

ПІДВИЩЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Розробка заходів та засобів підвищення ефективності асинхронного електропривода (АЕП) здійснюється із використанням математичного моделювання, точність якого повинна узгоджуватись з особливостями задачі, що розв'язується. Використання сталих каталогових параметрів заступної схеми асинхронного двигуна (АД) забезпечує достатню точність моделювання номінального режиму. Режим роботи АД в складі регульованого АЕП часто відхиляється від номінального внаслідок впливу несинусоїдності, несиметрії параметрів живлення, неномінальних рівнів частоти обертання та живлення, насичення магнітного кола. Підвищення адекватності математичних моделей АД при неномінальних робочих режимах забезпечується уточненням визначення величин електромагнітних параметрів, врахуванням залежностей їх зміни (як при зміні параметрів робочих режимів, так і в динамічних режимах за допомогою диференціальних параметрів), вдосконаленням структури математичної моделі АД відповідно до особливостей його конструкції та режимів роботи.

Найбільшу точність математичного моделювання АД забезпечують методи польового аналізу, але безпосереднє їх використання при вдосконаленні режимів АЕП практично унеможливується потрібними при цьому ресурсами ЕОМ. Для використання переваг польового аналізу АД доцільно за його допомогою визначити залежності зміни параметрів заступної схеми АД і використовувати їх при розрахунках режимів. В роботі [3] розроблено математичну модель еквівалентування польової моделі коловою і визначення відповідних параметрів заступної схеми, що підвищує точність моделювання із зміною величин параметрів робочих режимів. Використання цих параметрів при дослідженнях за допомогою моделі [1, 2] забезпечує адекватне врахування несиметрії, несинусоїдності, спектру просторових гармонік МРС, довільності схеми з'єднання віток обмотки статора між собою та із елементами зовнішньої мережі при дослідженнях статичних і динамічних режимів роботи. Модель складається з: системи диференціальних рівнянь електричної рівноваги для віток обмотки статора, контурів короткозамкненого ротора за кожною просторовою гармонікою МРС, що враховується; еквівалентних контурів втраг у сталі; рівняння електромагнітного моменту АД; диференційного рівняння механічної рівноваги приводу.

Для отримання потрібної форми рівнянь електричної рівноваги їх записано у фазних координатах (відносно миттєвих значень струмів електричних контурів) і перетворено до проєкцій результуючих просторових комплексів контурних струмів ротора і до миттєвих значень незалежних струмів віток обмотки статора. Перехід до просторових комплексів дозволяє зменшити порядок системи і позбутися у рівняннях періодичних коефіцієнтів, які залежать від кута повороту ротора. Використання незалежних струмів статора дозволяє за допомогою матриць включення за законами Кірхгофа аналізувати довільну схему з'єднання віток статора між собою та із зовнішньою мережею.

Рівняння для вітки статора i і для ротора відносно сумарного просторового комплексу струмів за гармонікою v для його контурів мають вигляд:

$$u_{si} = r_{si} \dot{i}_{si} + \frac{d}{dt} \sum_{q=1}^V \left(m_{iq} + \sum_{v=v_1}^{v_N} M_{iqv} \cos(\delta_{iv} - \delta_{qv}) \right) i_{sq} + \frac{d}{dt} \sum_{v=v_1}^{v_N} M_{ikv} \left(i_{rv}^R \cos \delta_{iv} + i_{rv}^I \sin \delta_{iv} \right);$$

$$0 = r_{rv} \dot{i}_{rv} + \left(\frac{d}{dt} - jv\omega_r \right) \left[\left(l_{rv} + \frac{z_2}{2} M_{kkv} \right) \dot{i}_{rv} + \frac{z_2}{2} \sum_{i=1}^V M_{kiv} \cdot e^{j\delta_{iv}} \cdot i_{si} \right],$$

де u_{si}, i_{si}, r_{si} – миттєві значення напруги, струму та активний опір i -ї вітки статора; $M_{iqv}, M_{ikv}, M_{kiv}$ – максимальні взаємні індуктивності за основним полем гармоніки v між i -ю та q -ю фазами статора, i -ю фазою статора та контуром ротора, контуром ротора та i -ю фазою статора відповідно, за умови суміщення їх осей; m_{iq} – взаємна індуктивності між i -ю та q -ю фазами статора за шляхами потоку розсіювання; δ_{iv}, δ_{qv} – кутове положення осей i -ї та q -ї фаз статора (положення максимуму МРС фази за гармонікою v) в координатах гармоніки порядку v ; i_{kv}^R, i_{kv}^I – струм k -го (n -го) контуру ротора за гармонікою порядку v ; r_c, r_{yk} – активний опір стрижня ротора та ділянки короткозамикаючого кільця між сусідніми стрижнями; M_{kkv}, m_n, m_d – власна індуктивність роторного контуру: за основним полем гармоніки v , за шляхами потоку розсіювання пази та кільця; V – кількість фаз статора; z_2 – кількість зубців ротора v_j – порядок гармоніки ($1 \leq j \leq N$); ω_r – частота обертання ротора; i_{rv}^R, i_{rv}^I – дійсна та уявна частини сумарного просторового комплексу струмів ротора.

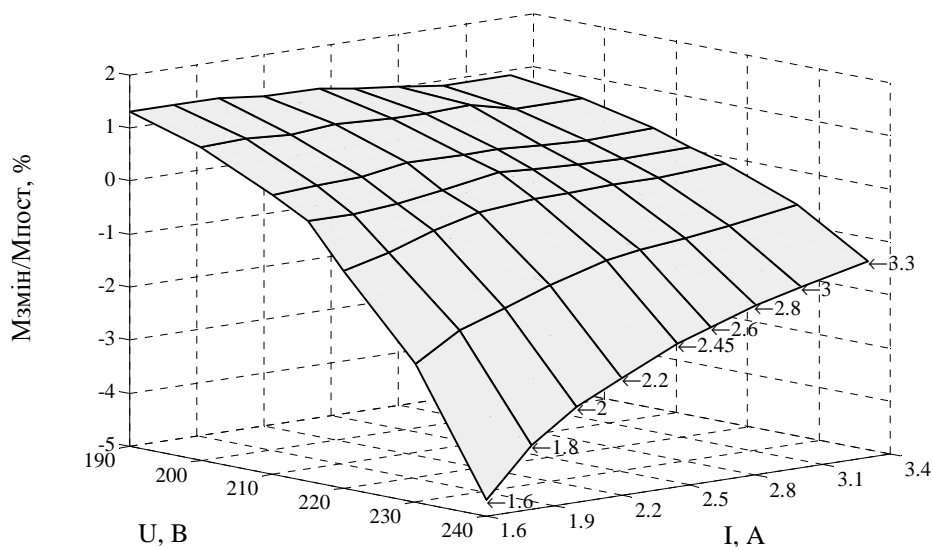
Рівняння електромагнітного моменту визначається як часткова похідна від запасу магнітної коенергії по

переміщенню. У припущенні (яке застосовують при рівнях насичення магнітного кола, які існують при основних робочих режимах), що магнітні енергія та коенергія рівні, вираз електромагнітного моменту суттєво спрощується: інтегральна залежність перетворюється на половину добутку підінтегральної функції на величину під знаком диференціалу. Повний вираз електромагнітного моменту при врахуванні довільного числа гармонік МРС і при довільній структурі обмотки статора набуває виду:

$$M_e = \sum_{i=1}^V i_{si} \sum_{v=v_1}^{v_N} v M_{ikv} (i_{rv}^R \sin \delta_{iv} - i_{rv}^I \cos \delta_{iv}).$$

Рівняння, які наведено дозволяють визначити часові залежності струмів контурів симетричного короткозамкненого ротора і віток статора АД із довільною їх кількістю при відомих параметрах, за часовими залежностями швидкості ротора і напруг, які прикладені до даних віток. Величини параметрів в рівняннях електричної рівноваги при врахуванні спектру гармонік МРС визначаються за заздалегідь визначеними двовимірними залежностями у функції амплітуди МРС та ковзання. Для визначення часової залежності швидкості ротора треба використовувати рівняння механічної рівноваги при відомих величинах моментів інерції та опору і наведений вираз електромагнітного моменту.

Оцінка особливостей математичного моделювання при врахуванні нелінійності електромагнітних параметрів за результатами польового аналізу здійснена при дослідженні величини електромагнітного моменту АД загальнопромислового використання 4А80А2У3. Діючі значення фазної напруги живлення U і струму I двигуна змінювалися в межах 190...240В та 1.6...3.3А відповідно, частота обертання відповідала номінальній. Електромагнітний момент визначався при сталих параметрах номінального режиму і при змінних параметрах [3]. На рис. наведено відповідну двовимірну залежність зміни розрахункової величини моменту АД при врахуванні змінності параметрів відносно цієї величини при сталих параметрах. Аналіз показує доцільність проведення розрахунку режиму роботи АД із змінними параметрами. Так, похибка отримання моменту через розрахунок режиму роботи АД з постійними параметрами $M_{\text{пост}}$ у порівнянні з розрахованим моментом в математичній моделі із змінними параметрами збільшується із відхиленням режиму роботи двигуна від номінального ($I=3.3\text{A}$, $U=220\text{В}$).



1. Попович О.М. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – 2010. – Вип.25. – С.89 – 97.

2. Попович О.М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 4. – С.25-32.

3. Попович О.М., Головань І.В. Визначення параметрів заступної схеми асинхронного двигуна та їх нелінійних залежностей за результатами польового аналізу. Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – 2012. – Вип.31. – С. 38–48.