

ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТНОЇ НАПРУГИ В ЗУБЦІ ЯКОРЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ЙОГО ПРОЄКТУВАННІ

М.В. Гончаров¹, **В.І. Міліх**²

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

² д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

Mykhailo.Honcharov@iee.khpi.edu.ua

Двигуни постійного струму (ДПС) продовжують відігравати помітну роль у сучасних електроприводах завдяки таким перевагам як широке і зручне регулювання частоти обертання та висока перевантажувальна здатність.

До основ проєктування ДПС відноситься розрахунок їхнього магнітного кола. При цьому однією з проблем такого розрахунку є дуже сильне і нерівномірне насичення зубців осердя якоря, а також суттєве витіснення магнітного поля із зубців в пази [1].

Для урахування цього замість однієї основної кривої намагнічування сталі осердя якоря (залежності магнітної індукції B від напруженості магнітного поля H), використовується ціла сім'я додаткових кривих, які зображено на рис. 1.

Посилання на конкретну криву залежить від зубцевого коефіцієнта

$$k_{tai} = \frac{\tau_{ai} \cdot l_{fe}}{b_{tai} \cdot l_{ef}} - 1, \quad (1)$$

де l_{fe} , l_{ef} – розрахункова та ефективна довжини якоря; τ_{ai} – зубцевий крок; b_{tai} – ширина зубця.

Коефіцієнт визначається на трьох рівнях по висоті зубця, показаних на рис. 2, із заміною в (1) індексу i відповідно на 1, 2 або 3, і на цих рівнях за значеннями магнітної індукції B_{tai} знаходиться напруженість магнітного поля H_{tai} , а потім і її розрахункове значення та магнітна напруга для зубця

$$H_{tav} = \frac{H_{ta1} + 4 \cdot H_{ta2} + H_{ta3}}{6}; \quad F_{ta} = H_{tav} \cdot h_{na}, \quad (2)$$

де h_{na} – висота зубця.

Недоліки зазначеної методики наочні: підготовка великої сім'ї кривих (див. рис. 1), неточність визначення величини H для значень зубцевого коефіцієнта (1), на наданих на рисунку.

Мета даної роботи – усунення зазначених проблем шляхом розробки математичної моделі, яка забезпечує автоматизований розрахунок напруженості магнітного поля і магнітної напруги зубця (2) якоря з використанням тільки основної кривої намагнічування, яка на рис. 1 позначена як нульова.

Пропопнується удосконалена методика визначення магнітної індукції, і відповідна розрахункова модель зображена на рис. 3. На зубець і паз якоря разом доводиться магнітний потік Φ_s , спрямований уздовж їхньої висоти h_{na} ,

$$\Phi_s = B_\delta \cdot (b_{ta1} + b_{na}) \cdot l_{ef}, \quad (3)$$

де B_δ – магнітна індукція у проміжку на поверхні осердя; b_{na} – ширина паза.

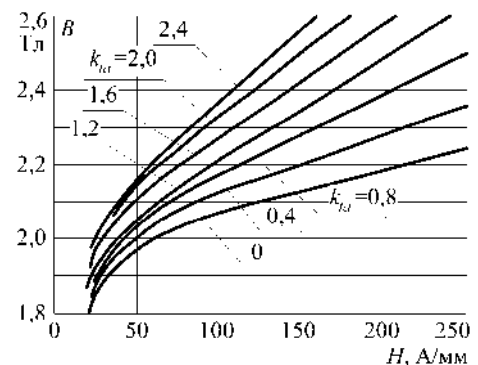


Рис. 1 – Сім'я кривих намагнічування

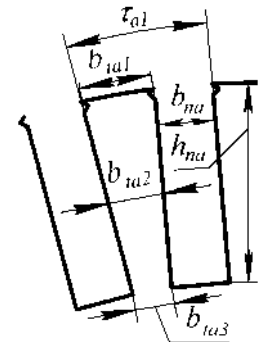


Рис. 2 – Зубцево-пазовий крок

Сутність методики продемонструємо для одного з рівнів, показаних на рис. 2, використовуючи узагальнене позначення ширини зубця якоря b_{tai} .

Розрахунок виконується ітераційним методом. На першій ітерації вважаємо, що увесь магнітний потік Φ_s проходить по феромагнітному зубцю, тобто $\Phi_{Fe} = \Phi_s$.

Тоді магнітна індукція в зубці:

$$B_{Fe} = \frac{\Phi_{Fe}}{k_{Fe} \cdot b_{tai} \cdot l_{ef}}, \quad (4)$$

де k_{Fe} – коефіцієнт заповнення осердя якоря сталлю.

За значенням індукції B_{Fe} і основною кривою намагнічування прийнятої сталі знаходиться напруженість магнітного поля у зубці H_{Fe} .

Згідно граничній умові для магнітного поля [2] тангенціальна складова векторів напруженості магнітного поля при переході через межу зубця і паза зберігається, і у даному випадку за рис. 3 маємо $H_0 = H_{Fe}$. Тоді магнітна індукція і магнітний потік в пазу:

$$B_0 = \mu_0 H_0; \quad \Phi_0 = B_0 \cdot b_{na} \cdot l_{ef}, \quad (5)$$

де μ_0 – магнітна постійна.

Тепер уточняється значення магнітного потоку в феромагнітному зубці:

$$\Phi_{Fe\ new} = \Phi_s - \Phi_0. \quad (6)$$

Для запобігання розходження ітераційного процесу після завершення кожної ітерації застосовується нижня релаксація магнітного потоку відповідно [2], а саме:

$$\Phi_{Fe\ iter} = \Phi_{Fe} + (\Phi_{Fe\ new} - \Phi_{Fe}) / W_\Phi, \quad (7)$$

де W_Φ – коефіцієнт нижньої релаксація, якій можна прийняти у діапазоні (2 – 6).

Це нове значення є початковим на наступну ітерацію ($\Phi_{Fe} = \Phi_{Fe\ iter}$), яка знов виконується за (4–7). Кожного разу магнітні потоки на початку Φ_{Fe} і наприкінці ітерації $\Phi_{Fe\ new}$ порівнюються. Ітераційний процес можна закінчити, якщо їхня відмінність стане меншою допустимої похибки. Значення величин на останній ітерації є підсумковими.

Дана математична модель була реалізована на скриптовій мові Lua включно із звертанням до основної кривої намагнічування $B(H)$.

Тестові розрахунки виконано для ДПС потужністю 50 кВт, зубцево-пазова структура якого має параметри: $\tau_{a1}=22,8$ мм; $h_{na}=32,6$ мм; $b_{na}=8,5$ мм; $b_{ta1}=14,3$ мм; $b_{ta2}=11,5$ мм; $b_{ta3}=8,6$ мм. Осердя якоря зроблено із сталі марки 2212 і має $k_{Fe} = 0,95$.

При значенні $B_\delta=0,9$ Тл маємо на рівні b_{ta1} : $B_{Fe}=1,56$ Тл; $B_0=0,003$ Тл; $H_{Fe} = 2533$ А/м за одну ітерацію при $W_\Phi = 1$; на рівні b_{ta2} : $B_{Fe}=1,92$ Тл; $B_0=0,028$ Тл; $H_{Fe} = 22200$ А/м за дві ітерації при $W_\Phi=1$; на рівні b_{ta2} : $B_{Fe}=2,30$ Тл; $B_0=0,288$ Тл; $H_{Fe} = 229500$ А/м при $W_\Phi = 4$ і 3 за п'ять ітерацій. Розходження значень магнітного потоку на останніх ітераціях було менше 1%. Підсумкові значення за (2) є такими: $H_{tav}=53400$ А/м; $F_{ta}=1743$ А.

Таким чином, доведена ефективність наданої методики розрахунку і вона рекомендується до втілення у систему проектування ДПС та інших електричних машин.

Список літератури:

1. Проектування електричних машин: навч. посіб. / Д. В. Ципленков, О. Б. Іванов, О. В. Бобров, В. В. Кузнецов, В. В. Артемчук, М. О. Баб'як; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.

2. Мілих В. І. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях: Підручник для студентів і аспірантів електротехнічного профілю / В. І. Мілих. –2-ге вид., перероблене. Київ: Вид-во «Каравела», 2024. 396 с.

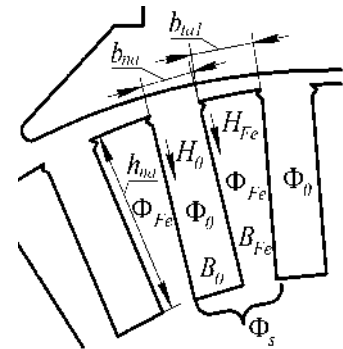


Рис. 3 – Зубцево-пазова структура осердя якоря