

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ СТРИЖНІВ ДЕМПФЕРНОЇ ОБМОТКИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ШАРОВОГО ПОДРІБНЮВАЛЬНОГО МЛИНА В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ

Вступ. Питання пуску синхронних двигунів (СД) досліджені досить повно [1]. Відомо, що пускові режими призводять до прискореного виходу СД з ладу внаслідок таких причин, як динамічні навантаження на підшипникові вузли, високі пускові струми, перегрів обмоток статора і ротора та зменшення терміну служби ізоляції тощо. Але в кожному конкретному випадку, для кожного окремого механізму необхідно знайти ті причини, дія яких на СД при його пуску найбільша. Це, з однієї сторони, дозволить проаналізувати умови роботи СД у даному технологічному процесі, а з другої – створити й застосувати найбільш ефективну пускову систему.

Мета роботи. Аналіз особливостей пуску СД шарового подрібнювального млина.

Матеріал і результати досліджень. Аналізуючи причини виходу СД з ладу, можна стверджувати, що термічні чинники впливають на всі елементи двигуна при пуску, значно знижуючи їх надійність і термін експлуатації [2, 3]:

- перевищення температури демпферної обмотки досягає декількох сотень градусів, при цьому сильний нагрів призводить до небезпеки її термічного або механічного руйнування;
- унаслідок нерівномірного розподілу струмів між стрижнями перевищення їх температури в межах полюса може відрізнятись у 2-3 рази, тому навіть при невисокому середньому нагріві демпферної обмотки температура окремих її стрижнів може значно перевищувати допустимі межі;
- нерівномірний розподіл перевищень температури по стрижнях полюса призводить до неоднакового теплового подовження стрижнів і появи внаслідок цього значної механічної напруги в жорсткій конструкції обмотки;
- при неоднаковому подовженні стрижнів в обмотці виникає напруга від центробіжних сил і теплового розширення короткозамкнутого кільця, що приводить до механічної деформації.

Враховуючи викладене, автори [2-4] перераховують вплив термічних чинників на старіння ізоляції, короткі замикання й вихід СД з ладу, показуючи, наприклад, що при щоденних пусках термін служби ізоляції зменшується на 27-51% на протязі одного року [4].

Вважається, що збільшення часу розгону двигуна, наприклад, внаслідок зниження напруги значно підвищує термічні навантаження [3]. Однак в окремих випадках процес нагрівання може прийняти характер адіабатного, тобто тепло, що виділяється, не встигаючи розсіятись в металі статора або ротора, викликає різке підвищення температури обмотки, що призводить до зниження рівня надійності ізоляції й аварій. При цьому найбільш уразливою є демпферна, або пускова, обмотка.

Зазначена проблема пуску є актуальною й для СД шарових подрібнювальних млинів. У млинах МШЦ 45-60, з СД типу СДС-19-56, потужністю 2500 кВт, 150 об/хв, номінальний струм і напруга – 281 А і 6000 В відповідно, ротор СД є складною механічною конструкцією з 20 парами полюсів. Фрагмент ротора млина з полюсним наконечником та стрижнями демпферної обмотки показаний на рис. 1.

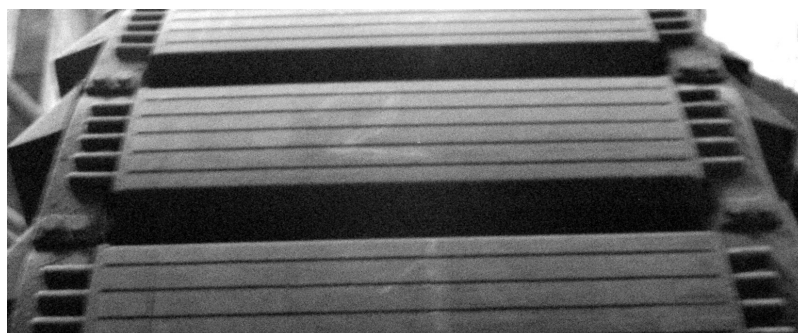


Рисунок 1 – Фрагмент ротора СД млина. Полюсний наконечник з стрижнями демпферної обмотки

Перевищення температури стрижня обмотки при пуску є складною функцією струму, що протікає по ньому, характеру його зміни, тривалості процесу, активного опору й теплоємності стрижня, передачі тепла самій обмотці, теплообміну між обмоткою, сталлю полюса й навколишнім середовищем, контактного опору, що визначає розтікання струму по сталі, та інших чинників. За умовами виділення й відведення тепла стрижень демпферної обмотки в загальному випадку можна розділити на дві частини: лежачу в межах сталевих пакетів сердечника і лобову. Найбільш важливе значення має визначення перевищення температури першої частини стрижня. Нестационарне теплове поле в сталі, викликане тепловіддачею з боку стрижня, відрізняється великою складністю:

воно суттєво залежить від часу, відстані між стрижнями, глибини закладки стрижня в сталь, коефіцієнта тепловіддачі від стрижня й від сталі до навколишнього середовища й таке інше. Наявність цього теплового поля погіршує тепловіддачу від стрижня до сталі через підігрів областей сталі, що оточують стрижень. З цієї причини при розрахунку нагрівання стрижня не можна вважати сталь полюса тілом з нескінченно великою теплоємністю.

Пуск СД млина навіть із завантаженим матеріалом для подрібнення становить близько 4 с, у цьому випадку можна з достатнім наближенням вважати, що вся теплова енергія, що виділяється стрижнем під час пуску, залишається в ньому і йде на підвищення його температури [6]:

$$C_{ст} \frac{d\vartheta}{dt} = I_c^2 r_c, \quad (1)$$

де $C_{ст}$ – теплоємність стрижня, що дорівнює $C_{ст} = cG_{ст}$, c – питома теплоємність стрижня, $G_{ст}$ – вага стрижня, i_c – струм стрижня, r_c – активний опір стрижня. Точне вирішення рівняння (1) майже неможливе, бо струм у стрижні не залишається постійним і є складною функцією часу $I_c = f(t)$.

Експериментальні дослідження пускових і теплових режимів СД шарового млина на ВАТ «Полтавський ГЗК» (ПГЗК) показують, що струми обмоток досягають шестикратних значень навіть при зниженні напруги на статорі до 10%.



Рисунок 2 – Температура в області полюса СД при його прямому пуску.

При таких значеннях струмів можна очікувати, що середнє перевищення температури стрижня демпферної обмотки буде перевищувати 200°C . Експериментальні дослідження вимірів температури ротора СД на ПГЗК дають значно менші значення – до 40°C (рис. 2). Така відмінність пояснюється тим, що вимірювання теплового поля службами ГЗК здійснювалось на відстані, причому стрижні закриті кожухом, який охолоджується струменем повітря вентилятора самоохолодження, розташованого на роторі.

Для встановлення дійсних значень температури нагріву стрижнів проведено моделювання пускових режимів СД з використанням моделі Парка-Горева в координатній системі d, q [5].

Урахування нагріву пускової обмотки виконане додаванням до відомої моделі СД рівнянь:

- нагріву стрижнів пускової обмотки:

$$C_{ст} \frac{d\vartheta}{dt} + \lambda_{\beta} \cdot S \cdot v + \frac{1+0.1v}{450} = k \cdot I_c^2 \cdot r_c (1 + \alpha\vartheta), \quad (2)$$

де $\lambda_p = 0,02$ Вт/см град - теплопровідність поверхні зіткнення з полюсом, S - площа зіткнення, v - окружна швидкість ротора, м/с, r_r - активний опір стрижня, $I_c = \sqrt{I_{ed}^2 + I_{eq}^2}$ - огибаюча (модуль зображуючого вектора) струму демпферної обмотки (струму стрижня), $\alpha = 0.004$ - температурний коефіцієнт;

- демпферної обмотки за поздовжньою та поперечною віссю з урахуванням зміни опору:

$$\frac{d\Psi_{ed}}{dt} = -R_{ed} I_{ed} (1 + \alpha\vartheta); \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{eq}}{dt} = -R_{eq} I_{eq} (1 + \alpha\vartheta),$$

де Ψ_{ed} , I_{ed} , R_{ed} і Ψ_{eq} , I_{eq} , R_{eq} - потокозчеплення, струм і активний опір демпферної обмотки за поздовжньою та поперечною віссю.

Результати моделювання пускових режимів СД шарового млина з 50% завантаженням, з урахуванням рівнянь (2), (3), показані на рис. 3, де відображені залежності зміни кутової частоти обертання й температури стрижнів ротора при прямому асинхронному пуску - ω_n, ϑ_n і від перетворювача частоти при пропорційному завданні напруги і частоти на статорі - $\omega_{nc}, \vartheta_{nc}$.

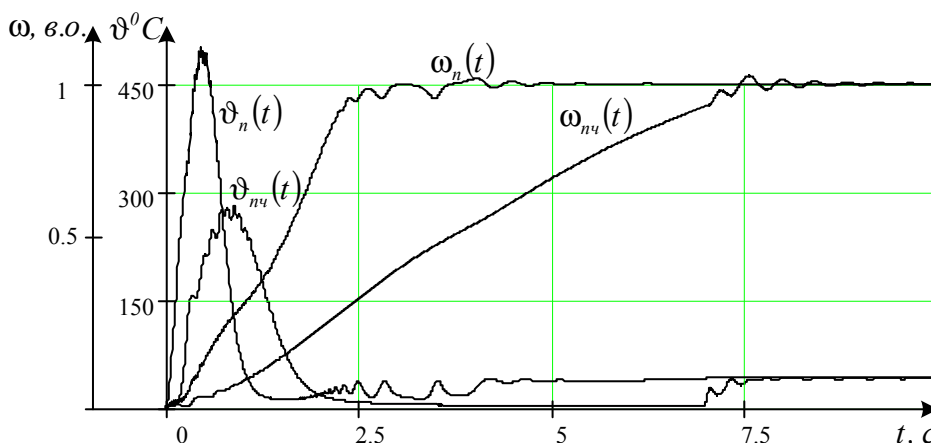


Рисунок 3 – Залежність кутової частоти обертання ω і температури стрижнів ротора ϑ при прямому асинхронному пуску (n) і від перетворювача частоти (nc)

Результати моделювання свідчать, що при прямому асинхронному пуску відбуваються теплові процеси стрімкого нагрівання пускової обмотки. Винос тепла, що виділяється через паз у зазор між статором і ротором, забезпечується конструкцією самого ротора СД, адже лопатки вентилятора охолодження розташовані безпосередньо під полюсами (рис. 4). Але інтенсивне охолодження відбувається лише при певних частотах обертання, що забезпечують неперервний повітряний потік через зазор при прямому пуску, це близько 25% номінальної, а при пуску від перетворювача частоти – 10..15%. Через це на початку пуску температура нагріву наближається до значень температури розм'якшення міді й латуні. Насправді температура нагріву стрижнів може бути ще більшою при врахуванні ефектів розсіювання й нерівномірного розподілу струмів по стрижнях. При цьому струм крайніх стрижнів у порівнянні із струмом середніх буде більший на 5-10%.

Висновки. Визначення дійсної картини теплових навантажень на обмотки СД доказує необхідність застосування системи плавного пуску з обмеженням струму на рівні 1,5..2 номінального. Дотримання цих умов дозволить уникнути деформації демпферної обмотки під впливом відцентрових сил, адже при такому нагріванні замикаючі кільця розтягуються й у зв'язку з жорстким з'єднанням їх із стрижнями викручуються у бік полюса. Стрижні згинаються в осьових площинах. У перетині кільця діють розтягуючі зусилля, в перетинах стрижнів – поперечні, а також додаткові зусилля від неоднакового їх теплового подовження.



Рисунок 4 – Фрагмент ротора СД млина.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Пусковые системы нерегулируемых электроприводов / [Черный А. П., Гладырь А. И., Осадчук Ю. Г., Курбанов И. Р., Вошун А. Н]. Монографія. – Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2006. – 280 с.
- 2 Лютер Р. А. Расчет синхронных машин / Лютер Р. А. – Л.: Энергия, 1979. – 272 с.
- 3 Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Сыромятников И. А.; под ред. Л. Г. Мамиконянца. [4-е изд., переработ. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
- 4 Котлярчук В. А. Электроснабжение экскаваторов / В. А. Котлярчук, А. Ф. Гончаров. – М.: Недра, 1980. – 175 с.
- 5 Сипайлов Г. А. Математическое моделирование электрических машин (АВМ): [учебное пособие для вузов]. / Сипайлов Г. А., Лоос А. В. – М.: Высш. школа, 1980. – 176 с.
- 6 Пинский Г. Б. Расчет явноточных синхронных машин / Г. Б. Пинский., В. В. Домбровский. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 136 с.