

ОГЛЯД ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КУЛЬОВИХ БАРАБАННИХ МЛИНІВ

Р.С. Кришук, асп., **А.П. Ращепкін**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Описано види приводу сучасних барабанних млинів, способи передачі обертового моменту на барабан. Висвітлено проблеми приводу вугільних кульових барабанних млинів теплових електростанцій. Досліджено недоліки зубчастої передачі з використанням ведучого валу та зубчастого вінця. Описано переваги й недоліки безредукторного приводу з кільцевим двигуном. Проведено огляд переваг та недоліків безредукторного дугостаторного приводу. Розглянуто проблему одностороннього магнітного притягання дугового статора. Висвітлено переваги електричних машин торцевого виконання. Вирішено проблему взаємного магнітного тяжіння статора й ротора торцевого асинхронного двигуна. Запропоновано новий тип двигуна безредукторного приводу для кульових барабанних млинів – торцевий дугостаторний асинхронний двигун. Розглянуто методи розрахунку торцевих асинхронних двигунів. Прийнято рішення про необхідність розробки методу розрахунку на основі інтегральних перетворень фундаментальних рівнянь теорії поля. Бібл. 33, рис. 6.

Ключові слова: кульовий барабанний млин, зубчастий вінець, безредукторний привід, торцевий дугостаторний асинхронний двигун, метод розрахунку електромагнітного поля.

Вступ. Барабанні млини – це механізми, в яких матеріал подрібнюється всередині обертового корпусу за допомогою подрібнювальних тіл (металеві кулі, стержні) або самоподрібнюється. Залежно від виду подрібнювальних тіл розрізняють такі барабанні млини: кульові, стержневі, самоподрібнення (МС), напівсамоподрібнення (МНС). Загальний вид барабанного млина показано на рис. 1, з якого видно, що при обертанні барабана 1 подрібнювальні тіла 2 під дією відцентрової сили піднімаються на певну висоту, а тоді внаслідок падіння розбиваються, роздавлюють та розтирають матеріал. Рекомендована швидкість обертання барабана близько 17-18 об/хв, причому технології подрібнення вимагають можливості її регулювання [8].

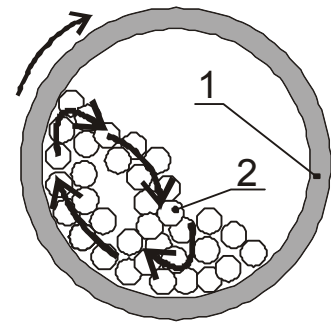


Рис. 1

Потужність приводу кульових барабанних млинів сягає до 3 МВт для вугільних млинів українських теплоелектростанцій і 35 МВт для МС на гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК). Привід таких млинів містить зубчасту пару вінець-вал (рис. 2). Млини напівсамоподрібнення великої потужності (понад 18 МВт) працюють з безредукторним приводом. Розміри барабана найбільших кульових млинів сягають 8 м у діаметрі довжиною більше 10 м. Кульові млини використовують для подрібнення вугілля на теплових електростанціях (ТЕС, ТЕЦ), стержневі – переважно для виробництва цементу, МС та МНС – у гірничо-збагачувальних комбінатах. Вони мають найбільші потужність та розміри.

Існують електромеханічні та електричні (безредукторні) типи приводу [13, 24, 28] барабанних млинів. До перших відносять приводи з зубчастими та фрикційними передачами, до других – обертання барабану безпосередньо від тихохідного двигуна. Електромеханічні (рис. 2) бувають з одним або кількома двигунами, в яких обертовий момент на барабан 1 передається через зубчасту пару: ведучий вал 2 та зубчастий вінець 3. Частіше за все використовуються синхронні двигуни 4 (160...200 об/хв) (рис. 2 а), що з'єднані безпосередньо з ведучою вал-шестернею, а рідше асинхронні 5 (750...1500 об/хв)

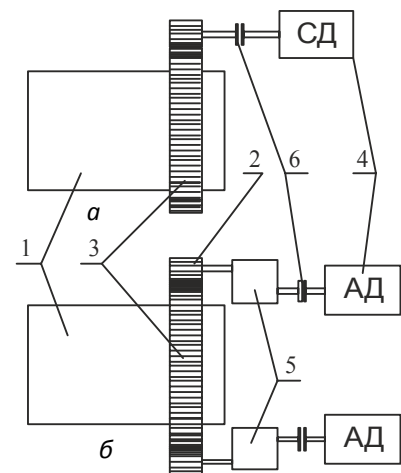


Рис. 2

(рис. 2 б), що з'єднуються з ведучою вал-шестернею через редуктор 5 [29]. На валу двигуна розміщується пружна муфта ковзання 5, яка зменшує ударне навантаження на двигун під час пуску. Причому зубчастий вінець може приводитись до руху як одним, так і двома двигунами, розміщеними з обох боків барабанного млина. Фрикційний привід передбачає вільне розміщення барабанів на роликкооперах і відкидає необхідність у зубчастій передачі, але через ненадійність він не застосовується. Для двигунів потужністю понад 12...15 МВт (млини для ГЗК) все частіше використовують безредукторний привід (ротор двигуна є частиною барабана млина).

На теплових електростанціях (ТЕС), таких як Трипільська, Ладижинська, Бурштинська, Добротвірська, для подрібнення вугілля в пил перед камерою згорання використовуються вугільні кульові барабанні млини потужністю до 2500 кВт. Найпоширеніші серед них – типу ШБМ 370/850 (Ш-50А), ШБМ 287/470 (Ш-16). Проблемою вугільних млинів є використання застарілого та ненадійного типу приводу, в якому обертовий момент передається зубчастою парою вал-шестерня. Пошук альтернативи у вигляді безредукторного приводу є важливою й актуальною науковою задачею сьогодення.

Метою цієї роботи є огляд стану розробки кульових барабанних млинів, способів їх приводу та методів визначення електричних параметрів і енергетичних показників двигунів приводу.

Недоліки зубчастої передачі. Зубчаста передача з використанням пари вінець-вал характеризується стиранням зубців, великим рівнем вібрацій, частими планово-попереджувальними заходами, довгочасними затримками виробництва, при пошкодженнях редуктора – необхідністю в додаткових запчастинах (випадок позапланових ремонтів). Тут особливо великі втрати потужності, що складають 25 %. Оскільки відкриті зубчасті передачі барабанних млинів можуть регулюватися, то неминучі неточності монтажу. Це обумовлює нерівномірність розподілу навантаження між зубцями і призводить до інтенсивного зносу відкритих зубчастих передач [33]. Особливо значне руйнування зубців відбувається при сухому подрібненні через наявність пилу. Дрібний абразивний пил та перепади температур спонукають застосовувати високоякісні змащувальні матеріали.

На виготовлення більш як 1100 деталей кожного комплекту зубчастих передач потрібно до 20 т металу (сталь різних марок, чавун, бабіт, латунь, бронза). У відливанні й обробці деталей беруть участь кілька великих цехів. Підведення фундаментів під редуктори, складання, монтаж вимагають близько 5000 людино-годин фізичної праці. Біля кожного такого редукторного приводу млина постійно чергує механік, який спостерігає за вальницями, масляним насосом, за роботою зубців. У редукторному приводі є такі місця тертя, де перерва в подачі мастила призводить до виходу з ладу всього редуктора, а отже, й млина протягом сятків годин. Вальниці й зубці редукторів зношуються, термін їх служби часто не перевищує двох-трьох років, а інколи, при важкому старті, менше одного року [21].

Чим більша ширина зубців вінця 3 й ведучого валу 6 (рис. 2), тим складнішим стає процес вирівнювання їх взаємного розміщення, оскільки сили повинні передаватися рівномірно по всій поверхні зубців. У разі недосконалого вирівнювання сили не будуть передані по всій поверхні зубця, а лише в деяких точках. На сьогодні для потужних млинів зубці сягають ширини від 0,5 до майже 1,4 м, що робить практично неможливим їх ідеальне вирівнювання [27].

Оскільки діаметр барабанних млинів сягає кількох метрів, вінці мають досить великі розміри і вагу в кілька десятків тонн. Тому часто вони виготовляються розбірними. Це дає змогу зменшити вагу відливання окремих половин удвоє або навіть учетверо, а транспортування може виконуватись стандартним транспортом без використання спецтехніки. Значно спрощуються встановлення і складання.

Зубчастий вінець є одним з найбільш дорогих і важливих елементів кульових барабанних млинів. За даними виробників, зубчастий вінець для млина МШЦ 4500x6000 коштує 22 тис. USD, тоді як вал-шестерня – 4 тис. USD. Гарантія безвідмовної роботи таких важливих деталей дається до одного року. Звичайно за сприятливих умов роботи при хорошому

змащенні ресурс деталей можна збільшити, але зупинки виробництва при ремонті можуть принести великі збитки.

Винайдено кілька способів збільшення терміну служби зубчастої передачі, але вони не в змозі повністю уникнути головних її недоліків. Наприклад, було запропоновано зміцнення зубчастого зачеплення приводу, що включає попереднє припрацювання з подальшою струменевою обробкою зубців для створення наклепу і розвитку стискаючих напруг. Причому після наклепу поверхня зубців повинна оброблюватись змащувально-холодильною рідиною [14]. Під час ремонту невеликі дефекти зубців (тріщини і вм'ятини) заварюються наплавленням і зачищаються наждачним кругом. При зношенні зубців до 30% їх товщини вінець потрібно розвернути на 180° , щоб зубці працювали незношеною стороною. Якщо ж зношення зубців більше – потрібно провести заміну вінця.

Для підвищення ресурсу роботи млинів особливу увагу приділяють планово-попереджувальним заходам. Щомісяця потрібно виконувати огляд на наявність можливих проблем. Такі огляди вимагають тимчасової зупинки млина на короткі проміжки часу для ремонту, в основному незначного. Він полягає в заміні зношених деталей, таких як зношений болт, регулюванні вальниць, решітки. Планово-капітальний ремонт виконується один раз на рік: чиститься та регулюється привід, замінюються великі деталі, наприклад вал-шестерня чи зубчастий вінець, перевіряються вальниці та ін. [32]. Барабани млинів міняють дуже рідко. Як правило, аварійна зупинка загрожує великими економічними втратами. Наприклад, вчасно не замінені вінець і шестерня можуть бути відсутніми на складі. А цикл їх виробництва займає від трьох до шести місяців.

Верхня межа потужності млинів з одним ведучим валом сьогодні зупинилася на межі 9 МВт, з подвійним – 18 МВт (рис. 3) [13, 17, 31]. Такі межі потужностей стали досяжні завдяки застосуванню покращених матеріалів і удосконаленню методів металообробки. Млини потужністю більше 15 МВт постачаються з безредукторним приводом.

Безредукторний привід. У безредукторного приводу відсутні всі традиційні механічні компоненти привідних систем – зубчастий вінець, ведуча вал-шестерня, редуктор, муфта зчеплення, вал електродвигуна та вальниці. Таким чином, барабан 1 млина (рис. 4, 5) стає ротором великого синхронного двигуна після монтажу полюсів ротора 2 з обмоткою 3 безпосередньо на сам барабан. Ротор «обгортають» кільцевим (рис. 4) або сегментним (рис. 5) статором 5 з обмоткою 4. Двигуни з кільцевим статором називають кільцевими, а з сегментним статором – дугостаторними.

Переваги безредукторного приводу полягають в тому, що знімається обмеження на габарити млина і його потужність, відсутня зубчаста передача, яка з часом виходить з ладу й потребує постійного контролю за її станом, невеликий обсяг технологічного обслуговування. Не створюються вібрації, биття, удари, викликані при контактній системі зубчастої пари. Виключаються довготривалі простої в роботі, викликані ремонтом, підвищується продуктивність, зменшується маса барабана, збільшується загальний ККД. Нема необхідності використовувати систему змащення зубців через їх відсутність, завдяки чому виключається стаття витрат на утилізацію матеріалів [30]. Безредукторний привід передбачає автоматичне перемикання швидкості, можливість обертання барабана в зворотному напрямку. Такі особливості дають змогу оптимізувати технологічний процес подрібнення й скоротити час простоїв за рахунок збільшеного терміну служби приводу.

Сьогодні великого поширення набули кільцеві двигуни безредукторного приводу барабанних млинів потужністю до 35 МВт (рис. 3). Провідними виробниками їх є такі компанії: ABB (Швейцарія), METSO MINERALS (Фінляндія), SIEMENS (Німеччина). Живиться

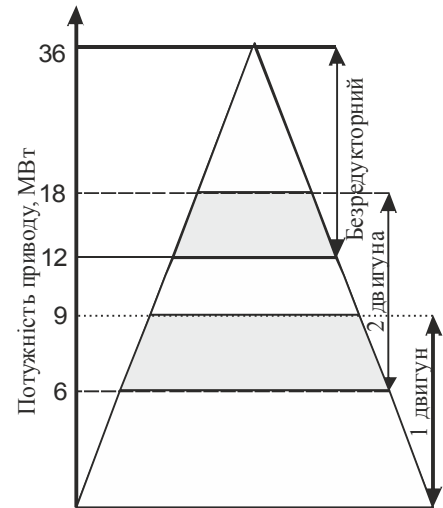


Рис. 3

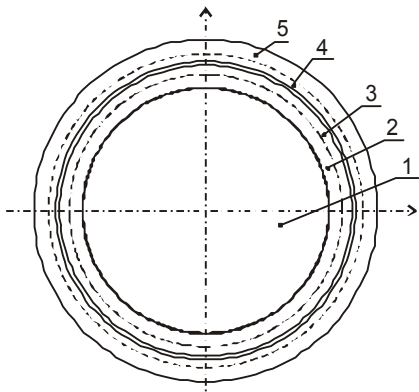


Рис. 4

безредукторний привід від мережевих комутаційних перетворювачів постійного струму без проміжного електричного кола – циклоконвертерів [28], де вихідна напруга формується із синусоїди мережі, але зі значним зниженням частоти до 0,3...6,0 Гц [25].

Основними недоліками кільцевого безредукторного електроприводу барабанних млинів є відносно великі першочергові затрати на його розробку, виготовлення та встановлення. Вартість приводу приблизно на 30 % вища вартості самого млина, а монтаж займає до 12 тижнів [26]. Причому, якщо встановлення приводу на зубчастій передачі з двома двигунами для млина 13 МВт коштує 1,9 млн USD, то кільцевого безредукторного – 4,18 млн USD. До недоліків також

відносять негативний вплив на електромережу, потребу в додаткових приміщеннях для перетворювачів частоти [23]. Отже, безредукторний привід з кільцевим статором не вигідно встановлювати на вугільних млинах, в яких нема надвеликих потужностей (до 3 МВт) і які не зможуть покрити собівартість безредукторного кільцевого приводу.

Дугостаторний привід. Окрім кільцевих двигунів, для безредукторного приводу барабанних млинів застосовували дугостаторні двигуни (рис. 5), що належать до машин з розімкнутим магнітопроводом. Дугові статори збуджують біжуче магнітне поле, взаємодія якого з циліндричною стінкою млина приводить в обертний рух барабан.

Особливість дугостаторних машин полягає в тому, що саме дугова форма дає можливості наблизитись до обода обертового механізму робочої машини й спрямувати на нього магнітне поле з будь-якою швидкістю від кількох десятків до кількох тисяч обертів за хвилину. Дугостаторний безредукторний привід застосовується в ліфтах висотних будинків, у підйомних машинах шахт, прокатних станах, поршневих компресорах, пресах, барабанних млинах, текстильних машинах, тахогенераторах і гіроскопах, в електротранспорті, індукційних насосах тощо.

У роботі [21] запропоновано дугостаторний асинхронний двигун (ДАД) для барабанних млинів та досліджено спосіб дрібноступеневого регулювання швидкості розповсюдження магнітного поля вздовж дугового статора, обмотку виконано двошаровою, тобто з фіксованим кроком, але при цьому ж зі змінним укороченням, завдяки чому була досягнута можливість перемикання виводів обмотки на різну кількість пазів на полюс-фазу.

У цій же роботі запропоновано використовувати дугостаторний привід для кульових барабанних млинів, виробництвом якого на той час займалися заводи «Електросила» в Ленінграді, «Красный котельщик» у Таганрозі. У роботі [11] вказується, що норвезькою фірмою «Суварангер АС» було введено в експлуатацію барабанний млин з безредукторним дугостаторним приводом, а в 1982 р. на заводі «Гигант» ВО «Воскресенскцемент» вперше в колишньому СРСР введено в експлуатацію млин розмірами 4×13,5 м з приводом потужністю 3200 кВт. Відомо про застосування дугостаторного безредукторного приводу на вугільних кульових барабанних млинах Ш-50 [20]. Сучасні виробники гірничо-збагачувального обладнання не виробляють дугостаторні приводи для барабанних млинів через відсутність замовлень, що пов'язано з описаними нижче проблемами.

Важливе значення має вибір раціонального варіанту розміщення дугового статора. Оскільки розміри барабана сягають кількох метрів у діаметрі, то дотична електромагнітна сила дугового статора, що діє вздовж опорних поверхонь, сягає кількох сотень кілоньютон. Зокрема, для статора вугільного кульового млина Ш-50 ця сила складала близько 200 кН [20].

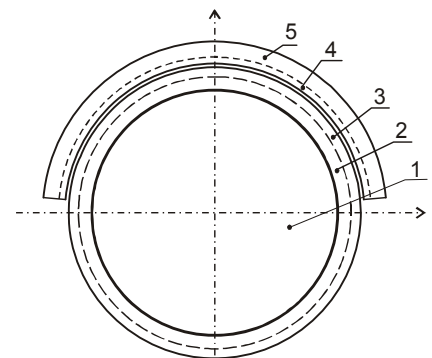


Рис. 5

При верхньому розміщенні дугового статора проміжок між точками кріплення ярма до станини необхідний втричі більший, ніж при нижньому, що змушує збільшити втричі й висоту станини, для того щоб не було значного прогинання ярма. При цьому маса всього статора та його фундаментної рами зростає вдвічі, а верхній розмір – на 1,5 м. Вигинаючі моменти на опорах дугового статора потребують спорудження чотирьох колон висотою до 8 м з поперечним перерізом 1 м^2 , але вони завалюють приміщення, ускладнюють монтаж агрегату.

Перерахованих труднощів можна позбавитись, якщо статор розміщувати знизу. При нижньому положенні виникають мінімальні коливання величини немагнітного проміжку. Недоліком же є велике навантаження на вальниці барабана через додаткову вертикальну силу магнітного тяжіння, яка може досягати 600 кН. Якщо розмістити статор під барабаном, необхідно загородити його від попадання бруду й води. Також потрібний більш глибокий підвал для розміщення статора [20].

Постає завдання щодо вибору такого приводу для кульових барабанних млинів, який би усунув недоліки та використав переваги існуючого. Як було зазначено, для кульових барабанних млинів ТЕС потужністю до 3000 кВт безредукторний кільцевий привід не знайшов застосування через високу вартість, а дугостаторний, хоч і позбавлений головного недоліку кільцевого, але через сили магнітного притягання статора до ротора не набув популярності.

Торцеві машини. Коли виникає необхідність створення компактного й економічного безредукторного електроприводу, часто звертаються до торцевого виконання двигунів. Переваги торцевих машин: значне зменшення маси й габаритних розмірів на одиницю потужності; можливість регулювання величини повітряного проміжку; зростання потужності в заданих габаритах порівняно з двигунами традиційного виконання; відсутність «зубчастого ефекту», який є перешкодою для розширення об'єму активної зони машини; економічність магнітопроводу; можливість досягнення ефективної вентиляції; технологічність конструкції.

Великого поширення набули торцеві асинхронні двигуни (ТАД) з короткозамкненою обмоткою в пазах ротора, а також торцеві синхронні машини (які можна використовувати як генератори) з ротором на постійних магнітах.

Основною проблемою в ТАД, як і в ДАД, можуть стати сили одностороннього магнітного тяжіння. Таку проблему можна спробувати вирішити шляхом використання двох статорів по сторонах ротора. Але в такій конструкції виникає небезпека деформування ротора і заклинювання його поміж статорами. Рішенням може бути використання неферомагнітного ротора дискового типу з матеріалу високої провідності. Але такий варіант значно дорожчий, оскільки цінного матеріалу, яким може бути алюміній чи мідь, потрібно дуже багато, щоб диск не деформувався і міг привести в рух багатотонний барабан.

Можна виготовити неферомагнітний диск із нержавіючої сталі з нанесеними на його сторони прошарків високопровідного матеріалу. Таким чином, отримаємо торцевий двигун без магнітних сил притягання. Також з'являється можливість застосувати дуговий статор для торцевого двигуна.

Отже, для вирішення проблеми електроприводу кульових барабанних млинів ТЕС можна застосувати торцевий дугостаторний асинхронний двигун (ТДАД) (рис. 6). Він являє собою торцеву електричну машину, що складається зі статора 2 у вигляді дуги з визначеним кутом φ і неферомагнітного дискового ротора 3 (на барабані 1) з нанесеним електропровідним матеріалом. Причому на кожній стороні ротора, яких може бути декілька, є можливість розмістити два однакові дугові статори.

У роботі [22] було запропоновано конструкцію ТДАД для корморізки в сільському господарстві. Однак на сьогодні немає інформації про проектування торцевих дугостаторних двигунів, зокрема ТДАД на кілька мега-

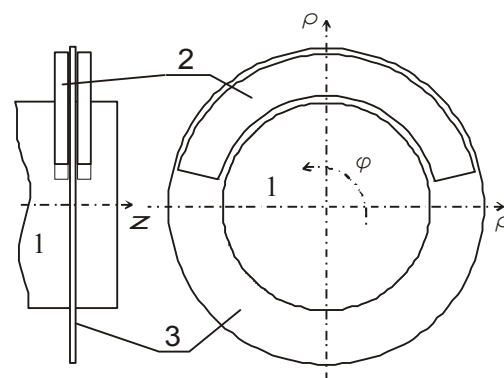


Рис. 6

ват. У літературі ще не зустрічалася інформація про методи розрахунку ТДАД.

Виконання торцевого статора двигуна у формі сегменту з центральним кутом $\varphi_{ст}$ (дуговий статор) дасть змогу регулювати швидкість обертання диска (ротора), закріпленого на барабані кульового млина, без використання механічного редуктора й перетворювачів частоти [21]. Ще однією перевагою є можливість легко охолоджувати ротор електричної машини. Наприклад, достатньо під барабаном кульового млина розмістити водяну ванну з проточною водою так, щоб диск ротора під час обертання занурювався в неї й охолоджувався.

У роботах [9, 10] зазначено, що технологія виготовлення торцевих електродвигунів значно простіша, ніж двигунів традиційного виконання. Встановлено, що геометричні розміри торцевих двигунів можна було б обирати за методиками, описаними для двигунів циліндричної конструкції, але такий спосіб розрахунку вносить недопустимі похибки, не враховує характер укладання лобових частин обмоток і потребує проводити багаторазові розрахунки й оцінку результатів, щоб підібрати оптимальні дані. Тому варто розглянути існуючі методи моделювання торцевих асинхронних машин.

Моделювання магнітного поля ТАД. На цей час найбільшого поширення набула конструкція ТАД з короткозамкненим феромагнітним ротором. Із відомих методів розрахунку ТАД з короткозамкненим ротором використовують теорію поля, $\dot{E} - \dot{H}$ схеми заміщення, деталізовані магнітні й електричні схеми заміщення, чисельні методи кінцевих різниць (МКР) та кінцевих елементів (МКЕ).

Важливим завданням є дослідження припущень, що приймаються при моделюванні магнітного поля ТАД і які прямо пропорційні похибкам. На основі прийнятих припущень можна орієнтуватись у виборі методу побудови математичної моделі для розрахунку параметрів ТДАД барабанних млинів.

Магнітне поле ТАД досліджувалось на основі теорії електромагнітного поля торцевих машин з друкованими обмотками, розміщеними як на гладких осердях, так і в пазах, а також магнітне поле машин зі штампозварними та всипними обмотками [3]. Математичні моделі побудовані без врахування обертання ротора, що вносить певні похибки в розрахунки.

При розрахунку магнітного поля ТАД з друкованими обмотками прийняті наступні припущення: поле в досліджуваній області двовимірне, квазістаціонарне, а струми рівномірно розподілені по перерізу провідників друкованих обмоток, магнітна проникність матеріалу приймається нескінченно малою. Через складність знаходження аналітичного рішення в загальному вигляді задача вирішується ітераційним методом, що потребує додаткових ресурсів для здійснення розрахунку, а також створює додаткові похибки розрахунків. Використовуючи метод накладання, знаходять напруженість магнітного поля в шуканій точці. Оскільки розподіл струмів у роторі важко описати періодичними функціями, то попередньо проводиться оцінка похибки розрахунку, яка виходить із наявності струмів ротора, а тоді припускається, що струми в роторі відсутні.

Магнітне поле машин зі штампозварними та всипними обмотками описують скалярним магнітним потенціалом у циліндричних координатах, де приймається припущення, що магніторушійна сила магнітного контура та скалярний магнітний потенціал незмінні вздовж радіуса.

У роботі [6] йдеться про розрахунок інтегральних характеристик трифазного ТАД. Зубчастість ротора і статора, а також насичення магнітного кола торцевої машини враховуються коефіцієнтами, що вносять певні похибки до розрахунків. Електромагнітне поле в системі координат описується рівняннями Максвелла.

У роботі [12] при розрахунку електромагнітного поля торцевої електричної машини розглядається з припущенням щодо заміни класичної зубцево-пазової структури статора еквівалентними за своїми електричними й магнітними властивостями активним розподіленим шаром (АРШ). Магнітне поле моделюється з використанням $\dot{E} - \dot{H}$ схем заміщення на основі теорії Інкіна А.І. [4, 5]. Модель і поле вважаються двовимірними, симетричними по осі: $\dot{E}_\varphi = 0, \dot{B}_r = 0, E_z = 0$, де φ, ρ, z – відповідно азимутальна, радіальна та аксіальна координати.

нати циліндричної системи координат (рис. 6). Торцева машина ділиться на конструктивні зони (ярмо статора й ротора, зубцево-пазові зони, немагнітний проміжок), параметри яких визначаються на основі рівнянь Максвелла. Користуються усередненими параметрами для кожної зони, джерелом обертового поля з умовною швидкістю приймається стороння густина синусоїдного струму статора.

У роботі [15] торцева асинхронна машина представлена статором без ярма, по сторонах якого розміщуються короткозамкнені ротори. Тут, як і в роботі [12], застосовується метод $\dot{E} - \dot{H}$ чотириполюсників. При складанні математичної моделі ТАД припускають, що немагнітний проміжок рівномірний – зубчастість статора й ротора враховують загальноприйнятими коефіцієнтами; втрати в сталі на гістерезис і вихрові струми відсутні й враховуються у кінцевих виразах балансу потужності; магнітне коло машини ненасичене; відсутній ефект витіснення струму; магніторушійні сили обмоток і магнітні поля розподілені синусоїдно вздовж кола повітряного проміжку; ротор симетричний, технологічні похибки при його виготовленні не враховуються; двигун працює від джерела нескінченної потужності синусоїдної напруги; стороння густина струму розглядається як усереднена величина по всій області, зайнятій АРШ.

У класичній теорії машин широко використовуються еквівалентні схеми заміщення. Їх синтезують, спираючись на закони електромагнетизму в інтегральній формі, які потім трансформують у закони Кірхгофа для магнітного кола. Так, схема заміщення в класичній теорії представляється у вигляді триелементної Т- або Г-подібної схеми.

Було запропоновано використання аналітичного методу деталізованих магнітних і електричних схем заміщення для торцевих електричних машин [2], що розроблялися для аналізу властивостей лінійних двигунів [1]. Введено поняття ідеальної моделі торцевого асинхронного двигуна, коли за висотою машину ділять на п'ять конструктивних зон. Всі зони розбиваються по радіусу і колу на рівні частини, які замінюються еквівалентними параметрами й утворюють двовимірну магнітну схему заміщення (МСЗ) ТАД.

Магнітна схема заміщення складається за наступних припущень: для кожної частини розбиття зубчастий повітряний проміжок приведений до гладкого за допомогою коефіцієнта картера, що залежить від радіуса; насичення сталених частин відсутнє, їх магнітний опір прирівнюється до нуля; потоки пазового та лобового розсіяння враховуються введенням у рівняння електричної рівноваги обмоток відповідних індуктивностей; всі прошарки ротора нерухомі стосовно статора, а їх реальний рух враховується введенням в контури провідного шару ротора ЕРС руху; в кожному шарі розрахункової моделі електричні й магнітні властивості ізотропні. Розподіл магнітного поля і струму ротора залежить від радіуса. Модель побудована на системі зведених до лінійних диференціальних рівнянь шляхом заміни кутовою швидкістю частинної похідної від часу.

На основі методу деталізованих схем заміщення відхилення розрахунків від експерименту для ТАД не перевищує 6 %, для класичних Т-подібних схем заміщення з урахуванням поправочних коефіцієнтів – 12 %, тоді як при розрахунках по середній лінії з допомогою традиційних методик похибка зростає до 25...35 % .

У роботі [7] розглядається торцевий короткозамкнений ротор, в якому між ярмом і зубчастим шаром присутній технологічний немагнітний проміжок. Така конструкція, як стверджує автор, дає змогу використовувати холоднокатану електротехнічну сталь і спрощує технологію виготовлення. Розрахунок виконується на таких припущеннях: магнітна проникність сталі рівна нескінченності, густина струму має лише радіальну складову, магнітний потік проникає в ротор тільки через коронки зубців, ширина пазу рівна ширині стержня, у робочому повітряному проміжку магнітна індукція описується синусоїдою.

Методи кінцевих різниць (МКР) та кінцевих елементів (МКЕ) набули широкого застосування як для дво-, так і тривимірних магнітних полів ТАД завдяки таким позитивним якостям, як універсальність та простота алгоритму.

У моделюванні магнітного поля ТАД методом кінцевих різниць без врахування зубцево-пазової зони статора приймають наступні припущення: магнітне поле плоскопарале-

льне й розглядається у двовимірному об'ємі, обмеженому подвійним полюсним діленням; магнітна проникність сталі скінченна, але достатньо велика порівняно з магнітною проникністю повітря; поверхня розточки статора гладка.

Недолік МКР полягає в тому, що при використанні ортогональних сіток виникають труднощі в описі границь розділення середовищ, що мають складну конфігурацію. Це призводить до необхідності застосування великої кількості вузлів. Оскільки на границях середовищ похідні, що входять до рівняння, можуть не існувати, метод МКР важко застосувати на межі поділу середовищ [19].

Моделювання основних фізичних процесів ТАД також здійснюють із застосуванням МКЕ у таких програмах, як Comsol, ANSYS [16]. Розглядається проблема вибору оптимального співвідношення числа полюсів на роторі й пазів на статорі торцевого генератора на нові скінченно-елементного моделювання магнітного поля в середовищі MathCad [18]. Для розв'язання тривимірної електромагнітної задачі використовуються наступні припущення: не враховуються несуттєві конструктивні деталі (немагнітні елементи кріплення котушок, ізоляція); нехтують струмами в заокругленнях котушок; шихтування магнітопроводу враховується заданням питомого опору сталі магнітопроводу вздовж шихтування. Недоліком МКЕ є те, що часто не вистачає ресурсів ЕОМ для необхідної точності розрахунку, а також потрібно щоразу корегувати модель машини при зміні параметрів її конструкції.

У відомих методах розрахунку, що застосовуються для ТАД з короткозамкненим ротором, враховуються лише радіальні складові струму ротора (що пояснюється наявністю «білячої клітки»), швидкість обертання ротора вводиться штучно (лінійна швидкість ротора не враховується), немає можливості обчислити складові розподілу магнітного поля по всіх координатах. Чисельні методи МКР та МКЕ не можуть братись за основу для наукових досліджень електромагнітного поля. Їх доцільно застосовувати для інженерних розрахунків.

Запропонована торцева машина (рис. 6) з дисковим високопровідним ротором потребує враховувати також тангенціальну складову струму ротора та лінійну швидкість. Для дослідження електромагнітного поля в немагнітному проміжку ТДАД пропонується застосувати аналітичний метод інтегральних перетворень на основі фундаментальних рівнянь теорії поля. У запропонованому методі параметри поля обчислюються по аксіальній координаті циліндричної системи координат. Причому виведена математична модель також дає змогу знайти розподіл тривимірному поля по інших координатах (радіальна й тангенціальна), але оскільки електромагнітне поле по тангенціальній і радіальній координатах суттєво не впливає, для економії обчислювальних ресурсів дозволяється його не враховувати. На відміну від відомих методів розрахунку ТАД, враховується лінійна швидкість обертання, яка залежить від радіального напрямку. Це дасть змогу отримати більш точну картину розподілу магнітного поля.

Висновок. Розглянуто проблему використання зубчастої передачі на кульових барабанних млинах українських ТЕС, існуючі типи електроприводу барабанних млинів, їх переваги та недоліки. Досліджено проблеми експлуатації механічної передачі з використанням пари вал-шестерня та основні заходи, що спрямовуються на збільшення її ресурсу. Представлено інформацію про види безредукторного приводу та застосування його для обертання барабанів млинів. Досліджено переваги та недоліки безредукторного кільцевого та дугостаторного приводу, шляхи вирішення основних проблем застосування дугостаторних двигунів на барабанних млинах. Запропоновано новий тип безредукторного приводу з торцевим дугостаторним асинхронним двигуном (ТДАД) з неферромагнітним дисковим ротором. Представлено інформацію про методи моделювання магнітного поля торцевих асинхронних двигунів, на основі чого вказано на необхідність розроблення нового методу розрахунку на основі інтегральних перетворень фундаментальних співвідношень теорії електромагнітного поля.

1. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарпулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
2. Власов В.В., Сарпулов Ф.Н., Урманов Ю.Р. Математическая модель торцевого асинхронного двигателя с биметаллическим ротором // Электричество. – 1992. – № 7. – С. 37–41.

3. *Игнатов В.А., Вильданов К.Я.* Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
4. *Инкин А.И.* Синтез Е-Н звеньев и цепных схем замещения электрических машин // Электрические беспазовые машины переменного тока. – Новосибирск: НЭТИ, 1973. – Вып. 4. – С. 107–113.
5. *Инкин А.И., Литвинов Б.В.* Электромагнитное поле в активном объеме трехфазного торцевого асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором // Электричество. – 1974. – № 9. – С. 47–53.
6. *Инкин А.И., Литвинов Б.В.* Интегральные характеристики трехфазного торцевого асинхронного электродвигателя // Электричество. – 1979. – № 10. – С. 70–72.
7. *Казанский В.Н.* Метод определения параметров торцевого комбинированного ротора // Асинхронные электромашины. – Каунас: КЕМ. – 1969. – № 1. – С. 207–211.
8. *Кириченко В.І.* Вибір параметрів та режиму роботи млинів примусового подрібнення // Уголь України. – 1998. – № 5. – С. 45–46.
9. *Никитин Б.А.* Конструирование и испытание дисковых асинхронных двигателей // Энергетика и электротехническая промышленность. – 1963. – № 3. – С. 10–13.
10. *Никитин Б.А.* Особенности расчета параметров и характеристик асинхронных двигателей с аксиальным воздушным зазором // Параметры электрических машин переменного тока. – К.: Наук. думка, 1968. – С. 98–102.
11. *Пащенко А.А.* Теория цемента. – К.: Будівельник, 1991. – 168 с.
12. *Петренко Ю.В.* Торцевой асинхронный двигатель для мотор-колеса легкового электромобиля: Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1984. – 237 с.
13. *Півняк Г.Г.* Сучасний стан і перспективи подальшого розвитку електроприводів потужних барабанних млинів // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика: Вестн. Хар. гос. политех. ун-та. – 1998. – С. 24–27.
14. *Поветкин В.В., Сушкова О.А.* Повышение долговечности тяжело нагруженных зубчатых передач методами поверхностно-пластического деформирования // Сб. мат. III Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы механики и машиностроения», том II, Алматы, 2009. – С. 257–261.
15. *Полошков Н.Е.* Двухроторный торцевой асинхронный двигатель: Дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2010. – 195 с.
16. *Полошков Н.Е., Федий К.С.* Исследование торцевых электрических машин с использованием пакета ANSYS // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – № 2. – С. 21–23.
17. *Темьрев А.П., Птах Г.К., Анисимов А.В., Павлюков В.М., Квятковский И.А., Цветков А.А., Рыбников А.В., Голиков А.А., Бикташев В.Г., Крашенников А.И.* Перспективы применения вентилярных индукторных электроприводов на горнообогатительных комбинатах акционерной компании «Алроса» // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 2. – С. 42–50.
18. *Тихонов А.И., Шишкин В.П., Рубцов Д.В.* Поиск оптимальной конструкции торцевого ветрогенератора с использованием динамической полевой модели // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 3. – С. 43–47.
19. *Федий К.С., Встовский А.И.* Некоторые особенности расчета электрических машин с постоянными магнитами // Межвуз. сб. науч. тр. "Оптимизация режимов работы электротехнических систем". – Красноярск, ИПЦ КГТУ, 2004.
20. *Фридкин П.А.* Безредукторный дугостаторный электропривод. – М.: Энергия, 1970.
21. *Фридкин П.А.* Дуговые статоры как электрические аппараты для вращения рабочих машин // Электричество. – 1937. – № 7. – С. 26–31; № 8. – С. 28–34.
22. *Пат. РФ 2168295.* Измельчитель кормов / А.С. Сафонов, В.И. Литвин, А.Ф. Мамедов. Оpubл. 2001. Б.И. № 16.
23. *Ahrens M.* Revamp and modernization of gearless mill drives, SME Annual Meeting, Feb. 24-Feb. 27, 2008, Salt Lake City, UT.
24. *Bomvisinho L.* Ball mill drives – process advantages, ABB Switzerland Ltd, Center of Excellence Minerals Processing, <http://www.miningcongress.com/pdf/presentations-downloads/ABB-Leandro-Bomvisinho.pdf>.
25. *Bomvisinho L., P. Meier.* Revolutionary drive controller for gearless mills, SME Annual Meeting, Feb. 28-Mar. 03, 2010, Phoenix, AZ.
26. *Greg S Lane, G Bernard Siddall.* Sag milling in Australia – focus on the future, http://www.orway.com.au/aboutus_technicalpublications.asp, 2006.
27. *M. van de Vijfeijken, A. Filidore and M. Walbert, A. Marks.* Copper mountain: overview on the grinding mills and their dual pinion mill drives, ABB Switzerland Ltd, January 2012.
28. *Tatiana Ravani von Ow.* Milling - energy intensive and high maintenance, overcoming the challenges using frequency converters, ABB Switzerland LTD., Suiza.
29. *Tatiana Ravani von Ow, Leandro Bomvisinho.* Use of the latest technology to overcome the demands of mill operation, ABB Switzerland Ltd, Center of Excellence Mining Process, Segelhofstrasse 9P, 5405 Baden-Dattwil, Switzerland.
30. <http://www.abb.com/minerals>.
31. <http://www.library.stroit.ru/articles/razmol>.
32. <http://www.litplast.ru/obogatitelnoe-oborudovanie/zapchasti-melnicy>.

УДК 621.313

Р.С. Крищук, асп., **А.П. Ращепкин**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Обзор электроприводов шаровых барабанных мельниц

Осуществлен обзор барабанных мельниц, (их типы, характеристики, мощность, область применения и электропривода современных барабанных мельниц, способ передачи крутящего момента на барабан, указанные мощности, размеры. Рассмотрены типы угольных шаровых барабанных мельниц, используемых на украинских тепловых электростанциях. Освещены проблемы привода с зубчатой передачей угольных мельниц. Исследованы недостатки зубчатой передачи с использованием ведущего вала и зубчатого венца. Проведен обзор по эксплуатации зубчатых венцов, планово-предупредительных мероприятий. Рассмотрены основные способы повышения ресурса и надежности зубчатых венцов и механической передачи в целом. Обоснована необходимость разработки альтернативного привода для шаровых барабанных мельниц. Представлен обзор максимально возможных мощностей для действующих типов привода барабанных мельниц. Описаны преимущества и недостатки безредукторного привода с кольцевым двигателем. Рассмотрены преимущества и недостатки безредукторного дугостаторного привода. Представлены характерные особенности дугостаторных двигателей, их возможность регулирования скорости без использования частотных преобразователей. Указано на проблему одностороннего магнитного притяжения дугового статора. Предложены способы решения проблемы одностороннего магнитного притяжения. Освещены возможности и преимущества электрических машин торцевого исполнения. Рассмотрена проблема взаимного магнитного притяжения статора и ротора торцевого асинхронного двигателя, предложено использование неферромагнитного дискового ротора. Принято решение выполнять дисковый ротор с высокопроводящим покрытием. Рекомендуется применить дуговые статоры для торцевого асинхронного двигателя по обеим сторонам дискового ротора. Проведен обзор методов расчета торцевых асинхронных двигателей. Принято решение о необходимости разработки метода расчета на основе интегральных преобразований фундаментальных уравнений теории поля. Библи. 33, рис. 6.

Ключевые слова: шаровая барабанная мельница, зубчатый венец, безредукторный привод, торцевой дугостаторный асинхронный двигатель, метод расчета электромагнитного поля.

R.S. Kryshchuk, A.P. Rashchepkin

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Electric drive for ball mills

This paper presents review of types, characteristics, powers, methods for transmitting torque to the trommels of tumbling mills. Review investigated types and basic problems of gearless drives with the driving shafts and the ring gears of ball mills, used at Ukrainian power stations. Besides, review of the gear rims demonstrates operating and scheduled preventive measures to increase service life and reliability of gear rims and mechanical transmission in general. Moreover, reviewing showed necessity of developing alternative drive for ball mills trommels. Overview presents the better possible power for the existing types of drive tumbling mills, advantages and disadvantages of gearless drive, particularly of ring-type gearless. Article presents specifications of arc-stator engines to control the speed without frequency converters use. Also the article indicates the features and benefits of electric machines mechanical performance torque, the problem of unilateral arc-stator magnetic attraction and solutions to solve this problem. This paper proposes to use a non-ferromagnetic rotor disk for solve the problem of mutual magnetic attraction of the stator and rotor motor. The review recommends to use rotor with highly conductive coating and to apply the arc-stators to face of rotor on both sides of the rotor disk. Reviewing of the methods for calculating of induction motors indicated on necessity to develop a method of analysis of electromagnetic processes, which based on integral transforms of the fundamental equations of electromagnetic field theory. References 33, figures 6.

Key words: ball mill, ring gear, gearless drive, arc-stator axial air gap inductive motors, the method of calculation of electromagnetic fields.

Надійшла 21.02.2014

Received 21.02.2014