

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ СКІН-ЕФЕКТУ

А.О. Осипов¹, В.В. Шевченко²

¹ магістрант кафедри електричних машин, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

² професор кафедри електричних машин, док. техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Україна
zurbagan8454@gmail.com

В однорідному провіднику з постійним струмом, щільність струму однакова у різних точках перерізу провідника. Але при змінному струмі, щільність струму не однакова за перерізом: вона більша на поверхні та менша на осі провідника. Ця нерівномірність збільшується з товщиною провідника: вона більше при збільшенні товщини провідника, а також залежить від частота змінного струму. При великих частотах струм практично існує тільки в тонкому поверхневому шарі на поверхні провідника. Ця особливість має назву скін-ефект (від англ. – skin – шкіра, поверхневий шар) або ефект витиснення струму [1]. В електроенергетиці, в електрообладнанні, в кабелях скін-ефект оказує негативний вплив, і мабуть тільки в асинхронних двигунах (АД) він має позитивне значення. Відомо, що АД під час пуску мають два недоліка: великий пусковий струм («кидок струму»), який перевищує в 5-8 разів номінальний струм двигуна, та малий пусковий момент, який, якщо не приймати додаткових мір, може бути менше номінального. Для поліпшення пускових характеристик в момент пуску слід мати великий опір обмотки ротора. І це забезпечує саме скін-ефект, для підсилення дії якого пази ротора роблять глибокими і вузькими. Але обирати таку форму паза слід враховуючи багато додаткових факторів. Наприклад, через невдало вибрані розміри пазів можлива надмірна щільність струму в верхніх ділянках стрижнів обмотки ротора. Це може викликати нерівномірне теплове подовження стрижнів і їх вигин, відрив від короткозамикаючих кілець.

Тому необхідно розуміти ступень впливу скін-ефекту, враховувати його при проектуванні АД із короткозамкненими роторами [2].

В роботі розглянуті декілька варіантів виконання обмотки ротора з метою визначення впливу форми паза ротора на його характеристики, рис. 1. Були розглянуті стандартна форма, яка зазвичай використовується в АД (рис. 1,а), подвійна клітина (рис. 1,б) та паз глибокої форми (рис. 1,в).

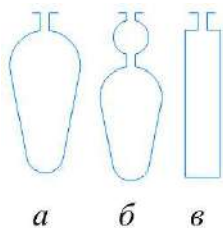


Рис. 1 – Форма пазів ротора:
а – звичайна форма; б – подвійна клітина; в – глибокий паз.

Також для приводів, де потрібен великий пусковий момент можна розглядати резистивну конструкцію ротора. Цей ротор має звичайну конструкцію, але кільця, що закорочують стрижні обмотки ротора, мають великий опір. Їх роблять зі спеціальних сталей або з нержавіючої сталі, зменшують переріз. У цих двигунів більше номінальне ковзання, високий пусковий момент, та зменшений пусковий струм. Обмеження використання

таких двигунів пояснюється низьким ККД через підвищені електричні втрати в роторі, а також тим, що вони потребують додаткового охолодження від зовнішнього вентилятора. Такі двигуни використовують для конвеєрів або для вантажопідйомні пристроїв, коли потрібні високий стартовий крутний момент та обмеження пускового струму.

Можна зробити висновок, що АД і натепер мають проблему з пуском, рис. 2, характеристика 1. Глибокий паз або двох-клітинна конструкція вирішують цю проблему, але якщо обмотка ротора з алюмінію. Окремо ми розглянули глибокі пази, в яких відношення висоти паза до його ширини дорівнює 10-12 (в

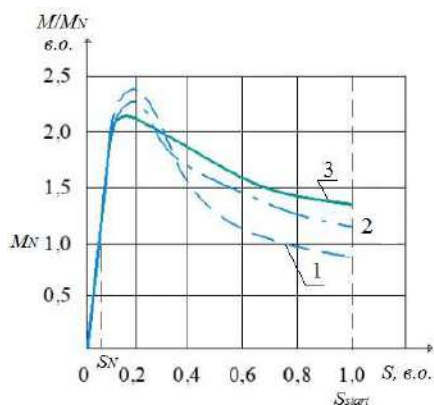


Рис. 2 – Механічні характеристики АД з різними формами пазів: 1 – двигун зі стандартним глибоким пазом, (рис. 1,а); 2 – двигун з глибокопазним ротором (рис. 1,е); 3 – двигун з двох-клітинним ротором (рис. 1,б)

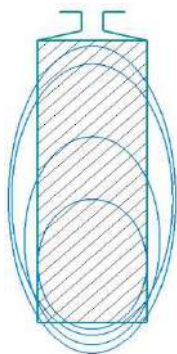


Рис. 3 – Розподіл потоків розсіювання в глибокому пазу

звичайних АД це відношення не перевищує 5) [3]. В машинах з глибокими пазами скін-ефект підсилюється за рахунок дуже маленького перерізу, в якому при пуску формується струм. Під час пуску нижня частина паза зчеплена з великою кількістю магнітних ліній потоку розсіювання, ніж верхня частина паза, рис. 3. Тому індуктивний опір нижньої частини паза більший, ніж верхній. Це призводить до витіснення струму ротора у верхню частину стрижнів обмотки. Щільність струму у верхніх шарах стрижня збільшується, що рівносильно зменшенню перерізу стрижнів та збільшенню активного опору обмотки ротора. Це призводить до збільшення обертового моменту двигуна. Одночасно, збільшення індуктивного опору обмотки ротора викликає зменшення пускового струму та збільшення пускового моменту M_{start} .

Скін-ефект найбільше проявляється на початку пуску, коли $s = 1$ і частота в роторі $f_r = f_s s = f_s$. У процесі пуску ковзання АД зменшується і при встановленому режимі дорівнює $s_N = 0,02 \dots 0,05$, при цьому $f_2 = f_1 s_N = 1 \dots 2,5$ Гц, за такої частоти явище витіснення струму зникає і струм рівномірно розподіляється за перерізом стрижня. Зі збільшенням швидкості двигун набуває властивостей, що відповідають його нормальним параметрам при класичній конструкції, але з дещо більшим індуктивним опором. Сучасна тенденція заміни обмотки ротора з алюмінію на мідь з метою підвищення енергоефективності АД знов загострила це питання. Питомий опір міді майже вдвічі менший, ніж у алюмінію. Тож сподіватися на вплив скін-ефекта без зміни конфігурації

паза не достатньо, слід заглиблювати паз. Але це робити безмежно не можна. Крім вказаних вище проблем, що приводять до деформації і обривів стрижнів обмотки ротора, можливе перевищення магнітної пропускної здатності спинки ротора, також існують технологічні обмеження щодо меншого радіусу паза ротора (під час штамповки).

Для того, щоб встановити найбільш перспективні напрямки забезпечення кращих пускових характеристик при переході до мідної обмотки ротора, на базі якої конструкції ротора, ми проаналізували пускові параметри АД з різними формами пазів. Дані цього аналізу наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Пускові характеристики двигуна з короткозамкненим ротором

Стандартне виконання		з двох-клітинним ротором		з глибокими пазами	
$\frac{I_{start}}{I_N}$	$\frac{M_{start}}{M_N}$	$\frac{I_{start}}{I_N}$	$\frac{M_{start}}{M_N}$	$\frac{I_{start}}{I_N}$	$\frac{M_{start}}{M_N}$
4-7	0,8-1,2	3,3-5,5	1-2	4-4,8	1,2-1,5

Можна запропонувати подальші дослідження щодо забезпечення пускових характеристик АД з мідною обмоткою ротора продовжувати для двох клітинних конструкцій ротора.

Список літератури:

1. А.П. Пузанов. Електротехніка і електромеханіка: Навчальний посібник / Пузанов А.П.– К.: Видавничий центр «Vitas-LTD», 2019. – 304 с.
2. Петрушин В. С. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на энергетические показатели регулируемых асинхронных двигателей / В. С. Петрушин, А. М. Якимец, Б. В. Каленик // Electrical engineering & Electromechanics. – 2008. – № 1. – С. 38-40.