

Д. С. БІЛУХІН (ДПТ)

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КІЛ ЕЛЕКТРОВОЗА

Пропонується математична модель для дослідження системи автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електровоза з генераторним джерелом живлення.

*Ключові слова:* математична модель, автоматичне регулювання напруги, автоколивання

Предлагается математическая модель для исследования системы автоматического регулирования напряжения низковольтных цепей электровоза с генераторным источником питания.

*Ключевые слова:* математическая модель, автоматическое регулирование напряжения, автоколебания

A mathematical model for research of the system of automatic voltage control of low-voltage circuits of electric locomotive with the generator power source supply is offered.

*Keywords:* mathematical model, automatic voltage control, natural vibrations

### Вступ

На цей час на залізницях України гострою залишається проблема критичного стану електрорухомого складу, термін служби 70 % якого складає 30 років та більше. Утримання такого рухомого складу приводить до перевищення нормативних ремонтних витрат більш ніж в два рази і негативно позначається на рентабельності залізничних перевезень. Критичний стан склався з вантажним парком електровозів постійного струму, основою якого є електровози ВЛ8 в кількості 515 одиниць з 759. Для рішення проблеми тягового забезпечення підприємства Укрзалізниці виконують капітально-відновлювальні ремонти електрорухомого складу для продовження їх терміну служби до 15...20 років. Щоб отримати найбільший ефект від витрат на капітально-відновні ремонти, до них доцільно приурочити модернізацію деталей і вузлів електрорухомого складу, перш за все таких, модернізація яких не вимагає великих капітальних вкладень, але дозволяє знизити експлуатаційні витрати на утримання електрорухомого складу. Одним з таких вузлів є морально і фізично застаріла система автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електрорухомого складу (ЕРС) постійного струму, зокрема електровозів ВЛ8.

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 розробляти блоки живлення для електронних вузлів вводити апаратну надмірність, напри-

клад за допомогою використання громіздких та матеріалоемних фільтрів, найчастіше неоптимальних за параметрами, доповнювати схеми складними стабілізаторами напруги, захистами та ін. Вказане виправдано при одиничних модернізаціях. При масштабних впровадженнях нової апаратури на основі сучасної напівпровідникової бази більш надійний шлях – створення стабільного й надійного джерела живлення низьковольтних кіл.

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 підтримкою стабільного значення 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. Тобто, після запуску генератора на його затисках встановлюються автоколивання в області заданого середнього значення напруги живлення.

### Мета роботи

Розробити математичну модель системи автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл ЕРС для дослідження можливості одержання автоколивань в системі автоматичного регулювання напруги (САРН) 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 приладу 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 застарілих моделей регуляторів напруги.

Для оцінки можливості застосування сучасних напівпровідникових приладів пропонується схема регулювання напруги кіл управління, яка показана на рис. 1. Складається з наступних функціональних вузлів: вузол керування на основі мікроконтролера й силового ключа. На пристрій порівняння поступає сигнал зворотного зв'язку – напруги на навантаженні  $u_n(t)$  та опорна напруга  $U_{оп}$  та формується сигнал розузгодження  $u_p(t)$ . Формувач керуючого впливу в виробляє імпульсну напругу  $u_3(t)$  на обмотку збудження генератора по одній з типових релейних характеристик. Як було показано в [2], навантаження має активно-індуктивний характер та для низьковольтних кіл динамічні параметри знаходяться в широких межах.

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 з заданого й при перевищенні по модулю заданого рівня здійснюється перемикавання силового ключа. При цьому спостерігається достатньо прискорений перехідний процес на відміну від широтно-імпульсних систем, де для

цього потрібно декілька тактів. Асинхронний принцип здійснюється релейними системами, які перебувають в автоколивальному режимі.

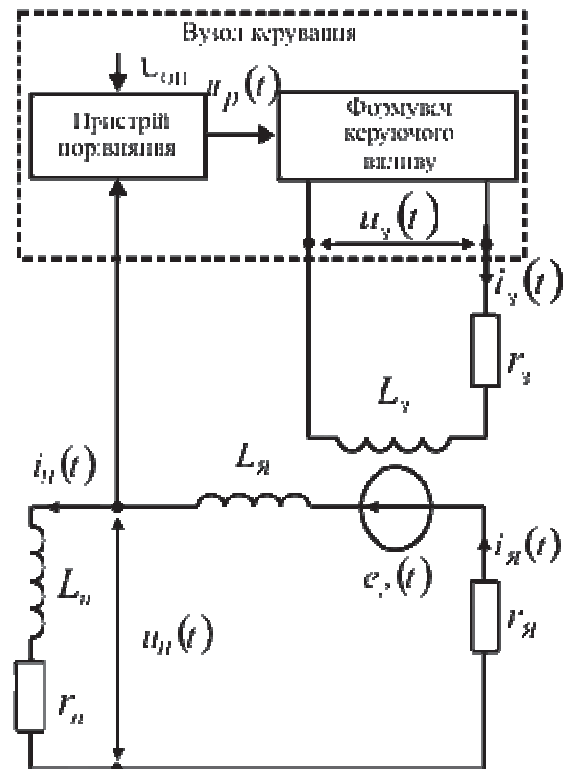


Рис. 1. Схема регулювання напруги

Для дослідження динамічних процесів в системі автоматичного регулювання напруги розроблено математичну модель функціонування системи у вигляді диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} u_p(t) = U_{оп} - u_n(t); \\ u_3(u_p) = \begin{cases} 0, & u_p(t) < 0, \\ U, & u_p(t) > 0; \end{cases} \\ u_3(t) = r_3 \cdot i_3(t) + L_3 \frac{di_3}{dt}; \\ \begin{cases} e_г(t) = r_я \cdot i_я(t) + L_я \frac{di_я}{dt} + u_n(t) = K_г \cdot i_3(t); \\ u_n(t) = r_н \cdot i_н(t) + L_н \frac{di_н}{dt} = e_г(t) - \Delta u_я(t); \\ \Delta u_я(t) = r_я \cdot i_я(t) + L_я \frac{di_я}{dt}; \\ i_я(t) = i_н(t), \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

де  $U$  – середнє значення напруги кіл керування ЕРС;

$u_p(t)$  – напруга розузгодження;

$U_{оп}$  – опорна напруга;

$u_3(t)$ ,  $i_3(t)$  – напруга та струм в колі обмот-

ки збудження;

$L_3, r_3$  – індуктивність та активний опір обмотки збудження;

$e_2(t)$  та  $i_2(t)$  – відповідно е.р.с. генератора та струм кола якоря;

$L_я, r_я$  – індуктивність та активний опір кола якоря;

$K_2$  – коефіцієнт передачі, який визначається по характеристиці холостого хода генератора;

$L_н$  та  $r_н$  – індуктивність та активний опір кола навантаження;

$i_н(t)$  – струм кола навантаження;

$\Delta U_я(t)$  – падіння напруги в колі якоря.

При розробці математичної моделі не враховувався вплив коливань напруги в контактній мережі на частоту обертання генераторів керування, оскільки на більшості ЕРС в якості приводу генераторів керування використовуються мотор-вентилятори, які, як відомо, пом'якшують вплив коливань напруги контактної мережі на частоту обертів двигуна. На електропоїздах постійного струму використовується двигун постійного струму для приводу генераторів, в якому вплив коливань напруги контактної мережі на частоту обертання зменшує обмотка паралельного збудження. Тому основним чинником, який визначає динамічні властивості системи, є зміна параметрів кіл навантаження.

Запропонована математична модель у вигляді структурної схеми системи автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл ЕРС показана на рис. 2. Вона подана у прийнятному в теорії автоматичного керування вигляді, коли основні динамічні ланки відображаються як передаточні функції. Це дозволяє відомими з теорії автоматичного керування методами виконати дослідження динамічних режимів, які виникають в системі. Відповідно до початкового завдання необхідно виявити наявність стійких автоколивань в системі.

На рис. 2 в блоках структурної схеми подано:  $K_3$  – коефіцієнт передачі обмотки збудження генератора;  $T_3$  – стала часу обмотки збудження;  $K_я$  – коефіцієнт передачі обмотки якоря;  $T_я$  – стала часу кола обмотки якоря;  $U_{оп}$  – опорна напруга;  $U_p$  – напруга розузгодження;  $U_3$  – напруга збудження;  $I_3$  – струм збудження;  $U_н$  – напруга на навантаженні;  $E$  – е.р.с. генератора;  $I_я$  – струм якоря;  $\Delta U_я$  – падіння напруги в обмотках якоря.

Тепер визначимося з типом нелінійності в САРН. Істотно нелінійним елементом у системі є релейна характеристика регулятора [3]. 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.

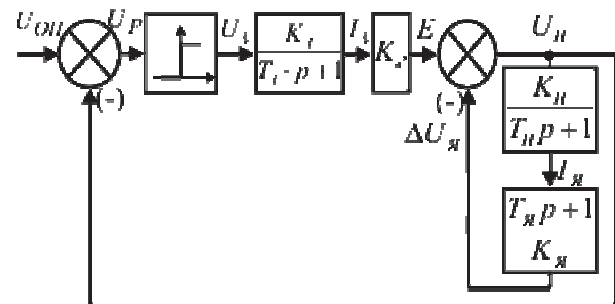


Рис. 2. Структурна схема САРН

Для розв'язання задачі по виявленню режиму стійких автоколивань, застосовано графо-аналітичний метод Гольдфарба з використанням гармонічної лінеаризації нелінійних елементів, в якості яких використано релейні елементи, які подають сигнал керування на лінійну частину системи.

## Висновок

Дослідженням годографів Гольдфарба встановлено, що в разі ідеальної релейної характеристики вузла керування САРН реалізація автоколивань в системі не можлива. Автоколивання можливі в системі при використанні релейного елемента з гістерезисом змінної ширини. При цьому основними факторами які впливають на це є параметри низьковольтних кіл  $T_н$  та  $K_н$ . Частота автоколивань обчислюється як

$$\omega(K_н, T_н) = \sqrt{\frac{K_я + K_н}{K_н [T_3 T_я - T_н (T_3 + T_я)] - T_н^2 K_я}} \quad (2)$$

Останній вираз дає можливість отримати співвідношення

$$K_н = \frac{T_н^2 K_я}{T_3 T_я - T_н (T_3 + T_я)}, \quad (3)$$

що визначає межу здійснення стійких автоколивань при використанні вказаної релейної характеристики.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ 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. збірник «Гірничі 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 21.12.2010.

Прийнята до друку 26.12.2010.