

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА НА РОЗПОДІЛ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В РОТОРІ

Кучинський К. А., д.т.н., ст.наук.співроб., e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com
Інститут електродинаміки НАН України

Актуальність дослідження. У хімічній, металургійній, нафтовій промисловості, для магістральних нафто- й газопроводів потрібне застосування турбокомпресорів, газових нагнітачів, нафтових насосів та інших швидкохідних механізмів для стиснення і перекачування газів та рідин. Для приводу зазначених механізмів використовуються двопольсні синхронні електродвигуни на 3000 об/хв нормального і вибухозахищеного виконання. Двигуни в агрегаті з механізмами повинні забезпечувати пуск та входження в синхронізм із мережею за певний час.

Досвід експлуатації машин потужністю 12500 кВт серії СТД показав, що вони мають серйозні недоліки – великі пускові струми і значні перегриви ротора. Слабким місцем були пазові клини, які при багаторазових пусках зміщувалися та підгоряли.

Основні функціональні властивості двигунів, пов'язані з появою сил, моментів і втрат потужності, залежать від розподілу в них електромагнітного поля при заданому розподілі струмів і формі граничних поверхонь, що поділяють середовища з різними магнітними проникненнями та електричними провідностями. Точність визначення магнітного поля у магнітопроводі істотно впливає на розрахункову величину локальних втрат, що наводяться, які, в свою чергу, визначають підвищені місцеві нагрівання елементів роторів.

Мета досліджень. Моделювання електромагнітних полів та виявлення основних закономірностей їх розподілу в масивних роторах потужних електродвигунів різного конструктивного виконання у короткочасних нестационарних режимах при великих ковзаннях для підвищення надійності експлуатації машин.

Основні матеріали досліджень. Дослідження електромагнітного поля в асинхронних режимах для окремих варіантів конструктивного виконання масивних роторів з урахуванням впливу різної електропровідності матеріалів пазових клинів, демпферної обмотки, великого зубця проводилося за допомогою чисельного методу скінченних елементів (МСЕ).

За МСЕ у варіаційній постановці за допомогою мінімізації функціоналу енергії магнітного поля здійснюється перехід від початкового диференціального рівняння до системи алгебраїчних рівнянь для визначення вузлових значень векторного магнітного потенціалу (ВМП) по всій розрахунковій області [1]:

$$([K] + [\theta]) \cdot \{A\} = \{C\}, \quad (1)$$

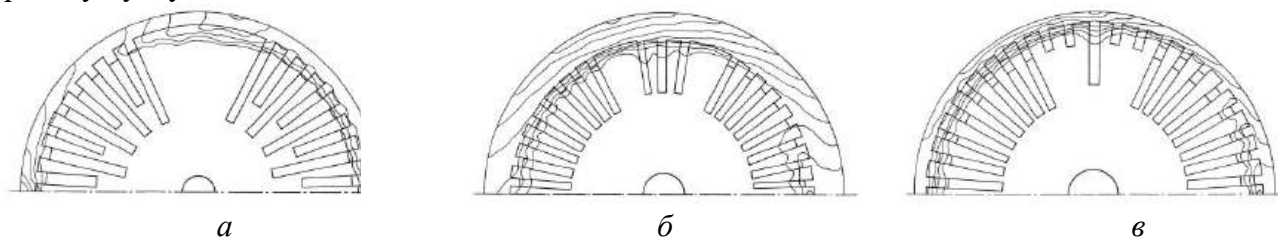
де $[K]$ – матриця коефіцієнтів (функція геометрії області та магнітної проникності середовища μ); $[\theta]$ – матриця врахування вихрових струмів (функція кутової частоти збуджуючих струмів ω та питомого опору середовища ρ); $\{A\}$ – вектор вузлових значень ВМП; $\{C\}$ – вектор зведених до вузлів струмів за постійності щільності струму j у межах елемента.

Об'єктами досліджень були двигуни потужністю 12500 кВт, що застосовуються як привод нагнітачів природного газу в нерегульованому режимі роботи:

1. З неізолюваними латунними клинами на роторі.
2. З різним конструктивним виконанням роторів підвищеної термостійкості до несинхронних полів.

Принципова відмінність конструкцій останньої групи двигунів полягає у застосуванні на роторах пазових клинів з матеріалу із низькою питомою електропровідністю – сплаву титану ВТ-6 або клинів з бронзи КМц-3 із укладеною під ними і в малих пазах на великих зубцях потужною демпферною системою з того самого матеріалу. Цим переслідуються цілі зменшити нагрів клинів й виключити їх осьові та радіальні переміщення внаслідок термомеханічних деформацій.

Наближене чисельне рішення МСЕ задачі визначення електромагнітного поля має вигляд компактного ряду значень вузлових потенціалів. Однак, мінімізація енергії дає поверхню рішення, яке є єдиним і точно визначеним всюди, а не лише у вершинах скінченних елементів. На рис. 1 показано розподіл магнітного поля (лінії рівного потенціалу $Re A$) в активному перерізі зазначених вище типів машин для початкової точки ковзання $s = 100\%$ процесу пуску.



**Рисунок 1 – Розподіл магнітного поля у роторах двигунів при ковзанні $s = 100\%$:
A – з латунними клинами; *б* – з титановими; *в* – з бронзовими та демпферною системою**

З наведених розподілів випливає, що картина поля відрізняється значною складністю. Разом з тим, результати досліджень показали, що при всьому різноманітті конструктивних варіантів виконання ротора, в процесі пуску двигуна спостерігається загальне явище – бочка, як потужна демпферна система, обмежує проникнення електромагнітного поля в глибину масиву включно до ковзання $s = 5\%$.

За наявності в роторі високоелектропровідних латунних клинів магнітне поле витісняється на шляху розсіювання в зазор, що зумовлено реакцією вихрових струмів $f = 50$ Гц у клині (рис. 1*а*). При встановленні високоомних титанових клинів витіснення магнітного поля в зазор незначне, розподіл ВМП в поверхневому шарі ротора більш рівномірне (рис. 1*б*). Вихрові струми потужної поздовжньо-поперечної бронзової системи (клинів та демпферної обмотки) створюють сильне зустрічне поле, яке витісняє магнітний потік до поверхні масиву ротора і в зазор (рис. 1*в*). Демпферна система сприяє швидкому згасанню поля та вихрових струмів у глибині масиву. Таким чином, латунні, бронзові клини та демпферна система повністю екранують обмотку збудження від полів частотою 50 Гц.

З наведених рисунків видно, що насичення має місце у поверхневому шарі ротора – зокрема, в масиві коронок великих та малих зубців. Області ярма й основи зубців є безумовно ненасиченими. У короткочасних режимах з великими струмами насичення зубців ротора практично повністю визначається полем вихрових струмів, і з розподілом останніх збігається розподіл втрат та місцевих нагрівів.

Висновок. Чисельний розрахунок магнітного поля дозволяє оцінювати демпфуючу дію вихрових струмів в окремих конструктивних елементах, досліджувати їх навантаження в процесі асинхронного пуску електродвигуна, а також виявляти основні закономірності розподілу магнітного потоку та втрат у масивному зубчастому роторі. Корисність отриманих результатів в активній зоні ротора машини полягає також у тому, що вони визначають величини струмів й втрат у торцевій зоні, місцях стиків роз'ємних клинів, і від точності їх визначення залежить точність всіх наступних розрахунків.

Ефективність методики підтверджена задовільним збігом розрахункових та експериментальних даних досліджень розподілу електромагнітного поля й місцевих питомих втрат від вихрових струмів в елементах поверхневого шару ротора двигуна потужністю 800 кВт у середині бочки при напрузі 6 кВ і частоті 50 Гц.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kuchynskyi K., Prus V. The Distribution of the Magnetic Field in the Rotors of Synchronous Machines of Various Designs at Large Slides. Proc. 2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, pp. 1–4, 21-25 September 2020. DOI: [10.1109/PAEP49887.2020.9240787](https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240787)