

Д. С. БІЛУХІН (ДІТ)

ОТРИМАННЯ СТІЙКИХ АВТОКОЛИВАНЬ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КІЛ ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ8

Розглядається можливість побудови стійкої автоколебальної системи введенням послідовної ланки корекції у вигляді аперіодичної ланки першого порядку.

Ключові слова: електровоз ВЛ8, низьковольтне коло, система автоматичного регулювання напруги, стійкі автоколивання

Рассмотрена возможность построения устойчивой автоколебательной системы введением последовательного звена коррекции в виде аперіодического звена первого порядка.

Ключевые слова: электровоз ВЛ8, низковольтная цепь, система автоматического регулирования напряжения, устойчивые автоколебания

The possibility of construction of a steady natural vibration system by introduction of successive correction link as an aperiodic link of the first-order is considered.

Keywords: electric locomotive VL8, low-voltage circuit, system of automatic voltage control, steady natural vibrations

Вступ

Більша частина електрорухомого складу залізниць України використовує системи управління, які розроблялися 30...40 років тому. Для часткового рішення проблеми тягового забезпечення на залізницях України здійснюється капітально-відновлювальні ремонти електровозів й електропоїздів з продовженням їх терміну експлуатації на 10...15 років. Щоб одержати найбільший економічний ефект при експлуатації електровозів з продовженням терміном служби, програма капітально-відновлювальних ремонтів передбачає модернізацію, що дозволить знизити експлуатаційні витрати на локомотивний парк. Виконується модернізація функціональних вузлів систем управління й із застосуванням сучасних напівпровідникових елементів, що підвищує вимоги до стабільності напруги живлення кіл управління. Це вимагає виконати заміну застарілих вузлів управління систем автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електрорухомого складу залізниць (ЕРС) постійного струму на сучасні, які побудовані з використанням мікропроцесорної техніки та напівпровідникових силових ключів. Сучасна елементна база дозволяє виконати розробку нових вузлів управління з високими експлуатаційними показниками. При цьому принцип роботи всієї системи бортового живлення зберігається. Тобто, після запуску генератора на його затисках встановлюються автоколивання в області заданого середнього значення напруги живлення.

В роботі [1] була запропонована математична модель перспективної системи автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електровоза ВЛ8 на основі існуючої схеми регулювання напруги. Математична модель, на основі якої розроблена структурна схема системи (рис. 1), призначена для дослідження автоколивань в системі автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл ЕРС.

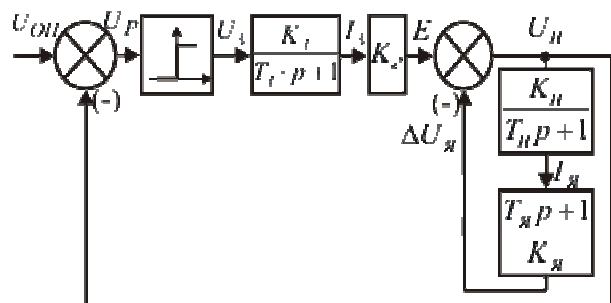


Рис. 1. Структурна схема САРН

На рис. 1 в блоках структурної схеми подано: K_s – коефіцієнт передачі обмотки збудження генератора; T_s – стала часу обмотки збудження; K_y – коефіцієнт передачі обмотки якоря; T_y – стала часу кола обмотки якоря; U_{on} – опорна напруга; U_p – напруга розузгодження; U_3 – напруга збудження; I_3 – струм збудження; U_n – напруга на навантаженні; E – е.р.с. генератора; I_n – струм якоря; ΔU_y – падіння напруги в обмотках якоря.

Істотно нелінійним елементом у запропонованій системі є ідеальна релейна характеристика регулятора. Досліди показали, що при використанні такої характеристики стійкі автоколивання в системі отримати неможливо [1].

Мета роботи

Дослідити можливість одержання стійких автоколивань в системі автоматичного регулювання напруги (САРН) кіл управління ЕРС постійного струму при використанні регуляторів на основі сучасних напівпровідникових елементів.

Матеріали дослідів

Регулятор на основі мікроконтролера й силового ключа дозволяє, не змінюючи схемних рішень одержати три типи релейних характеристик: ідеальну релейну (рис. 2, а), з гістерезисною петлею постійної ширини (рис. 2, б) й гістерезисною петлею змінної ширини (рис. 2, в).

Після виконання операції гармонійної лінеаризації нелінійності приходимо до передатної функції нелінійного елемента з коефіцієнтами гармонійної лінеаризації $q(a)$, $q'(a)$ у вигляді:

$$W_{HE}(a, p) = q(a) + \frac{q'(a)}{\omega} \cdot p. \quad (1)$$

Оскільки обрані типові релейні характеристики, то лінеаризацію в цьому випадку не показуємо, а використовуємо типові коефіцієнти, які приводяться в технічній літературі [2].

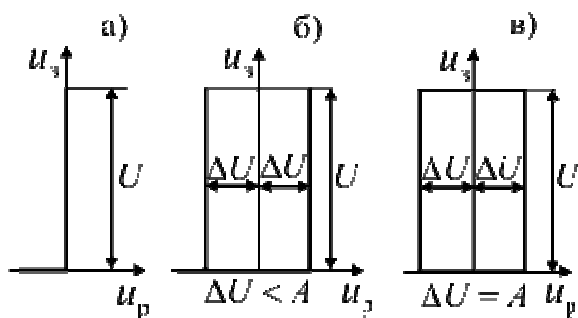


Рис. 2. Можливі характеристики вузла управління САРН

Передатна характеристика лінійної частини має вигляд:

$$W_L(p) = \frac{K_2 K_3 K_y (T_n p + 1)}{(p T_3 + 1)(p a_1 + a_2)}, \quad (2)$$

де $a_1 = K_y T_n + K_n T_y$, $a_2 = K_y + K_n$;

K_2, K_3, K_y, K_n – відповідно коефіцієнти передачі генератора, обмотки збудження, обмотки якоря, кола навантаження;

T_3, T_n – стала часу обмотки збудження генератора та кола навантаження.

Періодичне рішення лінійаризованої системи може бути отримане за наявності в характеристичному рівнянні замкнутої системи пари чисто уявних коренів. Відповідно до критерію Найквіста, цей випадок відповідає проходженню амплітудно-фазової характеристики $W(j\omega)$ через точку з координатами $(-1, j0)$. Періодичне рішення визначається рівнянням:

$$W_L(j\omega) = -\frac{1}{W_{HE}(a)} = N(a). \quad (3)$$

Останнє рівняння відображає суть графоаналітичного методу Л. С. Гольдфарба й дозволяє визначити шукану амплітуду й частоту періодичного рішення. Ліва частина рівняння являє собою амплітудно-фазову характеристику лінійної частини системи, а права частина – годограф $N(a)$ – зворотну амплітудно-фазову характеристику нелінійності. Точка перехрещення характеристик показує величину амплітуди й частоти автоколивань.

На рис. 3 представлено годограф, побудований за методикою Гольдфарба для САРН кіл управління з генератором ДК-405К. Для порівняння годографи трьох типових релейних характеристик зазначених раніше показані на одному полі як N1(A) – ідеального реле, N2(A) – реле із шириною петлі гістерезису величиною 1 В, N3(A) – реле зі змінною шириною петлі гістерезису. Амплітудно-фазова характеристика лінійної частини побудована для випадків коли навантаження має параметри: $K_n = 1,2$, $T_n = 0,062$ с й $K_n = 1,11$, $T_n = 0,00002$ с.

Побудова годографів Гольдфарба показала, що застосування регулятора з ідеальною релейною характеристикою не дозволяє одержати режиму автоколивань, тому що перетинання годографів лінійної й нелінійної частин відсутнє. Цей факт показує, що в системі частота $\omega \rightarrow \infty$, а амплітуда $A \rightarrow 0$. Прагнення амплітуди до нуля є прийнятним фактором, однак комутація ключового елемента з нескінченно великою частотою неможлива.

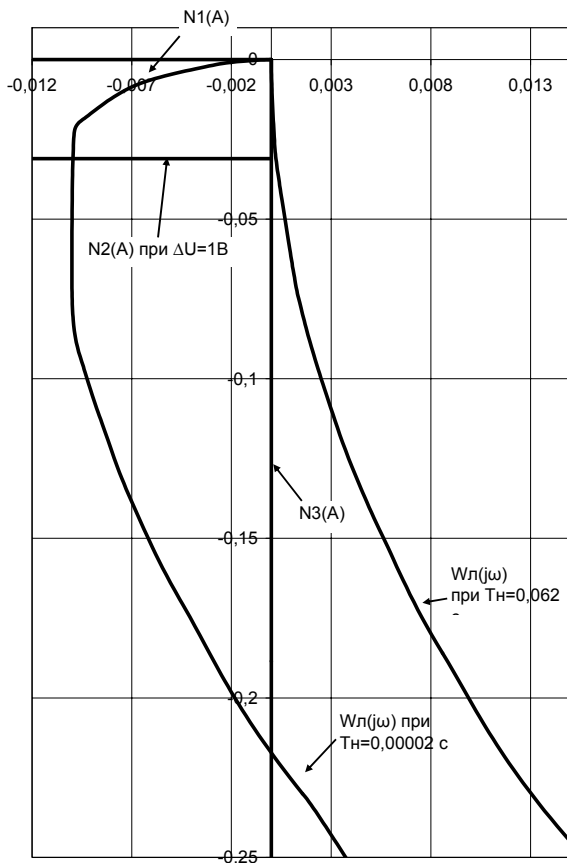


Рис. 3. Годограф Гольдфарба для САРН з генератором ДК-405К

Годографи нелінійних елементів для релейної характеристики з постійним гістерезисом і гістерезисом змінної ширини перетинають годограф лінійної частини в напрямку, що підкреслює наявність стійких автоколивань. Однак, коливання здійсненні не при всіх значеннях постійної часу навантаження та коефіцієнтах навантаження. Аналіз годографа лінійної частини для $T_n = 0,062$ с показує, що він розташований чітко в четвертому квадранті координатної площини, не перетинаючи мниму вісь. У результаті отримана ситуація, аналогічна случаю з ідеальним релейним елементом: $\omega \rightarrow \infty, A \rightarrow 0$. Таким чином, автоколивання здійснюються до деякої межі співвідношень між коефіцієнтом навантаження та постійної часу навантаження.

Для релейного елемента з гістерезисом змінної ширини, виходячи з рис. 3 умовою здійснення автоколивань є рівність $U(\omega) = 0$. Цьому відповідає частота:

$$\omega = \sqrt{\frac{K_y + K_n}{K_n [T_3 T_y - T_n (T_3 + T_y)] - T_n^2 K_y}} \quad (4)$$

Останній вираз дозволяє отримати межу при якій можливо отримати автоколивання в САРН при використанні релейної характеристики с петлею гістерезису змінної ширини при різних значеннях постійної часу кола навантаження T_n та коефіцієнта навантаження K_n

$$K_n = \frac{T_n^2 K_y}{T_3 T_y - T_n (T_3 + T_y)} \quad (5)$$

Для кіл управління електровоза ВЛ8 ця залежність приведена на рис. 4.

Таким чином для структури, що показана на рис. 1 автоколивання ні при жодній характеристиці релейного елемента на здійсненні в повному обсязі і для прийнятої до аналізу системі необхідна корекція.

При корекції нелінійних автоматичних систем звичайно потрібно розв'язати одну із двох основних задач: забезпечити стійкість системи; одержати автоколивання із прийнятною частотою й амплітудою. Корекція нелінійних систем традиційно здійснюється за допомогою лінійних або нелінійних коригувальних пристроїв, а також шляхом компенсації нелінійності. У всіх випадках необхідне застосування кіл зворотних зв'язків [3].

З теорії автоматичного керування відомо, що при ідеальній релейній характеристиці автоколивання неможливі [3], але релейна система стійка, якщо порядок полінома знаменника лінійної частини системи $W_L(p)$ перевищує порядок полінома чисельника не більше ніж на два. У цьому випадку частотна характеристика лінійної частини розташована в нижній півплощині як на рис. 3. З вищевикладеного випливає, що ступінь полінома знаменника існуючої лінійної частини системи по рівнянню (2) необхідно збільшити мінімум до третьої. Це дозволить одержати стійкі автоколивання при будь-яких параметрах навантаження для релейної характеристики з постійним гістерезисом. В існуючих електромеханічних системах автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл ЕРС автоколивання реалізуються за рахунок інерційності самих кіл регуляторів та порядок полінома знаменника лінійної частини перевищує поліном чисельника на чотири.

Застосування додаткових зворотних зв'язків збільшує кількість елементів принципової схеми, що знижує її надійність. У випадку застосування у вузлі керування сучасних мікроконтролерів з'являється можливість йти не по шляху введення додаткових зворотних зв'язків, а за

рахунок введення додаткового закону керування в блоці програм.

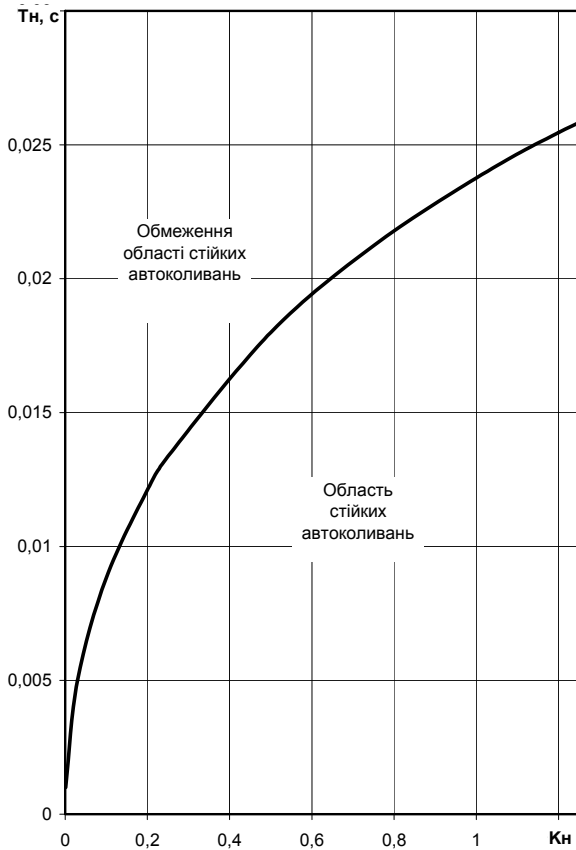


Рис. 4. Межа здійснення автоколивань в САРН при використанні релейної характеристики регулятора з петлею гістерезису змінної ширини

З існуючих типових динамічних ланок систем автоматичного управління можна використати аперіодичну ланку першого порядку, що дозволяє збільшити ступінь поліному знаменника лінійної частини:

$$W(p) = \frac{k}{Tp+1}, \quad (6)$$

де k – коефіцієнт передачі ланки (для мікроконтролера, який є цифровим автоматом приймаємо $k=1$);

T – стала часу кола аперіодичної ланки першого порядку.

Таким чином отримана нова структурна схема САРН з послідовним колом корекції, яка представлена на рис. 5.

Для останньої структури частота та амплітуда автоколивань, а також межа значень параметрів навантаження, при яких можливий асинхронний спосіб керування при використанні ідеального реле, визначаються як:

$$\omega = \sqrt{\frac{T_n a_4 - a_3}{T_n a_2 - a_1}}; \quad (7)$$

$$A = \frac{-2UK \left((a_4 - a_2 \omega^2) + T_n \omega (a_3 \omega - a_1 \omega^3) \right)}{\pi \left((a_4 - a_2 \omega^2)^2 + (a_3 \omega - a_1 \omega^3)^2 \right)}, \quad (8)$$

де $a_1 = TT_3 (K_y T_n + K_n T_y)$;

$$a_2 = TT_3 (K_y + K_n) + (T + T_3) (K_y T_n + K_n T_y);$$

$$a_3 = (T + T_3) (K_y + K_n) + K_y T_n + K_n T_y;$$

$$a_4 = K_y + K_n; \quad K = K_\phi K_3 K_y.$$

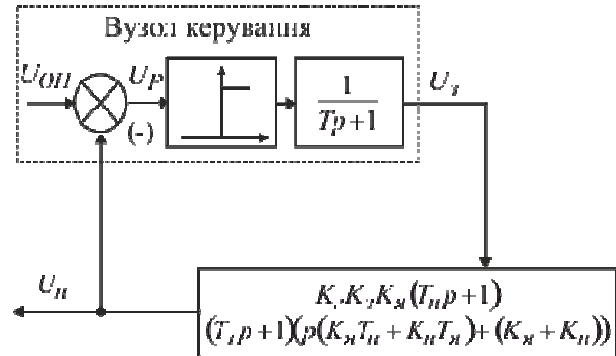


Рис. 5. Структурна схема САРН з послідовною корекцією

Частоту та амплітуду автоколивань в САРН низьковольтних кіл ЕРС при застосуванні релейної характеристики з петлею гістерезису постійної ширини можна визначити розв'язанням трансцендентного рівняння:

$$\frac{2UK \left((a_4 - a_2 \omega^2) + T_n \omega^2 (a_3 - a_1 \omega^2) \right)}{\left((a_4 - a_2 \omega^2)^2 + (a_3 \omega - a_1 \omega^3)^2 \right)} + \frac{2UK \left(j\omega (T_n (a_4 - a_2 \omega^2) - (a_3 - a_1 \omega^2)) \right)}{\left((a_4 - a_2 \omega^2)^2 + (a_3 \omega - a_1 \omega^3)^2 \right)} + \frac{\pi A}{\sqrt{1 - \frac{\Delta U}{A} \left(\frac{\Delta U}{A} + j \right)}} = 0. \quad (9)$$

Висновок

Використання в колах вузла керування релейної характеристики з петлею гістерезису змінної ширини не є доцільним, тому що в цьому разі мають місце автоколивання низької частоти, а їх амплітуда виходить за межі, допустимі стандартами якості електроенергії в низьковольтних колах електрорухомого складу. Структура з ідеальною релейною характерис-

тикою після корекції має обмеження, аналогічне представленому на рис. 4.

В результаті виконаних досліджень для вузлів керування систем автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електрорухомого складу рекомендовано використання релейної характеристики з постійним гістерезисом та послідовної корекції системи аперіодичною ланкою першого порядку. Так, для електровоза ВЛ8 рекомендовано релейні характеристики регулятора вузла керування з гістерезисом постійної ширини $0,1 \text{ В} \pm 10 \%$, а сталу часу аперіодичної ланки $0,01 \dots 0,001 \text{ с}$, що дозволяє отримати коливання напруги до 2% середнього встановленого стандартами значення та частоти комутації силового ключа вихідного каскаду до 1000 Гц за будь-якого співвідношення динамічних параметрів кіл навантаження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Білухін, Д. С. Дослідження можливості одержання автоколивань в системі автоматичного регулювання напруги кіл управління з релейним регулятором на основі силового ключа [Текст] / Д. С. Білухін // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 47-50.
2. Попов, Е. П. Приближенные методы исследования автоматических систем [Текст] / Е. П. Попов, И. П. Пальтов. – М.: Физматгиз, 1960. – 792 с.
3. Куропаткин, П. В. Теория автоматического управления [Текст] / П. В. Куропаткин. – М.: Высш. шк., 1973. – 528 с.

Надійшла до редколегії 06.04.2011.

Прийнята до друку 11.04.2011.