

## ПОРІВНЯННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИКОНАВЧИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

<sup>1</sup>Ігнатюк Є.С., <sup>1</sup>Стулішенко А.С., <sup>1</sup>Канівець Д.А., магістранти,  
<sup>2</sup>Тимощук О.Л., к.т.н., доц.

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, <sup>1</sup>кафедра електромеханіки, <sup>2</sup>кафедра математичних методів системного аналізу*

**Вступ.** В різних системах автоматики у якості виконавчих двигунів використовуються мікродвигуни постійного та змінного струму. Є необхідність провести порівняння властивостей двигунів постійного та змінного струму, насамперед колекторного двигуна постійного струму з низкою асинхронних двигунів співмірної потужності. Найбільший інтерес представляє порівняльний аналіз динамічних характеристик даних двигунів.

**Мета:** здійснити системний аналіз властивостей виконавчих електродвигунів двох типів: асинхронного (АД) і постійного струму (ДПС), призначених для використання в системах автоматики і керування (САК).

**Матеріали і результати досліджень.** Більша частина електричних машин що серійно випускаються, призначені до використання в сучасних САК, являються або колекторними ДПС, а також одно- або багатозазними АД. Специфіка області застосування потребує одночасного виконання таких вимог як лінійність механічних, а в ряді випадків і регульовальних характеристик двигунів, наявність певного «запасу» по пусковому моменту, необхідного для надійного і швидкого пуску, відсутність спеціальних мір і конструктивних рішень, направлених на обмеження струму якоря в перехідних режимах.

Наслідком таких вимог є конструктивні рішення, на яких ми, внаслідок їх неоднократного обговорення, зупинитися не будемо. Зауважимо лише, що магнітна система обох типів двигунів є слабонасиченою і крива ЕРС вздовж розточка статора практично синусоїдальна.

Засобом порівняння властивостей двигунів в робочому діапазоні зміни навантажень будемо рахувати механічну характеристику  $M = f(s)$ , для чого віднесемо також поняття «ковзання» на колекторні ДПС. Не дивлячись на різне фізичне тлумачення результатів, одержуваних за допомогою цього поняття для АД і ДПС, загальність одержуваних результатів математичних виразів дозволяє отримати достовірні кількісні результати що підлягають аналізу.

Спочатку отримаємо аналітичні вирази для механічних характеристик двигунів обох типів. Будемо розглядати наступні базові моделі:

- 1) колекторний ДПС «класичної» конструкції зі збудженням від постійних магнітів;
- 2) симетричний трифазний АД, що живиться від трифазної мережі;
- 3) симетричний трифазний АД, що живиться як однофазний і використовує для пуску реактивний елемент;
- 4) несиметричний двофазний АД, що живиться від однофазної мережі.

На рисунку 1 показані механічні характеристики двигунів базових моделей, побудовані у відносних одиницях при одному і тому ж значенні кратності пускового електромагнітного моменту  $m_s$ .

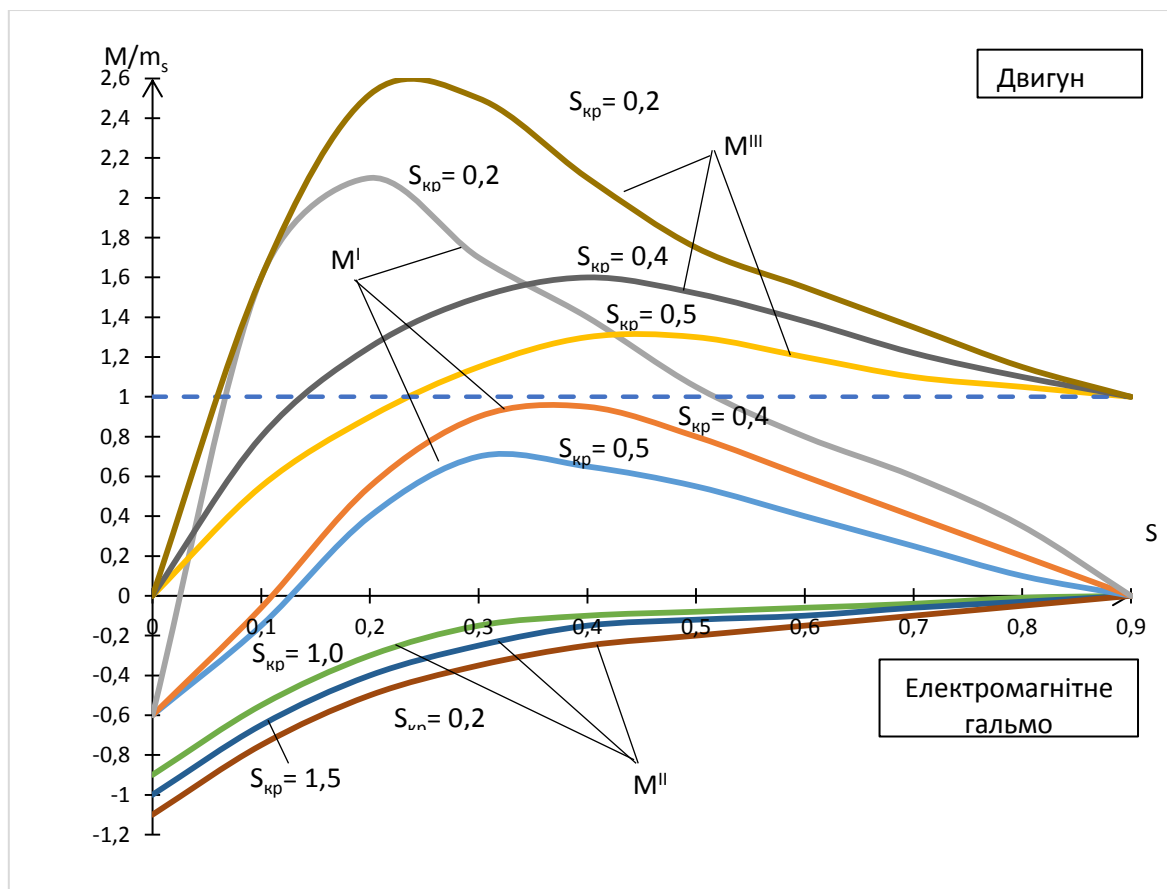


Рисунок 1 – Механічні характеристики АД: трифазного (МІІІ), двофазного (МІІ) і однофазного (МІ), при різних значеннях критичного ковзання.

Вираз механічної характеристики для ДПС має найпростіший вигляд

$$M_{*}^{\text{ДПС}} = m_s - (m_s - 1) = m_s - m_s(1 - s) = m_s \cdot s, \quad (1)$$

де  $s_H = \frac{s \omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = 1 - \frac{m_s - 1}{m_s} = \frac{1}{m_s}$  – номінальне ковзання ДПС у відносних одиницях.

Для отримання виразу механічної характеристики АД в безрозмірній формі скористаємося відомою формулою Клоса

$$\frac{M}{M_{max}} = 2 \frac{1 - \rho s_{kp}}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s} + 2\rho s_{kp}}, \quad (2)$$

де  $s_{kp}$  – критичне ковзання;  $\rho = R_1 / C_1 R_2'$  – постійний коефіцієнт.

Додатково припустимо, що при  $s_{kp} \leq 0.3$  величини  $\rho$  і  $s_{kp}$  є взаємно незалежними і членом  $\rho s_{kp}$  в (2) можна знехтувати. Тоді для симетричного трифазного АД отримаємо:

$$M_{*}^{III} = \frac{\frac{s_H + s_{кр}}{s_{кр}} \cdot \frac{s_H}{s}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad M_{n^{*}}^{III} = \frac{\frac{s_H + s_{кр}}{s_{кр}} + \frac{s_H}{s}}{s_{кр} + \frac{1}{s_{кр}}} = m_s$$

Звідки

$$M_{*}^{III} = \frac{m_s(1 + s_{кр}^2) \cdot s}{s^2 + s_{кр}^2}, \quad (3)$$

де  $M_{n^{*}}^{III}$  – пусковий момент базової моделі б) у відносних одиницях.

Як раніше зазначалося, величина  $C_1$ , що визначає відносне падіння напруги в обмотці статора АД для двигунів малої потужності ( $P_{2H} < 1$  кВт) не перевищує 1, 2 [1], а відповідно добуток ( $2 \rho s_{кр}$ ) буде менше 0,8 при  $S_{кр} \geq 0,5$ .

Однофазний АД буде мати, крім моменту від прямої послідовності поля  $M_{пр}$ , що визначається по (3), момент поля що обертається в протилежну сторону  $M_{обр}$ , що визначається при ковзанні протилежно оберненого поля  $s_{обр}$ :  $s_{обр} = 2 - s_{пр}$ , де  $s_{пр}$  ковзання прямого поля. Тоді, очевидно, для однофазного АД

$$\begin{aligned} M_{обр}^I &= \frac{m_s(2-s)(1+s_{кр}^2)}{(2-s)^2 + s_{кр}^2} \text{ і } M_{*}^I = M_{пр}^I - M_{обр}^I = \\ &= \frac{2m_s(1+s_{кр}^2)(1-s)}{s_{кр}[s_{кр}^2 + (2-s)^2]} \cdot \left( \frac{2s}{s_{кр}^2 + s^2} - 1 \right), \end{aligned} \quad (4)$$

де  $M_{обр}^I$  – момент від зворотного поля, в.о.;  $M_{*}^I$  – результуючий момент однофазного АД, в.о.

Двофазний виконавчий АД відрізняється від однофазного тим, що момент від оберненого поля  $M_{обр}^{II} > M_{пр}^{II}$  при  $0 < s < 1$ , що відповідає умові відсутності самоходу при роботі в складі САК. В цьому випадку результуючий момент буде, очевидно, в цій області від'ємним, член ( $2 \rho s_{кр}$ ) буде більше 1, і ним в (2) вже не можна буде нехтувати, так як двигуни даного типу мають значення критичного ковзання  $S_{кр} \geq 1$ .

$$M_{обр}^{II} = \frac{m_s(2-s)[1 + s_{кр}^2(1 + 2\rho)]}{s_{кр}^2[1 + 2\rho(2-s)] + (2-s)^2}$$

і кінцева формула

$$M_{*}^{II} = \frac{2m_s[1 + s_{кр}^2(1 + 2\rho)](s-1)(s^2 + s_{кр}^2 - 2s)}{[s^2 + s_{кр}^2(1 + 2\rho s)]\{(2-s)^2 + s_{кр}^2[1 + 2\rho(2-s)]\}}. \quad (5)$$

Аналогічно можна отримати момент однофазного АД як частковий випадок (5):

$$M_*^I = \frac{2m_s(1 + s_{кр}^2)(s - 1)(s^2 + s_{кр}^2 - 2s)}{(s^2 + s_{кр}^2)[s_{кр}^2 + (2 - s)^2]}. \quad (6)$$

Для подальшого аналізу будемо користуватись формулами (1), (3), (5) і (6).

На рис. 1 показані механічні характеристики АД всіх трьох базових моделей в області від  $0 < s < 1$ .

Перейдемо тепер до розгляду деяких параметрів, напряму пов'язаних з механічними характеристиками.

1. *Жорсткість механічної характеристики*, під якою ми будемо розуміти наступний вираз:

$$\gamma = \frac{M_{max} - M_0}{S_{кр}}, \quad (7)$$

де  $M_{max}$  – максимальне значення моменту який може розвинути двигун;  $M_0$  – момент синхронного режиму роботи ( $s=0$ ).

Для ДПС будемо мати:  $M_{max} = m_s$ ;  $M_0=0$ ;  $s_{кр}=1$ , а  $\gamma_{дпс}$ , рівна  $m_s$ , є постійною величиною, що не залежить від інших параметрів двигуна.

Для АД необхідно взяти похідні в (3), (5) і (6) по  $s$ , прирівнявши їх до нуля, визначити значення  $M_{max}$ . Неважко довести, що максимальне значення моменту у всіх випадках досягається при  $s=s_{кр}$ . При цьому для двигунів різних базових моделей отримаємо

- трифазний АД:

$$\begin{cases} M_{max}^{III} = \frac{m_s(1 + s_{кр}^2)}{2s_{кр}} \\ \gamma^{III} = \frac{m_s(1 + s_{кр}^2)}{2} \end{cases}; \quad (8)$$

- однофазний АД:

$$\begin{cases} M_{max}^I = \frac{m_s(1 + s_{кр}^2)(1 - s_{кр})^2}{s_{кр}(s_{кр}^2 - 2s_{кр} + 2)} \\ M_0^I = \frac{-2m_s(1 + s_{кр}^2)}{s_{кр}^2 + 4} \\ \gamma^I = \frac{m_s(1 + s_{кр}^2)[(1 - s_{кр}^2)(s_{кр}^2 + 6) + 2]}{(s_{кр}^2 + 4)(s_{кр}^2 - 2s_{кр} + 2)} \end{cases}; \quad (9)$$

- двофазний АД:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{max}^{II} = \frac{m_s [1 + s_{кр}^2 (1 + 2\rho)] (1 - s_{кр})^2}{(1 + \rho s_{кр}) [s_{кр}^2 - 2s_{кр} (1 + 2\rho) + 2(1 + 2\rho)]} \\ M_0^{II} = \frac{-2m_s [1 + s_{кр}^2 (1 + 2\rho)]}{s_{кр}^2 (1 + 4\rho) + 4} \\ \gamma^{II} = \frac{m_s [1 + s_{кр}^2 (1 + 2\rho)] \{ (1 - s_{кр})^2 [s_{кр}^2 (1 + 4\rho) + 6 + 2\rho s_{кр}] + 4(1 - s_{кр}) \rho (1 + \rho s_{кр}) + 2(1 + \rho s_{кр}) \}}{(1 + \rho s_{кр}) [s_{кр}^2 - 2s_{кр} (1 + 2\rho) + 2(1 + 2\rho)] [4 + s_{кр}^2 (1 + \rho)]} \end{array} \right. \quad (10)$$

2. Умови виконання ДПС і АД з однаковими максимальними моментами. Для простоти розглянемо випадок порівняння ДПС з симетричним трифазним АД.

Очевидно, повинна виконуватись умова, коли номінальне ковзання ДПС дорівнює критичному значення ковзання АД, моменти які розвиває двигун, однакові.

Введемо позначення:  $\alpha = s_{ад} / s_{дпс}$ , де  $s_{ад}$  і  $s_{дпс}$  будемо розуміти як їх номінальні значення. Тоді не важко показати, що виконання умови 2 необхідно, для того щоб  $\frac{s_{кр}}{2} < \alpha < 1$ , і тоді з (8) слідує, що механічна характеристика АД буде жорсткіша механічної характеристики ДПС.

На практиці [2]:  $s_{ад} \in [0,05 \dots 0,15]$ , що ілюструється на рисунку 2.

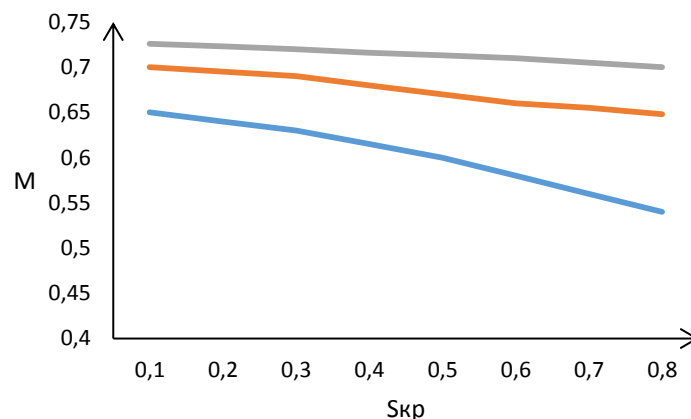


Рисунок 2 – Межа зони виконання АД і ДПС з однаковими максимальними моментами

3. Не важко показати, аналізуючи разом (1) і (3), що для двигунів однакової номінальної потужності значення кратності пускового моменту ДПС буде завжди вище, чи у АД таких же габаритних розмірів, так як в загальному випадку втрати в якорі при однакових значеннях номінального ковзання будуть більшими, ніж у АД.

4. Нарешті, визначимо, яким умовам повинна відповідати робоча точка на механічній характеристиці АД, щоб електромагнітні потужності що розвиваються у обох двигунів були однаковим

Очевидно, що

$$P_{АД} = \frac{m_s \cdot s(1 - s)\omega_0(1 + s_{кр}^2)}{s^2 + s_{кр}^2}; \quad (11)$$

$$P_{\text{ДПС}} = \omega_0 \cdot s(m_s - 1). \quad (12)$$

Спільне вирішення (11) і (12) дає величину оптимального ковзання:

$$s_{\text{опт}} = -\frac{m_s(1 + s_{\text{кр}}^2)}{2(m_s - 1)} \left[ 1 - \sqrt{1 + \frac{4(m_s - 1)(m_s + s_{\text{кр}}^2)}{m_s^2(1 + s_{\text{кр}}^2)^2}} \right]. \quad (13)$$

Залежність  $s_{\text{опт}} = f(s_{\text{кр}})$  при різних значеннях  $m_s$  представлена на рисунку 3, як не важко помітити, всі залежності практично прямолінійні.

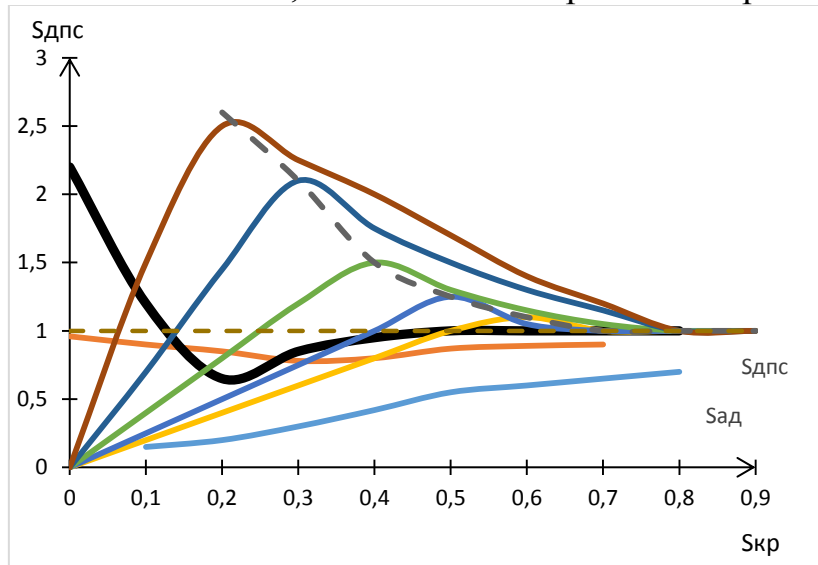


Рисунок 3 – До визначення максимального ковзання АД і ДПС

**Висновки.** Проведено аналіз властивостей електродвигунів призначених для роботи в системах автоматики з живленням від постійного та змінного струму. Було порівняно характеристики виконавчого асинхронного двигуна та виконавчого двигуна постійного струму.

Показано що кратність пускового моменту двигуна постійного струму одноковоного габариту та потужності, з асинхронними двигуном, вище за рахунок більших втрат в якорі ДПС у порівнянні з режимом АД при номінальному ковзанні

#### Перелік посилань

1. Электрические машины: Учебник для вузов. В двух томах. Том 2 / А.В. Иванов-Смоленский – 3-е изд., стереот. – М.: Издательский Дом МЭИ, 2006. – 532с.
2. Електричні машини: навч. Посіб. Для студ. Вищ. Навч. Закладів / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012. – 480с.
3. Электродвигатели асинхронные / В.Л. Лихачев. - М.: СОЛОН-Р, 2002. – 304с.
4. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для вузов / Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. и др. – М.: Высш. шк., 1988. – 328с.
5. Asynchronous machines. First edition / U.A. Bakshi, M.V. Bakshi.: Technical publications Pune. – 2008.