

РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

В останні два десятиріччя, регульовальний асинхронний електропривод зазнав такі істотні зміни у своєму розвитку, що повністю витиснув із багатьох галузей синхронний привод і привод постійного струму. Це пов'язано передусім з досягненням в силовій електроніці і мікропроцесорній техніці, на основі яких були зроблені перетворювачі частоти, які забезпечують управління асинхронними короткозамкненими двигунами з енергетичними та динамічними показниками, сумірними або перевищеними показниками інших приводів.

Сьогодні частотне управління є для асинхронного привода свого роду технічним стандартом. В той же час практично вийшли із застосування і не використовуються такі способи управління та пристрої як симетричне і несиметричне управління напругою, керування введенням додаткових опорів у коло статора і ротора, управління змінною числа пар полюсів та ін.

При дослідженні і проектуванні електроприводів дуже часто приходиться оперувати механічними характеристиками короткозамкнених асинхронних двигунів для вирішення багатьох задач: при розрахунку прискорення і тривалості розгону електропривода, побудові кривих струму в функції ковзання, для визначення уставок реле в схемах автоматичного керування та блокіровок та ін.

При аналізі режимів роботи асинхронного привода широко використовується рівняння механічної характеристики, виведеної для двигунів з незмінним параметрами при Γ -образній схемі заміщення асинхронного двигуна, відомої як формули Клоса [1]:

$$\mu = \frac{2 \cdot \mu_k \cdot \left(1 + \frac{R_1}{c_1 \cdot R_2'} \cdot S_k \right)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2 \cdot \frac{R_1}{c_1 \cdot R_2'} \cdot S_k}, \quad (1)$$

де $\mu = \frac{M}{M_n}$; $\mu_k = \frac{M_k}{M_n}$; $c_1 = 1 + \frac{z_1}{z_0} \approx (1,02 \div 1,06)$; $z_1 = R_1 + jX_1$; $z_0 = R_0 + jX_0$.

Однак, дослідження [2] показали, що прийняті припущення про сталість індуктивного опору взаємоіндукції (індуктивного опору вітки намагнічування) T -образної схеми заміщення і винесення його на затискачі, привело до створення помилкової Γ -образної схеми заміщення, а отже і подальших помилкових результатів.

Крім того, у сучасних короткозамкнених асинхронних двигунах параметри статора і ротора, як правило, змінюються разом із швидкістю обертання: при ковзанні більших за номінальне значення помітно проявляється насичення зубцевого шару, що тягне за собою відповідне зменшення реактивних опорів статора і ротора (X_1 і X_2'), а при збільшенні ковзання над критичним значенням S_k дуже часто проявляється і ефект витиснення струму, що приводить до збільшення активного роторного опору R_2' і додаткового зменшення реактивного опору X_2' . Тому використання рівняння (1) для побудови кривих $\mu = f(S)$ стосовно короткозамкнених двигунів неминує приводить до значних розрахункових помилок.

Для розрахунку і побудови механічної характеристики $\mu = f(S)$ асинхронного двигуна з урахуванням змінних параметрів в (1) для кожного значення S необхідно підставити значення кратності максимального моменту μ_k і критичного ковзання S_k , відповідні активному і індуктивному опорам при даному ковзанні S . Такий спосіб урахування параметрів приведений в [2], і тоді у формулі (1) μ_k і S_k можна розглядати як функцію ковзання S :

$$\mu_k = f(S) \text{ і } S_k = f(S)$$

Так як короткозамкнені асинхронні двигуни мають єдині значення критичних моменту μ_k і ковзання S_k , то для урахування зміни параметрів двигуна вводяться змінні коефіцієнти $(a, b, c) = f(S)$. Тоді формулу (1) можна записати у вигляді:

$$\mu = \frac{2 \cdot a \cdot \mu_k \cdot \left(1 + \frac{c \cdot R_{1*}}{c_1 \cdot R_{2*}} \cdot b \cdot S_k \right)}{\frac{S}{b \cdot S_k} + \frac{b \cdot S_k}{S} + 2 \cdot b \cdot \frac{c \cdot R_{1*}}{c_1 \cdot R_{2*}} \cdot S_k} \quad (2)$$

Для одержання аналітичної залежності доцільно ввести замість трьох змінних коефіцієнтів один $q_m = f(S)$. Це дасть можливість апроксимувати наступним виразом:

$$\mu = \frac{\mu_k \cdot (2 + q_m)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + q_m} \quad (3)$$

Апроксимуюча функція (3) при фіксованому значенні S_k повинна точно забезпечувати значення моменту у чотирьох характерних (гарантованих) точках, одержаних із каталогу або експерименту: $\mu = 0$ при $S = 0$; $\mu = 1$ при $S = S_n$; $\mu = \mu_k$ при $S = S_k$; $\mu = \mu_{II}$ при $S = S_{II} = 1$. При цьому через дві характерні точки $\mu = 0$ при $S = 0$ і $\mu = \mu_k$ при $S = S_k$ крива побудована по (3) проходить в силу структури функції (3). Через інші характерні точки: $\mu = \mu_n = 1$ при $S = S_n$; $\mu = \mu_{II}$ при $S = S_{II} = 1$ крива проходить тільки при певних значеннях q_m , відповідних цим режимам:

$$q_{m(n,II)} = \frac{\left(\frac{S_{(n,II)}}{S_k} + \frac{S_k}{S_{(n,II)}} \right) \cdot \mu_{(n,II)} - 2 \cdot \mu_k}{\mu_k - \mu_{(n,II)}} \quad (4)$$

Для одержання неперервності функції (3) в її вираз вводиться степенева залежність $q_m(S)$, яка задовольняє двом крайнім точкам

$$q_m = q_{mII} + \frac{q_{min} - q_{mII}}{(1 - S_n)^\gamma} \cdot (1 - S)^\gamma \quad (5)$$

Показник степені γ впливає на форму механічної характеристики. З достатньою мірою точності залежність $q = f(S)$ може бути прийнята лінійною, тобто $\gamma = 1$. Для одержання більшої угнутої механічної характеристики в пусковій частині можна прийняти $\gamma = 0,5$ при $q_{min} < q_{mII}$ і $\gamma = 1,5$ при $q_{min} > q_{mII}$.

Одержані формули дозволяють побудувати механічну характеристику двигуна, яка проходить через п'ять характерну точку мінімального обертального моменту у процесі пуску. Звичайно значення мінімального обертального моменту $\mu_{min} = (0,8 \div 0,9)\mu_{II}$ відповідає ковзанням $S_{min} = 0,8 \div 0,9$.

На рис. 1 приведені механічні характеристики асинхронного двигуна, розраховані по формулам (1) (крива 1) та по (3) (крива 2) для двигуна А – 104 – 8

$$P_n = 160(\text{кВт}); S_n = 0,02; S_{kn} = 0,127; \mu_{tn} = 1,3; \mu_{kn} = 2,5; \omega_n = 76,9(1/c); R_1 = 0,02(\text{Ом}); R_2' = 0,0145(\text{Ом}); X_k' = 0,113(\text{Ом})$$

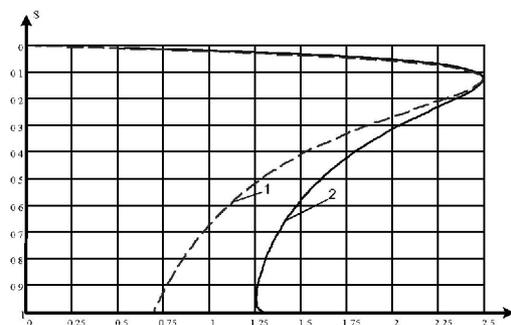


Рис. 1 Механічні характеристики АД: 1 – без урахування змінних параметрів; 2 – з урахуванням змінних параметрів

Таким чином, не урахування змінних параметрів асинхронного двигуна призводить до значних розходжень на пусковій ділянці механічної характеристики, що не відповідає реальному діапазону регулювання швидкості систем електропривода, наприклад «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун», де характеристики в замкненій системі регулювання обмежуються природною характеристикою.

Для забезпечення працездатності асинхронного привода при модульному частотному керуванні необхідно задати функціональний зв'язок між каналами управління напругою і частотного живлення статора, яка називається законом керування.

В 1925 р. академік М. П. Костенко сформулював загальний закон, який забезпечує оптимальні умови роботи двигуна в наступній формі: щоб забезпечити оптимальний режим роботи АД при усіх значеннях частоти і навантаження, необхідно відносно напругу двигуна змінювати пропорційно добутку відносної частоти на корінь квадратний із відносного моменту:

$$\gamma = \varphi_1 \cdot \sqrt{\mu_c}, \quad (6)$$

де $\gamma = \frac{U_1}{U_{1n}}$; $\varphi = \frac{\varphi_1}{\varphi_{1n}}$; $\mu = \frac{M_c}{M_n}$ - відповідно відносні значення напруги живлення, частоти і статичного моменту.

Із одержаного виразу (6) випливає, що зміна напруги U_1 визначається не тільки частотою мережі живлення f_1 , але і характером зміни моменту статичного навантаження на валу при зміні швидкості.

Для багатьох механізмів [1]:

$$M_c = M_{xx} + (M_n - M_{xx}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^\alpha = M_{xx} + (k \cdot M_n - M_{xx}) \cdot \varphi^\alpha, \quad (7)$$

де M_{xx} - момент холостого ходу; M_n - номінальний момент; α - коефіцієнт, який характеризує характер навантаження.

У відносних одиницях вираз (7) має вигляд:

$$\mu_c = \mu_{xx} + (1 - \mu_{xx}) \cdot \varphi^\alpha \quad (8)$$

Підставив (8) в (6), одержимо:

$$\gamma = \varphi_1 \cdot \sqrt{\mu_{xx} + (1 - \mu_{xx}) \cdot \varphi^\alpha} \quad (9)$$

Якщо підставити в (9) відповідні значення μ і φ , можна одержати для кожного із типів статичного навантаження основний закон зміни напруги при частотному регулюванні.

При постійному моменті на валу ($\alpha = 0$):

$$\gamma = \varphi_1 \text{ або } \frac{U_1}{f_1} = const, \text{ тобто } U = U_n \cdot \varphi.$$

При постійній потужності ($\alpha = 1$):

$$\gamma = \sqrt{\varphi_1} \text{ або } \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const,$$

тобто $U = U_n \cdot \sqrt{\varphi}$.

При вентиляторному навантаженні ($\alpha = 2$):

$$\gamma = \varphi_1^2 \text{ або } \frac{U_1}{f_1^2} = const, \text{ тобто } U = U_n \cdot \varphi^2.$$

Таким чином, напруга, яка прикладена до затискачів двигуна, є функцією частоти і одночасно залежить від закону частотного регулювання:

$$U = U_n \cdot \varphi^\beta, \quad (10)$$

де β - коефіцієнт, який характеризує закон частотного регулювання.

При побудові механічних характеристик асинхронного двигуна при будь-якій частоті можна скористатися загальним виразом моменту без урахування змінних параметрів [1]:

$$M = \frac{3 \cdot U^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \left[(R_1 \cdot S + R_2')^2 + S^2 \cdot (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (11)$$

де $\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}$; $X_1 = X_{1n} \cdot \varphi$; $X_2' = X_{2n}' \cdot \varphi$; X_{1n}, X_{2n}' - відповідно індуктивний опір статора і ротора, приведений до обмотки статора, при частоті 50 Гц.

Після введення відносних одиниць вираз для моменту з урахуванням закону частотного регулювання матиме вигляд:

$$M = \frac{3 \cdot U_n^2 \cdot \varphi^{2\beta-1} \cdot R_2'}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \left[(R_1' \cdot S + R_2')^2 + S^2 \cdot \varphi^2 \cdot X_{\text{кн}}^2 \right]}, \quad (12)$$

де $X_{\text{кн}} = X_{1n} + X_{2n}$ - номінальне значення індуктивного опору короткого замикання.

Для розрахунку механічних характеристик частотно – регульованого привода з урахуванням змінних параметрів скористаємося виразом (3), замінивши показання S на відносну швидкість $\nu = \frac{\omega}{\omega_n}$:

$$\mu = \frac{\mu_{\kappa} \cdot (2 + q_{\text{мф}})}{\frac{\varphi - \nu}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{\varphi - \nu} + q_{\text{м}}}, \quad (13)$$

де

$$q_{\text{мф}} = q_{\text{мПф}} - \frac{q_{\text{мПф}} - q_{\text{мнф}}}{(1 - S_n)^{0,5}} \cdot \nu^{0,5} \quad (14)$$

З урахуванням законів частотного регулювання формулу (4) можна записати так:

$$q_{\text{мПф}} = \frac{\left(\frac{S_{\text{П}}}{S_{\text{кф}}} + \frac{S_{\text{кф}}}{S_{\text{П}}} \right) \cdot \mu_{\text{Пф}} - 2 \cdot \mu_{\text{кф}}}{\mu_{\text{кф}} - \mu_{\text{Пф}}}; \quad (15)$$

$$q_{\text{мн}} = \frac{\left(\frac{S_n}{S_{\text{кф}}} + \frac{S_{\text{кф}}}{S_n} \right) \cdot \mu_n - 2 \cdot \mu_{\text{кф}}}{\mu_{\text{кф}} - \mu_n}; \quad (16)$$

У формулах (15) і (16):

$$S_{\text{кф}} = S_{\text{кн}} \cdot \frac{\sqrt{R_1'^2 + X_{\text{кн}}^2}}{\sqrt{R_1'^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot \varphi^2}}; \quad (17)$$

$$\mu_{\text{Пф}} = \mu_{\text{Пн}} \cdot \frac{\varphi^{2\beta-1} \cdot \left[(R_1' + R_2')^2 + X_{\text{кн}}^2 \right]}{(R_1' + R_2')^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot \varphi^2} \quad (18)$$

$$\mu_{\text{кф}} = \mu_{\text{кн}} \cdot \frac{\varphi^{2\beta-1} \cdot \left(R_1' + \sqrt{R_1'^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)}{R_1' + \sqrt{R_1'^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot \varphi^2}}. \quad (19)$$

На рис. 2 приведені механічні характеристики, розраховані по параметрам вище приведеного двигуна А – 104 – 8 з урахуванням змінних параметрів і різних видах законів частотного регулювання. На цьому рисунку також приведені залежності $\mu_c = f(\nu)$ механізмів, для яких доцільне застосування даних видів законів частотного регулювання.

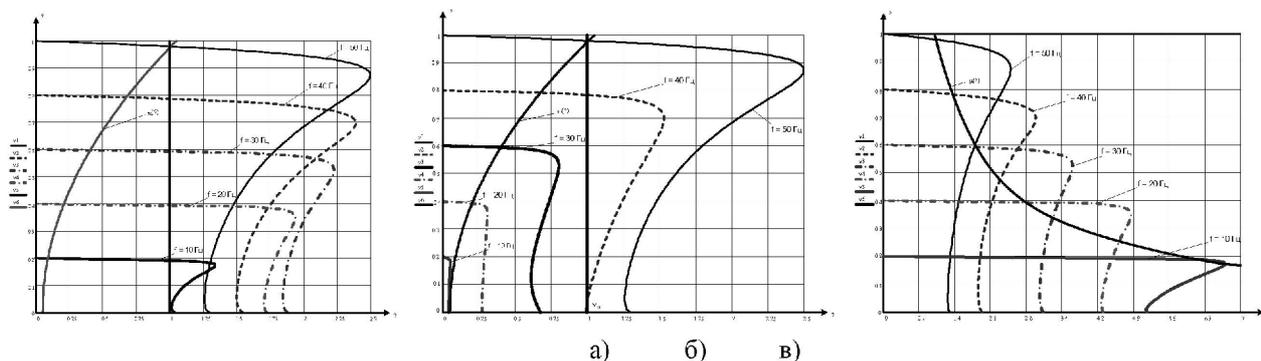


Рис. 2 Механічні характеристики частотно-регульовального привода з урахуванням мінних параметрів АД при трьох видах законів частотного регулювання:

а) $\beta = 1$; б) $\beta = 2$; в) $\beta = \frac{1}{2}$

Висновки. 1. Не урахування змінних параметрів асинхронного двигуна приводить до помилкових результатів при дослідженні і проектуванні електроприводів.

2. Приведена методика розрахунку механічних характеристик може бути використана при будь-яких інших законах частотного регулювання в залежності від характеру навантаження і параметрів асинхронного двигуна.

3. При законі регулювання $\frac{U_1}{f_1} = const (\beta = 1)$ ефективно може застосовуватися тільки в приводах з вентиляторним навантаженням. Для інших механізмів (наприклад, підйомно-транспортні) необхідно використовувати закони керування, які забезпечують збільшення відношення $\frac{U_1}{f_1}$ при зниженні частоти для компенсації падіння напруги в активному опорі статора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андрєєв В. П., Сабінін Ю. А. Основи електропривода. – М. – Л., Госенерговидавництво, 1963. – 772 с.
2. Андріанов В. Н., Бистрицький Д. Н. Визначення характеристик асинхронного короткозамкнутого електродвигуна із змінними параметрами по видозміненій формулі Клоса. – «Електротехнічна промисловість», 1967, вип. 286, - с. 6 – 8.