

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО – РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК МАГНІТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Шумилов Ю.А., д.т.н., проф.,
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ "КПІ", кафедра Електромеханіки
тел./факс (044) 241-76-38, e-mail: yuriyshumilov@svitonline.com

Чебанюк, В.К.
АТ "СКБ Укрелектромаш", завідувач відділу електричних і віброакустичних випробувань
Україна, 61050, Харків, вул. Іскринська, 37,
тел./факс (0572) 20-06-40

Наводяться результати експериментальних дослідження впливу насичення сталі на амплітуди вищих гармонік індукції в повітряному проміжку асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, розподіл високочастотних магнітних полів в пазу ротора, елементах осердя ротора, в ярмі статора, а також вищих гармонік струму в стрижні ротора на працюючому двигуні. Експериментальні результати якісно добре узгоджуються з розрахунковими, отриманими з використанням метода кінцевих елементів.

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния насыщения стали на амплитуды высших гармоник индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, распределение высокочастотных магнитных полей в пазу ротора, элементах сердечника ротора, спинке статора, а также результаты измерения высших гармоник тока в стержне ротора на работающем двигателе. Экспериментальные результаты качественно хорошо согласуются с расчётными, полученными с применением метода конечных элементов.

ВСТУП

Незважаючи на те, що вивченню вищих гармонік магнітного поля асинхронних двигунів (АД) присвячено багато праць, дотепер ще залишаються нез'ясованими деякі питання, зокрема, вплив насичення осердь двигуна на амплітуди вищих гармонік, розподіл високочастотних складових магнітного поля в осердях статора і ротора АД, що обертається, тощо. Інтерес до точнішого розрахунку вищих гармонік магнітного поля пояснюється тим, що останні є причиною підвищених рівнів вібрації й шуму магнітного походження, паразитних моментів і додаткових втрат потужності, які суттєво зросли в зв'язку з підвищеними електромагнітними навантаженнями сучасних асинхронних двигунів.

Нижче викладаються результати експериментальних досліджень вищих гармонік магнітного поля АД за допомогою вимірвальних обмоток із числом пар полюсів "ν" досліджуваної гармоніки, розташованих на поверхні розточки статора [1, 2], і витків, розташованих у різних місцях осердь статора і ротора. Вимірювання виконувалися на працюючому двигуні під час пуску, неробочого ходу і номінального режиму роботи.

Результати експериментальних досліджень в частині впливу насичення сталі на амплітуди вищих гармонік були підтверджені розрахунками на кінцево-елементній моделі АД.

Для дослідження був обраний асинхронний двигун АОЛ2-21-4 з такими даними:

$P = 1,1$ кВт, $f = 50$ Гц, схема з'єднання трифазної обмотки статора – "зірка/трикутник", напруга – 380/220 В, струм статора – 2,7/4,7 А, коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,78$, коефіцієнт потужності $\cos\phi_1 = 0,8$,

номінальна частота обертання $n = 1400$ об/хв, число пар полюсів $p = 2$, співвідношення чисел пазів статора і ротора $Z_1/Z_2 = 24/30$, пази ротора – закриті й нескошені, число котушок на фазу обмотки статора вздовж росточки статора – 4, число витків на фазу одношарової обмотки статора – 368, діаметр розточки статора – 94 мм, зовнішній діаметр статора – 153 мм, геометричний повітряний проміжок $\delta = 0,25$ мм, діаметр вала – 30 мм, довжина осердя статора – 70 мм, довжина осердя ротора – 72 мм, активний опір фази обмотки статора при 20°C $r_1 = 5,69$ Ом, паз статора – напівзакритий, висота паза статора – 14,98 мм, середня ширина паза статора – 8,55 мм, висота коронки зуба статора – 0,72 мм, розкриття паза статора – 2,5 мм, висота паза ротора – 13,3 мм, середня ширина паза ротора – 3,25 мм, висота коронки зуба ротора – 0,3 мм, розміри поперечного перерізу короткозамикаючого кільця – $8 \times 15,6$ мм², матеріал клітки ротора – алюміній.

Методика вимірювання забезпечила можливість селективно виокремлювати будь-яку гармоніку магнітного поля за ознакою числа пар полюсів і частоти, оскільки також застосовувався аналізатор гармонік. Амплітуда гармоніки індукції визначалася через відповідне значення електрорушійної сили (ЕРС), що наводилася у вимірвальній обмотці даною гармонікою поля. ЕРС вимірювалася за допомогою лампового вольтметра типу QRV. Використовувалися також інтегруючий підсилювач приладу SDM-132, ламповий вимірювач електричного кута зсуву Ф2-1, звуковий генератор, розщеплювач фаз, а також повітряний трансформатор [1].

Загальна похибка вимірювання вищої гармоніки поля за допомогою вимірвальної обмотки сягала не більше 10%. При цьому її можна було розкласти на

такі складові:

- Похибка вимірювання ЕРС $\approx 4\%$;
- Похибка у розмірах вимірювальних котушок $\approx 2\%$;
- Похибка при вимірюванні фазового кута між двома ЕРС $\approx 1,5\%$, що при фазовому куті $\varphi_1 = 35-65^\circ$ відповідає похибці у 3-4%.

Найбільша похибка вимірювання спостерігається поблизу неробочого ходу двигуна, оскільки навіть незначна неточність розташування груп вимірювальних котушок, з яких складалася вимірювальна обмотка, відносно осі фази викликала помітну похибку вимірювання. Зазначимо, що в роботі викладаються результати раніше неопублікованих унікальних експериментальних досліджень, виконаних в АТ "СКБ Укрелектромаш" В.К. Чебанюком, упорядкованих і узагальнених Ю.А. Шумилевим.

Не вдаючись до деталей схематичних рішень вимірювального комплексу, зупинимося на найважливіших результатах вищезазначених експериментальних досліджень.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В РОТОРІ, СТАТОРІ Й ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ У СТРИЖНІ РОТОРА ПРАЦЮЮЧОГО ДВИГУНА AOL2-21-4

Експериментальне дослідження розподілу магнітного поля в осерді ротора і вищих гармонік струму в стрижні ротора АД було виконано прямим (контактним) методом. Для того щоб зrealізувати задачу дослідження, були використані вимірювальні витки з проводу із скляною ізоляцією, розташовані в різних місцях ротора – навколо коронки зубця, по висоті пазу, а також навколо ярма ротора – до заливання пазів ротора алюмінієм. Оскільки температура плавлення алюмінію (650°C) суттєво нижче за температуру плавлення скла, вимірювальні витки після заливання пазів ротора алюмінієм залишилися неушкодженими. Під час експериментів вивідні кінці вимірювальних витків з'єднувалися з високочастотним осцилографом і частотним аналізатором. Це вдалося виконати завдяки тому, що під час експерименту вивідні кінці вимірювальних витків як біфілярні провідники намотувалися на котушку, стрижень якої вкручувався у вільний торець вала двигуна. Експеримент був побудований таким чином, що двигун своєчасно відключався від мережі й автоматично гальмувався, аби не пошкодити вивідні кінці вимірювальних витків. Отже, вимірювалися й спостерігалися не тільки розподіл високочастотних складових магнітного поля по висоті пазу й осердя ротора, а й падіння напруги в стрижні ротора під час пуску й короткочасної праці двигуна в режимі неробочого ходу. Окрім того, вимірювальні витки було встановлено на статорі, що дозволило оцінити високочастотні складові поля в його ярмі.

Вищезазначений прямий метод вимірювання складових магнітного поля характеризувався високою точністю. Завади вимірювання були незначні – близько 100 мкВ проти 1000 мкВ корисного сигналу. У такий спосіб була знята спектрограма електрорушійних сил при неробочому ході двигуна, індукованих у двох вимірювальних витках, намотаних навколо коронки

зуба і також навколо паза і ярма ротора. Магнітний потік у коронці зуба виявився значно більшим, ніж у пазу і ярмі ротора. При цьому високочастотні магнітні потоки, що замикаються через паз і ярмо ротора й наведені вищими гармоніками повітряного проміжку високих порядків, є настільки малі, що ними взагалі можна знехтувати. Слід зауважити, що в спектрограмах ЕРС, вимірюваних на частотах 50, 100, 300, 600 і 1200 Гц, спостерігалася биття амплітуди. Це пояснюється тим, що будь-яка результувна ЕРС індукується одночасно декількома гармоніками поля. Наприклад, результувна гармоніка ЕРС на частоті, близькій до 600 Гц, індукується вищими гармоніками поля з числами пар полюсів $p = 4, 8, 22, 26$ тощо. Якби йшлося лише про дві вищі гармоніки, можна було б на підставі вимірювань максимального і мінімального значень амплітуди визначити кожен з двох гармонік. При навантаженні двигуна спостерігалася аналогічна ситуація, однак частота биття збільшилася. Експериментально не вдалося виділити окремі складові результувної ЕРС через несуттєву різницю між частотами, що інтерферують.

На рис. 1 репрезентовані вищезазначені результати в одиницях магнітного потоку (в Максвеллах). Видно, що перша зубцева гармоніка й гармоніки вищих порядків у ротор майже не проникають. Не проникають зазначені гармоніки поля в паз і ярмо ротора навіть при "відкритті" пазу як наслідок насичення коронки закритого зуба. Більша частка магнітного потоку на частоті 600 Гц в пазу і ярмі ротора визначається, в основному, двома гармоніками повітряного проміжку з числами пар полюсів $p = 4$ і 8 . Вищезазначене твердження можна пояснити такими міркуваннями:

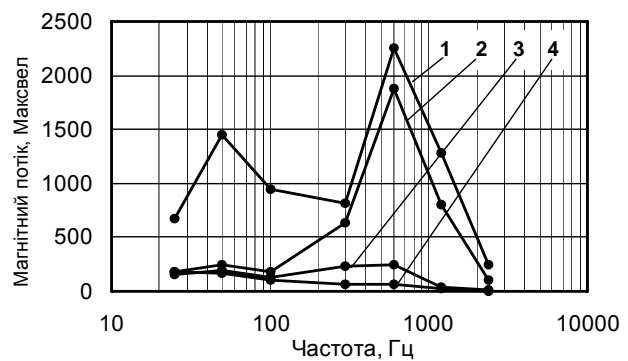


Рис. 1. Розподіл магнітного поля в роторі в залежності від частоти при неробочому ході і номінальному навантаженні двигуна AOL2-21-4: 1 – коронка зубця ротора, неробочий хід; 2 – коронка зубця ротора, номінальний режим; 3 – паз і ярмо ротора, номінальний режим; 4 – паз і ярмо ротора, неробочий хід

Вищі гармоніки $p = 4$ ($Z_2 - (Z_1 + p)$), $p = 8$ ($Z_2 - (Z_1 - p)$), $p = 28$ ($Z_2 - p$) були виділені і достатньо точно визначені за допомогою вимірювальних обмоток, розташованих вздовж всієї розточки статора. Магнітні потоки гармонік 4 і 8 виявилися помітно більшими, ніж потік гармоніки 28 (рис. 2). Отже, демпфуюча дія клітки ротора відносно вищих гармонік 4 і 8 виявилася суттєво меншою, ніж для зубцевих гармонік 22 і 26.

Зазначимо, що величина магнітного потоку в ярмі статора на частоті 700 Гц була визначена за допомо-

гою аналізатора гармонік з вузькосмуговим фільтром (близько 4 Гц).

Додатково було виконано дослідження розподілу високочастотних складових магнітного поля на тому самому двигуні, однак на цей раз гармоніка магнітного поля з числом пар полюсів $p = 4$ на частоті 400 Гц була створена штучно. Для цього під клини пазів статора були закладені три групи котушок із зсувом одна відносно одної на кут $(2\pi/3-p)$, з'єднаних у зірку. Така сама четверта група котушок використовувалася як вимірвальна обмотка.

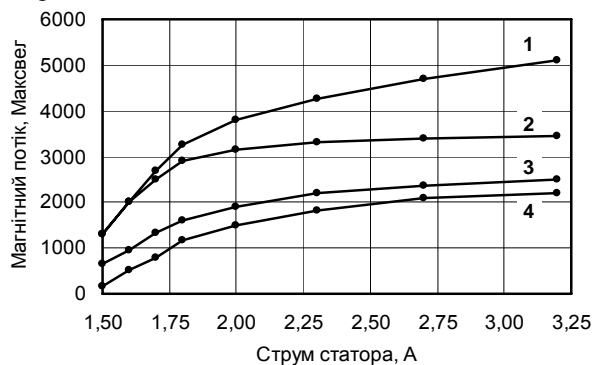


Рис. 2. Залежність різницевої гармоніки ($Z_2-(Z_1+p)$), ($Z_2-(Z_1-p)$) і зубцевої гармоніки ротора (Z_2-p) від струму статора двигуна AOL2-21-4: 1 – $\rho = 28$, повітряний проміжок; 2 – $\rho = 8$, повітряний проміжок; 3 – $\rho = 28$, ярмо статора; 4 – $\rho = 4$, повітряний проміжок

Перші три групи котушок живилися від трифазного високочастотного генератора на частоті 400 Гц і створювали обертове магнітне поле з числом пар полюсів $p = 4$. Результати дослідження представлені на рис. 3, з якого видно, що високочастотний магнітний потік у паз і ярмо ротора проникає слабо. Однак, баланс магнітних потоків при цьому було порушено, оскільки $0,5 \cdot \Phi_{\delta} > \Phi_{\delta-n} + \Phi_{\delta-a}$, що потребує додаткового пояснення.

На рис. 4 представлені результати вимірювання падіння напруги в стрижні ротора. Для того щоб знизити до мінімуму електромагнітні завади, провідник із скляною ізоляцією було закладено на дно паза ротора (вздовж паза) до заливання пазів ротора алюмінієм.

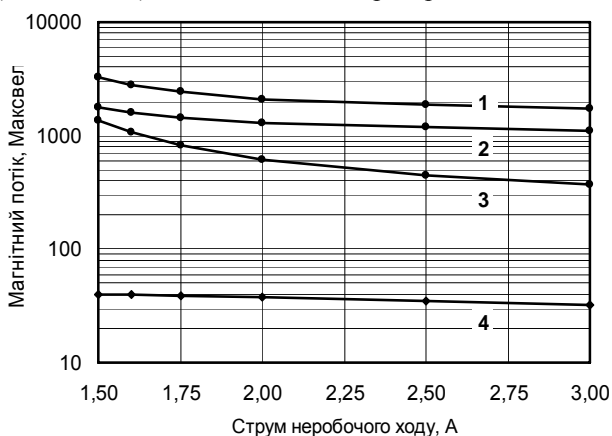


Рис. 3. Розподіл штучно створеної гармоніки "4", 400 Гц, в роторі двигуна AOL2-21-4 в залежності від струму неробочого ходу: 1 – повітряний проміжок; 2 – ярмо статора; 3 – коронка зуба ротора; 4 – паз і ярмо ротора

Після виготовлення клітки ротора лівий кінець провідника було приєднано до лівого кінця стрижня. Інший провідник було приєднано до правого кінця стрижня. Вільні кінці двох провідників, що намотувалися на котушку (про що вже йшлося), підводилися до осцилографа, аналізатора частоти і лампового вольтметра. Вимірювання падіння високочастотної напруги в стрижні ротора відобразило величину вищих гармонік струму в стрижні опосередковано.

Для того, щоб отримати амплітуди вищих гармонік струму стрижня, треба було б перерахувати високочастотні падіння напруги у відповідні струми з урахуванням залежності загального опору стрижня від частоти (такий перерахунок не було зроблено).

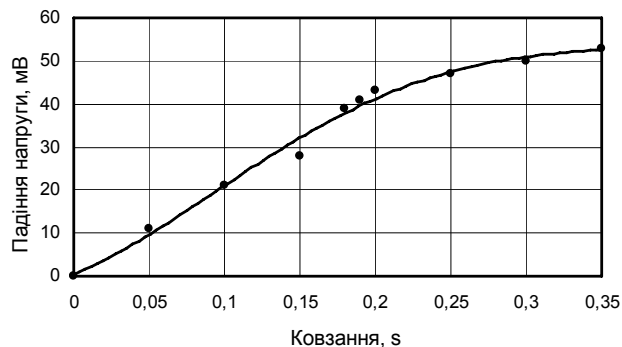


Рис. 4. Падіння напруги в стрижні ротора двигуна AOL2-21-4

Для цього треба було б враховувати для кожної частоти витіснення струму по висоті стрижня, оскільки опір стрижня на частоті ковзання $s = 2,25$ Гц практично дорівнює своїй активній складовій, а при більших частотах стає помітною індуктивна складова опору. Однак вищі гармоніки струму ротора виявилися в десять і більше разів менше, ніж перша гармоніка струму ротора.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ І РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАСИЧЕННЯ ОСЕРДЬ НА ВИЩІ ГАРМОНІКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТОКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Вплив насичення на вищі гармоніки магнітного поля АД до сих пір остаточно не досліджено. Існують різні точки зору відносно впливу насичення на амплітуди окремих гармонік поля. Інколи стверджують, що гармоніки поля з малими порядками (великою довжиною хвилі) залежать від насичення так само, як основна гармоніка. Однак не вказується межа, за якою коефіцієнт насичення для інших вищих гармонік треба підраховувати в інший спосіб (який спосіб?). Існує навіть точка зору, що взагалі немає сенсу для вищих гармонік враховувати коефіцієнт насичення, зокрема, для гармонік вищих порядків. Були запропоновані різні емпіричні вирази для врахування впливу насичення при розрахунку амплітуд вищих гармонік. Цікавість до цієї проблеми зростає із розширенням застосування частотно-регульованих асинхронних двигунів.

У зв'язку з цим було виконано ряд експериментальних досліджень і розрахунків, спрямованих на вивчення впливу насичення на амплітуди вищих гармонік магнітного поля в повітряному проміжку асинхронного двигуна.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження виконувалися на працюючому і також відключеному від мережі двигуні АОЛ2-21-4.

Спочатку були досліджені основна гармоніка поля $p = 2$; i вища гармоніка $\nu = 22$ на працюючому двигуні в режимі неробочого ходу в залежності від намагнічувального струму. За тих же умов була отримана залежність штучно утвореної вищої гармоніки $\rho = 22$ на частоті 410 Гц від струму неробочого ходу. Амплітуди основної і вищої гармонік були визначені відповідно за допомогою вимірювальної котушки з кроком $u = 0,92\tau_p$ і вимірювальної обмотки (групи котушок) з числом пар полюсів $\rho = 22$. Вісь вимірювальної котушки для вимірювання основної гармоніки індукції була суміщена з віссю однієї з фаз обмотки статора двигуна. Штучна гармоніка $\rho = 22$ з частотою обертання $n_p = 410 \cdot 60 / 22$ об/хв була створена за допомогою двох генеруючих груп котушок з числами пар полюсів $\rho = 22$, зсунутих одна відносно одної на кут $\pi/2\rho$. Генеруючі групи котушок живилися від звукового генератора через розщеплювач фаз струмами однакової величини, зсунутих один відносно одного на 90 електричних градусів. Амплітуда і фаза струмів генеруючих обмоток контролювалася спеціальним пристроєм. Для штучної гармоніки була обрана частота 410 Гц виходячи з того, що поблизу цієї частоти двигун не створює своїх магнітних полів. Для цього була використана спектрограма напруг на вимірювальній обмотці з $\rho = 22$ працюючого двигуна, отримана за допомогою селективного вольтметра із смугою пропускання 4 Гц. Результати вимірювання основної гармоніки, $p = 2$; $f = 50$ Гц, і вищих гармонік, $\nu = 22$ і $\rho = 22$ на частотах 50 Гц і 410 Гц., представлені на рис. 5 у мВ-масштабі, що не завадило визначити залежність вищезазначених гармонік поля від насичення (струму неробочого ходу).

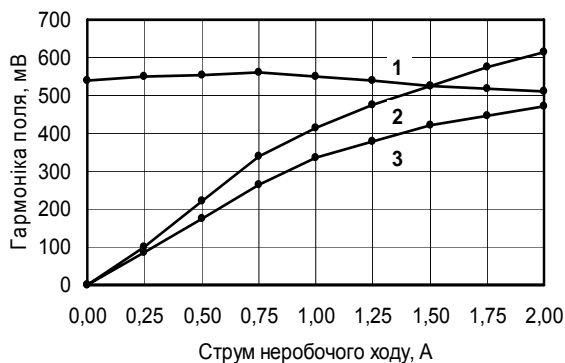


Рис. 5. Залежності головної гармоніки $p = 2$; 50 Гц, вищої гармоніки, "22"; 50 Гц, штучної гармоніки "22"; 410 Гц, від струму неробочого ходу двигуна АОЛ2-21-4: 1 – $\rho = 22$, 410 Гц (мВ); 2 – $p = 2$; 50 Гц (1/100 мВ); 3 – $\nu = 22$, 50 Гц (мВ)

На рис. 5 видно, що штучна гармоніка $\rho = 22$ (410 Гц) від насичення сталі майже не залежить, зокрема, при двох напрямках обертання ротора. Дві інші криві представляють основну, $p = 2$, і вищу гармоніку поля, $\nu = 22$, на частоті $f = 50$ Гц, створених струмом неробочого ходу двигуна. Обидві гармоніки, побудовані за різними масштабами, зі зміною насичення змі-

нюються практично однаково. Якщо їх перебудувати у відносних одиницях, вони майже співпадуть. Першу криву можна розглядати як змінну магнітну провідність штучної гармоніки $\rho = 22$ (410 Гц).

Різні закономірності зміни провідностей гармонік $\nu = 22$ ($f = 50$ Гц) і $\rho = 22$ (410 Гц) від насичення можна пояснити різною глибиною проникнення цих гармонік поля в осердя ротора, а також різною природою їх походження. Гармоніка $\nu = 22$ ($f = 50$ Гц) є природною складовою магнітного поля, створеного струмом статора, тобто вона існує лише разом з основною і іншими гармоніками статора, гармоніка $\rho = 22$ (410 Гц) є штучною і існує відокремлено від поля статора.

На рис. 6 спостерігається вплив насичення сталі на основну гармоніку $\rho = 2$ і вищу гармоніку $\rho = 22$, створених штучно на частоті 410 Гц. Двигун було відключено від мережі. Змінне магнітне поле $\rho = 2$ було створено завдяки живленню однієї з фаз від звукового генератора. Обертове магнітне поле $\rho = 22$ створено за допомогою двох генеруючих груп котушок, про що вже йшлося. Дві фазні обмотки, з'єднані одна з одною послідовно, живилися від джерела постійного струму. Зміна насичення відбувалася зі зміною величини постійного струму.

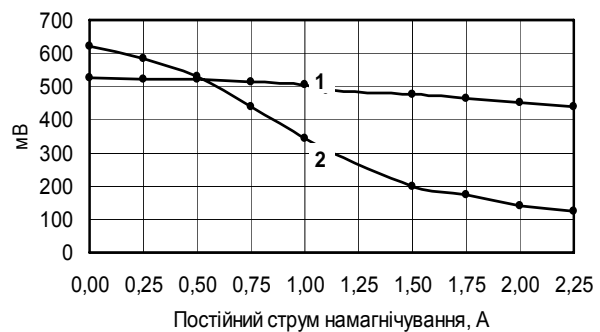


Рис. 6. Залежність штучних гармонік "2" і "22", 410 Гц, від насичення сталі двигуна АОЛ2-21-4: 1 – $\rho = 22$; 2 – $\rho = 2$

Видно, що величини магнітних провідностей основної і вищої гармонік суттєво відрізняються одна від одної. Цей результат кореспондується з результатами дослідження, отриманими раніше, а саме, чим більше довжина хвилі магнітного поля, тим глибше вона проникає в шихтоване осердя майже незалежно від частоти. Тому магнітна провідність основної гармоніки у порівнянні з магнітною провідністю вищої гармоніки з ростом струму намагнічування спадає значно швидше.

РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вплив насичення на амплітуду окремих вищих гармонік магнітного поля в повітряному проміжку було досліджено чисельно з використанням метода кінцевих елементів на прикладі двигуна з короткозамкненим ротором 4А180М6 ($2p = 6$, $Z_1/Z_2 = 72/58$). Дослідження виконувалося при нерухомому роторі. З урахуванням умов симетрії магнітної системи розрахунок поля виконувався на половині полюсного поділку двигуна. Задля спрощення процедури розрахунку число пазів ротора було змінено з 58 на 54. На половину полюсного поділку прийшлося шість пазів статора і чотири з половиною пазів ротора. Для запобі-

гання побічних явищ, які може викликати ексцентриситет ротора, останній не враховувався. Розрахунок виконувався для різних значень струму статора в межах $(0,415...2,5)I_N$ і довільному положенні ротора відносно статора. Результати такого чисельного гармонійного аналізу магнітного поля в повітряному проміжку дозволили отримати інформацію про довільну результувну гармоніку з числом пар полюсів ν , яка є сумою гармонік з однаковим числом пар полюсів ν і різними частотами. Розділити результувні гармоніки " ν " на її складові без урахування обертання ротора було неможливо. Однак коректне моделювання обертання ротора АД є досить складним завданням.

Дійсно, для того щоб виконати гармонійний аналіз довільної періодичної функції, треба переконатися, що проміжок (в нашому випадку часу), на якому аналізується функція, є періодом повторювання функції (T) або кратний йому. Магнітне поле АД визначається фазними струмами і взаємним положенням статора і ротора (магнітною провідністю повітряного проміжку). Якщо струм у фазах є синусоїдальним, а його частота f_1 , то картина первинних струмів повторюється через $1/f_1$ проміжку часу, тобто шуканий період можна визначити як

$$T = k_f / f_1,$$

де $k_f = 1, 2, 3, \dots$

За цей час основна гармоніка поля з числом пар полюсів " p " виконає n_f обертів:

$$n_f = k_f / p.$$

З іншого боку, для повторення картини магнітної провідності при рівномірному повітряному проміжку або наявності лише статичного ексцентриситету ротор має обернутися на ціле число зубцевих поділок, тобто за час " T " здійснити

$$n_R = k_R / z_2, \quad \text{де } k_R = 1, 2, 3, \dots$$

Враховуючи, що частота n_R обертання ротора визначається через ковзання

$$n_R = n_f (1 - s),$$

визначимо дискретний ряд ковзань, що задовольняє умовам періодичності (якщо $k_f \ll \infty$):

$$s = 1 - k_R p / k_f z_2.$$

Задля економії машинного часу слід домагатися, щоб вимогам періодичності задовольняв мінімальний проміжок часу. При цьому отримуємо ряд ковзань, що задовольняє вищезазначеній вимозі:

$$s = 1 - k_R p / z_2 = 0; \pm p / z_2; \pm 2p / z_2; \pm 3p / z_2 \dots$$

При наявності динамічного ексцентриситету за час T ротор має виконати ціле число обертів:

$$n_R = 0, 1, 2 \dots \quad \text{або } k_R = 0, z_2, 2z_2 \dots$$

В цьому випадку ряд ковзань буде іншим:

$$s = 1 - n_R p / k_f.$$

Цій умові задовольняють лише два значення ковзання: $s = 0$ та $s = 1$.

Якщо на проміжку T виконано n_i розрахунків поля, то при частотному аналізі можна виділити $n_i/2$ частот:

$$f = f_1 / k_f; 2f_1 / k_f; 3f_1 / k_f; \dots, (n_i/2) \cdot (f_1 / k_f).$$

Наведені міркування дійсні для всіх ковзань, за винятком $s = 1$, коли всі часові зміни пов'язані лише з безперервною зміною струму.

На рис. 7 наведені результати гармонійного аналізу магнітного поля в повітряному проміжку вищезгаданого двигуна у відносних одиницях. При цьому амплітуди гармонік індукції при намагнічувальному струмі $I_{\mu N}$ ($U_1 = U_{1N}$) були прийняті за одиничні. З урахуванням особливостей зміни окремих гармонік можна виділити три групи гармонік різних порядків:

1. Гармоніка $\nu = 3$. Вона стає помітною, коли намагнічувальний струм сягає свого "критичного" значення, після чого вона швидко зростає з подальшим зростанням струму.

2. Основна і всі зубцеві гармоніки, які залежать від насичення практично однаково.

3. Гармоніки $\nu = 5$ і 7 , що змінюються за своїм власним законом. Ці гармоніки віднесені до одної категорії, оскільки в їх створенні беруть участь як гармоніки магніторухливих сил даних порядків, так і умовні гармоніки магнітної провідності, які одночасно зростають з ростом струму, однак сумуються з протилежними знаками.

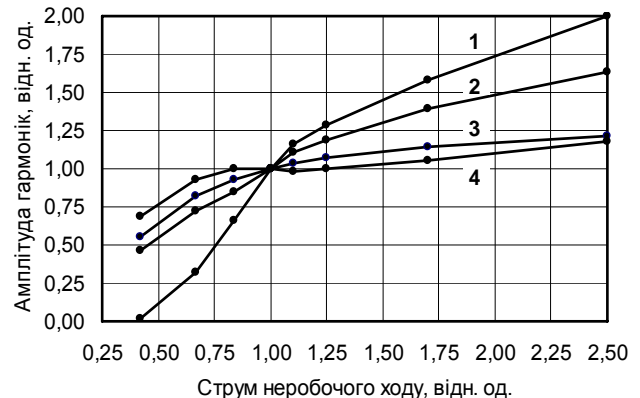


Рис. 7. Залежності гармонік магнітного поля статора від насичення (струму неробочого ходу) двигуна 4A180M6 ($2p = 6$; $Z_1/Z_2 = 72/54$): 1 - $\rho = 3$; 2 - $\rho = 7$; 3 - $\rho = 1, 23, 25, 47, 49, \dots, 95, 97, \dots$; 4 - $\rho = 5$

Окрім того, було досліджено залежність вищих гармонік магнітного поля ротора від насичення на кінцево-елементній моделі двигуна з короткозамкненим ротором малої потужності ($P = 0,45$ кВт, $2p = 4$, $Z_1/Z_2 = 24/18$). Під час дослідження величина струму ротора залишалася незмінною. Амплітуду струму ротора було обрана довільно, однак в декілька разів меншою за амплітуду струму статора. Завдяки цьому впливом магнітного поля ротора на загальний рівень насичення двигуна можна було знехтувати.

Магнітне поле ротора розраховувалося при чотирьох рівнях насичення машини, яким відповідали чотири значення намагнічувального струму: $I_{1\mu} = 0,5I_{1\mu N}; I_{1\mu N}; 1,5I_{1\mu N}; 2I_{1\mu N}$. Спочатку були зроблені розрахунки магнітного поля двигуна при вищезгаданих значеннях струму статора і струму ротора $I_2 = 0$.

Отримана в такий спосіб інформація про магнітний стан машини зберігалася в комп'ютері. При вищезазначеному струмі ротора були виконані розрахунки магнітного поля ротора для різного магнітного стану машини, отриманого для різних значень струму статора: $I_{1\mu} = 0; 0,5I_{1\mu N}; I_{1\mu N}; 1,5I_{1\mu N}; 2I_{1\mu N}$. Просторовий розподіл струму ротора по пазах відповідав струмовій

хвилі 7-го порядку. Результати дослідження у відносних одиницях представлені на рис. 8. Окремі гармоніки поля фактично є сумою багатьох гармонік однакового порядку, які відрізняються частотою і напрямком обертання. Видно, що вищі гармоніки ротора від насичення залежать відносно мало. Окремі гармоніки від насичення залежать неоднаково, проте ця різниця складає не більше 20% (за виключенням гармоніки $\rho = 4$). Отримані розрахункові результати якісно узгоджуються з раніше отриманими експериментальними даними.

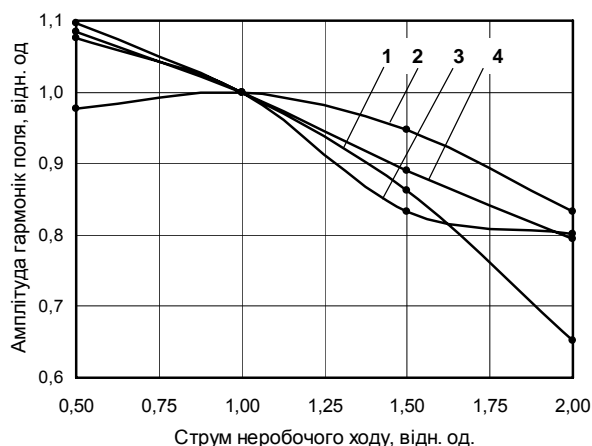


Рис. 8. Залежність гармонік магнітного поля ротора від насичення АД малої потужності, $Z_1/Z_2 = 24/18$, $2\rho = 4$. Магнітне поле викликане струмом ротора з просторовим розподілом "14": 1 – $\rho = 4$; 2 – $\rho = 10$; 3 – $\rho = 14$; 4 – $\rho = 52$

ВИСНОВКИ

1. Вважається, що звичайні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором теоретично досконально досліджені багатьма вченими і інженерами, проте залишаються питання, які потребують пояснення. До них відносяться, зокрема, вплив насичення на амплітуди вищих гармонік індукції в повітряному проміжку АД, розподіл високочастотних магнітних полів в пазу ротора, в осердях ротора і статора тощо. Особливо важливо отримати таку інформацію на короткозамкненому роторі, що обертається.

2. Для дослідження вищих гармонік магнітного поля в повітряному проміжку застосовані вимірювальні обмотки (групи вимірювальних котушок) із заданим числом пар полюсів тієї гармоніки, що досліджується.

3. Для дослідження розподілу високочастотних магнітних полів в роторі, в різні частини осердя, а також у паз ротора були закладені вимірювальні витки із скляною ізоляцією до заливання пазів ротора алюмінієм. Це забезпечило збереження вимірювальних витків після виготовлення ротора, оскільки температура плавлення алюмінія (650°C) значно нижче температури плавлення скла. Вивідні кінці вимірювальних витків з'єднувалися з високочастотним осцилографом і ламповим вольтметром контактним методом, що зводило до мінімуму похибку вимірювання. При цьому контролювався розподіл магнітного поля в коронці зуба, по висоті паза ротора, а також у спинці ротора. Крім того, осцилографувалося падіння напруги в стрижні ротора,

яке майже співпало з реальною зміною струму під час пуску ненавантаженого двигуна.

4. За допомогою двох (або трьох) генеруючих обмоток із заданим числом пар полюсів ρ штучно створювалося обертове магнітне поле в повітряному проміжку з вищезазначеним числом пар полюсів на частоті 410 Гц, на якій двигун, що досліджувався, не створює власних магнітних полів. Це дозволило спостерігати в чистому вигляді розподіл штучного магнітного поля в пазу і осерді ротора, а також залежність вищої гармоніки поля від насичення сталі.

5. Зубцеві гармоніки або вищі гармоніки поля з малою довжиною хвилі у паз або спинку ротора АД без скосу пазів практично не проникають завдяки демпфуванню їх кліткою ротора. Однак у спинці ротора спостерігаються високочастотні поля, які пов'язані з вищими гармоніками, що мають низький просторовий порядок. Подібні явища спостерігаються і в ярмі статора. Отже, треба рахуватися з тим, що глибина проникнення магнітного поля в шихтовану спинку, перш за все, статора і, в меншій мірі, ротора АД залежить в першу чергу від довжини хвилі гармоніки поля в повітряному проміжку. Високочастотні гармоніки поля з малими числами пар полюсів створюють в ярмі статора помітні додаткові втрати активної потужності. В АД з короткозамкненим ротором можуть виникати субгармоніки індукції високої частоти внаслідок взаємодії гармонік поля, число пар полюсів яких наближене до числа пазів статора (ротора), з хвилями магнітної провідності повітряного проміжку, що враховують наявність пазів статора або ротора:

$$n = \mu \pm k_1 Z_1, \text{ де } k_1 = 1, 2, 3 \dots; \text{ або } m = \nu \pm k_2 Z_2, \text{ де } k_2 = 1, 2, 3 \dots$$

Додаткові втрати такого штибу стають особливо помітними у частотно-керованих АД при наявності часових гармонік струму, що викликають низку основних гармонік на високих частотах.

6. Найбільші значення вищих гармонік струму в стрижні ротора двигуна АОЛ2-21-4 не перевершують 10% основного струму ротора.

7. Абстрагуючись від гармонік насичення, вищі гармоніки, створені струмом статора, залежать від насичення так само, як і основна гармоніка. Вищі гармоніки поля ротора (за виключенням взаємних гармонік, що є дзеркальним відображенням відповідних гармонік статора) залежать від насичення відносно слабо. Навіть при суттєвому насиченні осердь, що відповідало струму намагнічування $2I_{1\mu\text{H}}$, зниження амплітуд вищих гармонік ротора сягало не більше 20% (за виключенням гармоніки з малим числом пар полюсів $\rho = 4$)

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Шумилов Ю.А., Чебанюк В.К. Разделение обмоточных гармоник и гармоник проводимости магнитного поля в воздушном зазоре асинхронных машин, "Электротехника", № 9, 1972 г.
- [2] Шумилов Ю.А., Чебанюк В.К. Избирательное измерение гармоник магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин. Вестник Киевского политехнического института. Серия электроэнергетики, 9, 1972 г.

Надійшла 31.10.2005