

Д. С. БЛУХІН (ДПТ)

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОДЕРЖАННЯ АВТОКОЛИВАНЬ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ КІЛ УПРАВЛІННЯ З РЕЛЕЙНИМ РЕГУЛЯТОРОМ НА ОСНОВІ СИЛОВОГО КЛЮЧА

Розглянуто можливість використання сучасних силових напівпровідникових ключів для реалізації асинхронного способу управління напругою кіл бортового живлення електровозів.

Рассмотрена возможность применения современных силовых полупроводниковых ключей для реализации асинхронного способа управления уровнем напряжения цепей бортового питания электровозов.

The possibility of application of the modern power semiconductor keys is considered for realization of asynchronous method of control of voltage level for circuits of on-board feeding of electric locomotives.

### 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 ефект при експлуатації електровозів із продовженим 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. У результаті підвищуються вимоги до стабільності напруги живлення кіл управління. Проведені дослідження [1] показали, що реальний діапазон можливих середніх значень напруги живлення кіл управління при номінальному значенні 50 В знаходиться в межах від 35 до 80 В, що значно перевищує нормовані допуски параметрів. Цей фактор змушує розроблювачів вводити апаратурну надмірність, наприклад за допомогою використання громіздких та матеріалоємних фільтрів, найчастіше неоптимальних за параметрами, доповнювати схеми складними стабілізаторами напруги, захистами та ін. Вказане виправдане при одиничних впровадженнях. При масштабних впровадженнях нової апаратури на основі сучасної напівпровідникової бази більш надійним шляхом є створення стабільного й надійного джерела живлення кіл управління.

На новому електрорухомому складі (ЕРС) широко впроваджуються статичні перетворювачі живлення кіл управління. Однак створення статичних перетворювачів з метою модернізації застарілого ЕРС спричиняє високі капітальні вкладення заради декількох років експлуатації. Залишається розглянути варіанти вдосконалювання існуючої системи живлення.

Система живлення електровозів постійного струму складається із трьох основних вузлів: генератор постійного струму, акумуляторна батарея, вузол управління на основі регулятора напруги того або іншого типу. За стабільністю напруги стежить вузол управління, що на даний момент є й менш надійним з перерахованих вузлів. Сучасна елементна база дозволяє виконати розробку нових вузлів управління з високими експлуатаційними показниками. При цьому принцип роботи зберігається. В основі роботи існуючих систем автоматичного управління напруги ЕРС лежить автоколивальний принцип. Тобто, після запуску генератора в системі живлення встановлюються автоколивання в області заданого середнього значення напруги живлення. Цей принцип легко існував при використанні вібраційних релейних регуляторів.

### Мета роботи

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

## Матеріали дослідів

На цей час, у промислових установках набули широкого застосування силові ключові елементи на основі біполярних і польових транзисторів з ізольованим затвором (IGBT й MOSFET). Повна керованість цих приладів дозволяє виключити із силових схем перетворювачів пристрої з примусовою комутацією, кола виводу пристрою в робочий режим і повернутися до схем перетворення в їх найпростішому класичному вигляді. Високі динамічні характеристики таких приладів дозволяють їх розглядати як ідеальні керовані ключові прилади. Достоїнства таких ключових приладів у сполученні із сучасними мікроконтролерами можна використати для заміни вібраційних регуляторів напруги.

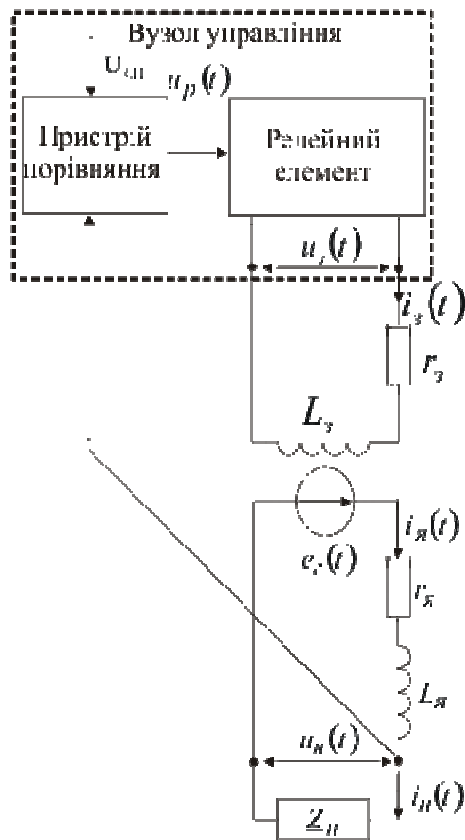


Рис. 1. Схема регулювання напруги

Пропонована система автоматичного регулювання напруги кіл управління показана на рис. 1. Складається з наступних функціональних вузлів: вузол управління на основі мікроконтролера й силового ключа, що одержує сигнал зворотного зв'язку у вигляді напруги на навантаженні  $u_n(t)$  й у результаті сигналу розузгодження  $u_p(t)$ , виробляє вплив у вигляді імпульсної подачі напруги  $u_з(t)$  на обмотку

збудження генератора управління; другий вузол – це генератор управління; третій вузол – навантаження. На схемі представлено навантаження загального виду, однак, як було показано в [2], навантаження має активно-індуктивний характер із широкою зміною своїх параметрів.

Подача керуючого впливу на обмотку збудження залежить від обраного способу управління. Всі відомі способи управління ключовими перетворювачами діляться на три основних групи: способи із запрограмованою заздалегідь послідовністю перемикавання, синхронізовані способи зі зворотними зв'язками, асинхронні способи. Програмний спосіб не дозволяє одержати стабільну напругу на виході. Синхронізовані способи, основою яких служить широтно-імпульсна модуляція, вимагають ускладнення алгоритмів програм і введення додаткових зв'язків. При асинхронних способах управління сигнал, пропорційний вихідній напрузі, віднімається із заданого й при перевищенні за модулем заданого рівня здійснюється перемикавання силового ключа. При цьому перехід з одного стійкого стану в інший здійснюється гранично швидко на відміну від широтно-імпульсних систем, де для цього потрібно декілька тактів. Асинхронний принцип здійснюється релейними системами, які перебувають в автоколебальному режимі.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_p(t) = U_{оп} - u_n(t); \\ u_з(u_p) = \begin{cases} 0, \text{ нпу } U_p < 0 \text{ або } U_H > U_{оп}; \\ U, \text{ нпу } U_p > 0 \text{ або } U_H < U_{оп}; \end{cases} \\ u_з(t) = r_з \cdot i_з(t) + L_з \frac{di_з}{dt}; \\ e_я(t) = r_я \cdot i_я(t) + L_я \frac{di_я}{dt} + u_n(t) = K_T \cdot i_з(t); \quad (1) \\ u_n(t) = r_н \cdot i_н(t) + L_н \frac{di_н}{dt} = e_я(t) - \Delta u_я(t); \\ \Delta u_я(t) = r_я \cdot i_я(t) + L_я \frac{di_я}{dt}; \\ i_я(t) = i_н(t). \end{array} \right.$$

Схема регулювання напруги кіл управління (див. рис. 1), описується системою рівнянь, яка розглядається як математична модель (1) системи автоматичного регулювання напруги кіл управління ЕРС з генераторами постійного струму.

Використовуючи типове перетворення за Лапласом рівнянь системи (1), складаємо структурну схему системи автоматичного регулю-

вання напруги (САРН) кіл управління, яка представлена на рис. 2.

Для дослідження автоколивань у нелінійних системах, на практиці, використовується метод гармонічної лінеаризації. За допомогою цього методу можна визначити наявність автоколивань у досліджуваній системі, їхні параметри й стійкість. Суть методу гармонічної лінеаризації полягає в приведенні нелінійної системи до еквівалентної лінійної, у якій нелінійна ланка замінюється еквівалентною лінійною з коефіцієнтом підсилення, який залежить від амплітуди автоколивань. Після приведення нелінійної системи до лінійної її досліджують лінійними методами [3].

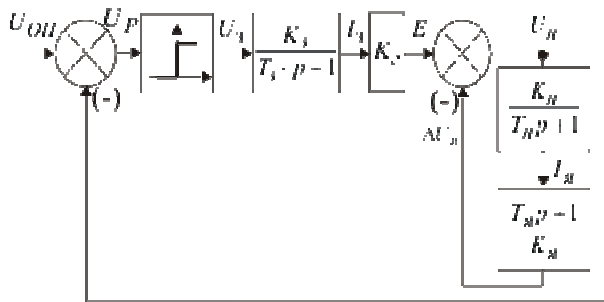


Рис. 2. Структурна схема САРН

Тепер визначимося з типом нелінійності в САРН. Істотно нелінійним елементом у системі є релейна характеристика регулятора. Регулятор на основі мікроконтролера й силового ключа дозволяє, не змінюючи схемних рішень, одержати три типи релейних характеристик: ідеальну релейну, з гістерезисною петлею постійної ширини й гістерезисною петлею змінної ширини, представлені на рис. 3.

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

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

Оскільки обрано типові релейні характеристики, то лінеаризацію в цьому випадку не показуємо, а використаємо типові коефіцієнти, які приводяться в технічній літературі [3].

Передатна характеристика лінійної частини має вигляд:

$$W_L(p) = \frac{K_2 K_3 K_n (T_n p + 1)}{(p T_3 + 1)(p a_1 + a_2)}, \quad (3)$$

де  $a_1 = K_n T_n + K_n T_3$ ;

$a_2 = K_n + K_n$ ;

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

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

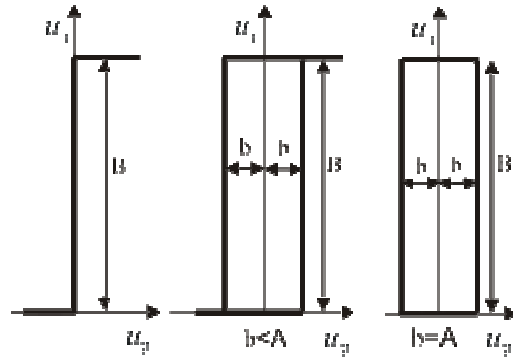


Рис. 3. Можливі характеристики вузла управління САРН

Періодичне рішення лінеаризованої системи може бути отримане за наявності в характеристичному рівнянні замкнутої системи пари чисто мнимих 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:

$$W_L(j\omega) = -\frac{1}{W_{HE}(a)} = N(a). \quad (4)$$

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. 4 представлено годограф, який побудовано 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 та  $K_n = 1,11$ ,  $T_n = 0,00002$  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 – фактор прийнятний, однак комутація ключового елемента з нескінченно великою частотою неможлива.

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.

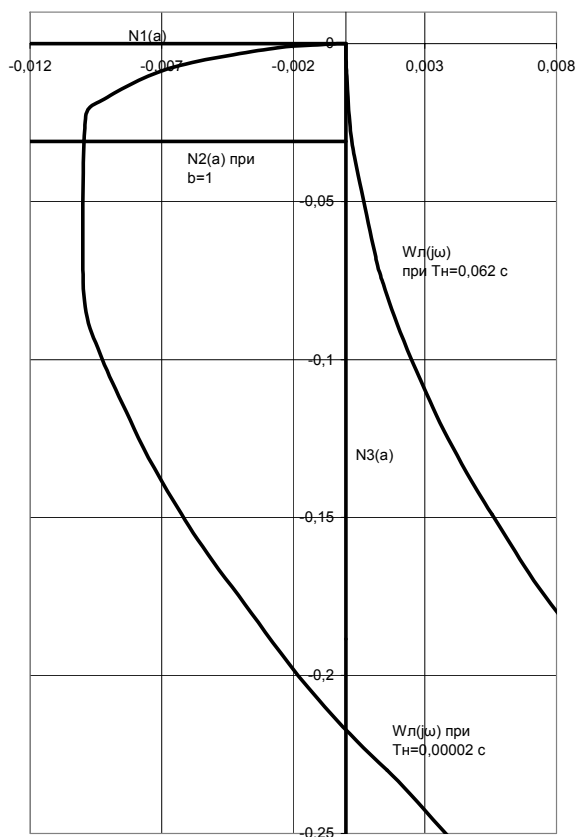


Рис. 4. Годограф САРН кіл управління з генератором ДК-405К

## Висновок

Відповідно до початкового припущення, пропонується вузол управління на сучасній елементній базі, виконаний на основі мікроконтролера й напівпровідникового силового елемента, що дозволяє одержати релейні характеристики регулятора трьох типів. Однак, проведені дослідження показали, що при ідеальній релейній характеристиці одержати автоколивання для існуючої САРН неможливо. Для характеристик з постійним і змінним гістерезисом наявність автоколивань можливе не при всякому співвідношенні параметрів навантаження  $T_n$  й  $K_n$ .

Для одержання автоколивального режиму в системі автоматичного регулювання напруги кіл управління ЕРС постійного струму необхідно введення додаткових ланок корекції, які дозволяють збільшити ступінь полінома знаменника рівняння лінійної частини (3). Колами корекції можуть служити класичні зворотні зв'язки, зміна характеру навантаження, наприклад, підключення конденсатора великої ємності паралельно навантаженню, введення в програмний режим мікроконтролера імітації динамічної ланки, наприклад аперіодичної ланки першого порядку.

## БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Сергеев, Б. С. Источники электропитания электронной аппаратуры железнодорожного транспорта [Текст] / Б. С. Сергеев, А. Н. Чечулина. – М.: Транспорт, 1998. – 280 с.
2. Білухін, Д. С. Структурна схема системи автоматичного регулювання напруги електрорухомого складу залізниць з генераторами постійного струму [Текст] / Д. С. Білухін // Наук.-техн. зб. «Гірнична електромеханіка та автоматика». – Д., 2007. – № 78. – С. 63-68.
3. Попов, Е. П. Приближенные методы исследования автоматических систем [Текст] / Е. П. Попов, И. П. Пальтов. – М.: Физматгиз, 1960. – 792 с.

Надійшла до редколегії 25.03.2009.