

УДК 621.313.333.

ГРАФОАНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ КООРДИНАТ СИСТЕМИ “АД - РОБОЧА МАШИНА” В ПЕРЕХІДНИХ І УСТАЛЕНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ.

Савченко П.І., доктор технічних наук; Овчаров С.В., Уваров О.В. - інженери
Харківський державний технічний університет сільського господарства

В системі “АД – РМ” важливе значення має дослідження умов стійкості при порушенні її усталеного стану, наприклад при: зміні навантаження; аварійному зниженню напруги в мережі живлення; одночасній зміні навантаження і напруги живлення тощо.

Умовою усталеного обертального руху системи “АД – РМ” відповідно до основного рівняння руху є рівність моментів двигуна і приведеного до валу двигуна моменту навантаження $M = M_c$. Перевірка виконання цієї умови здійснюється графічно за допомогою механічних характеристик (МХ) асинхронного електродвигуна (АД) і робочої машини (РМ).

Мета роботи є дослідження статичної стійкості (саморегулювання), тобто здатності системи автоматично відновлювати усталений режим роботи після його порушення без допомоги регулятора, а лише в наслідок властивостей привода, обумовлених МХ АД і РМ і коли зміна усталеного режиму протікає порівняно повільно і роль інерційних мас або індуктивності незначна. На цій основі виявити залежності механічних координат (моменту обертання M , кутової частота обертання ω і S ковзання АД) системи від зміни навантаження і напруги живлення які можна використовувати показниками при діагностиці АД.

Для досягнення мети необхідно побудувати МХ АД і РМ і прослідити графічно як будуть проходити перехідні процеси від одного усталеного режиму до іншого.

Відомо [1], що відповідно до уточненої формули Клосса МХ АД на ділянці малих ковзань момент двигуна змінюється за квазілінійним законом доти, поки не досягне M_k , причому у зоні малих ковзань $|S| \ll S_k$ МХ АД близька до лінійної залежності $M \approx 2M_k S/S_k$

Ця формула дає більш точніші результати, якщо у неї замість $2M_k$ підставити значення $N = S_k / S_H$, або взяти значення N із формули для визначення критичного ковзання [2], тобто

$$S_k = S_H \frac{[M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} - 1 + 2S_H(M_k^* - 1)}]}{1 - 2S_H(M_k^* - 1)} = S_H N \quad (1)$$

Із наведених формул можна одержати вираз для визначення моменту АД у відносних величинах, який буде дорівнюватися коефіцієнту завантаження АД.

$$M^* = N S / S_k = S / S_H = K_3 \quad (2)$$

За формулою (2) можна одержати координати точок нового усталеного режиму системи при зміні навантаження АД і одержати залежність величини ковзання від завантаження АД.

$$S = S_H K_3 = S_H M / M_n \quad (3)$$

Механічні характеристики робочих машин, які застосовуються у сільському господарстві, описують емпіричною формулою [2]:

$$M_c = M_{CO} + (M_{C.H} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^x, \quad (4)$$

де M_c – момент опору при швидкості ω , Н· м ; M_{CO} – момент опору тертя в рухомих частинах, який не залежить від швидкості, Н· м ; $M_{C.H}$ – момент опору при номінальній швидкості, Н· м ; ω_H – номінальна швидкість системи, рад/С; x – показник ступеня, який

характеризує зміну статичного моменту РМ при зміні швидкості. Він може мати такі значення ($x = 0; 1; 2; -1$)

На рис 1. *а, б, в, г* наведені МХ РМ для яких, значення x відповідно взято: *а* - $x=0$; *б* - $x=1$; *в* - $x = 2$; *г* - $x = -1$ при різній степені їх завантаження ($K_3 < 1$ або $K_3 > 1$) і МХ АД при різному значенні напруги живлення ($U_2 < U_H < U_3$, або $K_{U_2} < 1 < K_{U_3}$). В якості базового усталеного режиму роботи системи взято номінальний режим для всіх РМ (точка 1). Через точку 1 проходять МХ РМ $M_{c1} = f(\omega)$ при її номінальному навантаженні ($K_3=1$) і МХ АД, яка знята при номінальній нарузі живлення. $M_{U_H} = f_1(\omega)$ ($K_U=1$). Точки 1 на всіх графіках є точками перетину цих МХ, в яких $M_{c1} = M_H$, визначають стан рівноваги і відповідну швидкість ω_H електропривода. Цей приклад взято для номінального режиму роботи, але це не обов'язково повинен бути номінальний режим. Рисунки 1. *а, б, в, г* будемо використовувати при розгляді перехідних процесів в системі “АД – РМ” при зміні навантаження ($K_3 < 1$ або $K_3 > 1$), зміні напруги живлення ($U_2 < U_H < U_3$) і при одночасній зміні навантаження і напруги живлення Названі перехідні процеси будемо розглядати кожний окремо, але одночасно для системи “АД – РМ” з різними типами робочих машин.

1. Зменшення навантаження системи при номінальній нарузі живлення АД.

При зменшенні навантаження ($K_3 < 1$) з'являється новий режим роботи РМ в точці *а* нової МХ $M_{c2} = f(\omega)$. В перший момент часу перехідного процесу стрибком змінився тільки момент опору РМ, а швидкість і момент двигуна поки що залишилися не змінними в точці 1. Так як момент статичного опору РМ в точці *а* M_{ca} менший моменту M_H АД в точці 1 ($M_{ca} < M_H$), то відповідно до основного рівняння руху електропривода, АД почне розганятися за МХ $M_{U_H} = f_1(\omega)$, а вмісті з ним і РМ за характеристикою $M_{c2} = f(\omega)$ до перетину характеристик в точці 2 нового стану рівноваги, тобто $M_{c2} = M_2$ і почнеється новий усталений режим роботи системи з меншим навантаженням АД.

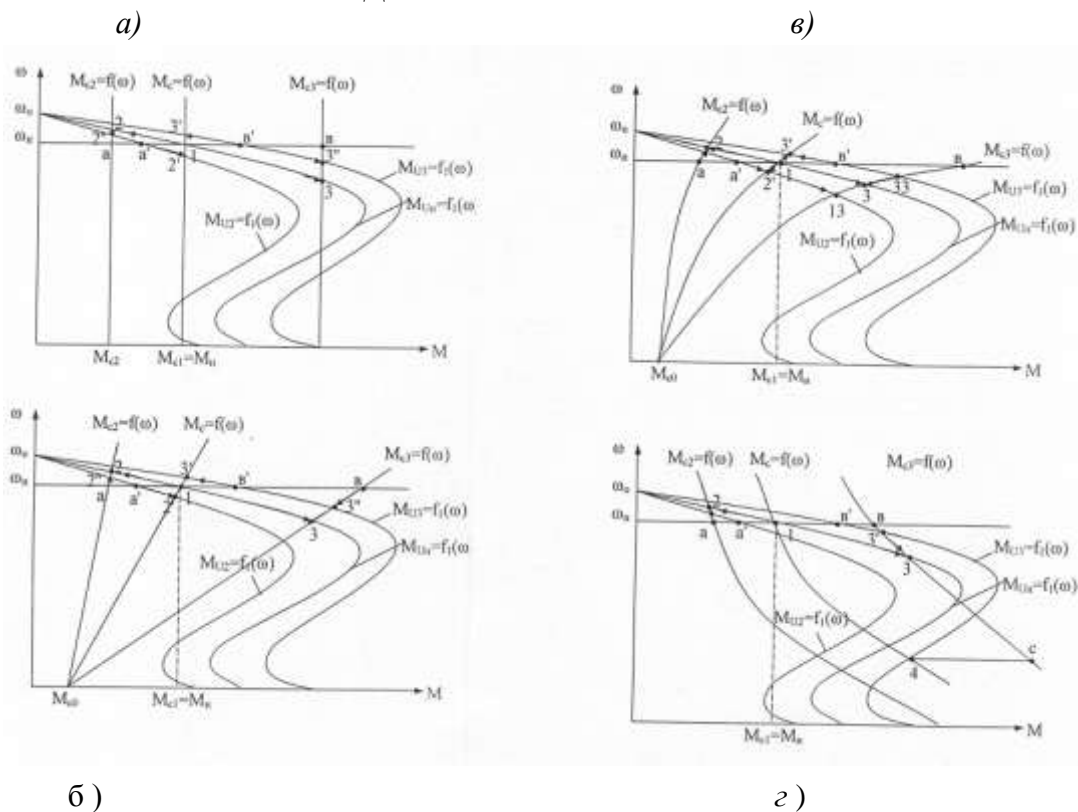


Рис.1. *а, б, в, г*. Механічні характеристики АД (при $U_2 < U_H < U_3$) і робочих машин: *а* - $x=0$; *б* - $x=1$; *в* - $x=2$; *г* - $x=-1$ при визначенні механічних координат системи “АД-РМ” в перехідних і усталених режимах роботи при зміні напруги живлення АД.

Коефіцієнт завантаження АД визначиться як відношення M_2 до його номінального моменту ($K_3 = M_2 / M_H$)

2. Збільшення навантаження системи при номінальній напрузі живлення АД.

При збільшенні навантаження ($K_3 > 1$) для РМ з'явився новий режим роботи в точці b нової МХ $M_{c3} = f(\omega)$, так як в перший момент часу стрибком змінився тільки момент опору РМ, а швидкість і момент двигуна поки що залишилися не змінними в точці 1. Момент АД в точці 1 менший ніж момент статичного опору РМ у точці b . Відповідно до основного рівняння руху електропривода, АД почне гальмуватися за його МХ $M_{U_H} = f_1(\omega)$, а вмісті з ним і РМ за характеристикою $M_{c3} = f(\omega)$ до перетину характеристик в точці 3 нового стану рівноваги, тобто $M_{c3} = M_3$ почнеться новий усталений режим роботи системи з більшим навантаженням АД. Коефіцієнт завантаження АД визначиться як відношення M_3 до його номінального моменту ($K_3 = M_3 / M_H$).

Розглянемо рис.1.2- точку 4 усталеного режиму. Внаслідок збільшення навантаження РМ, з'являється новий режим роботи РМ в точці c МХ $M_{c3} = f(\omega)$, так як в перший момент часу стрибком змінився тільки момент опору РМ, а швидкість і момент двигуна поки що залишилися не змінними. Так як момент АД в точці 4 менший ніж момент статичного опору РМ у точці c , то з'явиться надмір моменту оперу порівняно з моментом двигуна ($M_{cc} - M_4$), під дією якого швидкість АД почне падати. Для РМ це буде супроводжуватися подальшим збільшенням моменту опору в напрямки $b - c$ за характеристикою $M_{c3} = f(\omega)$, а для АД – зменшенням його моменту за МХ $M_{U_H} = f_1(\omega)$ на ділянці великих ковзань. Таке розходження моментів буде весь час збільшуватися, поки привод не зупиниться. Отже, дана система не буде статично стійкою при роботі у точці 4.

3. Зниження напруги живлення АД при номінальному навантаженню системи.

При зменшенні напруги живлення ($U_2 < U_H$) з'являється новий режим роботи АД в точці a нової МХ $M_{U_2} = f_1(\omega)$. Так як обертальний момент АД у цій точці a M_{U_2} менший моменту M_{c1} РМ в точці 1, то АД почне зменшувати свою швидкість за МХ $M_{U_2} = f_1(\omega)$, а вмісті з ним і РМ за характеристикою $M_{c1} = f(\omega)$ до перетину характеристик в точці 2` нового стану рівноваги, тобто $M_{c1} = M_H$ і почнеться новий усталений режим роботи системи при меншому значенні напруги живлення АД. Момент АД остається тієї ж величини, що і при номінальній напрузі. Як видно із одержаного результату, який не співпадає з відомим положенням з теорії електричних машин, що момент двигуна змінюється прямо пропорційно квадрату напруги на його затискачах $(U'/U)^2$ не можливо використовувати просто так, так як перерахунок моменту АД може привести до не вірного результату. Тому завжди необхідно враховувати який статичний момент переборює АД. Потужність, яку АД споживає з мережі живлення зростає, так як кутова частота обертання АД стала менше номінальної. Коефіцієнт зниження напруги живлення АД визначиться як відношення U_2 до номінального значення напруги АД U_H , тобто $K_{U_2} = U_2 / U_H = U_{2*}$.

4. Підвищення напруги живлення АД при номінальному навантаженню системи.

При підвищенні напруги живлення ($U_H < U_3$) з'являється новий режим роботи АД в точці b нової МХ $M_{U_3} = f_1(\omega)$. Так як обертальний момент АД в точці b M_{U_3} більший моменту M_c РМ в точці 1, то АД почне збільшувати свою швидкість за МХ $M_{U_3} = f_1(\omega)$, а вмісті з ним і РМ за характеристикою $M_{c1} = f(\omega)$ до перетину характеристик в точці 3` нового стану рівноваги, тобто $M_{c3} = M_H$ і почнеться новий усталений режим роботи системи при більшому

значенні напруги живлення АД, але момент АД, так же як і при зниженні напруги залишається не змінним. Коефіцієнт підвищення напруги живлення АД визначиться як відношення U_3 до номінального значення напруги АД U_H , тобто $K_{U_3} = U_3 / U_H = U_3^*$.

5. Зміна навантаження системи при зміні напруги живлення АД.

Для прикладу розглянемо випадок, коли одночасно відбувається зниження напруги живлення АД і підвищення навантаження. Останні можливі режими роботи розглядаються аналогічно.

При зниженні напруги живлення (рис.1,а) АД із точки 1 раптом переходить на нову характеристику $M_{U_2} = f_1(\omega)$ в точку а', РМ при збільшенні навантаження переходить в точку в МХ $M_{C_3} = f(\omega)$. Так як момент АД в точці а' менший ніж момент статичного опору РМ в точці в, то з'явиться надмір моменту оперу порівняно з моментом двигуна ($M_{CB} - M_{a'}$), під дією якого швидкість АД почне падати. Для РМ це буде супроводжуватися подальшим зменшенням швидкості в напрямку в-3 за характеристикою $M_{C_3} = f(\omega)$, але величина статичного моменту опору M_{C_3} залишається не змінною. Для АД – зменшенням його моменту за МХ $M_{U_2} = f_1(\omega)$ на ділянці великих ковзань. буде весь час збільшуватися розходження моментів, поки привод не зупиниться. Отже, дана система в цьому випадку не буде статично стійкою.

На рис 1,б в точці а' момент АД менший ніж момент статичного опору РМ в точці в, то з'явиться надмір моменту оперу порівняно з моментом двигуна ($M_{CB} - M_{a'}$), під дією якого швидкість АД почне падати за МХ $M_{U_2} = f_1(\omega)$, а РМ за МХ $M_{C_3} = f(\omega)$, поки в точці 13 не наступи рівновага моментів АД і РМ. Аналогічно на рис.1,в,г.

Залежність ковзання від коефіцієнта завантаження можемо одержати із рівняння (4) для кожної групи робочих машин, для чого запишемо його у відносних одиницях, використовуючи рівняння(3):

$$S / S_H = M_{CO}^* + (K_3 - M_{CO}^*) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x \quad (5)$$

Як видно із рівняння (5), що при номінальній нарузі на затискачах АД при зміні завантаження РМ його ковзання залежить від моменту рушення (M_{CO}^*) РМ, її коефіцієнта завантаження (K_3), коефіцієнта (x), який характеризує зміну моменту опору РМ від зміни швидкості і номінального ковзання S_H .

Розв'яжемо рівняння (5) відносно ковзання S для кожної групи машин.

1.Для робочої машини з незалежною від швидкості механічною характеристикою (x=0) одержимо::

$$S = S_H K_3 \quad (6)$$

2.Для робочої машини з лінійно – зростаючою МХ (x=1) одержимо:

$$S = \frac{K_3 - M_{CO}^* S_H}{\frac{1-S_H}{S_H} + K_3 - M_{CO}^*} \quad (7)$$

3.Для робочої машини з нелінійно – зростаючою (параболічною) МХ (x=2), одержимо квадратичне рівняння:

$S^2 (K_3 - M_{CO}^*) - S [(1 - S_H)^2 / S_H] + 2(K_3 - M_{CO}^*) + M_{CO}^* (1 - S_H)^2 + (K_3 - M_{CO}^*) = 0$, розв'язавши яке відносно S, одержимо:

$$S = \frac{-\epsilon \pm \sqrt{\epsilon^2 - 4ac}}{2a}, \quad (8)$$

де $a = K_3 - M_{CO}^*$; $\epsilon = -(1 - S_H)^2 / S_H - 2(K_3 - M_{CO}^*)$; $c = (K_3 - M_{CO}^*) \cdot M_{CO}^* (1 - S_H)^2$

4. Для робочої машини з нелінійно – падаючою (гіперболічною) MX ($x = -1$), одержимо квадратичне рівняння:

$S^2 - S(1 + M_{CO}^* S_H) + S_H K_3 - K_3 S_H^2 + M_{CO}^* S_H^2 = 0$, розв'язавши яке відносно S , одержимо:

$$S = -p/2 \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}, \quad (9)$$

де $p = (1 + M_{CO}^* S_H)$; $q = S_H K_3 - K_3 S_H^2 + M_{CO}^* S_H^2$

Коли одночасно змінюється навантаження системи і напруга живлення, то рівняння (5) буди мати такий вигляд:

$$K_U^2 S / S_H = M_{CO}^* + (K_3 - M_{CO}^*) \left(\frac{1-s}{1-s_H}\right)^x \quad (10)$$

Для визначення залежності величини ковзання при зміні навантаження системи і напруги живлення, розв'яжемо рівняння (10) відносно ковзання S для кожної групи машин.

1. Для робочої машини з незалежною від швидкості механічною характеристикою ($x=0$) одержимо::

$$S = S_H K_3 / K_U^2 \quad (11)$$

2. Для робочої машини з лінійно – зростаючою MX ($x=1$) одержимо:

$$S = \frac{K_3 - M_{CO}^* S_H}{\frac{1 - S_H}{S_H} K_U^2 + K_3 - M_{CO}^*} \quad (12)$$

3. Для робочої машини з нелінійно – зростаючою (параболічною) MX ($x=2$), одержимо квадратичне рівняння:

$S^2 (K_3 - M_{CO}^*) - S [K_U^2 (1 - S_H)^2 / S_H] + 2(K_3 - M_{CO}^*) + M_{CO}^* (1 - S_H)^2 + (K_3 - M_{CO}^*) = 0$, розв'язавши яке відносно S , одержимо:

$$S = \frac{-\epsilon \pm \sqrt{\epsilon^2 - 4ac}}{2a}, \quad (13)$$

де $a = K_3 - M_{CO}^*$; $\epsilon = -K_U^2 (1 - S_H)^2 / S_H - 2(K_3 - M_{CO}^*)$; $c = (K_3 - M_{CO}^*) \cdot M_{CO}^* (1 - S_H)^2$

4. Для робочої машини з нелінійно – падаючою (гіперболічною) MX ($x = -1$), одержимо квадратичне рівняння:

$S^2 K_U^2 - S(K_U^2 + M_{CO}^* S_H) + S_H K_3 - K_3 S_H^2 + M_{CO}^* S_H^2 = 0$, розв'язавши яке відносно S , одержимо:

$$S = \frac{-\epsilon \pm \sqrt{\epsilon^2 - 4ac}}{2a}, \quad (14)$$

де $a = K_U^2$; $\epsilon = (K_U^2 + M_{CO}^* S_H)$; $c = S_H K_3 - K_3 S_H^2 + M_{CO}^* S_H^2$

Висновок. Запропонований графоаналітичний метод дозволяє визначити механічні координати АД (момент, швидкість і ковзання) і аналітично установити залежність величини ковзання від навантаження системи і напруги живлення, що дає можливість використовувати результати досліджень при діагностиці АД.

Список літератури

1. Попович М.Г., Борисюк М.Г., Гаврилюк В.А. та ін. Теорія електропривода. К.:Вища школа,-1993. -196с.

2. Басов А.М., Шаповалов А.Т., Кожевников С.А. Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве. М.:Колос,-1972,- 344с.

Анотація

Розглядається графоаналітичний метод визначення механічних координат системи «Електропривод – робоча машина» і визначення залежності величини ковзання від зміни навантаження і напруги живлення АД.

Аннотация

Рассматривается графоаналитический метод определения механических координат системы «Электропривод – рабочая машина» и определяется зависимость величины скольжения от изменения загрузки и напряжения питания АД.

Summary

Mechanical co-ordinates of the «Asynchronous motor – operating machine» system and their dependence on load and impressed voltage change are defined by graphic method.