

УДК 629.341

ВИКОРИСТАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

**В.В. Тарасова, доцент, к.т.н., С.А. Суховій, магістрант, ХНУПС ім. Івана
Кожедуба, ЩА, А.В. Гнатов, професор, д.т.н., Щ.В. Аргун, доцент, к.т.н., ХНАДУ**

Анотація. Проведений порівняльний аналіз властивостей асинхронного двигуна (АД), як об'єкту автоматичного керування. Приведений приклад розрахунку критичного ковзання за спрощеною методикою. Приведена структурна схема АД як об'єкта керування. Розглянута розгорнута функціональна схема замкненої автоматичної системи управління (АСУ) стабілізації напруги асинхронного генератора.

Ключові слова. Асинхронний двигун, ковзання, механічна характеристика, автоматичне керування

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**В.В. Тарасова, доцент, к.т.н., С.А. Суховей, магистрант, ХНУПС им. Ивана
Кожедуба, ИГА, А.В. Гнатов, профессор, д.т.н., Щ.В. Аргун, доцент, к.т.н., ХНАДУ**

Аннотация. Проведен сравнительный анализ свойств асинхронного двигателя (АД), как объекта автоматического управления. Приведен пример расчета критического скольжения по упрощенной методике. Рассмотрена развернутая функциональная схема замкнутой автоматической системы управления (АСУ) стабилизации напряжения асинхронного генератора

Ключевые слова. Асинхронный двигатель, скольжение, механическая характеристика, автоматическое управление.

USE OF ASYNCHRONOUS MOTOR AS AN OBJECT OF AUTOMATIC CONTROL

**V. Tarasova, assistant professor, cand. eng. sc., S. Sukhovey, master student,
Ivan Kozhedub KhUAF, ICA, A. Hnatov, professor, dr. eng. sc., Shch. Arhun, assistant
professor, cand. eng. sc., KhNAHU**

Abstract. A comparative analysis of the properties of the asynchronous motor (AM) as an object of automatic control is carried out. The example of calculation of critical sliding according to the simplified method was given. There was presented the structural scheme of the AM as a control object. The expanded functional diagram of the closed automatic control system (ACS) for voltage stabilization of the asynchronous motor was considered.

Keywords. Asynchronous motor, sliding, mechanical characteristics, automatic control

Вступ

Найбільша кількість двигунів, які використовуються в промисловості, енергетиці та інших галузях промисловості є асинхронними, оскільки саме вони мають значні переваги за

своїми властивостями, характеристикам та експлуатаційним даним перед двигунами інших типів. АД позбавлені від ряду недоліків, які мають двигуни постійного струму. Крім того, АД дешевше, надійніше (оскільки не мають рухомих контактів) та мають більший

ККД, ніж двигуни постійного струму.

Аналіз публікацій

Найважливішою характеристикою АД є механічна характеристика [1, 4, 6] Механічною характеристикою АД зветься залежність частоти обертання ротора від моменту на валу двигуна. Саме від її характеру залежить спроможність АД для приводу різних механізмів [1, 9, 12]. Усі характерні точки та ділянки цієї характеристика мають конкретний фізичний зміст, що дозволяє легко використовувати АД як елемент автоматичних систем керування [8]. Необхідно вірно та точно розраховувати механічні характеристики як для серій АО і 4А, так і особливо для АД серії АИ, оскільки їх механічні характеристики в області закритичних ковзань мають інший характер, оскільки в них є ярко виражений мінімальний момент.

Аналіз асинхронного двигуна, як об'єкту автоматичного управління розглядався деякими авторами, але не з точки зору розрахунку та порівняння способів визначення критичного ковзання, як однієї з основних характеристик АД.

Постановка проблеми

Для регулювання швидкості АД потребують спеціальних безконтактних регуляторів, в першу чергу - тиристорних. Найбільше поширення мають дешеві у виробництві й надійні в експлуатації двигуни з короткозамкненою обмоткою (короткозамкнені двигуни). Ці двигуни мають тверду механічну характеристику, тобто при зміні навантаження від холостого ходу до номінальної їхня частота обертання зменшується всього на 2-5%. Двигуни з короткозамкненою обмоткою на роторі володіють також досить високим початковим пусковим обертовим моментом.

Їхні основні недоліки: труднощі здійсненн плавного регулювання частоти обертання в широких межах; споживання більших струмів з мережі при пуску (в 5-7 разів перевищуючий номінальний струм). Двигуни з фазною обмоткою на роторі (або двигуни з контактними кільцями) врятовані від цих недоліків ціною ускладнення конструкції ротора, що приводить до їхнього помітного подорожчання в порівнянні з короткозамкненими двигунами (приблизно в 1,5 рази). Тому ці двигу-

ни знаходять застосування лише при тяжких умовах пуску, а також при необхідності плавного регулювання частоти обертання.

Аналіз роботи асинхронних двигунів в різних умовах практично неможливий без знання формул, які визначають частоту обертаючого поля, ковзання, частоту струму ротору, обертаючого моменту.

Основна частина

При необхідності використання АД в системах автоматичного керування (САК) практично завжди необхідно вирішити декілька питань:

- проаналізувати та якщо потрібно допрацювати методику укладання механічної характеристики;
- необхідно уточнити методику визначення опорів R_1 та R_2' , необхідних для розрахунків критичного ковзання;
- необхідно мати методику розрахунку динамічного коефіцієнта АД з урахуванням впливу параметрів робочої машини;
- мати просту методику визначення сталої часу обмотки статора АД з обліком впливу його ротора;
- вміти проаналізувати формули для визначення критичного ковзання та дати рекомендації щодо підвищення точності його визначення;
- вміти визначати передаточну функцію АД.

Механічні характеристики двигуна можуть бути визначені з характеристик моментковзання, якщо облікувати, що швидкість обертання (частота) пов'язана з ковзанням залежністю $n = n_1(1 - S)$. Тоді рівняння механічної характеристики визначається виразом:

$$n = n_1 - \frac{n_1 \omega_1 R_2}{3p U_1^2} M.$$

Зовнішній вид механічної характеристики приведений на рис 1. Звичайно для зображення механічної характеристики розраховують три основні точки: точку холостого ходу, точку номінального режиму та точку критичного режиму.

Усі характерні точки та ділянки цієї характеристика мають конкретний фізичний зміст, що дозволяє легко використовувати АД як елемент автоматичних систем керування.

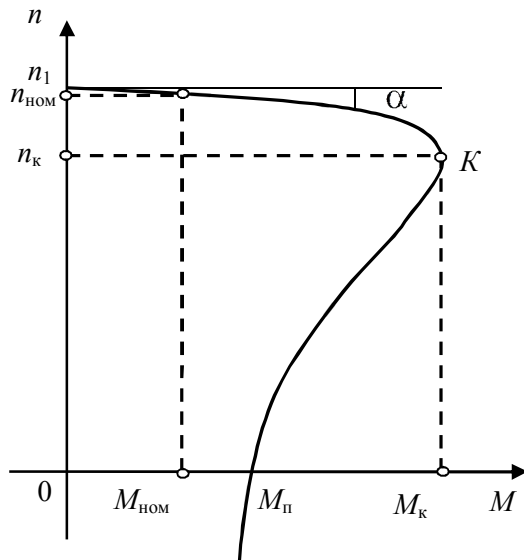


Рис. 1 – Механічна характеристика АД

При використанні АД в автоматичних системах керування, необхідно вміти достатньо просто та точно визначати критичне ковзання. В теорії електричного приводу використовують декілька формул для визначення критичного ковзання:

$$S_k = S_H \left(M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} - 1} \right); \quad (1)$$

$$S_k = \frac{S_H \left(M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} + 2S_H(M_k^* - 1) - 1} \right)}{1 - 2S_H(M_k^* - 1)}; \quad (2)$$

$$S_k = \frac{S_H + \sqrt{AS_H}}{1 + \sqrt{AS_H}}; \quad (3)$$

де $M_k^* = \frac{M_k}{M_{H*}}$ - відносне значення критичного моменту АД;

$$A = \frac{M_k^* - 1}{\frac{M_k^*}{M_n^*} - 1} - \text{допоміжний коефіцієнт;}$$

$$S_k = S_H \sqrt{\frac{K_I^2 - 1}{(1 - I_0^{*2})(1 + 2S_H)}} \quad (4)$$

- критичне значення ковзання;

I_0 - відносне значення струму холостого хода. Визначається за даними табл. 1.

Таблиця 1 – Відносне значення струму холостого хода

Потужність АД, Вт	$I_o^* = \frac{I_o}{I_{1H}}$			
	$n_1=3000$ об/хв	$n_1=1500$ об/хв	$n_1=1000$ об/хв	$n_1=750$ об/хв
0,5-1,0	0,40	0,55	0,60	-
1,1-5,0	0,35	0,50	0,55	0,60
5,1-10,0	0,25	0,45	0,50	0,55
10,1-25,0	0,20	0,40	0,45	0,50
25,1-50,5	0,18	0,35	0,40	0,45

Крім того існують і такі вирази:

$$S_k = \sqrt{\frac{S_H(M_n^* - 1)}{1 - S_H(3M_n^* - 2)}}; \quad (5)$$

$$S_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (6)$$

Для того щоб оцінити точність розрахунку критичного ковзання, проведемо розрахунок для одного з серійних АД, а потім порівняємо результати з тими, що отримані при розрахунках за формулою (7):

$$S_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}; \quad (7)$$

Для розрахунків використовуємо технічні (каталожні) дані АД типа 4А80А4УЗ: потужність $P_H = 1.1$ кВт; відносне значення пускового моменту $M_{п} = 2.0$; відносне значення критичного моменту $M_k^* = 2.2$; інші дані дорівнюють: $K_1 = 5.0$; $\eta_H = 0.75$; $\cos \gamma_H = 0.81$; $n_1 = 1500$ об/хв; $n_{2H} = 1420$ об/хв; $\omega_1 = 157.5$ с⁻¹; $\omega_{2H} = 149.1$ с⁻¹; $V_{1нл} = 380$ В; $V_{1нф} = 220$ В; $I_{1н} = 2.75$ А; $I_o^* = 0.5$;

$$S_H = 0.053; \quad I_o = 1.375 \text{ А}; \quad M_H = 7.38 \text{ Нм}; \\ M_K = 16,23 \text{ Нм}; \\ M_H = 14,76 \text{ Нм}.$$

Розрахуємо значення ковзання за виразами (1)...(5), отримуємо такі результати. За формулою (1) отримуємо:

$$S_k = S_H \left(M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} - 1} \right) = \\ 0,053 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,22,$$

де $S_H = \frac{n_1 - n_{2H}}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053$ - номінальне ковзання.

За формулою (2) розрахунки дають, що

$$S_k = \frac{S_H \left(M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} + 2S_H(M_k^* - 1) - 1} \right)}{1 - 2S_H(M_k^* - 1)} = \\ \frac{0,053 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 + 2 \cdot 0,053(2,2 - 1) - 1} \right)}{1 - 2 \cdot 0,053(2,2 - 1)} = 0,24$$

За формулою (3) результати розрахунків мають вигляд:

$$S_k = \frac{S_H + \sqrt{AS_H}}{1 + \sqrt{AS_H}} = \\ \frac{0,053 + \sqrt{0,053 \cdot 12}}{1 + \sqrt{0,053 \cdot 12}} = 0,473,$$

$$\text{де } A = \frac{M_k^* - 1}{\frac{M_k^*}{M_n^*} - 1} = \frac{2,2 - 1}{\frac{2,2}{2,0} - 1} = 12$$

Визначаємо критичне ковзання за формулою (4):

$$S_k = S_H \sqrt{\frac{K_I^2 - 1}{(1 - I_o^{*2})(1 + 2S_H)}} = \\ 0,053 \sqrt{\frac{5^2 - 1}{(1 - 0,5^2)(1 + 20,53)}} = 0,286,$$

де $I_o^* = 0.5$ - відносне значення струму холостого ходу АД.

За формулою (2.5) отримуємо:

$$S_k = \sqrt{\frac{S_H(M_n^* - 1)}{1 - S_H(3M_n^* - 2)}} = \sqrt{\frac{0,053(2 - 1)}{1 - 0,053(3 \cdot 2 - 2)}} = 0,259.$$

Для розрахунків ковзання S_k за виразом (6) необхідно знайти значення активних та індуктивних опорів R_1, R_2', X_k

Для цього попередньо визначимо:

$$\cos \gamma_K = \cos \gamma_H \left[\frac{M_n^* \eta_H}{(1 - S_H)K_1} + 0,33K_1(1 - \eta_H) \right] = \\ = 0,81 \left[\frac{2 \cdot 0,75}{(1 - 0,053)5} + 0,33 \cdot 5(1 - 0,75) \right] = 0,63$$

$K_k = Z_k \cdot \cos \gamma_K = 16 \cdot 0,63 = 10$ Ом - активний опір короткого замикання;

$$Z_k = \frac{V_{нл}}{\sqrt{3}I_{1H}K_1} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 2,75 \cdot 5} = 16 \text{ Ом} - \text{активний опір короткого замикання АД};$$

$X_k = Z_k \cdot \sin \gamma_k = 16 \cdot 0,776 = 12,4$ Ом - індуктивний опір короткого замикання. АД;

$$R_2' = \frac{M_n^* S_H \omega_1}{3I_2'^2} = \frac{7,38 \cdot 157,5 \cdot 0,08}{3 \cdot 2,382} = 3,6 \text{ Ом} -$$

активний опір обмотки фази ротора, приведенного до статора;

$$I_2' = \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} = \sqrt{2,75^2 - 1,375^2} = 2,38 \text{ А} - \text{приведений струм ротора АД};$$

$$I_0 = I_o^* \cdot I_{1H} = 0,5 \cdot 2,75 = 1,375 \text{ А} - \text{струм холостого ходу АД};$$

$$R_1 = R_k - R_2' = 10 - 3,6 = 6,4 \text{ Ом} - \text{активний опір обмотки фази статора}.$$

Знаходимо критичне ковзання за теоретичною формулою (6).

$$S_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{3,6}{\sqrt{6,4^2 + 12,4^2}} = 0,259.$$

З розрахунків видно, що найбільш доцільно за каталожними даними для визначення S_k використовувати формулу (5), оскільки саме

вона дає найбільш точні результати. А якщо відомі величини R_1 , X_k , R_2' , то формулою (6).

Проведений розрахунок та аналіз дозволяють зробити такі зауваження:

1. Виконані розрахунки показали, що при підключенні АД до живлючої мережі значення намагнічуючого струму I_0 установлюється не миттєво, а через деякий час, змінюючись по експоненціальному закону зі сталою часу, яка дорівнює T_e . Значення цього часу необхідно обов'язково враховувати при розрахунку перехідних процесів в автоматичній системі керування електроприводом з асинхронним двигуном.

2. Порівняння величин сталих часу електромагнітної (T_e) та електромеханічної ($T_m = \frac{J_d \cdot \omega_n}{M_n}$) для частоти 50 Гц показує, що

їх обидві необхідно враховувати при розрахунках перехідних процесів. На частоті $f_1 > 50$ Гц електромагнітні процеси протікають швидше. Тому електромагнітна стала часу буде

значно менше. Тобто при підвищенні частоти електромагнітну сталу часу можна не враховувати.

3. Для розрахунку опору R_2' доцільно використовувати формулу:

$$R_2' = \frac{M_n \omega_n}{3I_2'^2} \text{ Ом,}$$

де $I_2'^2 = I_{1n}^2 - I_0^2$; $I = I_0^* I_{1n}$; I_0^*

$$I_{1n} = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n \eta_n}.$$

З врахуванням електромагнітної сталої часу АД його передаточна функція по управляючому впливу може бути записана у вигляді співвідношення:

$$W(p) = \frac{\Delta \omega_{вих}(p)}{\Delta U_{вх}(p)} = \frac{k_d}{(T_e p + 1)(T_m p + 1)}.$$

Структурна схема АД наведена на рис.2.

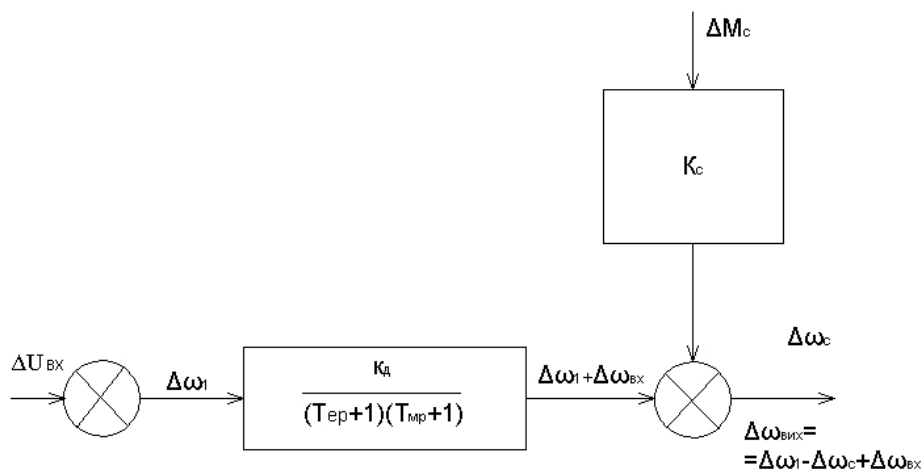


Рис. 2 – Структурна схема АД, як об'єкта керування

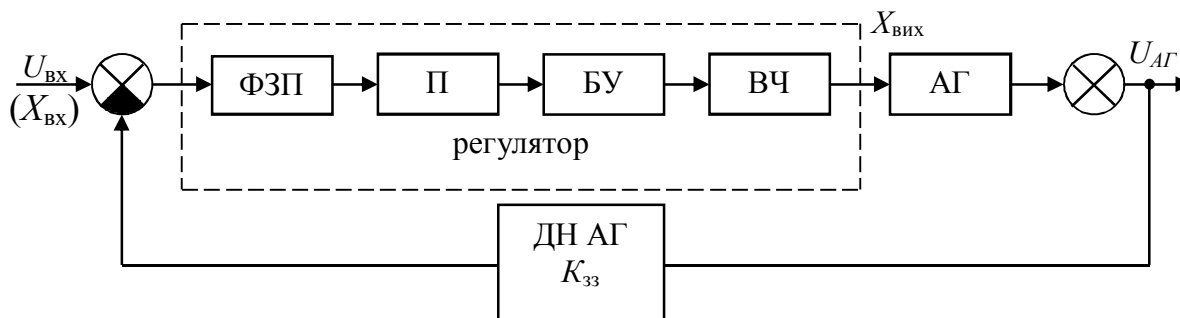


Рис. 3 – Функціональна схема АСУ стабілізації напруги АГ

Необхідно відмітити, що одним з технічних питань, пов'язаних з асинхронною машиною, є автоматичне регулювання (або стабілізація) напруги асинхронного генератора. Принцип регулювання напруги АГ досить докладно описаний в літературі [3, 4, 8]. Він полягає в тому, що регулятор змінює значення реактивного (індуктивного) струму в колі АГ, що викликає зміну напруги. Першочергове збудження АГ здійснюється шляхом підключення на вихід АГ конденсаторів збудження.

Розгорнута функціональна схема замкнутої автоматичної системи управління (АСУ) стабілізації напруги АГ наведена на рис.3.

Визначення передаточної функції замкнутої АСУ стабілізації напруги АГ починається з перетворення розгорнутої функціональної схеми (рис.3), та знаходження її еквівалентної, найбільш простої форми, яка приведена на рис.4.

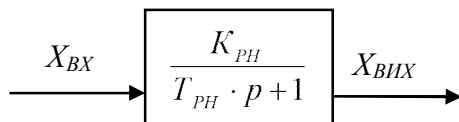


Рис. 4 – Схема регулятора напруги АГ

На схемі рис.4 використані такі позначення:

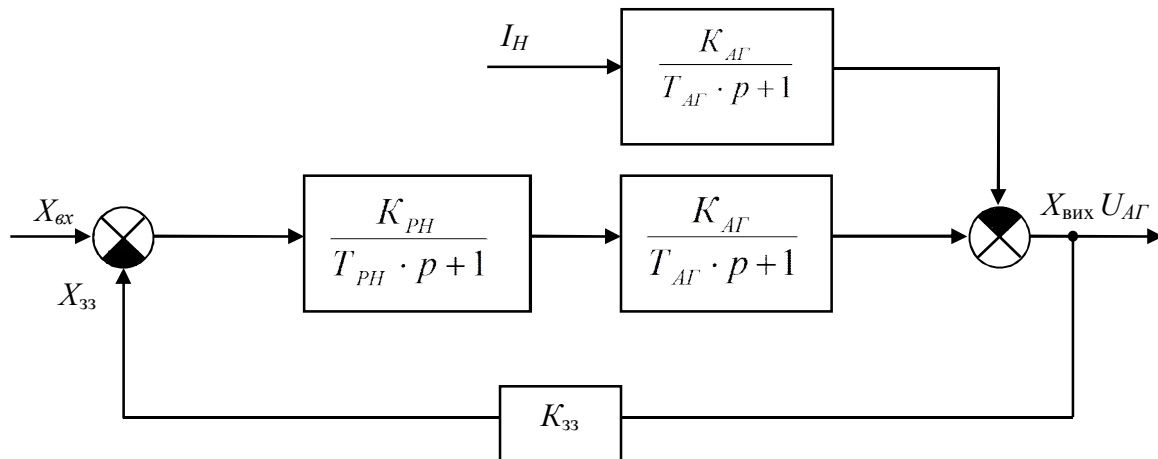


Рис. 5 – Схема автоматичної системи стабілізації напруги АГ

Знаходимо передаточну функцію АСУ.

$$W(p) = \frac{X_{ВІХ}(p)}{X_{ВХ}(P)} = \frac{\frac{K_{PH}}{T_{PH} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{AG}}{T_{AG} \cdot p + 1}}{1 + \frac{K_{PH} \cdot K_{AG} \cdot K_{33}}{(T_{PH} \cdot p + 1) \cdot (T_{AG} \cdot p + 1)}} = \frac{\frac{K_{PH} \cdot K_{AG}}{(T_{PH} \cdot p + 1) \cdot (T_{AG} \cdot p + 1)}}{\frac{(T_{PH} \cdot p + 1) \cdot (T_{AG} \cdot p + 1) + K_{PH} \cdot K_{AG} \cdot K_{33}}{(T_{PH} \cdot p + 1) \cdot (T_{AG} \cdot p + 1)}} = \frac{K_{PH} \cdot K_{AG}}{T_{PH} \cdot T_{AG} \cdot p^2 + (T_{PH} + T_{AG}) \cdot p + (1 + K_{PC} \cdot K_{33})} = \frac{e_0}{a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0} = \frac{10}{0,5p^2 + 1,5p + 9,5}$$

$K_{PH} = K_{\Phi 3П} \cdot K_{П} \cdot K_{БУ} \cdot K_{ВЧ} = S$ - результируючий коефіцієнт передачі регулятора;

$K_{\Phi 3П}, K_{П}, K_{БУ}, K_{ВЧ}$ - коефіцієнти передачі відповідно ФЗП, П, БУ, ВЧ;

$T_{PH} = T_{\Phi 3П} = 0,5$ сек - постійна часу регулятора.

Прийmemo передаточну функцію АГ у вигляді рівняння першого порядку:

$$W_{AG}(p) = \frac{K_{AG}}{T_{AG} \cdot p + 1},$$

де $K_{AG} = 2$ - коефіцієнт передачі АГ;
 $T_{AG} = 1$ с - постійна часу АГ.

Передаточна функція кола негативного зворотного зв'язку дорівнює:

$$W_{33}(p) = K_{33} = 0,85.$$

З урахуванням прийнятих позначень та відповідних величин, узагальнена структурна схема автоматичної системи стабілізації напруги АГ прийме вигляд, показаний на рис.5. Використовуючи цю схему можливо провести аналіз перехідного процесу при наборі та скиді навантаження.

де $K_{PC} = \epsilon_0 = K_{PH} \cdot K_{AG} = 5 \cdot 2 = 10$ – коефіцієнт передачі системи;

$$K_{3C} = 1 + K_{PC} \cdot K_{33} = a_0 = 1 + 10 \cdot 0,85 = 9,5;$$

$$K_{PE3} = \frac{K_{PC}}{K_{3C}} = \frac{10}{9,5} = 1,053 \quad \text{– результуючий}$$

коефіцієнт передачі замкнутої АСУ;

$$a_1 = T_{PH} + T_{AG} = 0,5 + 1 = 1,5 \text{ с};$$

$$a_2 = T_{PH} \cdot T_{AG} = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ с}.$$

Визначимо характеристичне рівняння АСУ. Як видно з виразу для передаточної функції, характеристичне рівняння АСУ для стабілізації напруги АГ має вигляд:

$$0,5p^2 + 1,5p + 9,5 = 0,$$

або

$$p^2 + 3p + 19 = 0.$$

Корені характеристичного рівняння дорівнюють:

$$p_{1,2} = -\frac{3}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 - 19} = -1,5 \pm j4,1,$$

або

$$p_1 = -1,5 + j4,1;$$

$$p_2 = -1,5 - j4,1.$$

Оскільки корені носять комплексний характер, то перехідний процес буде коливальним. Коефіцієнт згасання коливань АСУ дорівнює $\alpha = -1,5$, а кутова частота коливань дорівнює $\omega = 4,1 \text{ с}^{-1}$.

Максимально можливе відхилення напруги при накиді повного навантаження (без регулятора) знаходимо у вигляді:

$$A_0 = K_{PE3} \cdot X_{BX0} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2} =$$

$$= 1,053 \cdot 22,2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4,1}{1,5}\right)^2} = 44,4 \text{ В},$$

де $X_{BX0} = \frac{U_{AG0}}{K_{PH} \cdot K_{AG}} = \frac{222}{5 \cdot 2} = 22,2 \text{ В}$ – початковий керуючий вплив.

Рівняння вихідної напруги при перехідному процесі (при повному накиді навантаження) визначається таким чином. Як відомо з літератури [9, 11], рівняння вихідної напруги при коливальному перехідному процесі має вигляд:

$$u(t) = U_{BCT} + A_0 \cdot e^{\alpha t} \cdot \sin(57,3 \cdot \omega t + \psi_H).$$

Всі величини, які входять у це рівняння, для нашого випадку мають наступні значення:

$U_{BCT} = 220 \text{ В}$ – значення напруги АГ, що встановилося;

$U_{AG0} = 222 \text{ В}$ – напруга холостого ходу перед ввімкненням навантаження;

$\psi_H = 180 - |\varphi_I| = 180 - 2,58 = 177,4^\circ$ – початкова фаза коливань, градусах;

$$\varphi_1 = \arcsin \frac{U_{BCT} - U_{AG0}}{A_0} =$$

$$= \arcsin \frac{220 - 222}{44,4} = -2,58^\circ.$$

Розрахунок перехідного процесу при накиді повного навантаження, виконаний по рівнянню напруги при коливальному перехідному процесі, зведено в табл. 2.

Таблиця 2

t, с	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
U(t), В	222	195,6	224	227	221,2	222	220

Графік перехідного процесу наведено на рис.6.

За даними графіка витікає, що максимальне зниження напруги АГ складає 11 %:

$$\Delta U = 220 - 195,6 = 24,4 \text{ В}. \quad U_{BCT} = 220 \text{ В}.$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{BCT}} \cdot 100\% = \frac{24,4}{220} \cdot 100\% = 11\%.$$

При цьому регулятор має такі технічні дані:

$$K_{PH} = 5; \quad K_{AG} = 2;$$

$$T_{PH} = 0,5 \text{ с}; \quad T_{AG} = 1 \text{ с}.$$

$$W(p) = \frac{K_{PH}}{T_{PH} \cdot p + 1}.$$

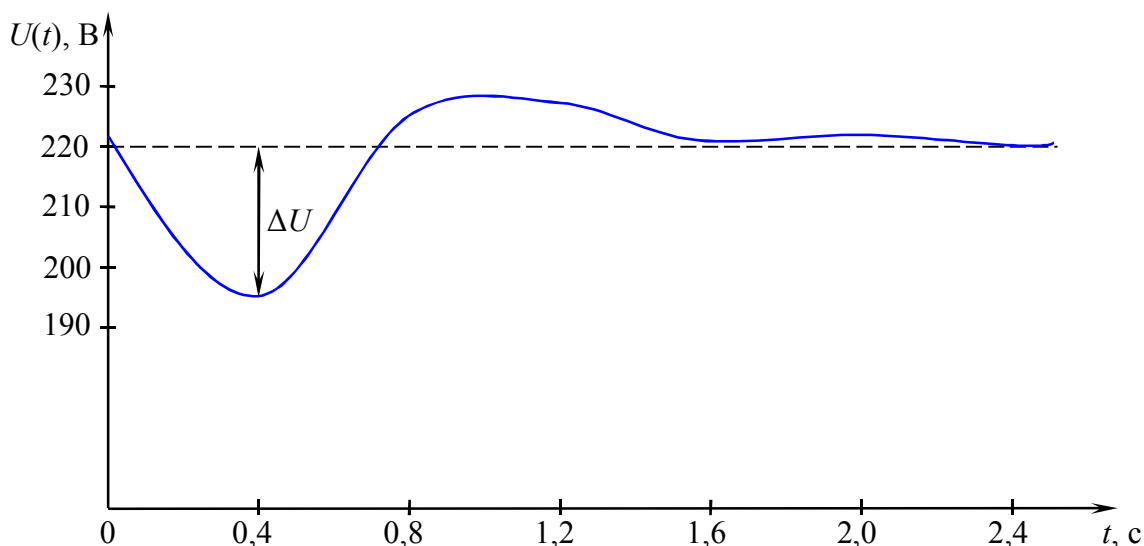


Рис. 6 – Графік переходного процесу

Для покращення якості переходного процесу можна змінити закон регулювання та параметри регулятора:

- зменшити постійну часу регулятора до $T_p = 0,25$ с, тобто у двічі;
- ввести в схему регулювання диференціюючу ланку, тобто в закон регулювання – похідну.

Найпростіша схема такої ланки наведена на рис.7.

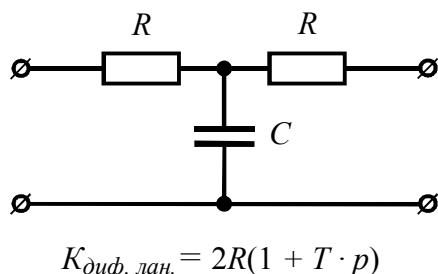


Рис. 7 – Найпростіша схема диференціюючої ланки

Висновки

Всі системи автоматичного керування (САК) є нелінійними. Нелінійності бувають таких типів: - нелінійність статичних характеристик підсилювачів регуляторів, котрі визначаються міцністю (здатністю до навантаження) вихідних елементів та величиною напруги живлення; - нелінійність обмеження частотних характеристик, вентильних перетворювачів, коли є обмеження по частоті та напрузі.

Електричний двигун також є нелінійним елементом системи автоматичного керування електроприводом, тому що струмова нелінійність обумовлена нелінійністю намагнічування, та дією кола збудження та реакції якоря. Для асинхронного двигуна регулювання напруги приводить до появи вищих гармонійних складових, деякі з котрих обумовлюють тормозні режими в цих двигунах по відношенню до своєї швидкості. Це залежить від того, чи є ця гармоніка складовою прямої чи зворотної послідовності.

Література

1. Красовский А. А., Поспелов Г. С. Основы автоматики и технической кибернетики. Госэнергоиздат, 1982. – 782 с.
2. Красовский А. А. Статистическая теория переходных процессов в системах управления. М., изд-во Наука, 1988. – 662 с.
3. Попов Е. П. Динамика систем автоматического регулирования. М.: Гостехиздат, 1954. – 724 с.
4. Попов Е. П. Расчет линейных автоматических систем на основе гармонической линеаризации. Л., Судпромгиз, 1959. – 426 с.
5. Поспелов ПС. Динамические характеристики релейных следящих систем. Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1965. – 642 с.
6. Красовский Н. Н. Теория управления движением. Линейные системы. М., изд-во Наука, 1968. – 646 с.

7. Нелинейная оптимизация систем автоматического управления. Под ред. Е. П. Попова. М., изд-во Машиностроение, 1970. – 346 с.
 8. Солодовников В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М., Физматгиз, 1960. – 682 с.
 9. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем, изд.. 2-е, М., изд-во Наука, 1966. – 564 с.
 10. Лурье А. И., Постников В. Н. К теории устойчивости регулируемых систем. Прикл. матем. и мех., т. 8, 1944, № 3. – 582 с.
 11. Теория автоматического управления. Учебн. для вузов/ Под ред. Ю.М. Соломенцева. 3-е изд. – М.: Высшая школа, 2000. 267 с., ил.
 12. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1985.
- Рецензент: О.Б. Богаєвський, професор, д.т.н., ХНАДУ.
- Стаття надійшла до редакції 20 жовтня 2017 р.