

**ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ  
З ГЕНЕРАТОРАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**Вступ.** Електрорухомий склад залізниць України, який знаходиться в експлуатації, використовує системи управління, які розроблювалися 30 – 40 років тому. В якості елементів систем управління використовувалися електромагнітні якорні реле. За останні роки умови роботи на залізницях суттєво змінилися: зменшилася вага поїздів та інтенсивність руху; значно зросла вартість електроенергії, збільшилися втрати на експлуатацію електрорухомого складу (ЕРС). У зв'язку з цим було ухвалено рішення про продовження терміну служби рухомого складу залізниць та проведення капітально-відновних робіт. При цьому ведеться модернізація апаратури систем управління. Найбільш економічно обґрунтованою може бути модернізація, що дозволяє застосовувати уніфіковані вузли і блоки для декількох моделей ЕРС. Одним з вузлів, що вимагають модернізації, є системи автоматичного регулювання напруги власних потреб. Такі системи доцільно будувати, використовуючи сучасні мікроконтролери та сучасні напівпровідникові ключі, за рахунок чого значно збільшиться надійність таких систем.

Основними джерелами живлення багатьох серій ЕРС є генератор постійного струму, акумуляторна батарея, яка його резервує. До загальної структури джерел живлення обов'язково входить регулятор напруги, причому в більшості серій ЕРС це давно застарілий вугільний вібраційний регулятор або електронний на елементній базі кінця 60-х років 20 ст. Аналіз елементів джерел живлення показує, що найменш надійним в системах живлення ЕРС є регулятор напруги [1], заміна якого уніфікованим для більшості серій ЕРС на сучасній напівпровідниковій базі значно підвищить надійність джерел живлення систем управління.

**Мета роботи (постановка задач дослідження).** Для розроблення нових регуляторів напруги необхідно виконати досліди динамічних процесів структури системи автоматичного регулювання джерел живлення та обрати більш доцільний закон регулювання, який може бути виконаним мікроконтролером та високондійним напівпровідниковим ключем.

**Матеріали дослідів.** На рис. 1 пропонується структурна схема системи автоматичного регулювання напруги (САРН) живлення елементів систем управління ЕРС з уніфікованим регулятором. До структурної схеми входить регулятор з вузлом порівняння на основі сучасного мікроконтролера та напівпровідникового ключа, генератор паралельного збудження з типовими ланками [2, 3] та структурний блок, який характеризує вплив навантаження на кола САРН і представляє собою статичну інерційну ланку з коефіцієнтом підсилення  $k=1$  [4]. Проведені дослідження показали великий розбіг значення постійної часу навантаження  $T_I$  в колах систем управління ЕРС. Так для електровозу ВЛ10 з генератором ДК-405К постійна часу навантаження знаходиться в межах 0,0001...0,062 с, що значно впливає на динамічні процеси в системі.

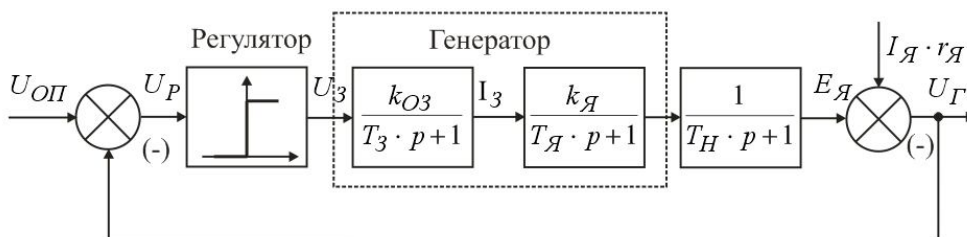


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного регулювання напруги ЕРС з генератором постійного струму

Показана структурна схема є одноконтурною з нелінійним регулятором, який відпрацьовує релейну несиметричну характеристику. При умові  $U_{\Delta} < U_{\Gamma I}$  регулятор до обмотки збудження приєднує напругу  $U_{\Delta}$  та напругу 0 В при умові  $U_{\Delta} > U_{\Gamma I}$ . Регулятор напруги з мікроконтролером та напівпровідниковим силовим ключем дозволяє, не змінюючи схемних рішень використати три типи характеристики релейного типу, які показані на рис. 2: несиметрична ідеальна релейна (рис. 2а), релейна несиметрична характеристика з гістерезисною петлею (рис. 2 б), релейна несиметрична характеристика з гістерезисною петлею змінної ширини (рис. 2в) [5]. Кожен з типів характеристик може бути визначено програмою та в подальших дослідках і побудовах мають відповідні номери – 1, 2, 3.

Для дослідження динамічних процесів в САРН обираємо метод гармонійної лінеаризації, який призначено для дослідження автоколивань в нелінійних системах як при відсутності вхідного впливу, так і при його

наявності. За допомогою цього методу, встановлюється можливість виникнення автоколивань в дослідній системі, їх параметри та стійкість. Суттєвість методу гармонійної лінеаризації складається в зведенні нелінійної системи до еквівалентної лінійної в якій нелінійна ланка замінюється еквівалентною лінійною з коефіцієнтом підсилення, який залежить від амплітуди автоколивань. Після приведення нелінійної системи до еквівалентної лінійної її досліджують лінійними методами [5, 6].

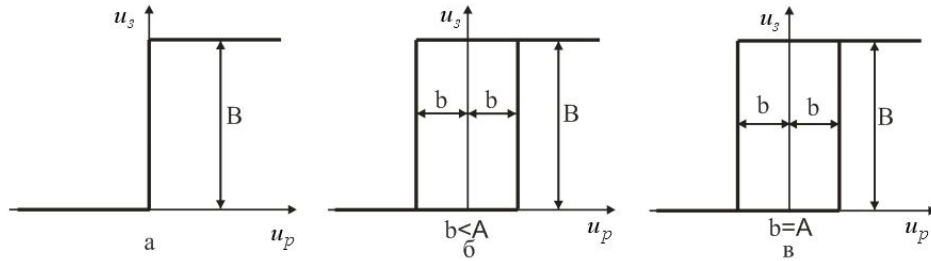


Рис. 2. Характеристики уніфікованого регулятора САРН

Передатна функція лінійної частини

$$W_{\text{Е}}(p) = \frac{k_{\text{Е}}}{T_1 \cdot p^3 + T_2 \cdot p^2 + T_3 \cdot p + 1}, \quad (1)$$

де для скорочення запису прийнято:  $k_{\text{Е}} = k_{\text{С}} \cdot k_{\text{В}}$ ,  $T_1 = T_{\text{С}} \cdot T_{\text{В}} \cdot T_{\text{І}}$ ,  $T_2 = T_{\text{С}} \cdot T_{\text{В}} + T_{\text{І}} \cdot (T_{\text{С}} + T_{\text{В}})$ ,  $T_3 = T_{\text{С}} + T_{\text{В}} + T_{\text{І}}$ .

Після проведення гармонійної лінеаризації нелінійності того чи іншого вигляду приходимо до передатної функції нелінійного елемента з коефіцієнтами гармонійної лінеаризації  $q(a)$ ,  $q'(a)$  у вигляді:

$$W_{\text{І А}}(a, p) = q(a) + \frac{q'(a)}{\omega} \cdot p. \quad (2)$$

Таблиця 1 - Коефіцієнти гармонійної лінеаризації нелінійних ланок уніфікованого регулятора напруги ЕРС

Тип ланки	Несиметрична ідеальна релейна характеристика	Несиметрична релейна характеристика з гістерезисною петлею	Несиметрична релейна характеристика з гістерезисною петлею змінної ширини
$F^0(A)$	$0.5 \cdot B$	$0.5 \cdot B$	$0.5 \cdot B$
$q(A)$	$\frac{2 \cdot B}{\pi \cdot A}$	$\frac{2 \cdot B}{\pi \cdot A} \cdot \sqrt{1 - \frac{b^2}{A^2}}$	0
$q'(A)$	0	$-\frac{2 \cdot B \cdot b}{\pi \cdot A^2}$	$-\frac{2 \cdot B}{\pi \cdot A}$

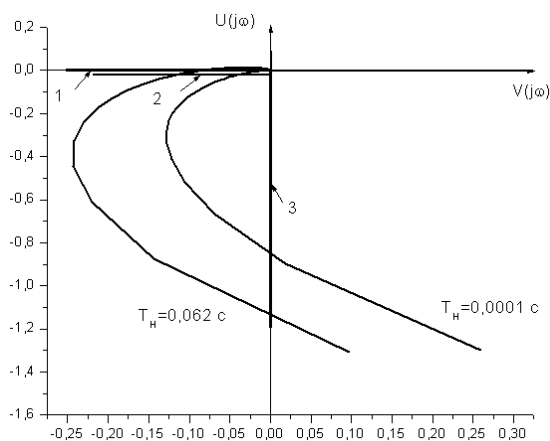


Рис. 3. Годограф Гольфарба для САРН

побудові виявляється точка перехрещення характеристик, то це і є величини шуканих амплітуди та частоти автоколивань. Якщо перехрещення не виявлено, то система знаходиться не в автоколивальному режимі [3, 4, 6].

На рис. 3 виконано побудову годографа Гольфарба для САРН при характеристиках регулятора відповідно

Періодичне рішення лінеаризованої системи може бути одержано при наявності в характеристичному рівнянні замкненої системи пари чисто уявних коренів. А це у відповідності до критерію Найквіста відповідає проходженню  $W(j\omega)$  через точку “-1”. Періодичне рішення визначається рівнянням:

$$W_{\text{Е}}(j\omega) = -\frac{1}{W_{\text{І А}}(a)} = N(a). \quad (3)$$

Це рівняння складає суть графоаналітичного методу Гольфарба і визначає шукану амплітуду та частоту періодичного рішення. Ліва частина рівняння представляє собою амплітудно-фазову характеристику лінійної частини системи, а права частина – годограф  $N(a)$  – зворотну амплітудно-фазову характеристику нелінійності. Якщо при

рис. 2. В якості дослідного прийняті кола електровоза ВЛ10 з генератором ДК–405К. Всі годографи перетинають амплітудно-фазову характеристику лінійної частини системи в напрямку збільшення амплітуди, що підтверджує стійкість автоколивань, але ж для кожного релейного елемента значно відрізняються параметри автоколивань. Амплітудно-фазову характеристику лінійної частини системи побудовано для значень постійної часу навантаження 0,0001 с та 0,062 с. Для кінцевого обрання типу характеристики необхідне порівняння параметрів автоколивань при зміні постійної часу навантаження, що має значне місце на ЕРС.

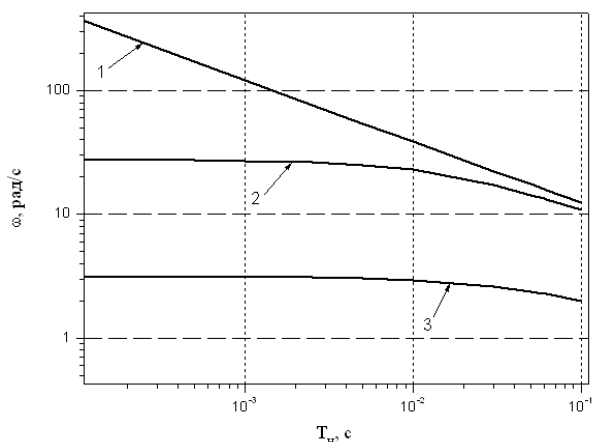


Рис. 4. Частота автоколивань в САРН з уніфікованим регулятором

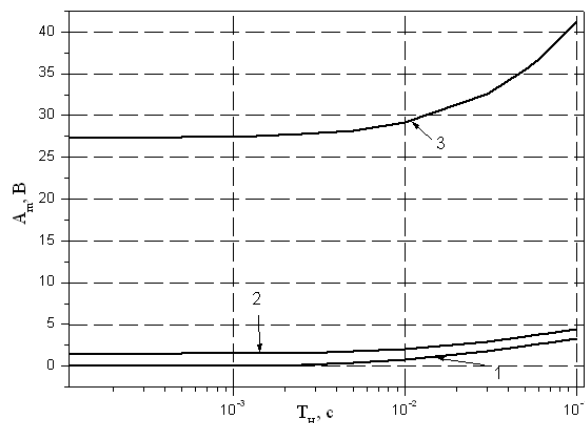


Рис. 5. Амплітуда автоколивань в САРН з уніфікованим регулятором

**Висновки.** При використанні в системі автоматичного регулювання електрорухомого складу залізниць з генераторами постійного струму в якості джерел живлення уніфікованого регулятора напруги на основі сучасних напівпровідникових елементів, виникає можливість у використанні для регулювання напруги будь-якої з розглянутих характеристик. Найбільш якісні параметри автоколивань при роботі регулятора на ідеальній релейній характеристиці.

Виконаний аналіз за графоаналітичним методом Л. С. Гольдфарба показав, що при постійній часу навантаження дослідного електровоза ВЛ10 з генератором ДК–405К  $T_i = 0,062$  с амплітуда автоколивань в системі з ідеальною релейною характеристикою дорівнює  $A_a = 2,722$  В, що менш у 13,6 рази, ніж при використанні регулятора з релейною характеристикою при гістерезисі змінної ширини, та не перебільшує відхилення на 5,4 % встановленого значення напруги кіл управління 50 В, що відповідає вимогам ДСТУ 2773-94 [7]. Частота автоколивань ідеального  $\omega_a = 15,762$  рад/с, що більш у 6,9 разів, ніж при використанні регулятора з релейною характеристикою з гістерезисом змінної ширини. На регулятор з гістерезисною петлею постійної ширини значно впливає ширина гістерезису. З її ростом збільшується амплітуда автоколивань та зменшується частота. Параметри автоколивального режиму для регулятора з гістерезисною петлею постійної ширини знаходяться між регулятором з ідеальним реле та регулятором з релейною характеристикою, де гістерезис змінної ширини. Такий тип характеристик використовується в застарілих типах регуляторів. Для всіх трьох характеристик регуляторів умови стійкості автоколивань в системі виконуються. Для джерел живлення з генераторами постійного струму може бути рекомендовано, виходячи з попереднього аналізу, використання регулятора з ідеальною релейною характеристикою.

#### Література.

1. Луцкий В. А. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры. / Справочник. К.: Наук. думка, 1966. – 208 с.
2. Топчеев Ю. И., Цыпляков А. П. Задачник по теории автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1977. – 592 с.
3. Иванов В. А. и др. Математические основы теории автоматического регулирования. Под ред. Б. К. Чемоданова. М.: Высшая школа, 1971. – 808 с.
4. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.
5. Е. П. Попов, И. П. Пальтов. Приближенные методы исследования автоматических систем. М.: Физматгиз, 1960. – 792 с.
6. Пальтов И. П. Нелинейные методы исследования автоматических систем. Л.: Энергия, 1976. – 128 с.
7. ДСТУ 2773-94 (ГОСТ 9219-95) Апарати електричні тягові. Загальні технічні умови; Введ. 01.07.96. – К.: Держстандарт України, 1996. – 74 с.