

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання курсового проєкту**

**з дисципліни**

***«НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМІ  
АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА»***

**Харків – 2023**

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 28 березня 2023 р., протокол № 7.

Рекомендуються для магістрів спеціальності 273 «Залізничний транспорт» освітньої програми «Електровози та електропоїзди» денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

доц. С. І. Яцько,  
старш. викл. Я. В. Ващенко

Рецензент

проф. С. Г. Буряковський (НДПКІ «Молнія» НТУ «ХП»)

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1 Загальна структура курсового проєкту .....	4
2 Вимоги до виконання курсового проєкту.....	5
3 Перелік тем курсового проєкту .....	7
4 Рекомендована література.....	10
Додаток А Розроблення системи підвищеної ефективності реостатного автоматичного гальмування електричного рухомого складу.....	12
1 Короткий огляд схем реостатного гальмування.....	12
2 Розроблення структурної схеми системи автоматичного регулювання реостатним гальмуванням електровоза (штатна силова схема).....	15
3 Розроблення регуляторів та їхніх параметрів системи автоматичного регулювання реостатним гальмуванням електровоза (штатна силова схема) .....	15
4 Моделювання режиму гальмування при використанні штатної силової схеми .....	18
5 Розроблення системи автоматичного регулювання реостатним гальмом підвищеної ефективності.....	22
6 Порівняльне дослідження штатної та модернізованої систем реостатного гальмування.....	25
7 Система електричного гальмування з бортовим накопичувачем енергії.....	26

## **ВСТУП**

Курсовий проєкт є частиною дисципліни «Новітні технології в системі автоматизованого тягового електропривода».

Робота над курсовим проєктом дасть змогу отримати знання та вміння щодо принципів побудови автоматизованих систем тягового електропривода з застосуванням новітніх технологій та особливостей їхньої практичної реалізації, з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, навчитися основам проведення аналізу існуючих схем та систем, формулюванню завдань та практичної їх реалізації при проведенні інженерної та наукової роботи.

Робота над проєктом вимагає використання спеціальної літератури і розширює світогляд майбутніх спеціалістів.

### **1 ЗАГАЛЬНА СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЄКТУ**

Метою курсового проєкту є підвищення ефективності системи автоматизованого тягового електропривода електричного рухомого складу.

Курсовий проєкт містить:

- 1) короткий аналіз базової автоматизованої системи тягового електропривода та формулювання завдання щодо підвищення її ефективності;
- 2) розроблення структурної схеми системи базової системи тягового електропривода;
- 3) розроблення регуляторів базової автоматизованої системи тягового електропривода та дослідження їх роботи на імітаційній моделі;
- 4) розроблення модернізованої системи автоматизованої системи тягового електропривода підвищеної ефективності;

5) порівняльне дослідження базової та модернізованої систем тягового електропривода на імітаційній моделі.

Наведений перелік розділів є загальним і має бути уточненим для кожної окремої теми. Деякі розділи залежно від теми можуть бути відсутні, а для деяких тем необхідно буде додати свої розділи. Кількість сторінок кожного розділу також є приблизною.

Обсяг пояснювальної записки має становити 20-30 аркушів. Розрахункова частина має складати не менше 30 % загального обсягу.

Після останнього розділу пояснювальної записки, яким зазвичай є розділ «Перелік використаних джерел», наводяться додатки.

## **2 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЄКТУ**

Проєкт має складатися з пояснювальної записки та графіків до неї, оформлених з урахуванням вимог ЄСКД. Виконувати роботу належить на стандартних аркушах паперу формату А4 (210X297 мм), які потім зшиваються. На титульному аркуші треба вказати кафедру, дисципліну, назву роботи, шифр (три останні цифри номера залікової книжки, далі крапка і номер за списком групи), а також прізвище здобувача та викладача. Розділи та підрозділи мають бути пронумеровані. Записка пишеться з одного боку кожного аркуша. З правого боку аркуша залишаються поля завширшки 10–15 мм, з лівого – 20 мм.

На початку записки вказують назву курсового проєкту, номер варіанта і записують усі вихідні дані. У «Вступі» треба вказати завдання, об'єкт та предмет дослідження, мету роботи та її актуальність.

Об'єкт дослідження – це те, що буде взято здобувачем для вивчення і дослідження. Це не обов'язково може бути якийсь неживий предмет або жива істота. Об'єктом дослідження може бути процес або явище дійсності.

Зазвичай назва об'єкта дослідження міститься у відповіді на питання: що розглядається?

Предмет дослідження – це особлива проблема, окремі сторони об'єкта, його властивості та особливості, які, не виходячи за рамки досліджуваного об'єкта, будуть досліджені в роботі. Зазвичай назва предмета дослідження міститься у відповіді на питання: що вивчається?

Отже, під об'єктом дослідження розуміється те явище (процес), яке створює досліджувану автором проблемну ситуацію і існує незалежно від дослідника. Основною відмінністю предмета дослідження від об'єкта дослідження є те, що предмет дослідження є частиною об'єкта дослідження. Тобто під предметом дослідження розуміються значущі з теоретичної або практичної точки зору властивості, особливості або сторони об'єкта.

Розрахунки проєкту супроводжуються поясненнями. Розрахункові формули наводяться в загальному вигляді з використанням літерних позначень, після чого у формулі вказується чисельне значення величин, що в ній містяться, і потім – результат (дивись приклад).

Приклад:

Передавальна функція електричної рушійної сили ТЕД

$$E_d = K_e \cdot V \cdot I_z, \quad (2.1)$$

де  $K_e = 0,1$  – перевідний коефіцієнт;

$V$  – швидкість руху, м/с;

$I_z$  – струм обмотки збудження ТЕД, А.

Для посилань формули слід нумерувати.

Рисунки (графіки) і таблиці наводяться відразу після першого посилання на них у тексті (на наступній сторінці, якщо виконані на окремих аркушах).

Побудову графіків руху виконувати з дотриманням правильного співвідношення масштабів.

Сторінки, графіки, рисунки, формули, таблиці треба пронумерувати. Таблиці мають бути з назвами, рисунки та графіки – з підписаними підписами.

При використанні даних з літературних джерел здобувач повинен наводити посилання на джерело (автор, назва, місце, рік видання, кількість сторінок).

Після одержання попередньо перевіреної роботи здобувач повинен акуратно виправити помилки і зробити потрібні доповнення.

*Стирати і закреслювати зауваження викладача заборонено.*

*Роботу треба підписати і вказати дату її виконання.*

Виконання всіх вимог є обов'язковою умовою для подання роботи до захисту.

### **3 ПЕРЕЛІК ТЕМ КУРСОВОГО ПРОЄКТУ**

#### **ТЕМА 1. Розроблення системи підвищеної ефективності реостатного автоматичного гальмування електричного рухомого складу**

Штатна силова схема тягового модуля в режимі реостатного гальмування наведена на рисунку 3.1.

У режимі реостатного гальмування якір тягового електродвигуна (ТЕД) М підключається індивідуально до гальмівного резистора, а обмотка збудження ТЕД (ОЗ М) підключена до випрямної установки (статичного перетворювача).

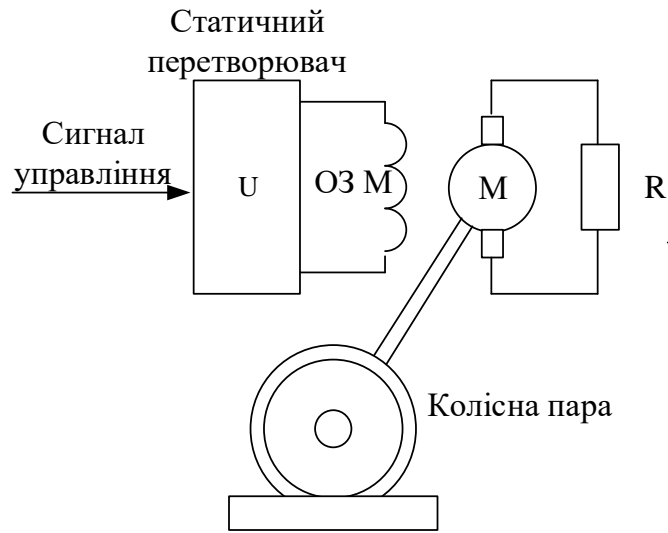


Рисунок 3.1 – Штатна силова схема тягового модуля в режимі реостатного гальмування

Структурна схема тягового електропривода (об'єкт регулювання) та параметри наведені на рисунку 3.2 та в таблиці 3.1 відповідно.

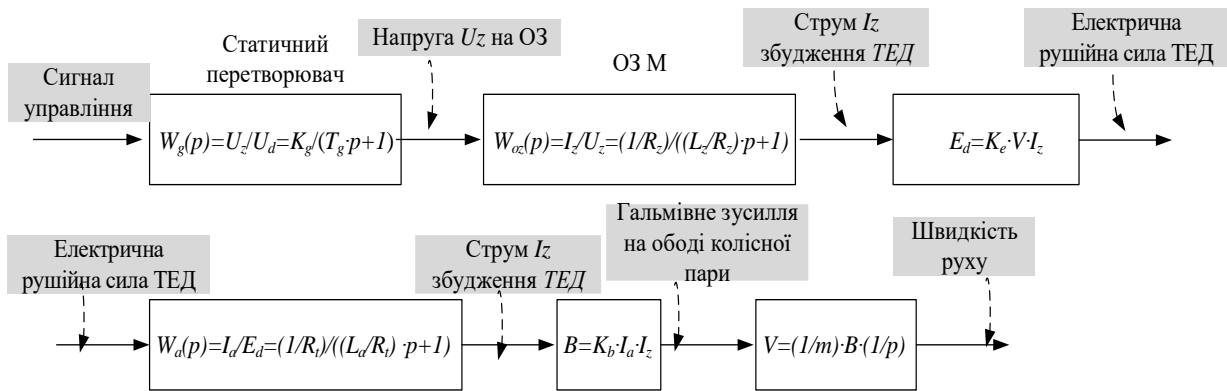


Рисунок 3.2 – Структурна схема тягового електропривода



Таблиця 3.1 – Вимоги до якості регулювання та параметри об'єкта

Варіант	$K_g$	$T_g$	$T_z$	$K_e$	$R_t$	$K_b$	$m$	$I_{amax}$	$I_{zmax}$
1	20	0,01	1	0,1	1,0	0,2	40 000	400	500
2	20	0,01	1	0,1	2,0	0,2	40 000	600	500
3	20	0,01	1	0,1	2,3	0,2	40 000	400	500
4	20	0,01	1	0,1	2,4	0,2	40 000	400	500
5	20	0,01	1	0,1	2,5	0,2	40 000	400	500
6	20	0,01	1	0,1	2,6	0,2	40 000	450	500
7	20	0,01	1	0,1	2,7	0,2	40 000	500	500
8	20	0,01	1	0,1	2,8	0,2	40 000	600	500
9	20	0,01	1	0,1	2,9	0,2	40 000	600	500
10	20	0,01	1	0,1	3,0	0,2	40 000	400	500

Позначення в таблиці 3.1:

$K_g$  – коефіцієнт підсилення статичного перетворювача;

$T_g$  – стала часу статичного перетворювача, с;

$T_z = L_z/R_z$  – стала часу обмотки збудження, с;

$R_z$  – опір обмотки збудження, Ом;

$L_z$  – індуктивність обмотки збудження, Гн;

$K_e$  – перевідний коефіцієнт;

$K_b$  – перевідний коефіцієнт;

$R_t$  – опір гальмівного резистора, Ом;

$m$  – умовна величини маси поїзда, яка припадає на один тяговий електричний двигун, кг;

$I_{amax}$  – максимальна величина струму якоря тягового електричного двигуна, А;

$I_{zmax}$  – максимальна величина струму збудження тягового електричного двигуна, А;

$$[I_a \cdot V] \leq 10\,000 \text{ А} \cdot \text{м/с.}$$

**Завдання:** розроблення автоматизованої системи тягового електропривода підвищеної ефективності та проведення порівняльного дослідження базової та модернізованої систем тягового електропривода на імітаційній моделі.

**Примітка:** один із варіантів можливих розроблень автоматизованої системи тягового електропривода підвищеної ефективності наведено в додатку А.

**Тема 2. Тяговий електропривод з додатковим джерелом живлення для компенсації зниження напруги живлення в контактній мережі**

#### **4 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1 Басов Г. Г., Яцько С. І. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. Харків: «Апекс+», 2005. Ч. 2. 248 с.

2 Системи електропостачання рухомого складу залізниць і метрополітенів: підручник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, М. М. Бабаєв, С. І. Яцько, Я. В. Ващенко. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 308 с.

3 Електропоїзд ЕПЛ9Т. Технічні умови ТУ У 35.2-05763797-027-2002. URL: <https://web.archive.org/web/20130919194321/http://luganskteplovoz.com/ProdOsnProduct/OnlyOsnProduct/27>

4 Кірпа Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему: монографія. Вид. 2-ге, перероб. і допов. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. В. Лазаряна, 2004. 248 с.

5 Яцько С. І., Тараненко В. О. Енергоощадний модернізований електропривод електропоїзда типу ЕПЛ9Т. *Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 147. С. 148-151.

6 Забарило Д. О. Підвищення ефективності електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09. Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2015. 25 с.

7 Yatsko S. Vashchenko Ya., Sydorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. Lviv : Lviv Politechnic Publishing House, 2019. Vol. 9. No 1. P. 44–52.

8 Статичні перетворювачі тягового рухомого складу: навч. посіб. / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін.; за ред. Ю. П. Гончарова. Харків: НТУ «ХПІ», 2007. 192 с. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/3/22/3-22-b3/part1/part1.html>

## ДОДАТОК А

### Розроблення системи підвищеної ефективності реостатного автоматичного гальмування електричного рухомого складу

#### 1 Короткий огляд схем реостатного гальмування

На рисунку А.1 подана типова силова схема реостатного гальмування.

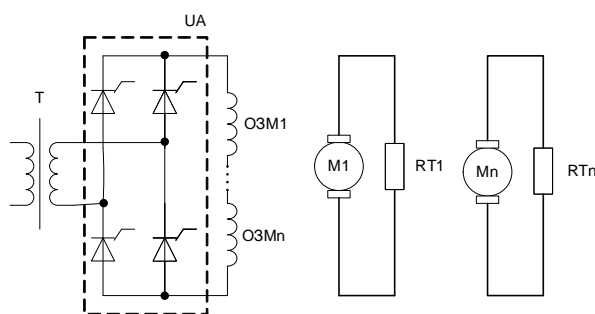


Рисунок А.1 – Типова силова схема реостатного гальмування

Якорі ТЕД  $M_1, \dots, M_n$  підключені до гальмівних резисторів  $RT_1, \dots, RT_n$  індивідуально. Обмотки збудження ТЕД з'єднані між собою послідовно і підключені до джерела живлення, в цьому випадку до вторинної обмотки однофазного трансформатора  $T$  через випрямляч  $UA$ , що керується.

Оскільки величина гальмівного зусилля залежить від величини струму збудження і струму якоря ТЕД, то відповідно її регулювання можна реалізувати шляхом:

- а) регулювання величини струму збудження;
- б) зміни (регулювання) величини опору гальмівного резистора;
- в) регулювання струму збудження та величини опору гальмівного резистора;
- г) застосування додаткового джерела живлення для збільшення величини струму якоря ТЕД.

На рисунку А.2 подано варіанти схем реостатного гальмування, що забезпечують регулювання величини струму якоря ТЕД шляхом дискретного (а) та плавного (б) регулювання величини опору гальмівного резистора та за допомогою додаткового джерела живлення UA2 (в).

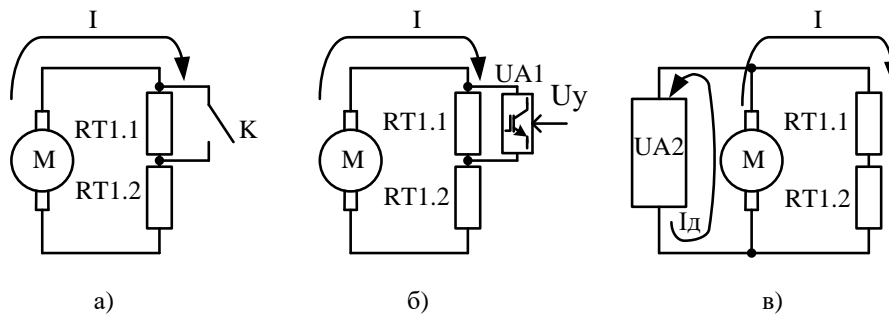


Рисунок А.2 – Силові схеми реостатного гальмування з регулюванням гальмівного зусилля по колу якоря:

RT1.1, RT1.2 – гальмівні резистори; М – якорь ТЕД; К – контакти силового контактора; UA1 – статичний перетворювач; UA2 – допоміжне джерело живлення; I – струм ТЕД; Id – струм додаткового джерела живлення UA2

Величину максимального значення гальмівного зусилля з урахуванням вище зазначених обмежень можна записати як:

$$B_{max}(V) = \min\{B_{I_3}(V); B_{I_я}(V); B_{[I_я \cdot V]}(V); B_{\psi 0}(V)\}.$$

На рисунку А.3 подано діапазон зміни гальмівного зусилля при русі зі стабілізацією швидкості.

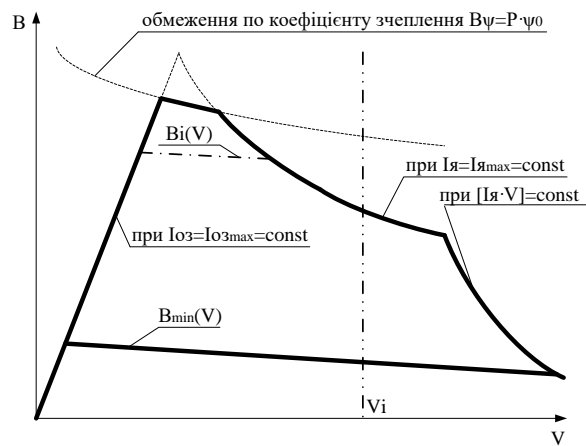


Рисунок А.3 – Гальмівна характеристика при реостатному гальмуванні

Гальмівна характеристика (при типовій схемі реостатного гальмування) наведена на рисунку А.3, де:

$V$  – швидкість руху;

$B$  – гальмівне зусилля;

$B_{min}(V)$  – мінімально допустиме значення гальмівного зусилля в режимі гальмування. Ця умова необхідна для уникнення «розтягування» поїзда при гальмуванні і запобігає виникненню небажаних динамічних зусиль в ньому;

$B_i(V)$  – зазвичай при реостатному гальмуванні передбачена можливість дискретного завдання гальмівного зусилля;

$V_i$  – в деяких системах регулювання гальмівного зусилля передбачається регулювання зі стабілізацією швидкості руху.

Максимальне значення типової гальмівної характеристики  $B_{max}(V)$  визначається з урахуванням ряду обмежень, а саме:

- за максимальною величиною струму якоря  $I_{\alpha max}$ ;
- максимальною величиною струму збудження  $I_{zmax}$ ;
- допустимою комутацією;
- з врахуванням обмеження за коефіцієнтом зчеплення  $\psi_0(V)$

( $B\psi_0(V)=P\cdot\psi_0(V)$ ), де  $\psi_0(v) = \frac{a}{b+c\cdot v}$ ;  $a, b, c$  – коефіцієнти).

## 2 Розроблення структурної схеми системи автоматичного регулювання реостатним гальмуванням електровоза (штатна силова схема)

Структурна схема автоматичної системи регулювання реостатним гальмуванням подана на рисунку А.4, де внутрішній контур є контуром регулювання струму збудження ТЕД, а зовнішній – струму якоря ТЕД.

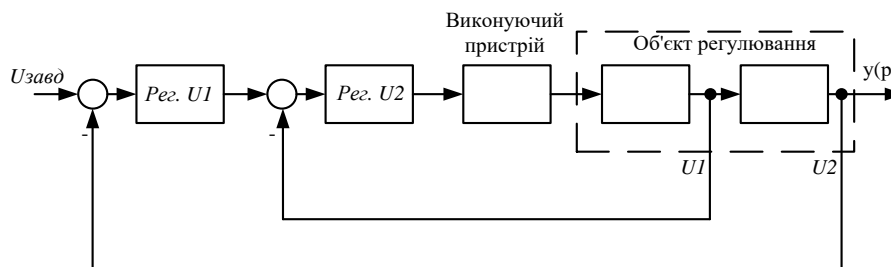


Рисунок А.4 – Структурна схема автоматичної системи регулювання реостатним гальмуванням

## 3 Розроблення регуляторів та їхніх параметрів системи автоматичного регулювання реостатним гальмуванням електровоза (штатна силова схема)

### 3.1 Передавальна функція статичного перетворювача

Передавальна функція статичного перетворювача, джерела живлення обмотки живлення ТЕД подана у вигляді:

$$W_g(p) = U_z / U_d = K_g / (T_g \cdot p + 1),$$

де  $K_g = 20$  – коефіцієнт підсилення;

$T_g = 0,01$  – стала часу, с.

### 3.2 Передавальна функція обмотки збудження

$$W_{oz}(p) = I_z / U_z = (1/R_z) / ((L_z/R_z) \cdot p + 1),$$

де  $R_z$  – опір обмотки збудження, Ом;

$L_z/R_z = T_z$  – стала часу обмотки збудження, с.

### 3.3 Передавальна функція електричної рушійної сили ТЕД

$$E_d = K_e \cdot V \cdot I_z,$$

де  $K_e = 0,1$  – перевідний коефіцієнт;

$V$  – швидкість руху, м/с;

$I_z$  – струм обмотки збудження ТЕД, А.

### 3.4 Передавальна функція якірної ланки ТЕД

$$W_a(p) = I_a / E_d = (1/R_t) / ((L_a/R_t) \cdot p + 1),$$

де  $R_t$  – активний опір якірної ланки;

$L_a$  – індуктивність якірної ланки.

### 3.5 Передавальна функція визначення величини гальмівного зусилля

$$B = K_b \cdot I_a \cdot I_z,$$

де  $K_b = 0,2$  – перевідний коефіцієнт.

### 3.6 Передавальна функція визначення швидкості руху



$$V=(1/m) \cdot B \cdot (1/p),$$

де  $m = 40\,000$  кг – приведена маса поїзда до 1 ТЕД.

### 3.7 Передавальна функція внутрішнього контуру об'єкту регулювання

Передавальну функцію об'єкта регулювання внутрішнім контуром (регулювання струму збудження ТЕД) можна записати у вигляді:

$$W_I(p) = W_g(p) \cdot W_{oz}(p) = [K_g / (T_g \cdot p + 1)] \cdot [(1/R_z) / ((L_z/R_z) \cdot p + 1)].$$

### 3.8 Синтез регулятора контуру регулювання струму збудження ТЕД

Застосуємо в якості регулятора ІІІ-регулятор, передавальна функція якого визначатиметься як:

$$W_{PII}(p) = [T_z \cdot p + 1] / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g \cdot T_g \cdot p] = T_z / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g \cdot T_g] + 1 / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g \cdot T_g \cdot p],$$

де  $T_z \gg T_g$ .

Визначаємо параметри ІІІ-регулятора:

$$K_{III} = T_z / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g] = 1 / [4 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 0,01] = 0,125;$$

$$1/T_{III} = 1 / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g] = 1 / [4 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 0,01] = 0,125.$$

### 3.9 Синтез регулятора контуру регулювання струму якоря ТЕД

Для визначення регулятора зовнішнього контуру регулювання визначаємо передавальну функцію внутрішнього.

$$\begin{aligned}
W_{o1}(p) &= W_g(p) \cdot W_{oz}(p) \cdot W_{pi1}(p) / [1 + W_g(p) \cdot W_{oz}(p) \cdot W_{pi1}(p)] = \\
&= [[K_g / (T_g \cdot p + 1)] \cdot [(1/R_z) / ((L_z/R_z) \cdot p + 1)] [T_z \cdot p + 1]] / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g \cdot p] / \\
&[1 + [K_g / (T_g \cdot p + 1)] \cdot [(1/R_z) / ((L_z/R_z) \cdot p + 1)] \cdot [T_z \cdot p + 1]] / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g \cdot p] = 1 / (2 \cdot T_g \cdot p + 1)^2; \\
W_{o1}(p) &= 1 / (2 \cdot T_g \cdot p + 1)^2
\end{aligned}$$

Передавальну функцію об'єкта регулювання зовнішнього контуру (регулювання струму якоря ТЕД) можна записати у вигляді:

$$W_2(p) = W_{o1}(p) = [1 / (2 \cdot T_g \cdot p + 1)^2] \cdot K_e \cdot V \cdot (1/R_t) / ((L_a/R_t) \cdot p + 1),$$

де  $R_t = 1,1$  Ом – активний опір якірної ланки;

$L_a = 0,11$  Гн – індуктивність якірної ланки.

$$2 \cdot T_g = 0,02$$

$$K_e = 0,1.$$

В якості регулятора пропонується вибрати ПІ-регулятор.

Враховуючи, що  $T_a \gg 2 \cdot T_g$ , коефіцієнти ПІ-регулятора можна визначити як:

$$K_{PI} = T_a / [4 \cdot (K_e \cdot V) \cdot (1/R_t) \cdot (4 \cdot T_g)]$$

$$1/T_{PI} = 1 / [4 \cdot (K_e \cdot V) \cdot (1/R_t) \cdot (4 \cdot T_g)]$$

$$K_{PI} = 0,1 / [4 \cdot (0,1 \cdot V) \cdot 0,9 \cdot (4 \cdot 0,01)] \approx 7 \cdot (1/V)$$

$$1/T_{PI} = 1 / [4 \cdot (kg \cdot \omega) \cdot kd \cdot ku \cdot (2 \cdot T_b + T_w)] \approx 70 \cdot (1/V).$$

#### **4 Моделювання режиму гальмування при використанні штатної силової схеми**

На рисунку А.5 наведено імітаційну модель системи тягового електропривода в режимі електричного реостатного гальмування. Модель реалізовано в програмному середовищі Matlab/Simulink.

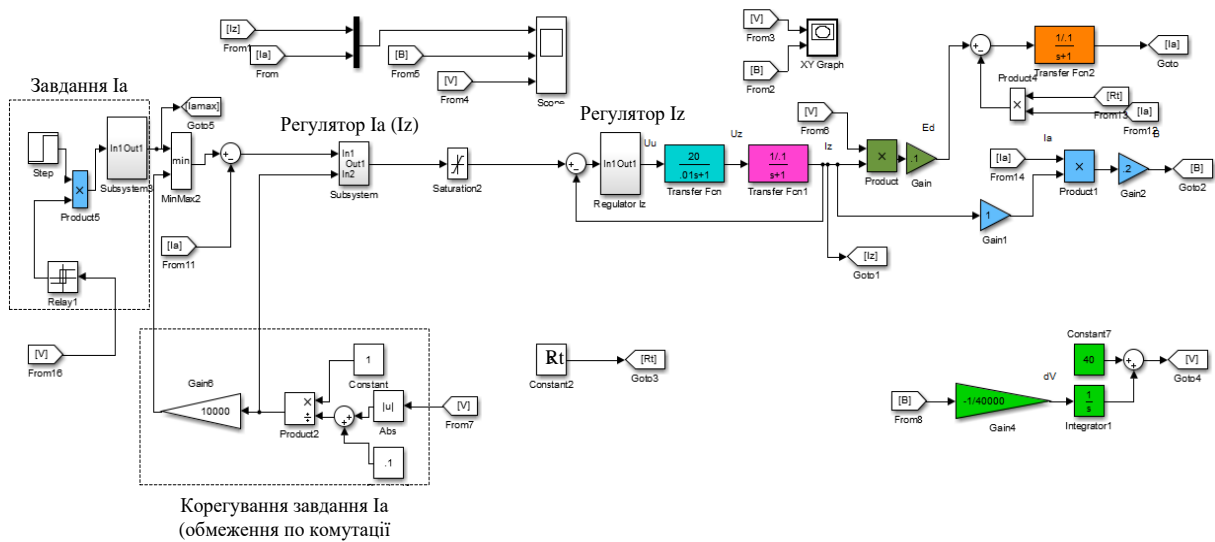


Рисунок А.5 – Імітаційна модель системи тягового електропривода в режимі штатного електричного реостатного гальмування

Завдання струму якоря визначається як найменше значення з двох величин, що задаються в двох блоках, а саме: у блоці завдання струму якоря та блоці визначення допустимого значення струму якоря з точки зору забезпечення задовільного рівня комутації.

Блок завдання струму якоря забезпечує початкове завдання максимально допустимого струму якоря та зниження уставки струму якоря до нуля при досягненні швидкості руху переходу на пневматичне гальмування або завершенні режиму гальмування з іншої причини. При цьому для обмеження швидкості зміни гальмівного моменту сигнал завдання струму якоря подається на датчик інтенсивності, модель якого наведено на рисунку А.6.

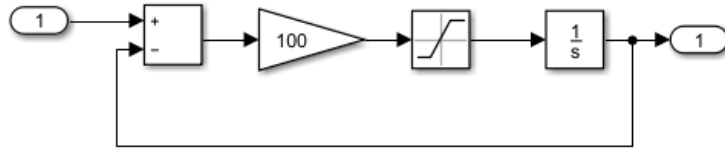


Рисунок А.6 – Блок завдання величини інтенсивності гальмування (обмеження нелінійного елемента  $\pm 1000$ )

Блок визначення допустимого значення струму якоря з точки зору забезпечення задовільного рівня комутації показано на рисунку А.5 і позначено як блок «корегування завдання  $I_a$ ».

Блок розрахунку швидкості руху наведено на рисунку А.7.

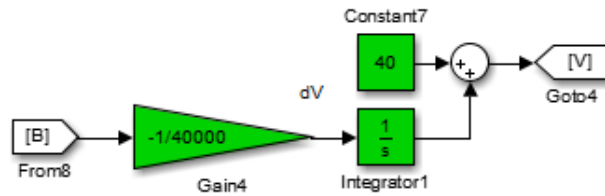


Рисунок А.7 – Блок розрахунку швидкості руху

Регулятор струму збудження та струму якоря тягового електричного двигуна наведено відповідно на рисунках А.8 та А.9.

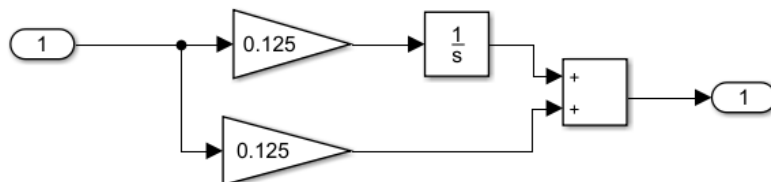


Рисунок А.8 – Регулятор струму збудження тягового електричного двигуна

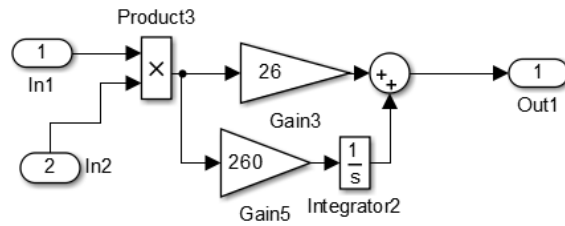


Рисунок А.9 – Регулятор струму якоря тягового електричного двигуна

На рисунку А.10 наведено результати моделювання режиму гальмування зі швидкості 40 м/с при заданих умовах та розрахованих параметрах регуляторів.

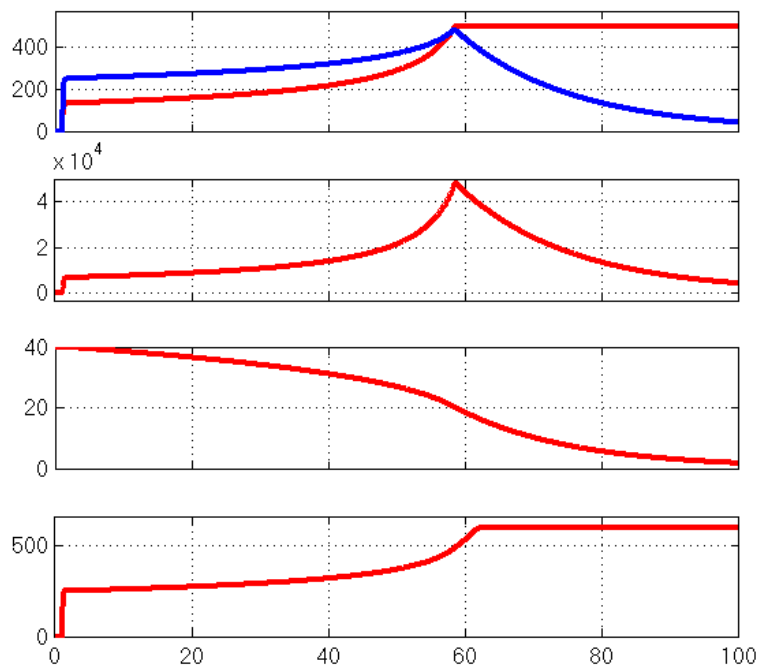


Рисунок А.10 – Результати моделювання режиму гальмування тягового електричного двигуна (струми якоря та збудження, величина гальмівного зусилля, швидкість руху та уставка струму якоря)

Залежність величини гальмівного зусилля від швидкості руху наведено на рисунку А.11.

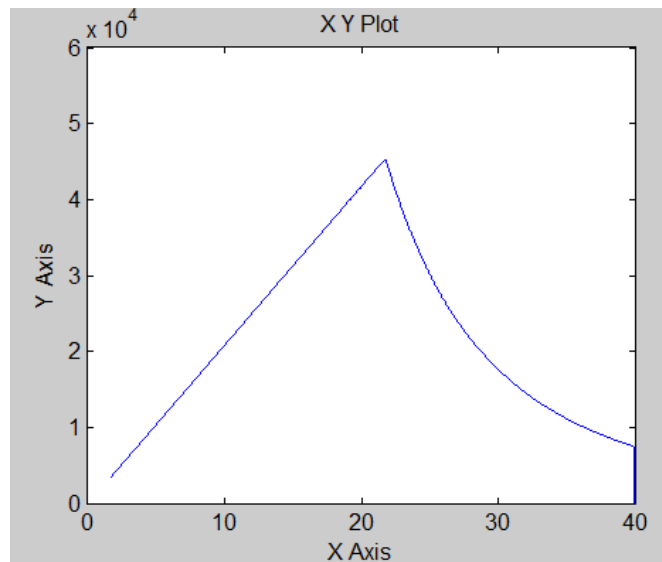


Рисунок А.11 – Залежність гальмівного зусилля від швидкості руху

Висновки:

- 1) розроблено структурну схему штатної системи регулювання тягового електропривода в режимі електричного реостатного гальмування;
- 2) систему регулювання побудовано з використанням підлеглих контурів регулювання;
- 3) результати моделювання показали, що при використанні силової схеми з індивідуальним нерегульованим гальмівним резистором тягових двигунів, в області низьких швидкостей ефективність електричного гальмування різко знижується при величині гальмівного зусилля 2 Ом;
- 4) при цьому значенні величини гальмівного резистора 2 Ом, при струмі збудження 500 А струм якоря не досягає значення максимальної уставки 600 А.

## **5 Розроблення системи автоматичного регулювання реостатним гальмом підвищеної ефективності**

Імітаційну модель системи електричного реостатного гальмування підвищеної ефективності наведено на рисунку А.12.

Відмінність запропонованої системи від штатної: при досягненні швидкості руху, після якої при подальшому її зниженні струм збудження підтримується максимальним, а величина струму якоря залежить від електричної рушійної сили двигуна та величини опору гальмівного резистора. В цій системі пропонується регулювати величину гальмівного резистора для підтримання заданої величини струму якоря.

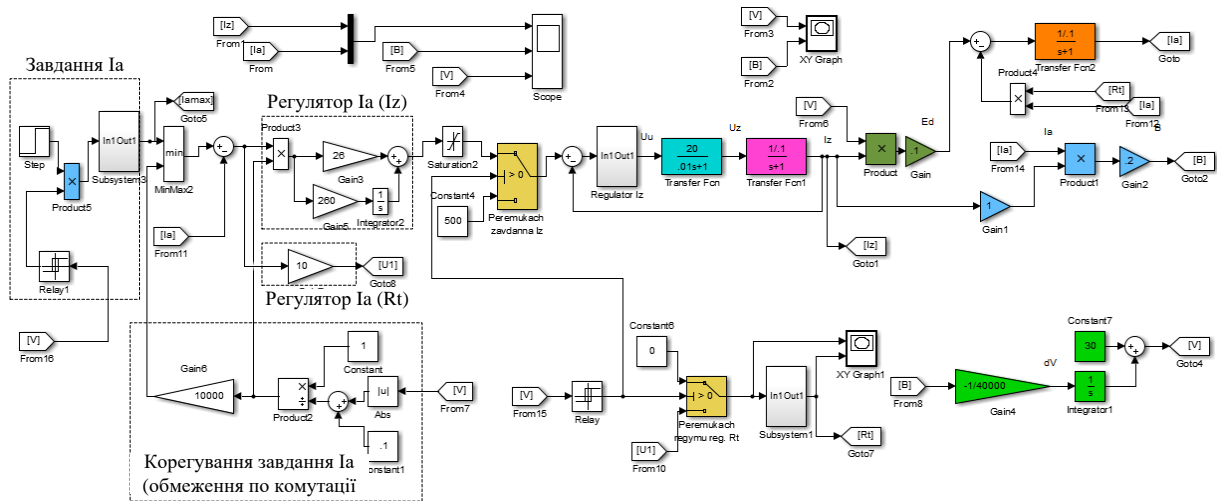


Рисунок А.12 – Імітаційна модель системи електричного реостатного гальмування підвищеної ефективності

При переході на режим регулювання величини опору гальмівного резистора на вхід регулятора подається завдання величини струму збудження. Для регулювання величини опору гальмівного резистора передбачено застосування пропорційного регулятора струму якоря та функціональний перетворювач (рисунок А.13), за допомогою яких визначається величина опору залежно від сигналу регулятора.

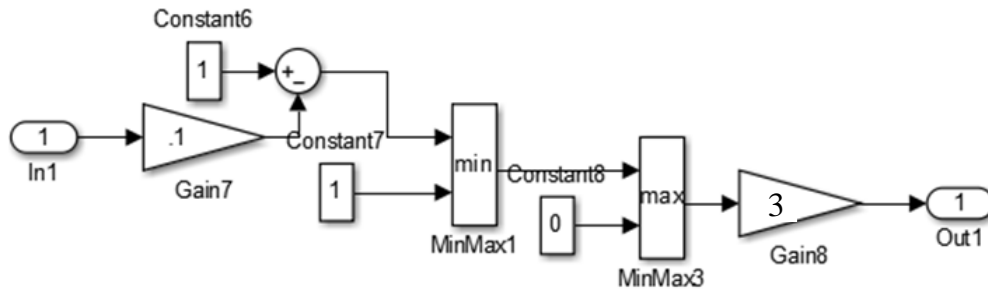


Рисунок А.13 – Функціональний перетворювач

Результати моделювання режиму гальмування тягового електричного двигуна (струми якоря та збудження, величина гальмівного зусилля, швидкість руху, уставка струму якоря, умовна величина опору гальмівного резистора) наведені на рисунку А.14.

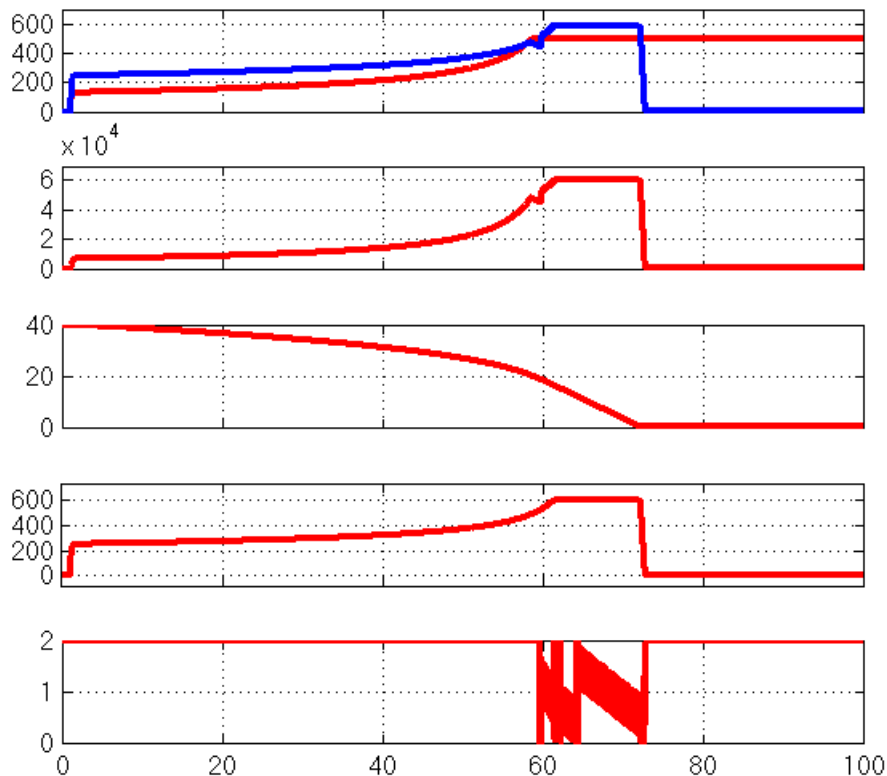


Рисунок А.14 – Результати моделювання модернізованої системи  
(перехід при  $V=21$  м/с)



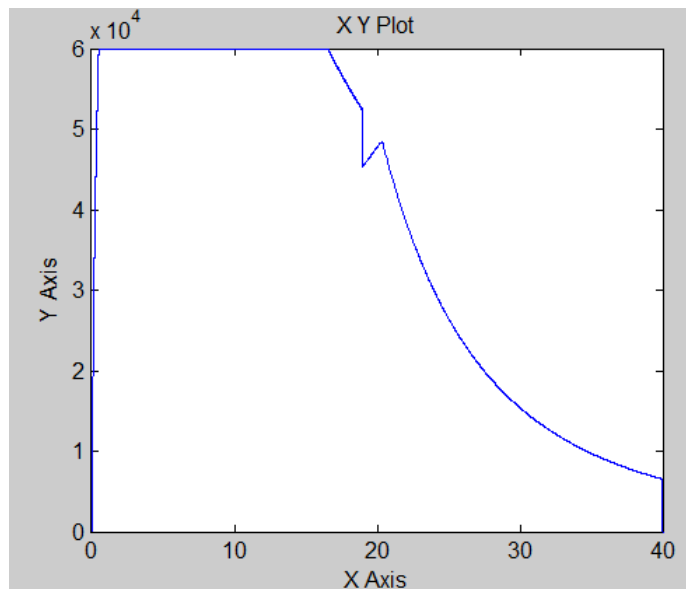
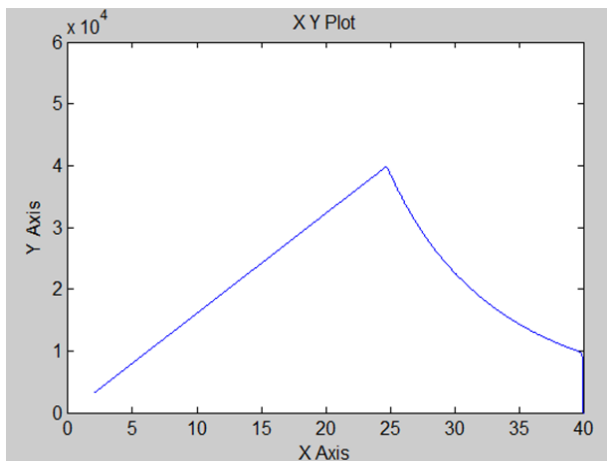


Рисунок А.15 – Залежність гальмівного зусилля від швидкості руху  
(перехід при  $V=21$  м/с)

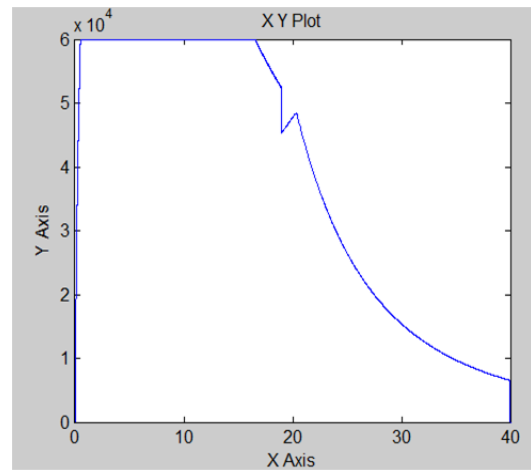
## **6 Порівняльне дослідження штатної та модернізованої систем реостатного гальмування**

Запровадження модернізованої системи реостатного гальмування дає змогу отримати більш ефективну систему електричного реостатного гальмування у значно розширеному швидкісному діапазоні. На рисунку А.16 наведено залежності гальмівного зусилля від швидкості руху при штатній схемі (рисунку А.16, а) та модернізованій (рисунку А.16, б, перехід при  $V=21$  м/с).

Як видно з рисунку, при запровадженні модернізованої системи, величина гальмівного зусилля в швидкісному діапазоні 1 – 25 м/с залишається максимальною, на відміну від штатної, при якій починаючи з 25 м/с і до нуля, величина гальмівного зусилля пропорційно залежить від швидкості руху.



а)



б)

Рисунок А.16 – Залежності гальмівного зусилля від швидкості руху при штатній (а) та модернізованій схемах (б, перехід при  $V=21$  м/с)

Зазначене проілюстровано осцилограмами режиму гальмування зі швидкості 40 м/с до зупинки (рисунки А.10 та А.14). При штатній схемі час гальмування 100 с, а при модернізованій – 71 с.

Наявність суттєвого перевищення (зниження) величини гальмівного зусилля 40 000 Н в діапазоні швидкості 22 – 25 м/с виникло у зв'язку з переходом на регулювання величини гальмівного зусилля при неузгодженні швидкості переходу. Цей недолік можна усунути реалізувавши узгодження переходу.

## 7 Система електричного гальмування з бортовим накопичувачем енергії

### 7.1 Аналіз та вибір типу бортового накопичувача енергії (НЕ)

На сьогодні альтернативою стаціонарним НЕ розглядаються бортові. Розміщення НЕ на борту рухомого складу дає змогу додатково отримати ряд суттєвих переваг порівняно зі стаціонарним розміщенням. Це можливість

зменшення габаритних розмірів гальмівних резисторів тягового рухомого складу, більш якісне згладжування піків енергії без необхідності зміни існуючої інфраструктури системи електропостачання, зведення до мінімуму втрати в елементах тягової мережі від передачі енергії.

Бортове розміщення дає змогу виключити частку енергетичних втрат у елементах тягової мережі  $\Delta A_{TM}$  від протікання енергії рекуперативного гальмування, а також зменшити втрати не лише в агрегатах тягових підстанцій  $\Delta A_{TP}$ , а й частку енергетичних втрат у елементах тягової мережі  $\Delta A_{TM}$ , що виникають при енергоспоживанні тягового рухомого складу (таблиця А.1).

Таблиця А.1 – Порівняльна оцінка складових втрат в системі електричної тяги при застосуванні стаціонарних та бортових НЕ

Варіант розміщення	Режим роботи	$\Delta A_{TP}$	$\Delta A_{TM}$	$\Delta A_{EPC}$
Стаціонарний	Тяга	±	+	+
	Гальмування	–	+	+
Бортовий	Тяга	±	±	+
	Гальмування	–	–	+
+ втрати залишаються; – відсутність втрат; ± зменшення втрат				

Особливо це є актуальним для міського та приміського електричного транспорту. Специфічна особливість роботи міського та приміського електричного транспорту пов'язана зі значною нерівномірністю споживання електроенергії при русі. У приміському сполученні середня відстань між зупинками звичайно становить 3 – 5 км, в метрополітенах від 0,6 до 0,7 км, в метрополітенах країн центральної і західної Європи від 0,3 до 0,5 км. При цьому період енергообміну електропоїзда з тяговою мережею становить від 3 до 5 хв в приміському сполученні, та від 1,2 до 1,5 хв у метрополітені.

Такий несприятливий режим енергоспоживання призводить до виникнення вагомих втрат енергії в тяговій мережі, агрегатах тягових підстанцій і первинній мережі змінного трифазного струму.

Цей варіант розміщення передбачає проведення модернізації існуючого рухомого складу електропоїзда на предмет зміни схеми розміщення його обладнання. Окрім цього, суттєвим недоліком є збільшення маси електропоїзда (у межах 2 %), що так само призводить до збільшення питомих енергозатрат на тягу. У зв'язку з цим, одними з основних вимог, що висувають до бортової НЕ є висока щільність потужності та енергоємності. Окрім цього, вона має бути нечутливою до вібрацій та сил інерції, що виникають під час експлуатації та підтримувати модульну компоновку накопичувача. Важливим є і дотримання безпекового фактору, оскільки цей варіант розміщення передбачає максимальну близькість до пасажирів. Водночас розміщення НЕ на борту рухомого складу є достатньо перспективним, оскільки дає змогу найбільш повно вирішити проблему з прийманням енергії рекуперації та звести до мінімуму енергетичні втрати у системі електропостачання. На даний час цей варіант розміщення на локомотивній тязі є недоцільним. Це пов'язано з необхідністю поглинання значної кількості енергії з наступним відносно тривалим часом її зберігання, що зменшує ефективність НЕ та вимагає використання накопичувача високої щільності потужності та енергоємності. Для маршрутів слідування, де переважає локомотивна тяга, стаціонарне розміщення є більш виправданим.

Недоліки кожного з варіантів розміщення не дають змоги отримати універсальне схемотехнічне рішення. Вибір варіанту розміщення має базуватися на результатах аналізу економічної доцільності та можливості його технічної реалізації.

На залізничному транспорті найбільшого розповсюдження набули системи накопичення енергії з електрохімічними (ЕСНЕ), індуктивними

(ІнСНЕ), ємнісними (ЄСНЕ) та інерційними (ІСНЕ) накопичувачами енергії [26-30].

У цілому ІСНЕ складається з трьох частин: системи ротора для накопичення енергії, системи підшипників, що підтримує ротор, і системи двигуна/генератора, що реалізує перетворення енергії. Дана НЕ має ряд суттєвих переваг. Насамперед це висока питома потужність. Обертання ротора накопичувача відбувається у середовищі з високим вакуумом і не має втрат на тертя, що дає змогу досягти ефективності циклу 85–95 %. Відсутність компонентів, що піддаються старінню, дає змогу досягти тривалого строку служби без погіршення характеристик та без потреби в обслуговуванні. Також важливим є той факт, що використання ІСНЕ дає змогу досягти низького впливу на навколишнє середовище. Серед основних недоліків цієї НЕ є висока швидкість саморозряду, висока початкова вартість, масогабаритні показники та чутливість до зовнішніх ударів та вібрацій. У зв'язку з присутністю ризику механічного руйнування ІСНЕ доповнюють бар'єрами захисту. Висока вартість та складність конструктивного використання інерційного накопичувача енергії призводить до зменшення економічної доцільності використання ІСНЕ. Водночас вказані недоліки обмежують можливість її розміщення на борту рухомого складу як з точки зору технічної складності, так і з точки зору безпеки.

ЄСНЕ є одними з найбільш традиційних серед НЕ. Це пов'язано з тим, що і електрична і хімічна енергія мають спільний носій – електрон. Зазвичай електрохімічний накопичувач енергії (акумулятор) містить три ключові компоненти: анод, катод та електроліт. Залежно від хімічного матеріалу, що використовується в електродах, існує широкий асортимент акумуляторів.

Літій-іонні акумулятори мають ряд суттєвих переваг для доцільності їх використання в силових колах систем електричної тяги: високу ефективність циклу роботи, модульність, можливість досягнення високої

щільності енергії та потужності. Однак їх суттєвими недоліками є кількість циклів роботи, безпека використання та висока вартість за необхідності досягнення як високої щільності потужності, так і енергії. Також важливою є екологічність їх утилізації та переробки, оскільки технології їхнього виготовлення передбачають використання важких металів. Існує високий ризик пожежонебезпеки з виділенням токсичних газів. Виходячи з цього використання літій-іонних акумуляторів на борту рухомого складу є неможливим. Однак стаціонарне їх розміщення дає змогу вирішити проблему безпеки використання.

На сьогодні використання ЄНЕ на транспорті розглядається як один з основних інструментів досягнення енергетичної оптимізації протікання тягового енергоспоживання. Серед ЄНЕ найбільшого розповсюдження набули так звані суперконденсатори. Вони демонструють високу щільність потужності (10 кВт/кг), високий ККД (>95 %), тривалий життєвий цикл (кількість робочих циклів >10<sup>6</sup>), низький темп деградації, модульність, широкий діапазон робочих температур та низькі втрати на нагрів. З точки зору безпеки вони не представляють ризику теплового розгону та містять у своєму складі менш токсичні матеріали порівняно з електрохімічними акумуляторами. Серед основних недоліків відносно низька щільність енергії (16 Вт год/кг), низьке значення напруги та чутливість до перезаряду. На сьогодні дослідження ведуться задля зниження вартості матеріалів суперконденсатора та підвищення щільності енергії без шкоди для потужності і строку служби. Останні розробки суперкоденсаторів мають щільність енергії 60 Вт год/кг та щільності потужності 100 кВт/кг. Характеристики роблять їх придатними для систем зберігання енергії як на залізничному транспорті, так і в енергетиці. Завдяки швидкому енергообміну, вони можуть ефективно використовуватися для забезпечення пікової потужності і регулювання напруги. Особливо доцільним є їх

використання у бортових системах накопичення енергії, що передбачають роботу у силових колах тягового рухомого складу.

Порівняння та оцінка накопичувачів на придатність їх використання у бортових системах накопичення енергії має проводитися за такими критеріями:

- гравіметрична щільність енергії (енергоємність системи накопичення енергії на одиницю її маси);
- гравіметрична щільність потужності (потужність системи накопичення енергії на одиницю її маси);
- об'ємна щільність енергії (енергоємність системи накопичення енергії на одиницю її об'єму);
- об'ємна щільність потужності (потужність системи накопичення енергії на одиницю її об'єму);
- ефективність зарядно-розрядного циклу (відношення вихідної електричної енергії до вхідної електричної енергії);
- інтенсивність саморозряду (відношення розсіяної енергії до загальної кількості накопиченої енергії за певний період зберігання);
- кількість циклів роботи;
- питома вартість;
- безпека експлуатації.

Параметри щільності енергоємності та потужності є вирішальними, їх слід враховувати при виборі накопичувача для систем накопичення енергії, особливо з бортовим розміщенням (таблиця А.2).

Що стосується часу розряду, електрохімічні акумулятори є більш обмеженими порівняно з інерційними, ємнісними та індуктивними накопичувачами. Вони не здатні до дуже швидкої динамічної поведінки, що є критичним параметром для завдань керування енергообміном та стабілізації напруги у системі електропостачання.

Таблиця А.2 – Порівняння щільності енергії та потужності накопичувачів енергії

Тип накопичувача енергії	Гравіметрична щільність енергії (Вт·год/кг)	Гравіметрична щільність потужності (Вт/кг)	Об'ємна щільність енергії (Вт·год/л)	Об'ємна щільність потужності (Вт/л)
Інерційний	5-100	400-1500	20-80	1000-2000
Ємнісний	5-15	5000-10000	10-30	>100000
Свинцево-кислотний акумулятор	30-50	75-300	50-90	10-400
Нікель-кадмієвий акумулятор	50-75	150-300	60-150	75-700
Нікель-метал-гідридний акумулятор	54-120	200-1200	190-490	500-3000
Літій-іонний акумулятор	150-250	500-2000	400-650	1500-10000
Окисно-відновний акумулятор	10-30	166	25-35	<2
Індуктивний	0,5-5	500-2000	0,2-2,5	1000-4000

При застосуванні в міському та приміському електричному транспорті, де кількість циклів заряду-розряду істотно вища, ніж в інших випадках, кількість робочих циклів також є важливим параметром, який слід враховувати. Це безпосередньо пов'язано з економічною доцільністю використання систем накопичення енергії. Згідно з даними, що наведені у таблиці А.3, акумулятори мають значно коротший строк експлуатації і кількість робочих циклів, ніж ємнісні, інерційні та індуктивні накопичувачі.



Таблиця А.3 – Додаткові характеристики накопичувачів енергії, що використовуються на залізничному транспорті

Тип накопичувача енергії	Ефективність циклу, %	Термін експлуатації, роки	Кількість циклів роботи
Інерційний	90-95	20	>21000
Ємнісний	90-97	10-30	>1000000
Свинцево-кислотний акумулятор	80-90	5-15	500-2000
Нікель-кадмієвий акумулятор	60-83	15-20	1500-3000
Нікель-метал-гідридний акумулятор	65-70	15-20	1500-3000
Літій-іонний акумулятор	90-98	8-15	1000-10000
Окисно-відновний акумулятор	75-80	10-20	>16000
Індуктивний	94-97	>20	>1000000

У таблиці А.4 наведено капітальні затрати на одиницю енергоємності та потужності накопичувача без урахування витрат на експлуатацію, обслуговування та заміну.

Таблиця А.4 – Капітальні затрати на впровадження НЕ

Тип накопичувача енергії	Капітальні витрати на одиницю енергоємності (\$/кВт·год)	Капітальні витрати на одиницю потужності (\$/кВт)	Вплив на навколишнє середовище
Інерційний	1000-5000	250-350	Майже відсутній
Ємнісний	300-2000	10-300	Незначний
Свинцево-кислотний акумулятор	50-100	200-650	Суттєвий
Нікель-кадмієвий акумулятор	200-1000	350-1000	Суттєвий
Нікель-метал-гідридний акумулятор	240-1200	420-1200	Середній
Літій-іонний акумулятор	273-1000	900-1300	Незначний
Окисно-відновний акумулятор	150-1000	600-1500	Середній
Індуктивний	1000-10000	200-300	Середній

Вибір НЕ для розміщення на борту рухомого складу є багатокритеріальною задачею і відноситься до задач вибору найкращого проектного рішення. Для вирішення цієї задачі можна застосувати метод прийняття рішень при детермінованих даних для кожної альтернативи в умовах визначеності.

Нехай маємо  $n$  альтернатив та  $k$  критеріїв. Позначимо  $U_{ij}$  – оцінку  $i$ -ї альтернативи за  $j$ -м критерієм. У цьому випадку кожен критерій має різну ступінь важливості, яка позначається вагою критерію. Нехай вага  $j$ -го

критерію дорівнює  $W_j$ . Приймається, що вага критерію оцінюється за шкалою від 0 до 1.

Для прийняття оптимального рішення необхідно вирішити функцію корисності кожної альтернативи  $F_i$ :

$$F_i = \sum_{j=1}^k U_{ij} \cdot W_j, \quad i = 1 \dots n. \quad (\text{A.1})$$

Прийняті альтернативи НЕ:

- 1) НЕ з інерційним накопичувачем енергії (А);
- 2) НЕ з ємнісним накопичувачем енергії (В);
- 3) НЕ з літій-іонним акумулятором (С);
- 4) НЕ з індуктивним накопичувачем енергії (D);

Альтернативи бортової НЕ оцінюються за такими критеріями:

- 1) безпека експлуатації (мінімальний ризик травмування чи гибелі пасажирів) (J1);
- 2) гравіметрична щільність енергоємності (мінімальна маса НЕ при заданій енергоємності накопичувача) (J2);
- 3) гравіметрична щільність потужності (мінімальна маса НЕ при заданій потужності енергопоглинання) (J3);
- 4) об'ємна щільність енергоємності (мінімальні габаритні параметри НЕ при заданій енергоємності накопичувача) (J4);
- 5) об'ємна щільність потужності (мінімальні габаритні параметри НЕ при заданій потужності енергопоглинання) (J5);
- 6) ефективність зарядно-розрядного циклу (мінімум втрат енергії) (J6);
- 7) кількість циклів роботи (максимальна кількість циклів роботи) (J7);
- 8) капітальні витрати на одиницю енергоємності (мінімальна кількість коштів, що необхідно витратити для отримання заданого значення енергоємності накопичувача) (J8);

9) капітальні витрати на одиницю потужності (мінімальна кількість коштів, що необхідно витратити для отримання заданої потужності енергопоглинання) (J9);

10) модульність (можливість отримання необхідних параметрів накопичувача шляхом з'єднання окремих, однотипних модулів) (J10).

Привабливість кожного критерію оцінюється за десятибальною шкалою (таблиця А.5). Задача розв'язується за максимізацією, тобто чим вища оцінка альтернативи, тим вона більш приваблива.

Таблиця А.5 – Оцінка критеріїв альтернативних НЕ

Альтернативи	Критерії									
	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
А	6	7	4	7	3	8	6	5	8	5
В	8	5	10	5	10	10	10	7	10	10
С	4	10	5	10	5	10	4	10	5	10
Д	10	3	5	3	2	9	9	4	7	5

Оцінка значень ваги критеріїв пояснюється так:

1) критерій «Безпека експлуатації (J1)» має найбільшу вагу, оскільки визначає ризик травмування чи гибелі пасажирів;

2) критерії «Гравіметрична щільність енергоемності (J2)», «Гравіметрична щільність потужності (J3)», «Ефективність зарядно-розрядного циклу (J6)» та «Кількість циклів роботи (J7)» мають суттєву вагу, оскільки визначають енергоефективність та техніко-економічну доцільність використання конкретної НЕ;

3) критерії «Об'ємна щільність енергоемності (J4)», «Об'ємна щільність потужності (J5)» та «Модульність (J10)» визначають можливість технічної реалізації НЕ на борту рухомого складу. Мають помірну вагу;

4) критерії «Капітальні витрати на одиницю енергоємності (J8)» та «Капітальні витрати на одиницю потужності J9)» визначають капітальні витрати на впровадження НЕ та носять разових характер. Постійний та інтенсивний розвиток як накопичувальних пристроїв, так і напівпровідникової перетворювальної техніки буде сприяти монотонному зменшенню вартості НЕ. У зв'язку з цим вага цих критеріїв мінімальна.

Оцінку значень ваги критеріїв наведено в таблиці А.6.

Таблиця А.6 – Оцінка значень ваги критеріїв

Критерій	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
Вага	1	0,8	0,8	0,5	0,5	0,9	0,9	0,4	0,4	0,7

За формулою А.1 визначено корисність кожної альтернативи (таблиця А.7).

Таблиця А.7 – Таблиця порівняння корисності альтернатив

Варіанти	Бали	Місце
ІСНЕ (А)	41.1	3
ЄСНЕ (В)	59.3	1
ЕСНЕ (С)	49.1	2
ІнСНЕ (D)	43	4

Отримані результати підтверджують, що найбільш перспективною є альтернатива В, тобто найбільш раціональним є використання у якості бортових систем накопичення енергії ЄСНЕ.

## 7.2 Розроблення системи автоматичного електричного гальмування з накопичувачем енергії

У режимі електричного гальмування тяговий електричний двигун працює в режимі генератора електричної енергії. Як споживач електричної енергії виступає накопичувач енергії НЕ. В цьому випадку суперконденсатор. Узгодження режимів роботи джерела енергії та споживача реалізується за допомогою перетворювачів DC/DC. У режимі електричного гальмування можна виділити два основні режими:

- РЕЖИМ 1 – величина струму якоря регулюється шляхом регулювання струму збудження ТЕД (рисунок А.17);

- РЕЖИМ 2 – при максимальному значенні струму збудження величина струму якоря (струм заряду накопичувача) регулюється шляхом накопичення додаткової енергії в індуктивності  $L1$  з наступним підключенням послідовно з'єднаних якоря і індуктивності  $L1$  до накопичувача (рисунок А.18).

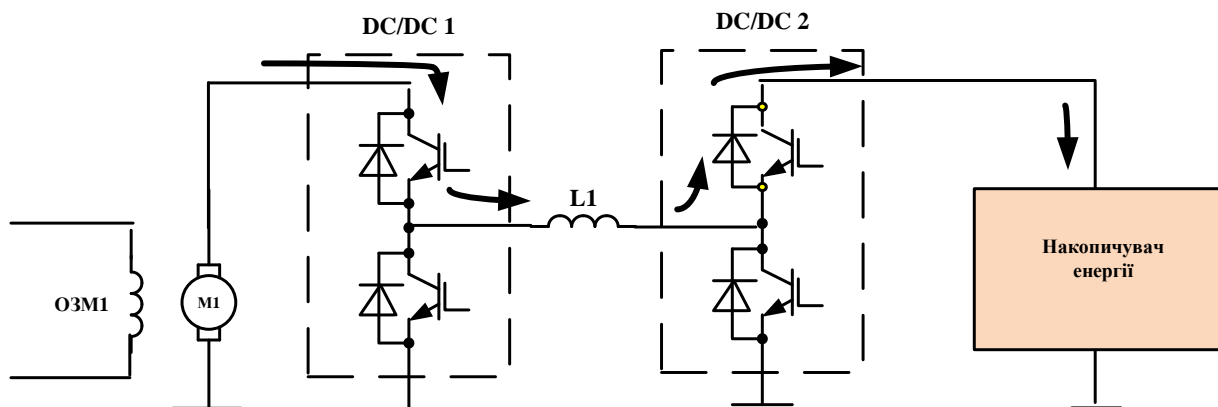


Рисунок А.17 – Схема протікання струму якоря ТЕД при РЕЖИМІ 1

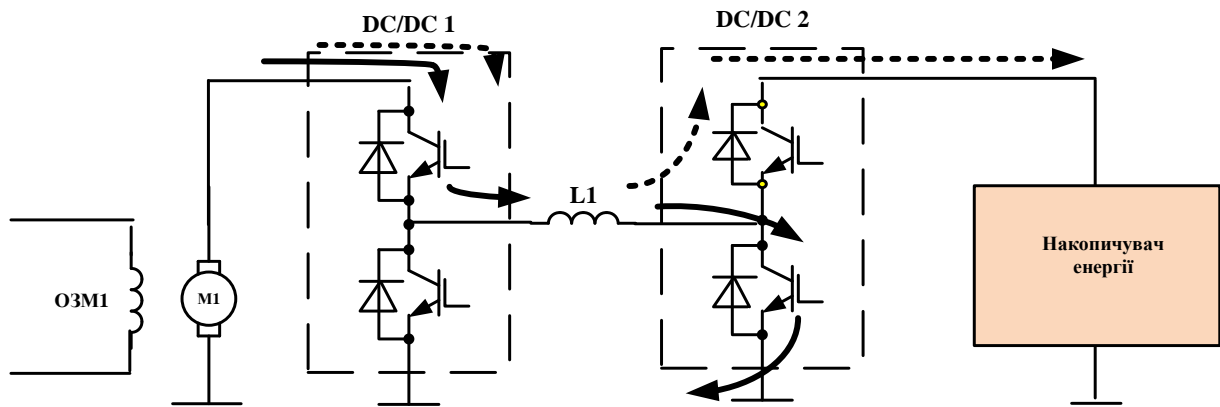


Рисунок А.18 – Схема протікання струму якоря ТГД при РЕЖИМІ 2

Імітаційну модель системи електричного гальмування з накопичувачем енергії наведено на рисунку А.19.

Основними елементами моделі є:

- ТГД, обмотка збудження якого підключена до окремого джерела живлення за допомогою перетворювача DC/DC;
- накопичувач енергії НЕ, підключений за допомогою статичного перетворювача DC/DC до якоря ТГД;
- регулятор струму якоря та струму збудження ТГД. Регулятор релейного типу. Реалізується «РЕЖИМ 1»;
- регулятор струму заряду НЕ. За допомогою цього регулятора реалізується «РЕЖИМ 2».

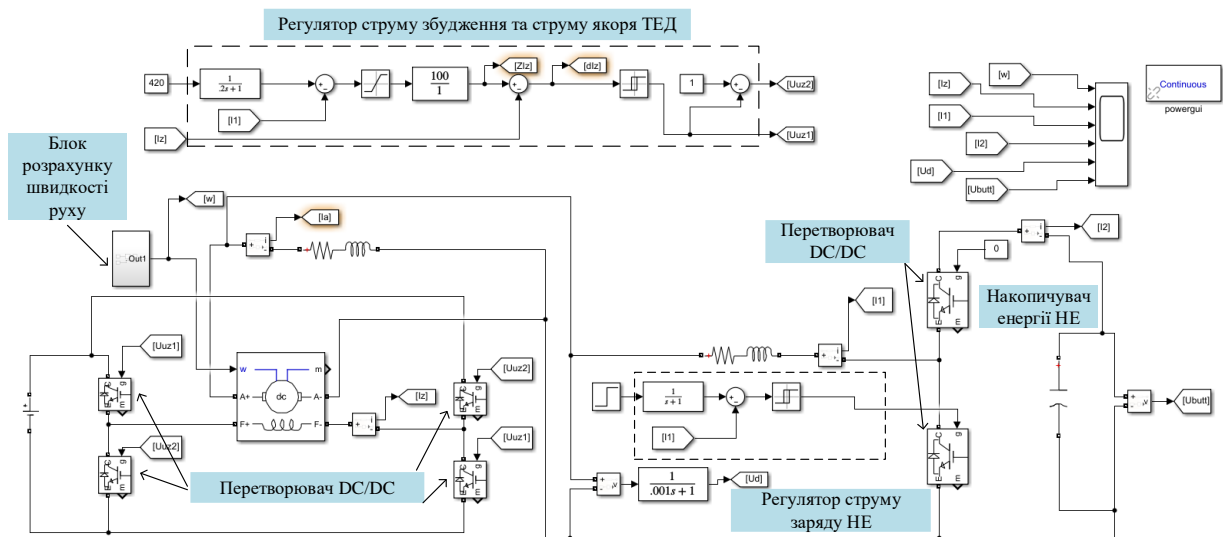


Рисунок А.19 – Імітаційна модель системи електричного гальмування з накопичувачем енергії

Результат моделювання режиму електричного гальмування з накопичувачем енергії наведено на рисунку А.20 при початкових умовах:

Ємність конденсатора НЕ, $F$	10
Початкова напруга на конденсаторі НЕ, В	200
Напруга джерела живлення обмотки живлення ТЕД, В	50
Максимальний струм якоря ТЕД, А	400
Максимальний струм збудження ТЕД, А	400



## Параметри ТЕД:

Block Parameters: DC Machine ×

DC machine (mask) (link)  
 Implements a (wound-field or permanent magnet) DC machine.  
 For the wound-field DC machine, access is provided to the field connections so that the machine can be used as a separately excited, shunt-connected or a series-connected DC machine.

Configuration Parameters Advanced

Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)] [ 0.06 0.012 ]

Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)] [ .05 .05 ]

Field-armature mutual inductance Laf (H) : .04

Initial field current: 1

OK Cancel Help Apply

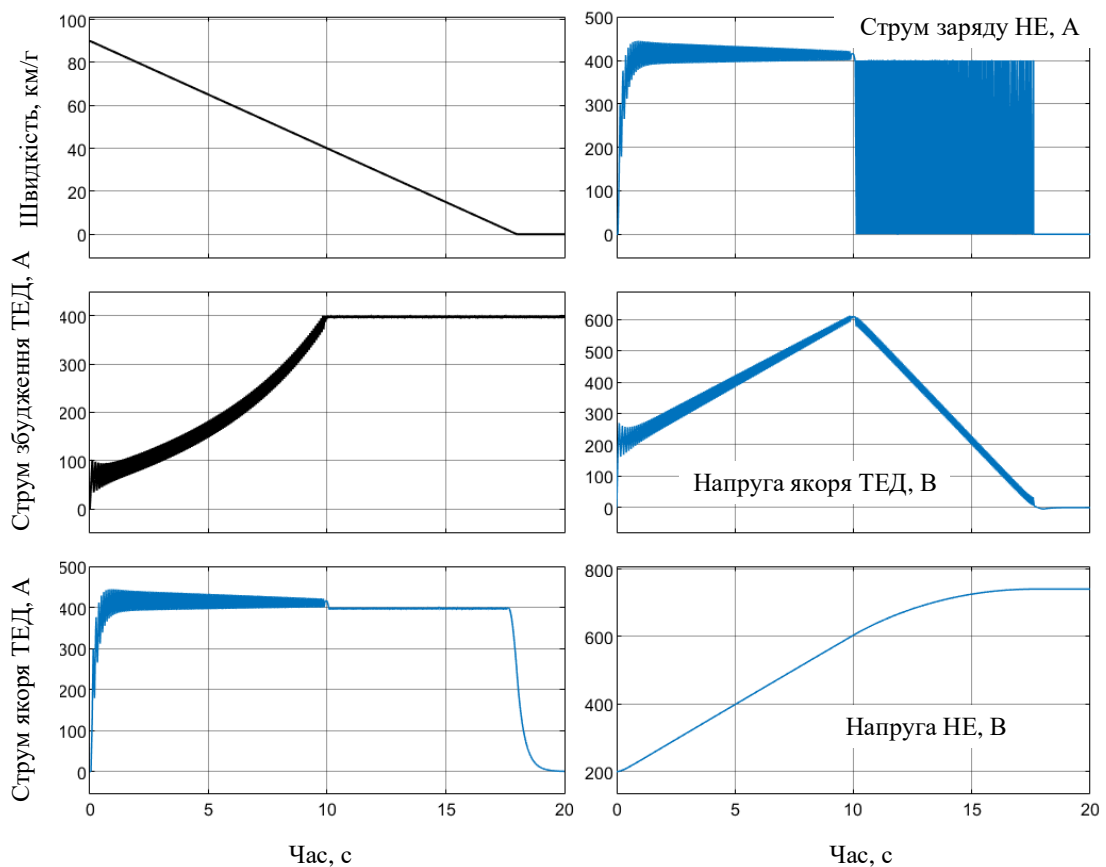


Рисунок А.20 – Результат моделювання режиму електричного гальмування з накопичувачем енергії

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсового проєкту

з дисципліни

*«НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМІ  
АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА»*

Відповідальний за випуск Ващенко Я. В.

---

Підписано до друку 04.05.2023 р.

Умовн. друк. арк. 2,5. Тираж . Замовлення № .

Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного  
транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.