорсткість пружних елементів двомасової електромеханічної системи млина МШРГУ-4500×6000, яка близька до 7843 кН·м/рад.

Результати досліджень. На першому етапі досліджений процес пуску приводу із традиційною системою керування збудником та важкими умовами запуску («злежалий» стан завантаження барабана). Використана в моделі електромеханічної системи млина у відносних одиницях жорсткість пружного зв'язку становить 2,11 в.о., дисипативна складова моменту врахована коефіцієнтом $\beta=2,83$ в.о. Прийнято, що за нормальних умов запуску робочий кут підйому продуктів завантаження становить $\theta_0=0,69$ рад., а при «злежалому» стані завантаження воно піднімається до кута повороту барабана $\pi/2$ із збереженням первісної форми поперечного розрізу, після чого завантаження обвалюється і кут його підйому стає таким, як у сталому режимі млина. За таких умов запуску млина максимум статичного моменту сягає $m_{c \max}=0,96$ в.о. В процесі аналізу якості перехідних процесів визначався коефіцієнт динамічності пружного моменту як відношення його максимального рівня до сталого статичного моменту ($m_c=0,62$ в.о.). Враховано, що в традиційній системі збудження постійна напруга на обмотку збудження подається при досягненні двигуном ковзання $s=0,05$. Результати дослідження наведені на рис. 1.

Із побудовань видно, що в режимі синхронізації за рахунок виникнення нестационарного резонансного режиму в механічній частині приводу виникають значні коливання пружного моменту (коефіцієнт динамічності становить 3,82). До того ж спостерігається розімкнення зазору зубчастого зачеплення. Термін досягнення ковзання 0,05 складає 3,686 с. Отже, слід зробити достатньо виважений висновок, що використання традиційної системи керування збудником зумовлює вельми значний рівень коефіцієнта динамічності пружного моменту із відповідним зростанням необхідних модулів, розмірів та ціни відкритого зубчастого зачеплення, скороченням терміну його використання. Тож система керування двигуном потребує вдосконалення.

Відомо, що під час асинхронного пуску для виключення ефекту «застрягання» приводу при половинній швидкості розробники двигунів пропонують замикати

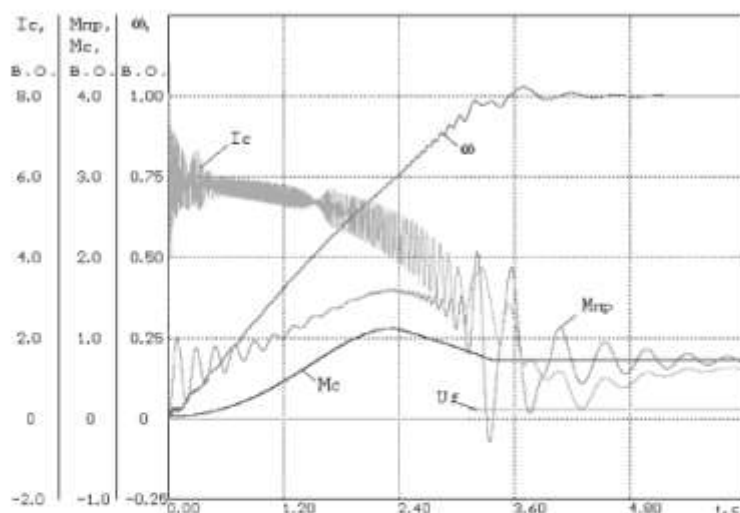


Рис. 2. Пуск млина МШРГУ-4500×6000 із додатковим опором у колі збудження 5,6 Ом.

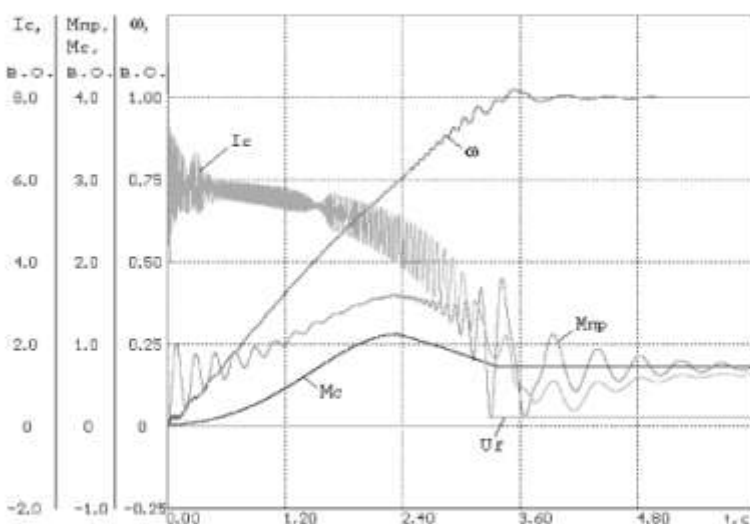


Рис. 3. Пуск млина МШРГУ-4500×6000 із додатковим опором у колі збудження 5,6 Ом та затримкою подачі напруги збудження ($s=0,02$).

обмотку збудження на розрядний опір, який у 5...10 разів перевищує власний опір обмотки. Для досліджуваного приводу використаний тиристорний збудник із вбудованим розрядним опором 1,6 Ом (кратність опору лише 2,88). В результаті досліджень динаміки пускового режиму нами встановлена доцільність збільшення розрядного опору в 3,5 рази. Динаміка пуску з таким розрядним опором набрала вигляду побудовань на рис. 2. Видно, що таке вдосконалення системи керування пуском забезпечило зниження коефіцієнта динамічності до рівня 2,86 з одночасним терміном розганяння приводу до ковзання 0,05 до 3,164 с. В той же час розмикання зазорів зубчастого зачеплення залишилося можливим.

За відомою рекомендацією, викладеною у роботі [6], для подальшого зниження рівня динамічних навантажень електромеханічної системи крисне подавання сталого напруги збудження при менших ковзаннях. Тобто, при асинхронному режимі після досягнення ковзання 0,05 слід зачекати приблизно 3...4 постійних часу механічної частини приводу. Як приклад використання такого методу нами досліджена динаміка пуску при вмиканні збудника на ковзанні 0,02. Результат дослідження отримано у вигляді побудовань на рис. 3. Можна зробити висновок, що таке удосконалення системи керування збудником забезпечило подальше зниження коефіцієнта динамічності до рівня 2,49. Одночасно термін досягнення моменту вмикання напруги збудника зріс до 3,318 с. Серед переваг такого удосконалення системи керування збудником – практично виключення явища шкідливого розмикання зазорів відкритого зубчастого зачеплення приводу млина.

Серед відомих сучасних методів поліпшення умов запуску найбільш перспективним є застосування програмно керованого збудника [1]. Згідно досліджень авторів розробки формування напруги збудника за певними алгоритмами дає змогу підвищувати середню та зменшувати амплітуду змінної складових електромагнітного і пружного моментів в області малих ковзань. В двомасових системах це сприяє зменшенню часу розганяння приводу і зростанню темпу проходження резонансної зони з відповідним зниженням коефіцієнта динамічності. Для визначення переваг програмного керування збудником досліджена його ефективність у приводі із збереженням наявного коефіцієнта форсування напруги збудника 1,75. Зокрема, досліджено режим керування збудником з метою зменшення терміну розганяння приводу за рахунок підвищення середньої складової електромагнітного моменту двигуна. Результати дослідження наведені у вигляді побудовань на рис. 4. Видно, що навіть за наявності коефіцієнта форсування напруги збудника 1,75 коефіцієнт динамічності пружного моменту знизився до рівня 2,5.

За необхідності подальшого зниження рівня динамічних навантажень електромеханічної системи слід використати алгоритм керування з метою можливо більшого зниження періодичної складової електромагнітного моменту двигуна [1]. Результати використання такого алгоритму керування збудником наведені у вигляді побудовань на рис. 5. Видно, що це забезпечило подальше зниження коефіцієнту динамічності. А саме до рівня 2,24 (визначається критичним моментом асинхронної характеристики двигуна). Результат отримано

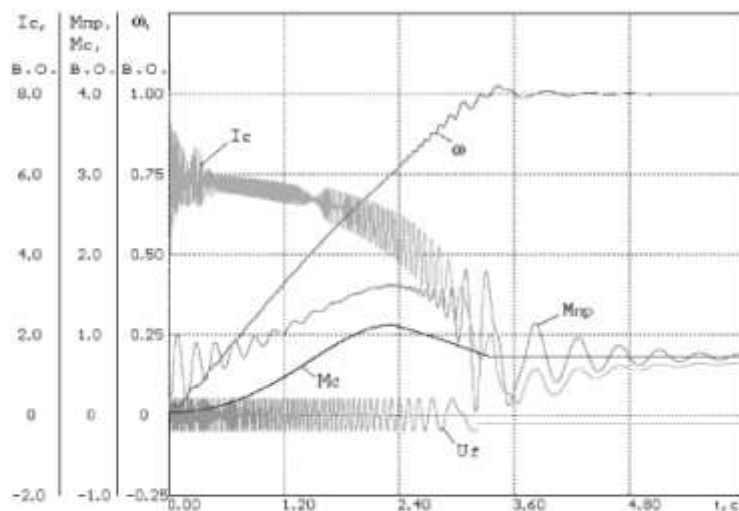


Рис. 4. Пуск млина МШРГУ-4500×6000 із додатковим опором у колі збудження 5,28 Ом та програмно керованим збудником.

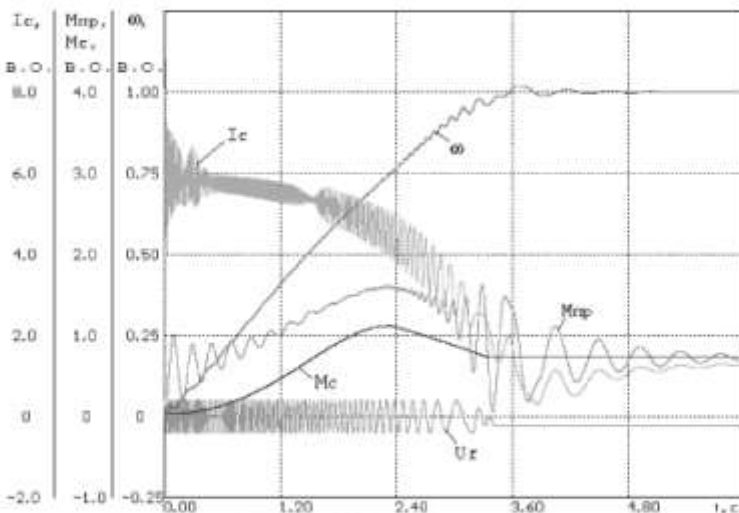


Рис. 5. Пуск млина МШРГУ-4500×6000 із додатковим опором у колі збудження 5,14 Ом та програмно керованим збудником з метою компенсації періодичної складової електромагнітного моменту.

для розрядного опору у колі збудження 5,14 Ом як найбільш доцільного для вибраного типу алгоритму та прийнятого коефіцієнта форсування напруги збудника.

Остаточна оцінка ефективності використання запропонованих удосконалень системи керування синхронним двигуном СДС 19-56-40 УХЛ4 приводу млина МШРГУ-4500×6000 отримана із врахуванням ступеню нагрівання його обмоток під час пуску. Оцінка нагрівання отримана наступним чином. Врахована відносна кількість теплоти, яка виділяється в обмотках на інтервалі ковзання $s=1...0,02$ як сума добутків квадратів відповідних повних токів обмоток на крок обрахунків. Така інтегральна оцінка передбачає сталі значення активних опорів обмоток і тому є попередньою. Результати досліджень зведені у вигляді даних таблиці.

Таблиця

№ рисунка	Коефіцієнт динамічності пружного моменту	Час досягнення ковзання $s=0,02$ в сек.	Коефіцієнт відносного нагрівання обмотки стагора	Коефіцієнт відносного нагрівання пускової обмотки	Коефіцієнт відносного нагрівання обмотки збудження
1	3,82	3,686	1	1	1
2	2,86	3,164	0,900	0,923	0,723
3	2,49	3,318	0,908	0,925	0,733
4	2,50	3,212	0,888	0,907	0,698
5	2,24	3,412	0,901	0,919	0,697

Як видно із даних таблиці використання запропонованих удосконалень системи керування пуском призводить до істотного зниження коефіцієнта динамічності пружного моменту та одночасного зменшення ступеня нагрівання обмоток двигуна.

Висновки.

1. Існуючий привод барабанного млина МШРГУ-4500×6000 з синхронним двигуном СДС 19-56-40 УХЛ4 номінальною потужністю 2,5 МВт має значні коефіцієнти динамічності пружного моменту під час пуску, при цьому завжди спостерігається шкідливе з точки зору надійності приводу розмикання зубчатого зацеплення.

2. Істотно знизити динамічні навантаження елементів електромеханічної системи млина у пускових режимах дозволяє оптимізація параметрів і режимів керування системи збудження. Для вибраного об'єкту досліджень доцільно підвищити опір розрядного резистора у колі збудження з 1,6 до 5,6 Ом та знизити рівень вхідного ковзання до 0,02.

3. Найбільш ефективно знизити коефіцієнт динамічності приводу можливо за рахунок використання програмно керованого збудника. При цьому нагрівання обмоток двигуна знижене порівняно з традиційною системою керування приводом, особливо при використанні алгоритму максимального підвищення середньої складової електромагнітного моменту.

4. За умови жорстких вимог до рівня коефіцієнта динамічності доцільне використання алгоритму зменшення періодичної складової електромагнітного моменту двигуна.

Література.

1. Півняк Г.Г., Кириченко В.В., Боровик Р.О. Програмне керування синхронним двигуном з важкими умовами запуску // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» / Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007 – С. 146-148.
2. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: Учеб. пособие для вузов. – 4-изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 301 с.
3. Подрібновання. Енергетика і технологія: Навч. посібник / Г.Г. Півняк, Л.А. Вайсберг, В.І. Кириченко, та ін.; за ред. акад. Г.Г. Півняка. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 314 с.
4. Виноградов Б.В. Динаміка барабаних млинів. Монографія. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2004. – 127 с.
5. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горно-обогатительных предприятий. – М.: Недра, 1966. – 173 с.
6. Школа Н.И. Совершенствование пусковых режимов мощных электроприводов рудоразмольных мельниц с синхронными двигателями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1985. – 28 с.