

*Дмитро Білухін*

## **АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КІЛ ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ8 З ЛІНІЙНИМ РЕГУЛЯТОРОМ**

*Проаналізовано структурна схема системи автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електровоза ВЛ8 з лінійним регулятором та на її основі запропонована функціональна схема.*

*Выполнен анализ структурной схемы системы автоматического регулирования напряжения низковольтных цепей электровоза ВЛ8 с линейным регулятором и на ее основе предложена функциональная схема.*

*The analysis of flow diagram of the system of automatic control of tension of low-voltage chains of electric locomotive of ВЛ8 is executed with a linear regulator. A functional diagram is offered.*

*Ключові слова: структурна схема, регулятор, моделювання.*

**Вступ.** Сучасний стан залізничного комплексу України характеризується помітним спрацюванням основних фондів, що істотно зменшує техніко-технологічні, економіко-організаційні та інші можливості залізниць. Тому оновлення цих фондів, їх технічне переоснащення сьогодні є одним із найважливіших завдань вітчизняного залізничного транспорту відповідно до сучасних вимог. Одним із найбільш фондомістких підрозділів галузі є локомотивне господарство, а головна складова частина його фондів – це вартість тягового рухомого складу. 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 і негативно позначається на рентабельності залізничних перевезень. Критичний стан склався з вантажним парком електровозів постійного струму, основою якого є електровози ВЛ8. 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.

Основними елементами систем автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електрорухомого складу постійного струму, який знаходиться в експлуатації є акумуляторна батарея, генератор постійного струму та вузол управління

джерелом живлення, який впливає на струм збудження генератора. Вихід з ладу любого з вказаних елементів може привести до відмови системи керування однією електрорухомого складу в цілому. Це може привести до порушення графіка руху поїздів або до аварійної ситуації. Найменш надійними з вказаних вузлів на ЕРС, який знаходиться в експлуатації, зокрема електровозів ВЛ8 та електропоїздів ЕР1, ЕР2 є вузли регулювання напруги низьковольтних кіл на які приходить 54 % відмов. Останні мають низькі експлуатаційні показники: рівень надійності, підтримання напруги в заданих межах, знос механічних частин, значні витрати на утримання.

В роботі [1] пропонується альтернативне рішення проблеми, яке полягає в заміні існуючих в експлуатації електромеханічних регуляторів типу СРН-7У на сучасні. За основу сучасних вузлів управління напругою низьковольтних кіл пропонується використовувати схемні рішення на основі сучасних мікроконтролерів та ключових елементах з польовим управлінням (польові транзистори та біполярні транзистори з ізольованим затвором). Доказана можливість створення імпульсної автоколивальної системи. Однак в роботі зовсім не розглядається можливість використання сучасних напівпровідникових елементів для побудови лінійного вузла управління напругою низьковольтних кіл.

**Матеріали дослідів.** В роботі [1] пропонується структурна схема системи автоматичного регулювання напруги (САРН) низьковольтних кіл ЕРС, яка показана на рис. 1. В схемі:  $K_3$  – 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;  $U_n$  – напруга на навантаженні;  $E$  – е.р.с. генератора;  $I_я$  – струм якоря;  $\Delta U_я$  – падіння напруги в обмотках якоря.

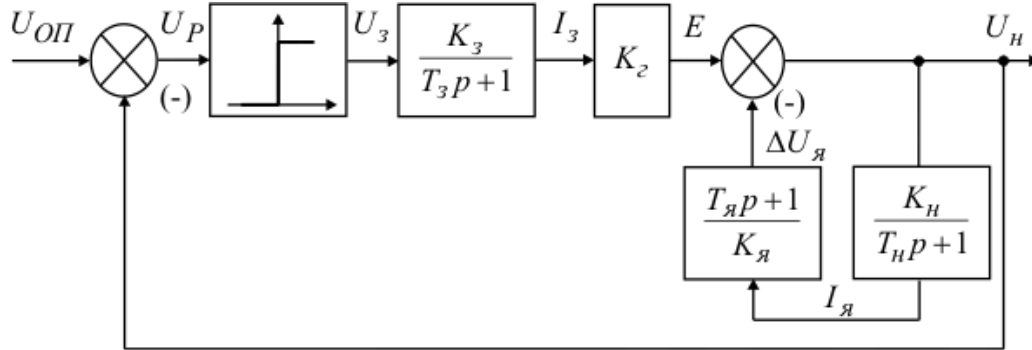


Рис. 1. Структурна схема САРН з релейним регулятором

Суттєвою перевагою принципових схем [2], які розроблювалися на основі показної структури є значне підвищення надійності вузла управління за рахунок вико-

ристання малої кількості елементів на платі управління завдяки використанню мікроконтролера. До недоліків схеми на основі мікроконтролера слід віднести необхідність складання програми по якій працює пристрій. За рахунок використання специфічних мікроконтролерів та необхідності залучати до програмування і подальшого обслуговування спеціалістів з інших галузей промисловості вартість такого пристрою значно підвищується.

Шлях створення імпульсних систем управління дійсно виправдано за рахунок зменшення втрат потужності на напівпровідникових елементах [3] але ж, в даному випадку, середнє значення струму обмотки збудження генератора управління електровоза ВЛ8 типу ДК-405К знаходиться в межах 2–3 А та не може розглядатися як суттєвий фактор до економії електричної енергії в напівпровідникових приладах, що працюють в лінійному режимі. Сучасна промисловість випускає достатню кількість біполярних транзисторів зі струмом колектора до 10 А, напругою колектор-емітер більш 50 В і потужністю, що розсіюється колом колектора до 300 Вт [4]. Це дозволяє виконати розробку вузла управління з біполярним виходом та який мав би лінійну характеристику регулятора. В такому випадку робота системи регулювання якісно оцінюється відомими з теорії автоматичного керування методами [5].

Виконуємо необхідну заміну в структурі системи автоматичного регулювання яка пропонується на рис. 1. Заміні підлягає суттєво не лінійна релейна характеристика. Цю характеристику замінюємо пропорційною ланкою, тобто типовим П-регулятором. Передатна характеристика типового П-регулятора має вигляд

$$W_{\Pi} \Phi \approx k_{\Pi}, \quad (1)$$

де  $k_{\Pi}$  – коефіцієнт передачі П-регулятора, або коефіцієнт підсилення біполярного транзисторного вузла в даному випадку.

Нова структурна схема представлена на рис. 2. Дослідження лінійних систем проводимо за типовими методиками, які полягають в визначенні частотної стійкості та якості перехідних процесів в системі.

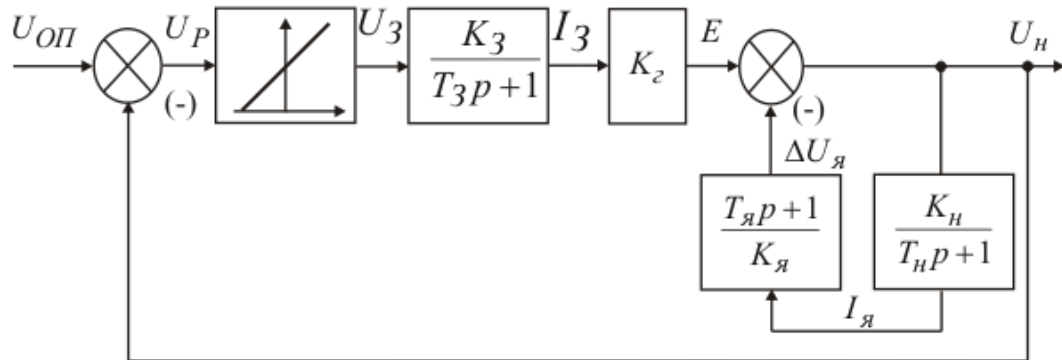


Рис. 2. Структурна схема САРН з П-регулятором

Передатна функція розімкненої системи автоматичного регулювання з лінійним регулятором

$$W_p(s) = \frac{k_{\Pi} K_{\Gamma} K_{\text{я}} K_3 (s+1)}{(s+1)(K_{\text{я}}(s+1) + K_{\text{н}}(s+1))} \quad (2)$$

Позначимо

$$\begin{aligned} K &= k_{\Pi} K_{\Gamma} K_{\text{я}} K_3, \\ a_0 &= T_3 (K_{\text{я}} T_{\text{н}} + K_{\text{н}} T_{\text{я}}), \\ a_1 &= K_{\text{я}} T_{\text{н}} + K_{\text{н}} T_{\text{я}} + T_3 (K_{\text{я}} + K_{\text{н}}), \\ a_2 &= K_{\text{я}} + K_{\text{н}}. \end{aligned}$$

Зробивши підстановку, одержимо кінцеве рівняння для розімкненої лінійної САРН

$$W_p(s) = \frac{K(s+1)}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \quad (3)$$

Комплексний коефіцієнт передачі розімкненої системи.

$$W_p(j\omega) = \frac{K(j\omega+1)}{a_0 j^2 \omega^2 + a_1 j\omega + a_2} = \frac{K + j\omega K T_{\text{н}}}{a_2 - a_0 \omega^2 + ja_1 \omega} \quad (4)$$

У відповідності до критерію Найквіста система вважається стійкою, якщо амплітудне-фазова характеристика (годограф) не огинає точку яка має координати  $(-1; j0)$ . Результати побудови (годограф в статті не показано) вказують на стійкість системи при любому співвідношенні параметрів кола навантаження. Однак стійкість системи не означає, що система має якісні показники перехідних процесів. Якість перехідного процесу прийнято оцінювати по перехідній характеристиці системи. Побудову кривої перехідного процесу при впливі одиничного імпульсу по заданій дійсній частотній характеристиці замкненої системи, можна виконувати за допомогою наближеного методу В. В. Солодовнікова (метод h-функцій) та іншими. На цей час існує безліч програмного забезпечення для ЕОМ за допомогою якого можна побудувати криву перехідного процесу без виконання складних обчислень [5]. Для побудови перехідної характеристики системи застосовуємо програму Simulinc 5/6. Математична модель у вікні цієї програми представлена на рис. 3, а графік перехідного процесу представлено на рис. 4.

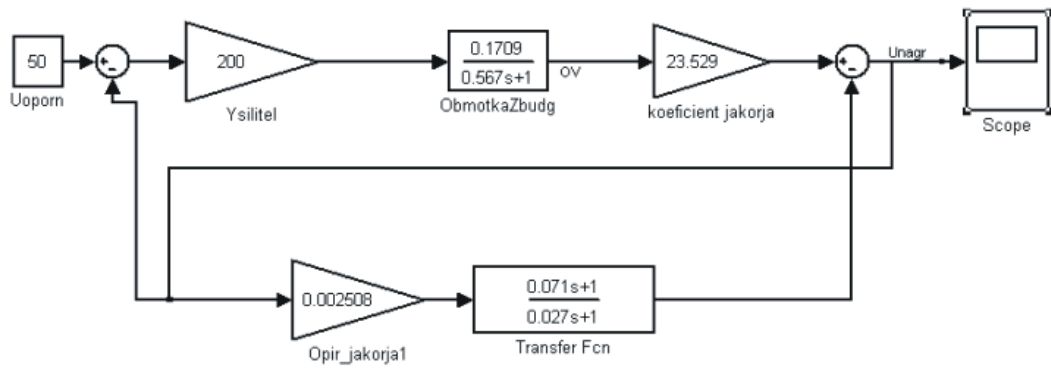


Рис. 3. Структурна схема САПН з П-регулятором в середовищі програми Simulink 5/6

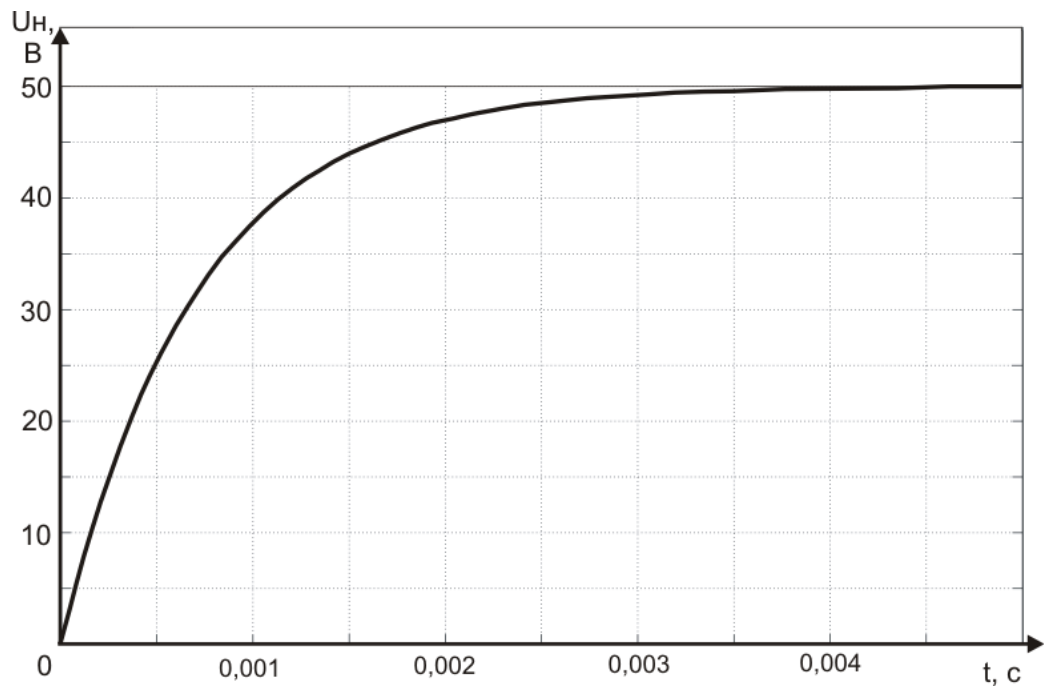


Рис. 4. Результати моделювання САПН з П-регулятором в середовищі програми Simulink 5/6

Система що запропонована, на перший погляд, дає достатньо якісні показники частотної стійкості та перехідного процесу. Крім того, достатньо просто виконати проектування такої системи. Це може бути звичайний операційний підсилювач, ввімкнений за інвертуючою або не інвертуючою схемою. Тому можна було б і зупинитися на досягнутому результаті. Але ж з теорії автоматичного керування відомі деякі недоліки системи з використанням пропорційного регулятора, які слід враховувати при подальшому аналізі. При використанні пропорційного регулятора величини що регулюється не стабілізуються на заданому значенні. Завжди існує статична помилка, яка дорівнює такому значенню керованої величини, що забезпечує вихідний сигнал необхідний для стабілізації вихідної величини при конкретному значенні інших параметрів системи. Збільшення коефіцієнта підсилення зменшує статичну помилку, але ж при значному коефіцієнті підсилення починаються автоколивання, а при подальшому збільшенні система втрачає стійкість. Для виключення статичної помилки використовується інтегральна складова. Система з інтегральною складовою враховує попередній стан. Якщо до системи не прикладені зовнішні збурення, то через деякий час керована величина стабілізується на заданому значенні, сигнал пропорційної складової буде дорівнювати нулю, а вихідний сигнал буде повністю забезпечувати інтегральна складова. Вказаний алгоритм забезпечується пропорційно-інтегральними регуляторами або ПІ-регуляторами.

ПІ-регулятор це паралельно поєднані пропорційний П-регулятор та інтегральний І-регулятор. Сигнал ПІ-регулятора залежить від помилки регулювання та інтеграла цієї помилки. Передатна функція ПІ-регулятора:

$$W_{\text{ПІ}} = k_{\text{П}} + \frac{1}{T_{\text{І}}p} = \frac{k_{\text{П}}T_{\text{І}}p + 1}{T_{\text{І}}p}, \quad (5)$$

де  $k_{\text{П}}$  – коефіцієнт підсилення пропорційної частини ПІ-регулятора;

$T_{\text{І}}$  – стала часу або час ізодрому.

Розімкнена передатна функція САПР з ПІ-регулятором

$$W_{\text{р}}^{\text{ПІ}} = \frac{b_{01}p + b_{11}}{a_{01}p^3 + a_{11}p^2 + a_{21}p}, \quad (6)$$

де:

$$\begin{aligned} b_{01} &= K_{\text{г}} K_{\text{я}} K_{\text{з}} (T_{\text{н}} T_{\text{І}} k_{\text{П}} + T_{\text{І}} k_{\text{П}} + T_{\text{н}}) \\ b_{11} &= K_{\text{г}} K_{\text{я}} K_{\text{з}}, \\ a_{01} &= T_{\text{І}} T_{\text{з}} (K_{\text{я}} T_{\text{н}} + K_{\text{н}} T_{\text{я}}) \\ a_{11} &= T_{\text{І}} (K_{\text{я}} T_{\text{н}} + K_{\text{н}} T_{\text{я}} + T_{\text{з}} (K_{\text{я}} + K_{\text{н}})) \\ a_{21} &= T_{\text{І}} (K_{\text{я}} + K_{\text{н}}) \end{aligned} \quad (7)$$

Комплексний коефіцієнт передачі системи з ПІ-регулятором

$$W_p^{\text{П}}(j\omega) = \frac{b_{11} + j\omega b_{01}}{-a_{11}\omega^2 + j\omega a_{21} - a_{01}\omega^3} \quad (8)$$

Аналіз годографа (в статті не показано) при  $k_{\text{П}} = 50$  та  $T_1 = 0,01$  с для САРН з ПІ-регулятором вказує на її стійкість. Результати моделювання САРН з ПІ-регулятором в середовищі програми Simulink 5/6 вказують на відсутність перерегулювання в системі. Тому, в подальшому рекомендовано розрахункові параметри регулятора САРН наступні: ПІ-регулятор з коефіцієнтом підсилення  $50 \pm 5$  та сталою часу  $0,01 \pm 0,005$  с.

Проектування та розрахунок схем вузлів на основі напівпровідникових елементів звичайно починають з вибору або розробки його функціональної схеми [6]. На рис. 5 показана функціональна схема САРН з вузлом управління на основі напівпровідникової елементної бази, яка за призначенням своїх функціональних елементів відповідає структурній схемі САРН з лінійним ПІ-регулятором. В якості елементної бази рекомендуються операційні підсилювачі. Це дає при проектуванні схемних рішень додаткові вимоги. Так для використання в схемі зручніше було б вибрати єдиний тип операційного підсилювача, що дозволяє використовувати єдиний пристрій живлення та видалити зі схеми елементи погодження деяких характерних параметрів (наприклад внутрішнього вхідного та вихідного опору підсилювачів, рівня вхідних-вихідних напруг та ін.).

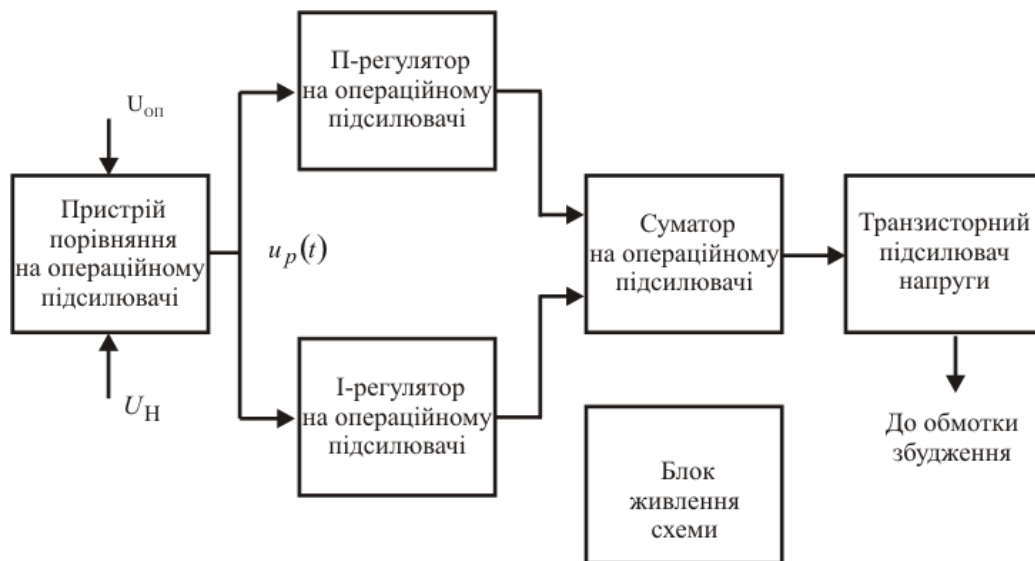


Рис. 5. Функціональна схема вузла керування системи автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електровоза ВЛ8 з лінійним регулятором

**Висновок.** Досліди структурної схеми системи автоматичного регулювання напруги з лінійним регулятором підтвердили можливість забезпечення цією системою динамічної стійкості при можливих обуреннях та її побудову на основі зручних в експлуатації напівпровідникових елементів. Перехідні процеси в системі мають аперіодичний характер. В якості вузла регулятора слід застосовувати пропорційно-інтегральний регулятор, який виключає статичну помилку. По функціональній схемі, що пропонується в роботі може бути розроблена принципова електрична схема з увімкненням операційних підсилювачів по відомим на практиці [6] схемним рішенням.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Белухин Д. С.* Повышение эксплуатационных показателей систем автоматического регулирования напряжения низковольтных цепей электроподвижного состава: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.22.09 / Д. С. Белухин – Дн-к, 2010. – 202 с. – (ДИИТ).
2. *Білухін Д. С.* Патент на корисну модель 33080 України, МПК (2006) H02P9/14. Вузол керування автономною електроенергетичною установкою / Білухін Д. С.; заявник та утримувач патенту Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № u200801407; подано 04.02.2008, опубл. 10.06.2008. Бюл. №11.
3. *Сосков А. Г., Соскова И. А.* Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. – К.: Карвелла, 2005. – 344 с.
4. *Партала О. Н.* Радиокомпоненты и материалы: справочник / Партала О. Н. – К.: Радиоаматор, М.: КУБК-а, 1998, – 720 с.
5. *Филипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. -М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.-616 с.
6. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.

**Надійшла**