

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: «Моделювання системи тягового електропостачання змінного струму з використанням миттєвих параметрів електрорухомого складу»
за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

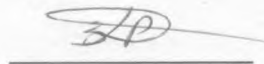
Виконав студент групи: ЕЕ2321

Керівник



/ Денис СКВОРЦОВ /

Нормоконтролер:



/ доцент Денис ЗЕМСЬКИЙ /



/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент



Дніпро – 2025

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
Освітня програма: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»
Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІСЕ



(підпис)

/Дмитро БОСИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата 01.04.2024

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

магістр з електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки

(ступінь вищої освіти)

студенту Скворцову Денису Віталійовичу

(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Моделювання системи тягового електропостачання змінного струму з використанням миттєвих параметрів електрорухомого складу

Керівник роботи: Земський Денис Романович, доктор філософії, без звання

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "01" квітня 2024 р. № 247 ст

2. Строк подання студентом 12.01.2025 р.
роботи:

3. Вихідні дані до роботи: відкриті технічні, наукові та нормативні джерела, навчальна література.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналіз існуючих методів моделювання системи тягового електропостачання.

4.2 Застосування миттєві параметри електрорухомого складу.

4.3 Моделювання системи електропостачання та аналіз результатів моделювання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

5.1 Залежність миттєвих параметрів електрорухомого складу від часу

5.2 Часова діаграма струму електрорухомого складу

5.3 Зіставлення розрахованого струму електровозу з оригіналом

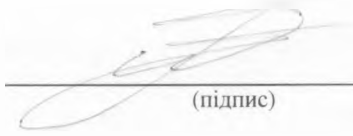
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих методів моделювання системи тягового електропостачання	10.11.2024	30 %
2	Застосування миттєві параметри електрорухомого складу	15.12.2024	60 %
3	Моделювання системи електропостачання та аналіз результатів моделювання	29.12.2024	95 %
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри.	12.01.2025	100 %
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії.	20.01.2025	

Студент

Денис СКВОРЦОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)


(підпис)

Керівник роботи

Денис ЗЕМСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)


(підпис)

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
другого (магістерського) рівня вищої освіти Скворцова Д.В. на тему:
«Моделювання системи тягового електропостачання змінного струму з
використанням миттєвих параметрів електрорухомого складу»

Складова кваліфікаційної роботи	Кількість	Обсяг
Пояснювальна записка	1	90 стор.
Графічна частина (за наявності)	-	-
Демонстраційний матеріал	1	15 слайдів
Електронна частина (за наявності): назва файлу з розширенням	-	-

Керівник:



/ Денис ЗЕМСЬКИЙ /

Нормоконтролер:



/ Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ:



/ Дмитро БОСИЙ /

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

90 с., 27 рис., 2 табл., 1 додаток, 26 джерел.

Об'єктом дослідження – порушення синусоїдальності електромагнітних процесів, а також використання активних і реактивних параметрів у розв'язанні диференційних рівнянь.

Мета роботи – метою роботи є створення математичної моделі системи тягового електропостачання змінного струму на основі миттєвих параметрів електрорухомого складу, що дозволяє підвищити точність розрахунків електромагнітних процесів та покращити ефективність управління системою.

Методи дослідження – У роботі використано аналітичні методи для формулювання математичної моделі, чисельні методи для вирішення диференційних рівнянь, а також імітаційне моделювання в середовищі MATLAB для аналізу результатів. Крім того, здійснено порівняння отриманих даних із результатами, наявними в літературі.

У дипломній роботі досліджується створення математичної моделі для аналізу електромагнітних процесів у тяговій мережі змінного струму на основі активних та реактивних характеристик, а також її застосування для обчислення миттєвих значень напруги на струмоприймачі електровоза.

Об'єктом дослідження обрано порушення синусоїдальності електромагнітних процесів, а також використання активних і реактивних параметрів у розв'язанні диференційних рівнянь.

Отримані результати дозволяють встановити параметри електрорухомого складу, що відкриває можливість застосування розробленої математичної моделі для зміннострумового електрорухомого складу в комплексному моделюванні із системою зовнішнього електропостачання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ДИФЕРЕНЦІЙНІ РІВНЯННЯ, ЗМІННИЙ СТРУМ, ТЯГОВА ПІДСТАНЦІЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ, МОДЕЛЮВАННЯ.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	13
1.1 Математичне моделювання електрорухомого складу	13
1.2 Математична модель системитягового електропостачання одноколіїної дільниці	23
1.3 Моделювання взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації з тяговою мережею.	30
1.4 Огляд актуальних проблем якості електроенергії та визначення напрямів дослідження.....	37
1.5 Висновок	38
РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ МИТТЄВІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ	40
2.1 Система тягового живлення та електрорухомого складу	40
2.2 Метод прямого синтезу електричної схеми за обмінними ознаками	46
2.3 Оцінка енергоефективності роботи споживача електричної енергії	48
2.4 Взаємозв'язок між змінними $v(i)$ та $v(u)$ у простих електричних колах	54
2.5 Висновок	56
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ	57
3.1 Алгоритм визначення властивостей нелінійного навантаження та моделювання системи електропостачання пакету імітаційного моделювання.....	57

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Скворцов Д.В			Моделювання системи тягового електропостачання змінного струму з використанням миттєвих параметрів електрорухомого складу	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник		Земський Д.Р.					7	90
Консульт						МОН України. УДУНТ Кафедра ІСЕ Група EE2321		
Н. Контр.		Потапчук І.Ю.						
Зав.кафед.		Босий Д.О.						

3.2 Реалізація моделі у програмному середовищі Matlab	64
3.3 Оцінка характеристик та показників якості електроенергії	82
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	86
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання енергоресурсів та забезпечення надійної роботи обладнання, що визначається доступністю ресурсів, рівнем технологічного розвитку, а також політичними та економічними умовами.

Електроенергія, завдяки своїм унікальним властивостям, стала основою сучасної інфраструктури, знаходячи широке застосування у промисловості, транспорті й побуті. Її виробництво та постачання суттєво впливають на економічний розвиток країни. Серед основних завдань електроенергетики – підвищення надійності функціонування обладнання та зниження втрат електроенергії на всіх етапах її використання. Особливу роль у цьому процесі відіграє підтримка належного рівня електромагнітної сумісності пристроїв, що стало важливою вимогою сучасного технологічного прогресу.

Сьогодні поширення чутливого до якості електроенергії обладнання в різних сферах діяльності, зокрема у промисловості, транспорті та побуті, створює нові виклики для енергетичних систем. У системах електропостачання залізниць змінного струму, наприклад, одночасно живляться тягові та нетягові споживачі, що призводить до порушення балансу напруги і генерації вищих гармонік. Це вимагає вдосконалення підходів до забезпечення стабільності енергосистем і сумісності всіх її елементів.

Моделювання систем електропостачання, зокрема з урахуванням нелінійного навантаження, є важливим інструментом для вирішення актуальних задач енергетики. Нелінійне навантаження, до якого належать потужні споживачі, такі як електрорухомий склад або промислові установки, генерує вищі гармоніки струму, викликає асиметрію в мережах і створює додаткові електромагнітні перешкоди. Ці явища призводять до зниження ефективності використання енергетичних ресурсів, зростання втрат у системі та порушення роботи іншого обладнання.

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Моделювання дозволяє точно аналізувати вплив нелінійного навантаження на параметри системи електропостачання. Завдяки моделюванню можна:

1. Визначити точки підвищених втрат, обрати ефективні стратегії їх мінімізації та підвищити загальну енергоефективність.
2. Аналізувати вплив гармонійних спотворень і корекція параметрів системи для зниження їхнього впливу.
3. Оцінити поведінку системи під час змін режимів роботи або підключення нових споживачів.
4. Обґрунтувати встановлення фільтрів, компенсаторів або інших пристроїв для стабілізації роботи мережі.

Таким чином, моделювання є основою для прийняття ефективних рішень у проектуванні, модернізації та експлуатації систем електропостачання, особливо в умовах ускладнення їх структури та збільшення частки нелінійного навантаження [1].

Моделі електрорухомого складу, які враховують нелінійність їхніх параметрів, зазвичай характеризуються високою складністю, що вимагає значних обчислювальних ресурсів. У цьому контексті особливо актуальною стає потреба у застосуванні простіших підходів до моделювання, які б дозволяли зберегти точність розрахунків, водночас зменшуючи вимоги до обчислювальних потужностей.

Оптимальним рішенням цієї задачі є врахування миттєвих параметрів навантаження, тобто змін опору в часі, які можуть бути задані програмно у вигляді функцій часу та використані в процесі моделювання. У науковій літературі вже є публікації, де цей підхід застосовувався для моделювання електровоза ВЛ80.

Відповідно, дане дослідження є продовженням роботи над розвитком підходів до моделювання електрорухомого складу із врахуванням миттєвих параметрів навантаження, розширюючи його застосування на інші типи локомотивів та вдосконалюючи методи опису змінних характеристик у часі.

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямкам роботи кафедри «Інтелектуальні системи енергопостачання» Українського державного університету науки і технологій і співпадає з науково-дослідною роботою «Математико-інформаційне забезпечення процесу моделювання режимів роботи систем електричного транспорту» (№ 0119U103838).

Мета роботи: Розширити функціональні можливості моделювання електрорухомого складу шляхом врахування миттєвих параметрів навантаження для різних типів локомотивів.

Для досягнення мети поставленні наступні завдання:

1. Визначити існуючі методи та підходи до моделювання систем змінного струму з електрорухомим складом.
2. Визначення миттєвих параметрів електрорухомого складу
3. Проведення моделювання системи електропостачання з аналізом результатів

Об'єкт дослідження – процес моделювання електрорухомого складу із врахуванням змін параметрів навантаження у часі.

Предмет дослідження – методи визначення та використання миттєвих параметрів навантаження для підвищення точності моделювання різних типів електровозів.

Методи дослідження: Аналіз та узагальнення наявних наукових публікацій і методик моделювання електрорухомого складу. Математичне та комп'ютерне моделювання системи електропостачання з використанням сучасного програмного забезпечення. Експериментальна перевірка моделі шляхом порівняння розрахункових даних із результатами реальних вимірювань.

Наукова новизна:

1. Вдосконалений підхід до моделювання електрорухомого складу із врахуванням миттєвих параметрів навантаження, що відрізняється від відомих

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

можливістю застосування повного миттєвого опару нелінійного навантаження.

2. Вперше визначено миттєві параметри навантаження для конкретної нової моделі електровоза, що не була раніше досліджена.

Практична цінність:

1. Розроблена методика може бути використана для моделювання і аналізу роботи різних типів електровозів, що дозволить оптимізувати їхні режими експлуатації.

2. Отримані результати сприятимуть підвищенню точності розрахунків енергетичних характеристик електрорухомого складу.

3. Модель може бути впроваджена у програмне забезпечення для технічного обслуговування та діагностики електровозів, а також у навчальні процеси для підготовки спеціалістів у галузі залізничного транспорту.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні дослідження, розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих результатів, та формулювання висновків отримані здобувачем самостійно

Апробація результатів магістерської роботи.

Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих учених «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ 2024», 27 листопада 2024 року.

Публікації.

Скворцов Д., Земський Д. Нелінійні процеси в системах електропостачання. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ 2024» : ЗБ. ТЕЗ, м. Дніпро, 27 листоп. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 84.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1 Математичне моделювання електрорухомого складу

У працях дослідників [2-7] представлено математичну модель електровоза з тяговим перетворювачем, аналогічного електровозу 2ЕЛ5. Ці моделі реалізовані за допомогою DesignLab, пакета MATLAB та інших програмних засобів. Зазвичай для спрощення моделювання руху поїзда приймається постійне значення швидкості поїзда або струму в тяговому двигуні. Однак математичний опис алгоритму управління випрямно-інверторним перетворювачем (ВІП), за винятком роботи, відсутній.

У запропонованій роботі система змінного струму для тягових потреб розглядається як сукупність двох основних підсистем [24]. Перша підсистема — це електроенергетична частина, яка включає тягову підстанцію та тягову мережу. Друга підсистема — це електрорухомий склад (ЕРС), що охоплює головну електросистему та електроніку локомотивів. Через короткочасність досліджуваних електромагнітних процесів (у межах секунд) вплив механічних компонентів локомотива не враховується [3]. Аналіз електромагнітних процесів проводиться лише в підсистемі ЕМП, тому схема тягової підстанції (рис. 1.1, а) подана еквівалентними параметрами трансформатора (єдиничне значення e_{tr} , індуктивність L_{tr} , активний опір r_{tr}) з перенесенням до вторинної обмотки [5, 6]. Альтернативний варіант схеми тягової мережі (однолінійна) зображено у вигляді каскаду з чотиріполіусників, кожен з яких представлено як відрізок довжиною 0,4 км (рис. 1.1, б).

Система диференціальних рівнянь, що описує електромагнітні процеси в електричному колі тягової підстанції, має наступний вигляд.

$$\frac{di_{mn}}{dt} = -\frac{1}{L_{mn} + L_{kc}} \left[(r_{mn} + r_{kc}) i_{mn} + r_{kc} \dot{i}_{(1)} + r_0 i_{0(1)} - e_{mn} \right], \quad (1.1)$$

$$\frac{di_{kc(n-1)}}{dt} = -\frac{1}{L_{kc}} (r_{kc} i_{kc(n-1)} + r_{kc} \dot{i}_n + r_0 i_{0(n)} - u_{c0(n-1)}), \quad (1.2)$$

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

$$\frac{d\hat{i}_{(n)}}{dt} = \frac{r_{\text{кк}}}{L_{\text{кк}}} \hat{i}_{(n)}, \quad (1.3)$$

$$\frac{du_{c0(n)}}{dt} = \frac{1}{C_0} \left(i_{\text{кк}(n-1)} - i_{\text{кк}(n)} - \frac{1}{r_0} u_{c0(n)} \right), \quad (1.4)$$

$$i_{\text{кк}(n)} = i_{\text{кк}(n-1)} - i_{0(n)} - i_{c0(n)}, \quad (1.5)$$

$$i_{c0(n)} = C_0 \frac{du_{c0(n)}}{dt}, \quad (1.6)$$

$$\hat{i}_{(n)} = i_{\text{кк}(n-1)} - \hat{i}_{(n)}, \quad (1.7)$$

$$i_{0(n)} = \frac{u_{c0(n)}}{r_0}, \quad (1.8)$$

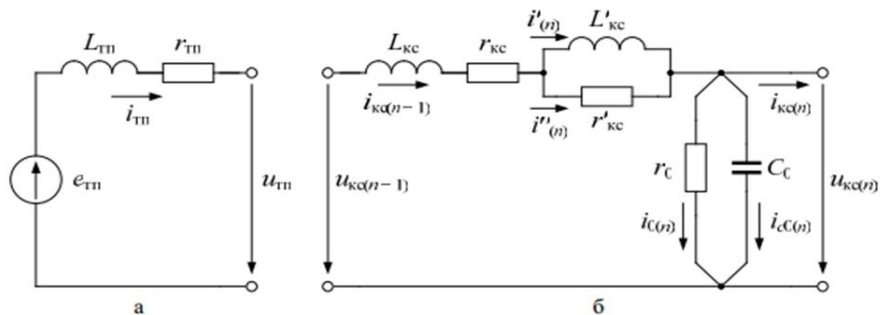


Рисунок 1.1 – Схема заміщення тягової підстанції (а), і ділянки контактної мережі в довжину 0,4 км (б)

У рівняннях (1.1) – (1.8): $u_{\text{тп}}$ – вихідна напруга на тяговій підстанції; $u_{\text{кк}(n-1)}$, $u_{\text{кк}(n)}$, $u_{c0(n)}$ — напруги на ділянках тягової мережі; $R_{\text{кк}}$, $L_{\text{кк}}$ - активний та індуктивний опір тягової мережі; C_0 , r_0 - ємнісний та активний опір ланцюга «тягова мережа - земля»; $I_{\text{тп}}$ - вихідний струм тягової підстанції;

$i_{kc(n-1)}, i_{kc(n)}, i'_{(n)}, i''_{(n)}, i_{0(n)}, i_{c0(n)}$ — струми ділянок тягової мережі; n - номер елементарної ділянки.

Напруги на ділянках тягової мережі можна знайти за формулами:

$$u_{mn} = e_{mn} - L_{mn} \frac{di_{mn}}{dt} - r_{mn} i_{mn}, \quad (1.9)$$

$$u_{kc(n)} = u_{c0(n)} = L_{kc} \frac{di_{kc(n+1)}}{dt} + r_{kc} i_{kc(n+1)} + r'_{kc} i''_{(n+1)} + r_0 i_{0(n+1)}, \quad (1.10)$$

Характеристики тягової подстанції з напругою ЛЕП 110 кВ та довжиною 13,5 км (провода АС-150) и трансформатором потужністю 40 МВ·А розраховані за [4]: $L_{ТП} = 9,6735$ мГн; $E_{ТП} = 27,5$ кВ; $r_{ТП} = 0,2497$ Ом. Характеристики ділянки тягової мережі: контактна підвіска ПБСМ1-95+2МФ-100, рейка Р-75; $r_{kc} = 5,307 \cdot 10^{-2}$ Ом; $L_{kc} = 2,48 \cdot 10^{-4}$ Гн; $r_{kc} = 0,4669$ Ом; $L'_{kc} = 4,4 \cdot 10^{-5}$ Гн; $r_0 = 2,4 \cdot 10^6$ Ом; $C_0 = 8$ нФ [5]. Довжина ділянки 10 км (25 ділянків). ПБСМ1-95+2МФ-100, рейка Р-75, один шлях;

$r_{kc} = 5,307 \cdot 10^{-2}$ Ом; $L_{kc} = 2,48 \cdot 10^{-4}$ Гн; $r_{kc} = 0,4669$ Ом; $L'_{kc} = 4,4 \cdot 10^{-5}$ Гн; $r_0 = 2,4 \cdot 10^6$ Ом; $C_0 = 8$ нФ.

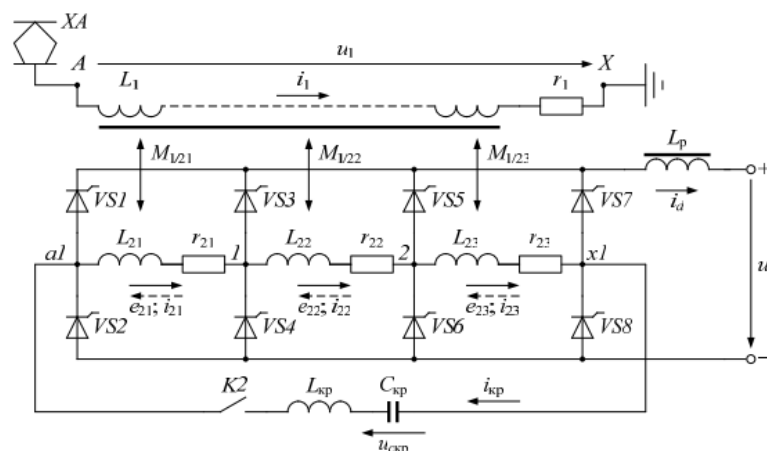


Рисунок 1.2 – Схема заміщення електровоза 2ЕЛ5

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Від струмоприймача ХА напруга контактної мережі з'являється на первинну обмотку А-Х тягового трансформатора. Вторинна обмотка забезпечена двома тяговими обмотками (на рис. 1.2), до кожної з яких входить в мережу ВП, що має вісім тиристорів VS1 - VS8. Номінальна напруга вторинних обмоток а1-1, 1-2 становить $u_{21} = u_{22} = 315$ В, секції 2-і $u_{23} = 630$ В. До узагальнень вторинної обмотки а1-х1 активований компенсатор реактивної потужності, що міститься з реактора $L_{кр}$ і батареї конденсаторів $C_{кр}$. До затискачів постійного струму «+», «-» з'єднуються паралельно два тягових двигуна електровоза 2ЕЛ5 кожен двигун має свій згладжувальний реактор L_p . На схемі заміщення позначені: u_1 , L_1 , r_1 - напруга, індуктивний опір і активний опір первинної обмотки тягового трансформатора; e_{21} , e_{22} , e_{23} , u_{21} , u_{22} , u_{23} - ЕРС і напруги секцій вторинної обмотки; i_{21} , i_{22} , i_{23} - струми секцій вторинних обмоток; $I_{кр}$ - струм компенсатора; $M_{1/21}$, $M_{1/22}$, $M_{1/23}$ - взаємоіндуктивності між первинною обмоткою та вторинною обмоткою; U_d , i_d - випрямлені напруга і струм. Не включаючи взаємоіндуктивність між вторинної обмотки, можна визначити наступні рівняння зв'язку між характеристиками тягового трансформатора:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{1/21} \frac{di_{21}}{dt} + M_{1/22} \frac{di_{22}}{dt} + M_{1/23} \frac{di_{23}}{dt}, \quad (1.11)$$

$$u_{21} = i_{21} r_{21} + L_{21} \frac{di_{21}}{dt} + M_{1/21} \frac{di_{21}}{dt}, \quad (1.12)$$

$$u_{22} = i_{22} r_{22} + L_{22} \frac{di_{22}}{dt} + M_{1/22} \frac{di_{22}}{dt}, \quad (1.13)$$

$$u_{23} = i_{23} r_{23} + L_{23} \frac{di_{23}}{dt} + M_{1/23} \frac{di_{23}}{dt}, \quad (1.14)$$

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На електровозі [25] 2ЕЛ5 використовується випрямно-інверторний перетворювач моделі ВІП-4000, який укомплектується тиристорами Т353-800. Показники тягового трансформатора [6] ОНДЦЕ-4350/25 приведені в табл. 1, особливості тиристора Т353-800 - в табл. 2. До всіх тиристорів послідовно підключений індуктивний дільник струму величиною 14 мкГн.

Ознаки згладжуючого реактора і компенсатора реактивної потужності: $L_p = 8,2$ мГн; $r_p = 0,014$ Ом; $L_{кр} = 3,249$ мГн, $C_{кр} = 433$ мкФ [3].

Математична модель тягового двигуна (ТЕД) ДТК-820 побудована на основі його схеми заміщення (рис.1.3).

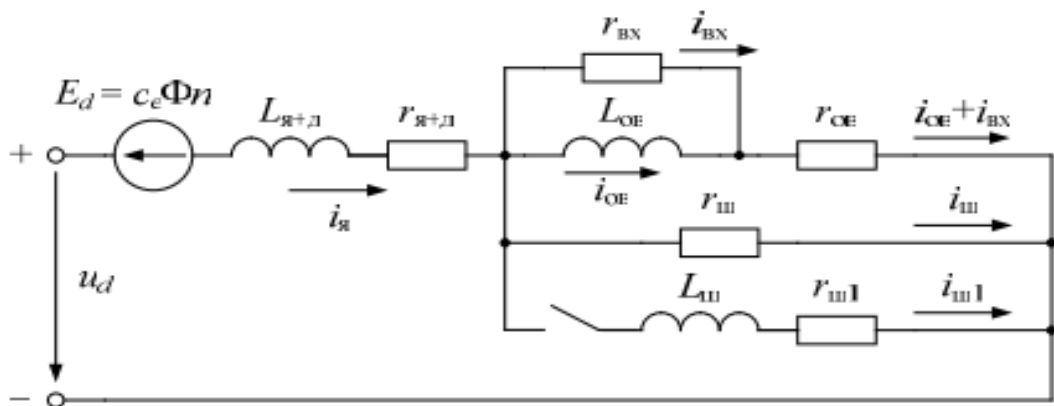


Рисунок 1.3 – Схема заміщення тягового двигуна

На рис. 1.3 показано: $c_e = 11,6$ - стала двигуна; $\Phi = f(I_я)$ - магнітний потік, Вб; n - частота обертання якоря, об/хв; $I_я$, $I_{ов}$, $I_ш$, $I_{ш1}$, $I_{вх}$ - струми якоря, обмотки збудження. Включення кола ослаблення поля ($L_{ш}, r_{ш1}$) визначається логічної змінної $f_{ш}^*$, яка дорівнює 1 або 0 для активного і неактивного стану.

Ефект вихрових струмів враховується у вигляді активного опору $R_{вх}$, шунтуючого індуктивність обмотки збудження. Величина такого опору прийнята рівною [3] $R_{вх} = 7$ Ом. Для схеми (рис. 1.3) правильна система рівнянь:

$$\frac{di_я}{dt} = \frac{1}{L_{я+д}} [u_d - c_e \Phi n - r_{я+д} i_я - r_{ш} i_{ш}], \quad (1.15)$$

$$\frac{di_{os}}{dt} = \frac{1}{L_{os}} [r_{uu} i_{uu} - r_{os} (i_{os} + i_{ex})], \quad (1.16)$$

$$\frac{di_{uu1}}{dt} = f_{uu}^* \frac{1}{L_{uu}} [r_{uu} i_{uu} - r_{uu1} i_{uu1}], \quad (1.17)$$

$$i_{uu} = i_{я} - i_{os} - i_{ex} - f_{uu}^* i_{uu1}, \quad (1.18)$$

$$i_{ex} = -\frac{1}{r_{ex}} L_{os} \frac{di_{os}}{dt}. \quad (1.19)$$

Технічні дані тягового двигуна ДТК-820 (табл. 1) обрано з [6, 7]. Магнітні параметри ТЕД обрані [6]. Опір кола вихрових струмів $R_{ex} = 0,0483$ Ом. У побудованій моделі швидкість руху поїзда визначається шляхом інтегрування рівняння руху [8], в якому режимі тяги при відсутності гальмування має вигляд:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{30} (f_k - w). \quad (1.20)$$

де v - швидкість руху поїзда, км / год;

f_k - питома сила тяги, Н / кН;

w - питома сила опору руху поїзда, Н / кН.

Основний питомий опір руху електровоза і вагонів, Н/кН, визначається за формулами [9]:

- для електровоза 2ЕС5К (2ЕЛ5) на безстиковій колії

$$w_0' = 0,65 + 0,00906v + 0,000227v^2, \quad (1.21)$$

- для 4-вісних вагонів на роликкових підшипниках

$$w_0'' = 7,0 + (3 + 0,09v + 0,002v^2) / q_0, \quad (1.22)$$

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $q_0 = 17,5$ т - середня розподілена маса на вісь вагона. При моделюванні визначаємо силу тяги постійною величиною ($F_k = const$).

Таблиця 1.1 – Показники тягового двигуна ДТК-820

Характеристики	Основні показники		Познач.
	Велич.	Од.виміру	
Активний опір обмотки якоря та додаткових плюсів	0,0237	Ом	$r_{я+д}$
Індуктивність обмотки якоря та додаткових плюсів	$0,52 \cdot 10^{-3}$	Гн	$L_{я+д}$
Активний опір обмотки збудження	0,0069	Ом	$r_{ов}$
Індуктивність обмотки збудження	$0,85 \cdot 10^{-3}$	Гн	$L_{ов}$
Активний опір резистора постійного шунтування	0,294	Ом	$r_{ш}$
Індуктивність індуктивного шунта	$2,2 \cdot 10^{-3}$	Гн	$L_{ш}$
Активний опір резистора ослаблення збудження	0,0039 0,017 0,058	Ом	$r_{ш1}$ $r_{ш2}$ $r_{ш3}$

Відповідно [8], рівняння (1.20) може бути внесено у формі:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_k - g(m_{en} \omega_0(v) + m_e \omega_0(v))}{30(m_{en} + m_e)g}, \quad (1.23)$$

В результаті інтегрування рівняння (1.23) отримуємо швидкість руху поїзда в км/год. Тоді частота обертання ТЕД, об/хв:

$$n = \frac{\mu}{0.188D_k} v, \quad (1.24)$$

У формулі (1.24) $\mu = 4,19$ - передаточне число редуктора; $D_k = 1205$ мм - діаметр бандажа колісної пари. Рівняння (1.15)-(1.19), (1.23), (1.24) складають повну систему рівнянь кола тягового двигуна.

Метод керування [10] тиристорами ВПІ в режимі тяги приведено в табл. 2. Позитивний напрям ЕРС e_2 вторинної обмотки трансформатора (рис. 1.2)

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показано суцільною стрілкою, а негативне - штриховий. Формування імпульсів ВІП (рис.1.4) здійснюється шляхом порівняння опорного пилообразного сигналу $U_{on}(t)$ амплітудою 180 В (180 ел. Град.) з двома рівнями спрацьовування. Перший рівень чисельно дорівнює куту α , а другий - величиною $\alpha + \tau_i$, де τ_i - тривалість імпульсу, виражена в градусах. Для створеного модельно [11] ВІП $\tau_i = 15,3^\circ$ (850 мкс) для кутів α_0, α_p ; $\tau_i = 45^\circ$ (2500 мкс) для кутів α_{03} .

У табл. 1.2: α_0 - нерегульований по фазі імпульс; α_{03} - нерегульований затриманий по фазі імпульс; α_p - регульований по фазі імпульс. Опорний пилкоподібний сигнал можна обчислити за формулою:

$$u_{on}(t) = \frac{180}{\pi} \arctg \left(tg \omega t + \frac{\pi}{2} \right) + 90, \quad (1.25)$$

Таблиця 1.2 – Метод керування тиристорами ВІП в режимі тяги

Зона регулювання	Напрямок ЕРС e_2	Номера тиристорів ВІП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
I	+				α_p	$\alpha_0; \alpha_p$			
	-			α_0			α_p		
II	+		α_p		α_{03}	α_0			
	-	α_p		α_{03}			α_0		
III	+				α_p		α_{03}	α_0	
	-			α_p		α_{03}			α_0
IV	+		α_p		α_{03}			α_0	
	-	α_p		α_{03}					α_0

де $\omega = 2\pi f$ - кутова частота мережі ($f = 50$ Гц), рад/с. Для опису алгоритму роботи ВІП складені рівняння, в яких застосовані символи « \wedge » (логічне І), « \vee » (логічне АБО), « \rightarrow » (логічне ЯКЩО ... ТО). З метою формалізації опису методу введемо такі логічні величини: - змінні вибору зони регулювання z_j , де $j = 1 \dots 4$ - номер зони. Якщо відповідна змінна z_j дорівнює одиниці, електровоз

працює на j -й зоні регулювання; - функції формування імпульсів f_a^* , де α - кут управління ВП. При $f_a^* = 1$ формується прямокутний імпульс тривалістю $t_{\text{и}}$ з затримкою від початку напівперіоду, що дорівнює α ; - функції розподілу імпульсів f_k^* , де $k = 1 \dots 8$ - номер тиристора ВП. При $f_k^* = 1$ на тиристор з номером

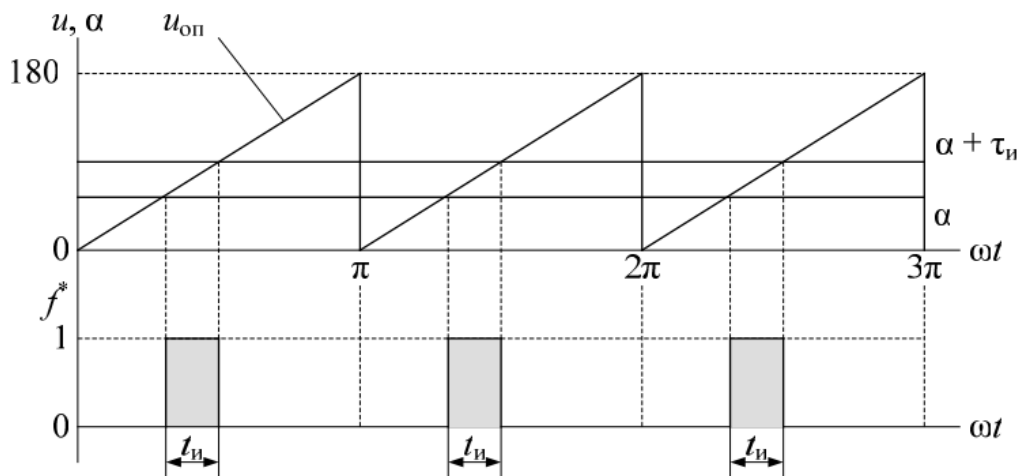


Рисунок 1.4 – Діаграма управління імпульсами за фазовим кутом

Логічні функції формування імпульсів ВП f_a^* :

$$\begin{aligned}
 f_{\alpha 0}^* &= (u_{ax} > 0) \cap (u_{on} - \alpha_0 \geq 0) \cap (\alpha_0 + \tau_u - u_{on} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi + \alpha 0}^* &= (u_{ax} > 0) \cap (u_{on} - \alpha_0 \geq 0) \cap (\alpha_0 + \tau_u - u_{on} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\alpha 03}^* &= (u_{ax} > 0) \cap (u_{on} - \alpha_{03} \geq 0) \cap (\alpha_{03} + \tau_u - u_{on} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi + \alpha 03}^* &= (u_{ax} > 0) \cap (u_{on} - \alpha_{03} \geq 0) \cap (\alpha_{03} + \tau_u - u_{on} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\alpha p}^* &= (u_{ax} > 0) \cap (u_{on} - \alpha_p \geq 0) \cap (\alpha_p + \tau_u - u_{on} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi + \alpha p}^* &= (u_{ax} > 0) \cap (u_{on} - \alpha_p \geq 0) \cap (\alpha_p + \tau_u - u_{on} \geq 0) \rightarrow 1.
 \end{aligned} \tag{1.26}$$

При невиконанні умов (1.26) усі відповідні логічні функції дорівнюють нулю.

Створена математична модель в пакеті імітаційного моделювання. Сила тяги і початкова швидкість руху поїзда [10] (по тяговій характеристиці), маса складу, номер зони регулювання, кути регулювання ВП встановлюються

тому повна компенсація реактивної потужності в даному режимі не забезпечується. При зазначених умовах моделювання отримані наступні параметри: коефіцієнт потужності електровоза 0,856; коефіцієнт несинусоїдальності напруги на струмоприймачі 6,1%; коефіцієнт спотворення первинного струму електровоза 0,9671; коефіцієнт потужності на шинах тягової підстанції 0,859. Характер електромагнітних процесів і результати моделюванняв цілому відповідають даним [11, 3-5], отриманим в що дозволяє вважати розроблену модель правильної.

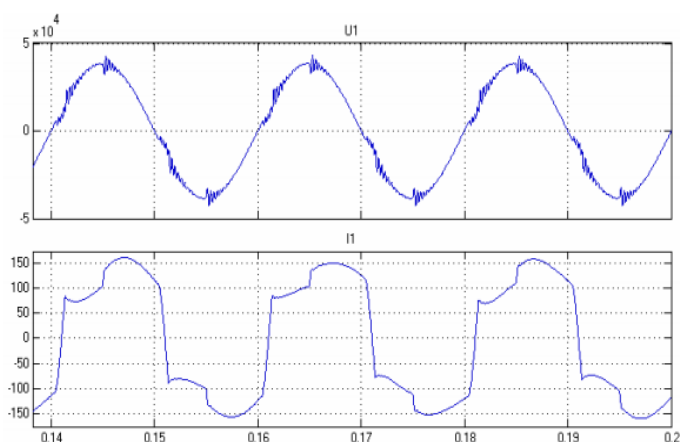


Рисунок 1.6 – Результати комп’ютерного моделювання: напруга u_1 та струм i_1 на струмоприймачі електровоза

Розроблена математична модель електротягового приводу електровоза 2ЕЛ15 сприяє досліджувати електромагнітні процеси з урахуванням несинусоїдності напруги на струмоприймачі та нелінійності випрямленого струму кола.

1.2 Математична модель системитягового електропостачання одноколійної дільниці

Математична модель системи тягового електропостачання одноколійної дільниці з однобічним електроживленням і двома електровозами на дільниці дана на рис. 1.7. Для оцінки ступеня впливу гармонік тягового струму на роботу рейкових кіл пропонується скористатися спрощеною схемою заміщення відрізка Δx тягової мережі [1], представленої на рис. 1.8, де тягова

						02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			23

контактна мережа, $Z_{із}$ – опір ізоляції контактної мережі, що враховує заземлення на рейки різних залізничних конструкцій (головним чином опор контактної мережі, постів секціонування, роз'єднувачів, розрядників і т.д.), Z_6 – опір баласту, – опір струму витoku рейкових проводів через шпали, баласт і брезент.

Ця схема заміщення є досить простою та зручною для аналізу розподілу гармонік, що містяться в тяговому струмі, по довжині фідерної зони та для врахування їхнього впливу на роботу пристроїв автоматики, зокрема рейкових кіл (РК), їх елементів та системи автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС).

В загальному випадку опір проводів та ізоляції змінюється в залежності від погодних та експлуатаційних умов у межах зазначених значень. Опір баласту (ізоляції рейкових ниток) складається з опорів рейок — рейкове скріплення — шпала — баласт — земляне полотно — земля, і може бути визначений за формулою:

$$r_6 = r_{пк} + \frac{\rho}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{1}{a_{екв} \cdot a_p} \right), \quad (1.27)$$

де ρ — питомий опір ґрунту; $a_{екв}$ — еквівалентний радіус земляного полотна, що дорівнює 1 м для одноколійної ділянки та 2 м для двоколійної [1]; a_p - постійна поширення рейкової мережі; $r_{пк}$ — перехідний опір рейок — земля.

Опір ізоляції рейкового кола становить:

при щебеновому баласті — 2 Ом/км,

при сухому і слабо промерзлому баласті — 50 Ом/км,

при сильно промерзлому — від 50 до 100 Ом/км.

Мінімальний опір ізоляції для нормального функціонування рейкових кіл повинен становити не менше 1 Ом/км.

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перехідний опір рейка – земля $r_{пк}$ залежить від типу баласту і має такі значення:

0,5...1 Ом.км при чистому щебеневому баласті,

0,3...0,5 Ом.км при брудному щебеневому баласті,

0,15...0,3 Ом.км при піщаному баласті,

0,1...0,15 Ом.км при баласті з домішкою глини.

При збільшенні вологості перехідний опір зменшується в 1,5...2,5 рази, а при промерзанні — збільшується в 3...10 разів [6–8].

На електрифікованих залізницях до рейок приєднуються споруди та конструкції, що мають зв'язок із землею, такі як опори контактної мережі, пости секціонування (ПСК), роз'єднувачі, розрядники, світлофори, релейні шафи тощо. Заземлення виконуються сталевим проводом діаметром 12 мм при електричній тязі постійного струму та 10 мм при електричній тязі змінного струму. У особливо небезпечних місцях (наприклад, опори контактної мережі з секційними роз'єднувачами, розрядниками, ПСК, опори і конструкції в небезпечних зонах, а також на переїздах, мостах і шляхопроводах) заземлення здійснюють подвійним проводом.

Опір залізобетонних опор:

В суху погоду при високій температурі навколишнього середовища та сильних морозах опір становить $10...10^3$ кОм,

При вологій погоді та дощі опір знижується до 0,5...0,8 кОм,

Після дощу опір повертається до початкового значення через 10...15 год.

Таким чином, у дощову погоду струми витоку сигнального та тягового струму значно зростають, а опір залізобетонних конструкцій знижується до

кількох сотень Ом [1]. Опір заземлення залізобетонних опор варіюється в межах 10...40 000 Ом. Основним фактором, що впливає на цей опір, є провідність баласту в шарі між хомутами та арматурою, а також наявність електроізоляційних покриттів на фундаментах і заставних деталях. Опір заземлення релейних шаф і світлофорних щогл становить 20...3000 Ом.

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Опір рейкової мережі включає активний і індуктивний опір рейок, опір електричних з'єднувачів та опір вторинних обмоток дросель-трансформаторів, що використовуються для пропуску зворотного тягового струму. Також до цього опору відноситься опір взаємодукції між контактною мережею і рейками.

Схема заміщення (рис. 1.7) характерна для кожної гармоніки, що міститься у зворотному тяговому струмі. Нижче розглядається питання розподілу напруги та струмів по довжині тягової мережі для випадку, коли ділянка є однорідною. Система рівнянь для струмів і напруг в тяговій мережі, складена за законами Кірхгофа, має вигляд:

для тягової мережі

$$\begin{cases} \dot{U}_{kp1} = \dot{I}_{k1} \cdot Z_k + \dot{U}_{kp2} + \dot{I}_{p1} \cdot Z_p, \\ \dot{I}_{k1} = \dot{I}_{k2} + \dot{U}_{kp2} / Z_{i3} \end{cases}, \quad (1.28)$$

для контуру котактна мережа – земля

$$\begin{cases} \dot{U}_{k1} = \dot{I}_{k1} \cdot Z_k + \dot{U}_{k2}, \\ \dot{I}_{k1} = \dot{I}_{k2} + \dot{U}_{kp2} / Z_{i3} \end{cases}, \quad (1.29)$$

- для контуру колійна мережа – земля

$$\begin{cases} \dot{U}_{p1} = -\dot{I}_{p1} \cdot Z_p + \dot{U}_{p2}, \\ \dot{I}_{p1} = \dot{U}_{p2} \cdot \frac{1}{Z_{i6}} + \dot{I}_{p2} \end{cases}, \quad (1.30)$$

де \dot{U}_{kp1} , \dot{U}_{kp2} – напруга в контурі контактна мережа–рейки, \dot{U}_{p1} , \dot{U}_{p2} – напруга між рейками і землею; \dot{U}_{k1} , \dot{U}_{k2} – напруга в контурі контактна мережа

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– земля; $I_{\kappa 1}, I_{\kappa 2}$ – струму контактній мережі; I_{p1}, I_{p2} – струм в рейковій мережі (зворотний тяговий струм) на початку і в кінці кола відповідно. На даний момент існують два варіанти електропостачання залізничних ліній: одно- і двобічне. Запропонована схема заміщення системи тягового електропостачання є зручною для використання при моделюванні ділянок з одностороннім живленням. У випадку двобічного електропостачання, коли електровози в межах фідерної зони отримують живлення від двох джерел (тягових підстанцій), кожен елемент навантаження буде підключений до двох джерел живлення. У реальному житті, при нерівномірному розподілі навантаження, споживаний струм буде більшим від тієї підстанції, від якої струм споживається найбільше. Внаслідок цього точка струморозподілу зміщуватиметься в бік тієї тягової підстанції, від якої споживається більший струм. Систему двобічного електропостачання можна умовно поділити на дві окремі системи з одностороннім живленням, причому довжина отриманих фідерних зон буде обмежена точкою струморозподілу. Криві струму і напруги в другій половині ділянки живлення будуть будуватися з тими ж самими значеннями, але з протилежними знаками (тобто дзеркально відображені відносно точки струморозподілу і побудовані в негативній півплощині). Знак у цьому випадку буде вказувати на те, від якої тягової підстанції відбувається живлення. Для спрощення моделювання можна вважати, що навантаження зосереджене в конкретній точці ділянки. Падіння напруги в колі електровоза визначається за формулою:

$$\dot{U}_{kp2} = I_{\kappa 2} \cdot Z_{el}, \quad (1.31)$$

Струм в контактній мережі на початку лінії

$$I_{\kappa 1}(x) = I_{\kappa 2} + \frac{\dot{U}_{k2}}{Z_{ib}(x)}, \quad (1.32)$$

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Струм витоку через ізоляцію опор є лінійною залежністю і описується виразом

$$\dot{I}_{yіз}(x) = \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{із}(x)}, \quad (1.33)$$

Зворотний тяговий струм в рейках в районі тягової підстанції визначається виразом

$$\dot{I}_{p1}(x) = \dot{I}_{\kappa 2} + \dot{I}_{yіз}(x) - \dot{I}_y, \quad (1.34)$$

Потенціал рейок біля електровоза

$$\dot{U}_{p2}(x) = \dot{I}_y \cdot \dot{Z}_\delta(x), \quad (1.35)$$

Потенціал рейок біля тягової підстанції

$$\dot{U}_{p1}(x) = -\dot{I}_{p1}(x) \cdot Z_p(x) + U_{p2}(x), \quad (1.36)$$

Метод моделювання розподілу тягового струму та його гармонійних складових, а також потенціалу системи тягового електропостачання з однобічним електроживленням фідерної зони полягає у покроковому розрахунку напруг і струмів за формулами (1.31–1.35). Крок Δx визначається перед початком моделювання. Алгоритм виконання операцій наведено на рисунку 1.9.

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

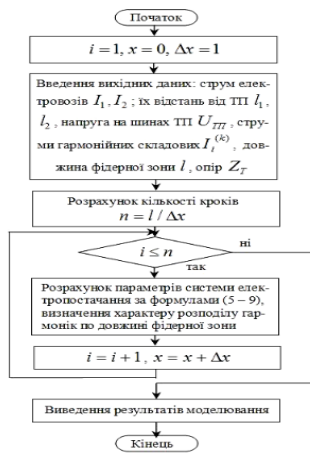


Рисунок 1.9 – Послідовність виконання операцій при моделюванні розподілу струмів та напруг по довжині фідерної зони при однобічному електроживленні

1.3 Моделювання взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації з тяговою мережею

Для передачі енергії від ЕРС під час електричного гальмування до контактної мережі в централізованій та розподіленій системі тягового електропостачання необхідно виконати певну умову [2]:

$$U_{км}(t) < U_c(t) < U_{км}^{\max}, \quad (1.37)$$

де $U_{км}(t)$, $U_c(t)$, $U_{км}^{\max}$ — це відповідно напруги в контактній мережі, на струмоприймачі рекуперуючого ЕРС і граничне значення напруги в контактній мережі.

Виконання умови (1.37) щодо нижньої межі забезпечується за допомогою відповідних регулювань у силовому колі ЕРС і залежить від параметрів гальмування, а виконання верхньої межі визначається рівнем тягового навантаження СТЕ в зоні рекуперації. Тобто умова (1.37) за верхньою межею виконується головним чином при

$$I_{\text{тяг}}(t) \geq I_{\text{рек}}(t), \quad (1.38)$$

де $I_{\text{тяг}}(t)$, $I_{\text{рек}}(t)$ — це струм тягового навантаження в зоні рекуперації та струм рекуперації ЕРС.

Порушення умови (1.38) призводить до зростання напруги на струмоприймачі рекуперуючого ЕРС. Для виконання лівої границі умови (1.37) повернення енергії в контактну мережу припиняється, що веде до "зриву" рекуперації. У такому випадку ЕРС переходить на реостатне гальмування, де надлишкова енергія утилізується в гальмівних реостатах, що знижує енергетичну ефективність через збільшення втрат.

Основним методом оцінки ефективності рекуперації в розосередженій СТЕ є моделювання взаємодії ЕРС з СТЕ в режимі рекуперації та визначення факторів, що на це впливають. Для цього потрібно вдосконалити модель системи електричної тяги при розподіленому живленні, що складається з таких елементів:

- схема заміщення ЕРС в режимі тяги та рекуперації;
- схема заміщення розподіленої СТЕ;
- аналітичні вирази, що пов'язують електричні параметри СТЕ.

При побудові моделі припускається, що розподіл енергії рекуперації в системі електричної тяги є усталеним процесом, визначеним інерційними режимами руху поїздів, тобто електричні перехідні процеси не враховуються.

Режим рекуперації на ЕРС має особливості, оскільки ЕРС при рекуперації є нестабільним джерелом енергії, що рухається в просторі, на відміну від стаціонарних джерел [2].

При побудові моделі ЕРС в режимі рекуперативного гальмування слід розрізняти два випадки рекуперації електроенергії: гальмування для обмеження швидкості на затяжному уклоні при сталому русі, коли реалізується потенціальна енергія поїзда, а генерація енергії є тривалою; гальмування для зупинки або стабілізації швидкості, коли реалізується кінетична енергія поїзда під час короткочасної рекуперації.

У першому випадку генерація енергії стабільна і триває достатньо довго, що характерно для магістрального ЕРС на затяжних спусках, де рекуперація

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

може тривати від 2 до 20 хвилин. У другому випадку енергія має імпульсний характер, що характерно для циклічних гальмувань при зупинках або підтримці стабільної швидкості, наприклад, в електропоїздах, метрополітенах, тролейбусах і трамваях, де генерація триває від 0,05 до 1,5 хвилини.

На сучасному ЕРС з плавним регулюванням потужності при гальмуванні в діапазоні швидкостей $v_p < v < v_{\max}$ у режимі рекуперації система автоматики підтримує постійну потужність рекуперації для забезпечення сталості гальмівного зусилля (рис. 1.10 б). При коливаннях напруги в контактній мережі в межах допустимих значень $U_{\text{км}}^{\min} \dots U_{\text{км}}^{\max}$ відбуваються коливання рекуперативного струму.

$$I_{\text{рек}} = P_{\text{рек}} / U_{\text{км}}^{\max} = f(U_{\text{км}}), \quad (1.39)$$

Отже, струм рекуперації в кожен момент часу залежить від напруги на струмоприймачі ЕРС. В результаті, поїзне навантаження є нелінійним і має моделюватися як джерело сталої потужності або джерело струму, яке регулюється напругою

Якщо діапазон коливань напруги на струмоприймачі незначний, то ЕРС в режимі рекуперації можна вважати ідеальним джерелом струму. Для стабілізації струму на ЕРС постійного струму з дискретним регулюванням потужності використовується система протизбудження сумісно із системою автоматичного управління рекуперативним гальмуванням. Тому в діапазоні швидкостей $v_p < v < v_{\max}$ таку ЕРС також можна розглядати як ідеальне джерело струму.

При рекуперації енергії зі зниженням швидкості руху в діапазоні $v_{\min} < v < v_p$ кінетична енергія поїзда та генерована потужність зменшуються пропорційно швидкості. При $v < v_{\min}$ рекуперація припиняється, і в цьому режимі ЕРС працює як джерело струму, умовно кероване швидкістю руху, може замінюватися наступним джерелом струму

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

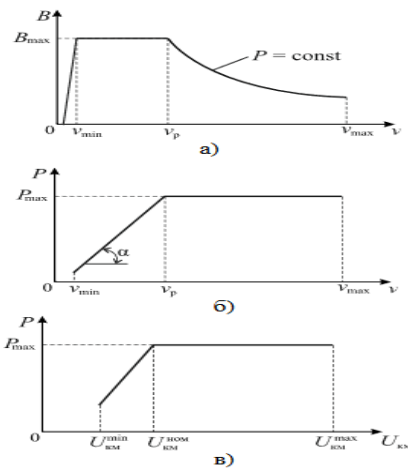


Рисунок 1.10 – Характеристики ЕРС з плавним регулюванням потужності в режимі рекуперації.

$$I = \begin{cases} I_{рек}(v) = const, & \text{при } v_p < v < v_{max} \\ I_{рек}(v) = v \cdot tg\alpha, & \text{при } v < v_p \end{cases}, \quad (1.40)$$

При зниженні напруги в контактній мережі рекуперативна потужність ЕРС автоматично зменшується через струмове обмеження для запобігання перегріву обладнання (рис. 1.10, в).

Як приклад, розглянемо розподіл енергетичних потоків в розосередженій СТЕ постійного струму 3,3 кВ, що включає дві ТП з централізованим живленням та один локальний пункт живлення з вітрогенератором ВТП. Припустимо, що на ділянці знаходяться два поїзди: один у режимі рекуперації, а інший — у режимі тяги. Схема живлення ділянки та миттєва схема заміщення для цього випадку наведені на рис. 1.11.

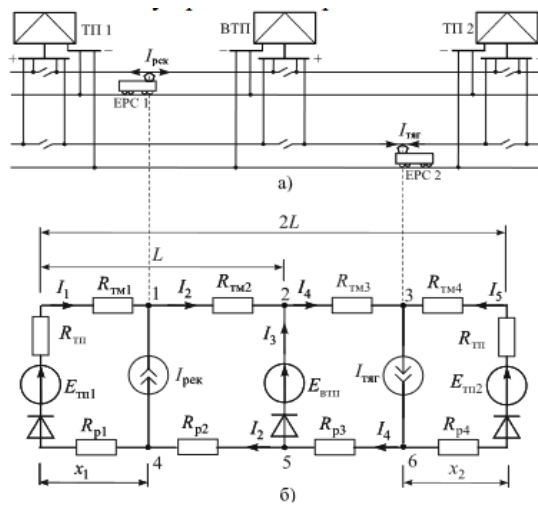


Рисунок 1.11 – Схема живлення а — ділянки розосередженої СТЕ б — миттєва схема заміщення

Параметри ділянки такі: контактна підвіска М120+2МФ100 з питомим опором тягової мережі $r_{км} = 0,056$ Ом/км; рейки Р65 з питомим опором $r_{рм} = 0,0155$ Ом/км; напруга холостого ходу на шинах ТП 1, ТП 3 та вітроустановки ВТП однакова і становить 3,3 кВ [2]; внутрішні опори тягових підстанцій з централізованим живленням однакові і рівні $R_{ТП1} = R_{ТП2} = 0,042$ Ом; ТП з вітрогенератором вважається ідеальним джерелом напруги ($R_{ВТП} = 0$) довжина міжпідстанційних зон 15 км.

Припускаємо, що всі ТП не обладнані пристроями для прийому надлишкової енергії рекуперації (інверторами, накопичувачами), що характерно для більшості електрифікованих ділянок. Струм рекуперації ЕРС 1 замикається лише через коло ЕРС 2 (в зоні рекуперації немає інших поїздів у режимі тяги). Через однобічну провідність коло є нелінійним, тому його розрахунок здійснювався чисельним методом.

У роботі на основі багатоваріантних розрахунків миттєвої схеми ділянки з розподіленим електропостачанням (рис. 1.11, б) було визначено розподіл струмів живлячих ТП в тяговому та рекуперативному режимах. Для оцінки ефективності використання енергії рекуперації введено коефіцієнт

використання струму рекуперації $k_{рек}$, який характеризує можливість реалізації струму рекуперації відносно струму тягового споживання на ділянці.

$$k_{рек} = I_{рек} / I_{тяг}, \quad (1.41)$$

де $I_{рек}$ та $I_{тяг}$ — це відповідно струми рекуперації та тяги ЕРС.

Для СТЕ, що не мають пристроїв прийому надлишкової енергії рекуперації, за умовою (1.38) коефіцієнт $k_{рек}$ знаходиться в межах $0 \leq k_{рек} \leq 1$. Однак навіть якщо СТЕ здатні здійснювати реверс надлишкової рекуперативної енергії до первинної енергосистеми, не можна стверджувати, що $k_{рек} \geq 1$, оскільки ефективність цього процесу значною мірою залежить від завантаження системи зовнішнього електропостачання у вузлі приєднання СТЕ.

При моделюванні різних відстаней між поїздами було визначено залежність напруги на струмоприймачах ЕРС в режимі рекуперації $U_c^{рек}(k_{рек})$ та тягової напруги $U_c^{тяг}(k_{рек})$ (рис. 1.12, а). З цих залежностей випливає, що з ростом відстані між поїздами ефективність використання рекуперативної енергії зменшується, оскільки напруга на струмоприймачі рекуперативного ЕРС значно збільшується.

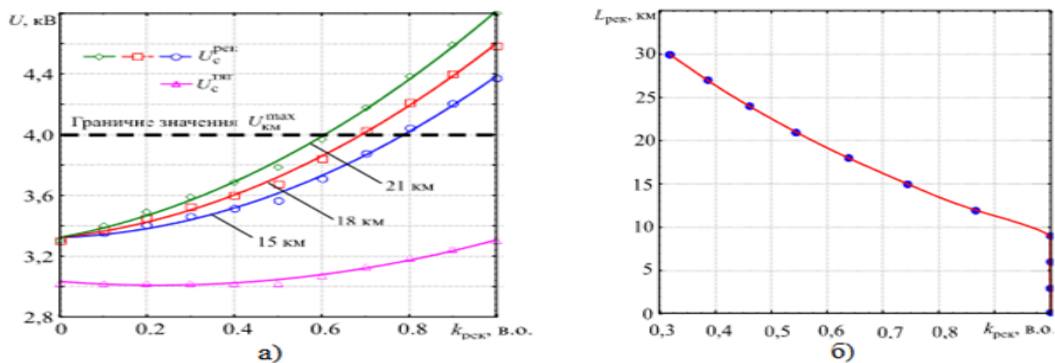


Рисунок 1.12 – а - залежності напруги на струмоприймачах
б - ефективної зони рекуперації від відносного струму рекуперації

При відстані 15 км рекуперація енергії в мережу стає неможливою при струмі, що складає близько 80% від тягового струму ЕРС 2. Тому для утилізації надлишкового рекуперативного струму на ЕРС 1 необхідно застосовувати паралельну схему реостатного гальмування. Водночас, функція $U_{рек}(k)$ не залежить від відстані між ЕРС.

Моделювання також показало ефективну зону рекуперації $L_{рек}$ в залежності від коефіцієнта $k_{рек}$ (рис. 1.12, б). Ця зона визначається відстанню між поїздами в режимі тяги та рекуперації: $L_{рек} = 2L - x_1 - x_2$ (де x — відстань між поїздами). Зона рекуперації забезпечує стійкий генераторний струм ЕРС та виконання умови (1.37) за правою границею на всьому діапазоні $k_{рек}$. При відстані між поїздами $2L$ струм рекуперації в мережу може становити лише 30% від струму поїзда в режимі тяги через великий опір тягової мережі.

Для відстані між поїздами менше 9,75 км можна реалізувати рекуперацію з будь-яким струмом, що забезпечує ефективну рекуперацію з прийнятними втратами енергії.

Одним із способів розширення ефективної зони рекуперації є плавне регулювання напруги на шинах ТП, що підтримує стабільний режим рекуперації з напругою на струмоприймачі 3950 В.

Основні фактори, що впливають на ефективність використання рекуперативної енергії в розосередженій СТЕ:

Співвідношення струмів поїздів в режимах тяги та рекуперації;

Відстань між ЕРС у цих режимах;

Можливість плавного регулювання напруги на шинах ТП в залежності від $k_{рек}$.

Для покращення рекуперації електроенергії в розосередженій СТЕ необхідно розробити ефективні принципи розподілу генерації між паралельно працюючими ТП та ЕРС в режимі рекуперації, зокрема через оптимальні алгоритми регулювання напруги на шинах ТП, що дозволить перетікати

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надлишковому струму до віддалених поїздів та знизить ймовірність зривів рекуперації.

1.4 Огляд актуальних проблем якості електроенергії та визначення напрямів дослідження

Економіка України залишається однією з найбільш енергоємних у світі, що відкриває значний потенціал для підвищення енергоефективності та зниження енергоспоживання. Впровадження заходів з енергоефективності є найбільш економічно виправданим підходом для зменшення витрат енергії, скорочення шкідливих викидів в атмосферу, підвищення конкурентоспроможності економіки та забезпечення енергетичної безпеки.

Як показано на рис. 1.13 за даними Міністерства енергетики України, згідно з [18] «Прогнозним балансом електроенергії об'єднаної енергосистеми України на 2021 рік» від 24.09.2021, було вироблено 156 975 млн кВт·год електроенергії, а споживання склало 151 945 млн кВт·год (збільшення на 5,3 % порівняно з 2020 роком). Прогноз на 2022 рік згідно з [19] «Прогнозним балансом електроенергії об'єднаної енергосистеми України на 2022 рік» від 11.11.2021 передбачав виробництво на рівні 160 997 млн кВт·год та споживання 153 700 млн кВт·год. Водночас втрати електроенергії в електромережах оцінюються приблизно у 10 %.

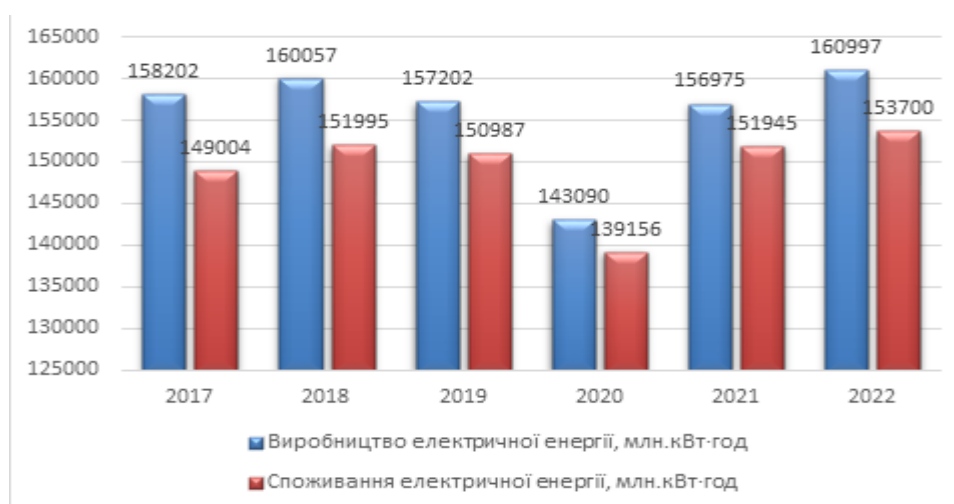


Рисунок 1.13 – Гістограма виробництва та споживання електричної енергії в Україні

Зі зростанням попиту та вартості електроенергії виникає необхідність у підвищенні енергоефективності та надійності роботи елементів електромережі та електроприймачів. Проте сьогодні широко використовуються пристрої з нелінійними характеристиками, що викликає спотворення синусоїдальної форми напруги в мережі.

Відхилення від синусоїдальної форми напруги збільшують втрати енергії, скорочують термін служби обладнання та погіршують роботу систем автоматизації, зв'язку і керування. Визначення ключових параметрів пристроїв є важливим для надійної роботи електропостачання. Проектування будь-якої системи ґрунтується на прогнозах напруги, струму та рівнях завад, які генерує обладнання, для загальної оцінки електромагнітного середовища. При цьому важливою є точність моделі електропостачання, особливо за наявності нелінійних елементів.

Моделювання таких систем зазвичай вимагає або детального врахування нелінійностей, або спрощення через заміну нелінійного навантаження ідеальним джерелом струму, що породжує компроміс між простотою і точністю моделі.

1.5 Висновок

Проведений аналіз проблематики моделювання електрорухомого складу для дослідження несинусоїдних режимів роботи показав, що наявні моделі мають складну структуру, яка може ускладнювати розрахунки. Це призводить до підвищення ризику появи похибок та значних витрат часу на обчислення.

Для вирішення цієї проблеми сформульовано такі задачі дослідження:

Розробити метод розрахунку миттєвих параметрів електрорухомого складу, що забезпечує точність та спрощення обчислень.

Створити комп'ютерну модель системи тягового електропостачання, яка враховує миттєві параметри.

Провести дослідження адекватності розробленої моделі для забезпечення точності розрахунків системи тягового електропостачання.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Результати вирішення зазначених задач будуть представлені у наступних розділах дослідження.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

2 ЗАСТОСУВАННЯ МИТТЄВІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

2.1 Система тягового живлення та електрорухомого складу

Блок моделювання відтворює електрорухомий склад разом із тяговою мережею, замінюючи їх еквівалентною схемою (рис. 2.1). Ця схема включає контактну підвіску і рейкову колію, яка заземлена для забезпечення шунтування. Для симуляції тягового навантаження використано метод, який виражає параметри електрорухомого складу через активну та обмінну характеристики, тобто як функції активного опору та індуктивності складу, що змінюються залежно від струму ($r_e(i_e)L_e(i_e)$) або від часу ($r_e(t),L_e(t)$).

Проте, застосування характеристик, залежних від струму, має певні обмеження: при зміні конфігурації моделі це може суттєво змінити миттєве значення струму електровоза. Внаслідок цього можливий вихід значення за межі, встановлені характеристиками, або неповне проходження певних областей, що призводить до спотворення результатів аналізу. Наприклад, при модифікації конструкції електричної схеми або зміні параметрів елементів ланцюга, таких як опір, індуктивність чи ємність, характеристика струму може не відповідати реальним умовам експлуатації. Це створює необхідність корекції характеристик під кожен конкретну схему, що дозволяє уникнути помилок у розрахунках та забезпечити точність енергетичних розрахунків. У таких випадках необхідно враховувати динамічні зміни в електричній схемі та коригувати параметри в реальному часі, щоб забезпечити стабільність роботи пристроїв і досягти оптимального використання енергії.

Корекція характеристик також важлива для забезпечення надійності системи в умовах змінного навантаження або зовнішніх впливів.

Враховуючи, що характеристики струму можуть бути нелінійними, зміна конфігурації може призвести до значних відхилень у роботі електричних машин, що потребує гнучкості та адаптивності в розробці і налаштуванні таких характеристик.

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

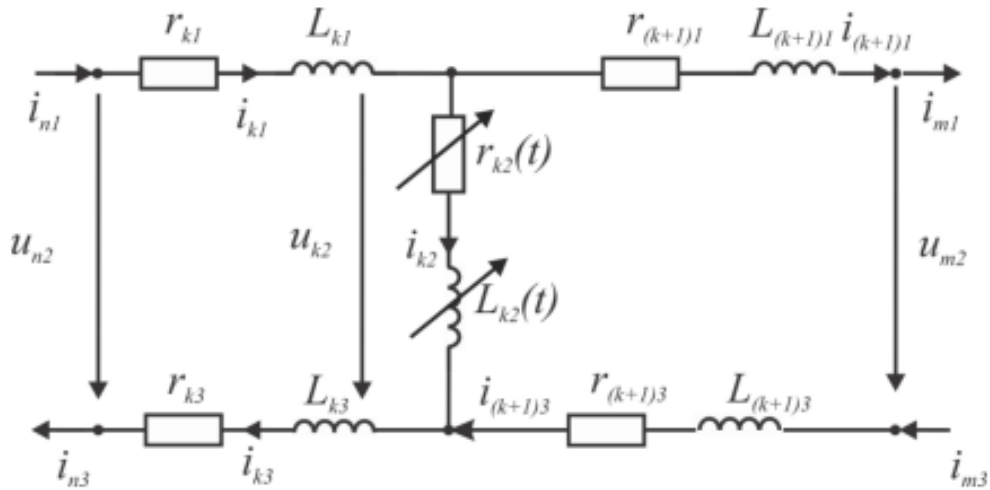


Рисунок 2.1 – Схема еквівалентної моделі системи тягового живлення та рухомого електроскладу

Характеристики, які залежать від часу, не мають цього недоліку – їх період залишається сталим і становить половину періоду зміни струму електровозу. Однак використання таких характеристик пов'язано з іншою проблемою, яка стосується визначення розташування їх періодів на часовій осі. Для її вирішення достатньо здійснити попередній розрахунок за умови лінійних значень параметрів тягового навантаження. Оскільки отриману пару характеристик для електрорухомого складу можна використовувати в різних розрахункових моделях, в процесі моделювання застосовуються параметри, що знаходяться в функціональній залежності від часу, тобто $r_e(t)$ та $L_e(t)$.

Система рівнянь, яка описує дану підсистему в умовах консольного живлення, має такий вигляд [12]:

$$u_{n2} = i_{k1}r_{k1} + i_{k1}'L_{k1} + i_{k2}r_{k2}(t) + i_{k3}r_{k3} + i_{k3}'L_{k3} = i_{k1}r_{k1} + i_{k1}'L_{k1} + u_{k2} + i_{k3}r_{k3} + i_{k3}'L_{k3}, \quad (2.1)$$

$$i_{k1} - i_{(k+1)1} - i_{k2} = 0, \quad (2.2)$$

$$i_{k2} - i_{(k+1)3} - i_{k3} = 0, \quad (2.3)$$

$$i_{k3} - i_{n3} = 0, \quad (2.4)$$

$$i_{n1} - i_{k1} = 0, \quad (2.5)$$

У разі реалізації схеми двостороннього живлення до системи додається одне рівняння балансу напруги та два рівняння для вузлів:

$$u_{m2} = -i_{(k+1)1} r_{k1} - i'_{(k+1)1} L_{(k+1)} + i_{k2} r_{k2}(t) + i'_{k2} L_{k2}(t) + i'_{k2} L_{k2}(t) + -i'_{k2} L_{k2}(t) - i_{(k+1)3} r_{(k+1)3} - i'_{(k+1)3} L_{(k+1)3}, \quad (2.6)$$

$$-i_{(k+1)3} - i_{m3} = 0, \quad (2.7)$$

$$-i_{m1} - i_{(k+1)1} = 0, \quad (2.8)$$

У рівняннях (2.1), (2.6)-(2.8) n та m позначають порядкові номери підсистем у загальній моделі, u_{n2} – напруга обмотки трансформатора або напруга на попередньому електровозі, u_{m2} – напруга на трансформаторі наступної підстанції або наступному електровозі.

Для побудови активних та обмінних характеристик використано вимірні миттєві значення напруги на струмоприймачеві та струму електровозу змінного струму ВЛ-80, які представлені на рис. 2.2. Необхідні характеристики визначають на основі рівнянь напруги на електровозі в моменти часу t_1 та t_2 .

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

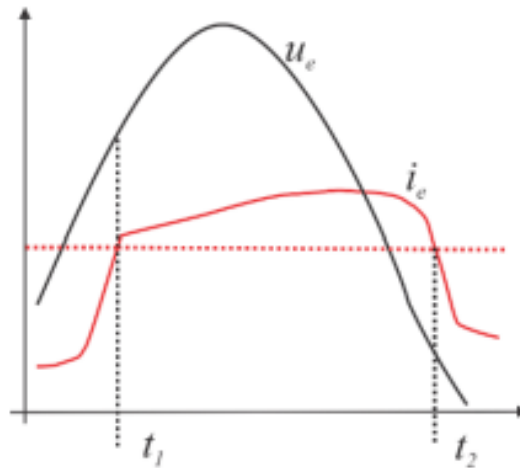


Рисунок 2.2 – Часова діаграма напруги та струму до пояснення розрахунку активних та обмінних характеристик електричного рухомого складу

$$u(t_1) = i(t_1) \cdot r_e(t_1) + L_e(t_1) \cdot i_e'(t_1), \quad (2.9)$$

$$u(t_2) = i(t_2) \cdot r_e(t_2) + L_e(t_2) \cdot i_e'(t_2), \quad (2.10)$$

якщо $i(t_1) = i(t_2)$, то $i_e'(t_1) > 0$, $i_e'(t_2) < 0$, що видно з рис. 2.2.

Допускаючи, що $r_e(t_1) = r_e(t_2)$ та $L_e(t_1) = L_e(t_2)$, віднімемо рівняння (2.10) від рівняння (2.9):

$$u(t_1) - u(t_2) = L_e(t_1) \left[i_e'(t_1) - i_e'(t_2) \right] = L_e(t_2) \left[i_e'(t_1) - i_e'(t_2) \right], \quad (2.11)$$

та визначимо

$$L_e(t_1) = L_e(t_2) = \frac{u(t_1) - u(t_2)}{i_e'(t_1) - i_e'(t_2)}, \quad (2.12)$$

Потім з (2.9), підставляючи (2.12), отримаємо

$$r_e(t_1) = \frac{u(t_1) - L_e i'(t_1)}{i(t_1)}, \quad (2.13)$$

Для одноколійної ділянки опір та індуктивність еквівалентної контактної підвіски та рейкової колії з урахуванням стікання струму в землю визначатимуться таким чином:

$$r_{ke} = \frac{r_k r_T + 0,126}{r_k + r_T + 0,504 / (r_k + r_T)}, \quad (2.14)$$

$$L_{ke} = \left[\frac{0,355 (r_k^2 + r_T^2) + 0,09}{(r_k^2 + r_T^2) + 0,504} + 0,106 \right] / 2\pi f, \quad (2.15)$$

$$r_{pз} = a_1 r_{pe} - b_1 x_{pe}, \quad (2.16)$$

$$L_{pз} = (a_1 x_{pe} - b_1 r_{pe}) / 2\pi f, \quad (2.17)$$

де r_{ke} – активний опір еквівалентної контактної підвіски; r_k – активний опір контактної провладу; r_T – активний опір несучого тросу; L_{ke} – індуктивність еквівалентної контактної підвіски; f – основна частота струму;

$r_{pз}$ – активний опір рейкової колії; r_{pe} – еквівалентний активний опір рейкової колії; $L_{pз}$ – індуктивність рейкової колії; x_{pe} – еквівалентна індуктивність рейкової колії [12].

a_1 та b_1 – це відповідно дійсна та уявна складова відношення струму в рейках до струму в контактній мережі, що залежить від довжини ділянки та перехідного опору між колією і землею. За умови, що середня відстань між підстанціями змінного струму становить 50 км, а значення перехідного опору для баласту з щебню дорівнює 1 Ом·км, на основі діаграми (рис. 2.3) отримуємо значення a_1 та b_1 , які складають 0,6 та 0,005 відповідно

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

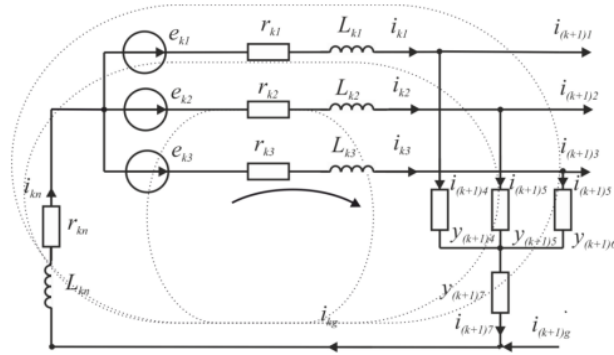


Рисунок 2.3 – Схема заміщення електроенергетичної системи

Параметри r_{pe} та x_{pe} визначаються наступним чином:

$$r_{pe} = 0,5r_{pa}, \quad (2.18)$$

$$x_{pe} = 0,375r_{pa} + 0,0628 \ln \left(a_{kp} \sqrt{R_p a_{12}} \right), \quad (2.19)$$

де r_{pa} – активний опір 1 км рейки; a_{kp} – висота контактного проводу відносно головки рейки; R_p – еквівалентний радіус рейки; a_{12} – відстань між осями рейок.

У формулах для розрахунку параметрів тягової мережі враховано взаємоіндукцію між контактною підвіскою та рейковою колією. На основі експериментально отриманих значень первинного струму та напруги на струмоприймачі електровоза ВЛ-80 були розраховані активна та обмінна характеристики, які представлені на рис. 2.4.

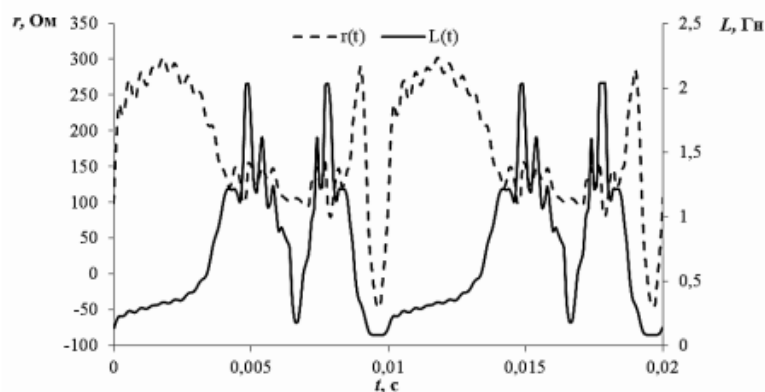


Рисунок 2.4 – Характеристики електровоза ВЛ-80

									Арк.
									45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

2.2 Метод прямого синтезу електричної схеми за обмінними

ознаками

Викладені принципи визначення активних та обмінних характеристик пасивних двополіусників дозволяють реалізувати електричні кола з заданими вхідними характеристиками напруги та струму. Завдання полягає у визначенні параметрів ланцюга або закономірностей зміни параметрів, що формують ланцюг, із зосереджених пасивних елементів $r(t)$, $g(t)$, $C(t)$, $L(t)$. При подачі на вхід напруги (або струму) коло з необхідною точністю відтворює залежність струму (або напруги) у вибраній момент часу t . Загалом, ця задача є нелінійною [13].

Нижче розглядається метод прямого синтезу двополіусників з втратами на основі вхідних функцій напруги та струму, враховуючи електромагнітні процеси, що відбуваються в досліджуваному ланцюзі.

Припустимо, що на вході пасивного двополіусника обурення і реакція визначені деякими періодичними функціями часу: $u_1 = u_1(\omega t)$. Тоді миттєвий опір двополіусника буде

$$z_1 = \frac{u_1(\omega, t)}{i_1(\omega, t)} = z_1(\omega, t), \quad (2.20)$$

Ця величина може бути подана як сума миттєвого активного опору $r_1 = r_1(\omega, t)$ та миттєвого обмінного опору $x_1 = v_1(i_1)L_1(\omega, t)$:

$$z_1 = r_1 + x_1 = r_1(\omega, t) + v_1(i_1)L_1(\omega, t), \quad (2.21)$$

де r_1 , x_1 - відповідно парна і непарна частини функції z_1 щодо змінної

$v(i_1) = \frac{di_1}{dt} \frac{1}{i_1(t)} = \frac{\dot{i}_1}{i_1}$ які називаються характеристикою обміну енергією

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$r_1(\omega, t) \geq 0$ або $g_1(\omega, t) \geq 0$, коли активний еквівалент двополюсника не має від'ємних значень [13].

За умов фіксованої частоти $\omega = const$ процедура визначення структури та параметрів електричного кола значно спрощується. У цьому випадку може бути реалізований лише перший етап синтезу, який забезпечує побудову двоелементного електричного кола (типу r, L або g, C).

2.3 Оцінка енергоефективності роботи споживача електричної енергії

У складних електричних ланцюгах, що містять різноманітні джерела енергії, частина енергії, що надходить від джерел, необоротно перетворюється в тепло та інші форми енергії (наприклад, механічну чи світлову), в той час як інша частина цієї енергії тимчасово накопичується у вигляді електричних та магнітних полів. Такий процес може бути описаний через миттєві значення потужностей, що характеризують енергетичні переходи в ланцюзі. Зокрема, електричні елементи, як-от конденсатори та індуктивності, здатні зберігати енергію в своїх полях і тим самим змінювати її форму без втрат в процесі зберігання. Однак, у реальних системах, де присутні резистивні елементи, частина енергії перетворюється на тепло через теплові втрати, що пов'язані з опором матеріалів, в результаті чого ефективність енергетичних переходів зменшується.

Важливу роль у цьому процесі відіграє аналіз миттєвої потужності, що дає змогу враховувати як активні, так і реактивні компоненти потужності, що пояснює зміну енергетичних резервів у кожному елементі ланцюга. В теорії електричних кіл інтенсивність цих процесів виражається через миттєві активну та обмінну потужності. Активна потужність, позначена як $[p=p(t)]$, вказує на потужність, що безпосередньо споживається або витрачається на виконання корисної роботи, зокрема перетворення енергії на тепло або механічну роботу. Обмінна потужність, позначена як $[q=q(t)]$, характеризує енергію, що тимчасово накопичується в полях (електричних чи магнітних) і потім може бути повернена назад в ланцюг.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Ці величини взаємопов'язані з динамікою зарядів, струмів та електричних полів, що змінюються з часом. Миттєві значення потужностей дозволяють детально аналізувати ефективність енергетичних перетворень у колах, а також сприяють оптимізації роботи електричних систем, зокрема в енергетичних мережах, електродвигунах, трансформаторах та інших пристроях, де енергія постійно змінює свою форму

$$p = \sum_{k=1}^n q_k u_{qk}^2 \quad \text{або} \quad p = \sum_{k=1}^n r_k i_{rk}^2, \quad (2.24)$$

$$q = \sum_{k=1}^n L_k i_{Lk} \frac{di_{Lk}}{dt} + C_k u_{ck} i_{Lk} \frac{du_{ck}}{dt}, \quad (2.25)$$

де $i_{rk} = i_{rk}(t)$ і $i_{Lk} = i_{Lk}(t)$ - відповідно струм миттєвого опору $r_{rk} = r_{rk}(i_{Lk})$ і струм миттєвої індуктивності $L_k = L_k(i_{Lk})$, $U_{qk} = U_{qk}(t)$ і $U_{ck} = U_{ck}(t)$ - напруга миттєвої провідності $q_k = q_k(u_{qk})$ і напруга миттєвої ємності $C_k = C_k(u_{ck})$. Повна миттєва потужність $s = s(t)$ пасивного приймача електричної енергії є сумою величин p і q , т. е.

$$s = ui = p + q, \quad (2.26)$$

З цього виходить, що [14,15]

$$\begin{aligned} s/i^2 = p_r/i^2 + q_x/i^2 = r + x = z; s/u^2 = \\ = p_q/u^2 + q_b/u^2 = q + b = y \end{aligned}, \quad (2.27)$$

де $z = s/i^2 = u/i$; $y = s/u^2 = i/u$; $r = p_r/i^2$; $q = p_q/u^2$; $x = q_x/i^2$; $b = q_b/u^2$ - повні, активні і обмінні опору і провідності розглянутого приймача електричної енергії.

Розкладання та співвідношення(2.24), що з нього випливають, можуть бути застосовані для аналізу миттєвих станів різних електричних ланцюгів та

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергетичних процесів, які в них протікають [16]. Це розкладання, зокрема, дає можливість оцінити енергетичну ефективність роботи пасивного двополюсника, використовуючи відповідну величину, зазначену в джерелі.

Завдяки такому підходу можна детально оцінити енергетичні втрати та оптимізувати роботу ланцюгів, враховуючи миттєві зміни потужності, що мають важливе значення при проектуванні та налаштуванні електричних пристроїв.

$$K_n = \frac{W_0}{W_0 + W_{\sim}}, \quad (2.28)$$

Коефіцієнт K_n (коефіцієнт споживання електричної енергії) визначає, яка частина всієї енергії, що надходить на певну ділянку ланцюга, необоротно споживається, тобто використовується на корисні цілі. Якщо в ланцюгу відбувається тільки споживання електричної енергії, то $K_n = 1$. У випадку, коли в ланцюгу відбувається лише обмін або накопичення енергії без її споживання, $K_n = 0$. Всі інші варіанти знаходяться між цими значеннями, що вказує на наявність як споживаної, так і накопиченої енергії.

Розкладання миттєвих характеристик електричних ланцюгів на активні та обмінні складові дає змогу точніше оцінити енергетичні процеси в цих ланцюгах. Розглянемо процес визначення величин $p = p(t)$, $r = r(t)$, $g = g(t)$, $i = q = q(t)$, $x = x(t)$, $b = b(t)$ на основі заданих змінних, таких як напруга і струм $i = u(t)$ і $i = i(t)$ на вході двополюсника. У подальших розрахунках припускається, що функції напруги та струму на вході приймача електричної енергії задовольняють умови Діріхле, тобто є заданими на певному інтервалі часу. Це дозволяє отримати точні значення енергетичних характеристик для двополюсника, що складається з активного елемента та накопичувача енергії, та розглядати як споживання енергії, так і її тимчасове накопичення в полях або елементах зберігання.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Для визначення величин $p(t)$ і $q(t)$ скористаємося наведеними вище співвідношеннями. Потужність, що визначає зміну енергії, накопиченої в магнітному полі, є позитивною, і енергія магнітного поля збільшується, якщо струм та похідна індуктивності $L(i_L)\frac{di_L}{dt}=L(i_L)i_L'$, мають однакові знаки. У протилежному випадку, коли знаки цих величин різні, енергія магнітного поля зменшується.

Аналогічно можна показати, що змінні $N(u_c)=u_c'u_c$ і $v(u_c)=u_c'u_c$ є параметрами обміну електричної енергії в ємнісному накопичувачі, де u_c — напруга на ємності, u_c' — її перша похідна за часом.

Можна записати вираз так

$$q_L = LN(i_L)i_L' = x_L i_L'^2 ; q_C = CN(u_C)u_C' = b_C u_C'^2, \quad (2.29)$$

де x_L — це миттєвий обмінний опір індуктивного накопичувача енергії, а b_C — миттєва обмінна провідність ємнісного накопичувача енергії.

Миттєва потужність p , що описує процес споживання електричної енергії, а також миттєвий активний опір r і миттєва активна провідність g є парними функціями змінних N та v .

Розглянемо рівняння:

$$s = p_r + q_x = p_q + q_b, \quad (2.30)$$

де p_r та p_q — це парні частини функцій $s[v(i)]$ та $s[v(u)]$, а q_x та q_b — непарні частини цих функцій.

Аналогічно, визначаємо:

$$z = r + x ; y = g + b, \quad (2.31)$$

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де r та g — парні частини функцій $z[v(i)]$ та $y[v(u)]$, а x та b — непарні частини цих функцій.

Тут I та U позначають струм і напругу на розглянутій ділянці електричного кола.

Таким чином, ми можемо відрізнити парні та непарні компоненти миттєвих потужностей і опорів для точнішого аналізу енергетичних процесів у електричних колах, де важливою є залежність цих величин від струму та напруги. Парні компоненти миттєвих потужностей, як правило, відповідають за середні або активні потоки енергії, що переноситься в системі і, в кінцевому підсумку, перетворюється в корисну роботу або потужність. Непарні компоненти, у свою чергу, пов'язані з реактивною потужністю, яка тимчасово накопичується в електричних та магнітних полях і не виконує корисної роботи, але є необхідною для підтримання осциляцій в колах змінного струму.

Врахування цих компонент дозволяє здійснити більш точний і детальний аналіз енергетичних процесів у складних електричних системах. Наприклад, у колах з індуктивними та ємнісними елементами важливо правильно розраховувати як активні, так і реактивні потужності для забезпечення оптимального функціонування системи та зниження втрат енергії. Крім того, точна ідентифікація парних і непарних компонент миттєвих потужностей дає змогу ефективно планувати енергетичні стратегії, включаючи оптимізацію навантажень і поліпшення енергоефективності в електричних мережах.

Умови використання змінних $v(i)$ та $v(u)$ для поділу миттєвої потужності пасивного електричного кола, а також її миттєвих опорів і провідності на активні та обмінні частини передбачають, як показано раніше, використання однієї з цих змінних як робочого оператора [16]. Це дозволяє реалізувати просту електричну схему, що складається або з послідовно з'єднаних елементів r та L , або з паралельно з'єднаних елементів g та C .

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

У кожній з цих схем є лише один накопичувач енергії, запас енергії в якому, при сталій індуктивності або ємності, визначається або безпосередньо величиною вхідного струму (для кола r, L), або величиною вхідної напруги (для кола g, C). Інтенсивність надходження або втрати цієї енергії описується відповідно змінними $v(i)$ та $v(u)$. Таким чином, вибір оператора поділу безпосередньо залежить від характеру отриманої схеми, який, в свою чергу, визначається властивостями вихідного ланцюга [16].

Далі ми обмежимося визначенням характеру приймача електричної енергії за заданими вхідними змінними $u = u(t)$ та $i = i(t)$ лише для випадку періодичного режиму. Для цього розглянемо дві функції: u' / i'' та i' / u'' .

У випадку індуктивного ланцюга, що представляється послідовним еквівалентом r, L і піддається впливу змінних u та маємо рівняння:

$$u = ri + Ldi / dt = ri + Li' \\ \text{або } \frac{du}{dt} = u' = ri' + \frac{dr}{di} ii + \frac{dL}{di} (i')^2 + Li'' \quad (2.32)$$

З цього рівняння слідує, що

$$\left. \frac{u'}{i''} \right|_{t=t_1} = L \Big|_{t=t_1} > 0, \quad (2.33)$$

де t_1 визначається з рівняння $i'(t_1) = 0$.

Для паралельного еквівалента g, C , що описує деякому колу ємнісного характеру, величина

$$\left. \frac{u'}{i''} \right|_{t=t_1} < 0, \quad (2.34)$$

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Взаємозв'язок між змінними $v(i)$ та $v(u)$ у простих електричних колах

Математичні властивості змінних $v(i)$ та $v(u)$ дозволяють ефективно використовувати їх для аналізу процесів, що відбуваються в ланцюгах з накопичувачами електричної енергії. Однак при цьому важливо враховувати взаємозв'язки між цими змінними величинами, зокрема їхню залежність від параметрів середовища, типу накопичувачів та динамічних режимів роботи системи.

Додатково, необхідно враховувати вплив нелінійностей у характеристиках накопичувачів, таких як ємність і опір, які змінюються залежно від рівня заряду або частоти коливань струму та напруги. Ці параметри безпосередньо впливають на ефективність роботи системи, теплові втрати та її надійність у різних умовах експлуатації. Аналіз цих змінних дає змогу визначати енергетичні втрати, оптимізувати режими роботи та передбачати поведінку системи при різних сценаріях, таких як змінні навантаження, температурні коливання або старіння компонентів.

Крім того, врахування цих факторів є важливим для розробки методів компенсації впливу нелінійностей, що сприяє підвищенню стабільності, тривалості експлуатації накопичувачів і зменшенню ризику їх передчасного зносу. Це особливо актуально в контексті інтеграції накопичувачів у складні системи, такі як електромережі з високою часткою відновлюваних джерел енергії, де коливання потужності та динамічні зміни навантаження є постійними викликами.

Додаткові дослідження у цьому напрямі можуть забезпечити створення моделей, що дозволяють точно прогнозувати параметри роботи накопичувачів залежно від умов експлуатації, а також сприятимуть розробці алгоритмів адаптивного управління для досягнення максимальної ефективності системи в реальному часі.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

У цьому контексті необхідно встановити зв'язок між характеристиками $v(i)$ та $v(u)$ для пасивного двополюсника, що має миттєвий опір z та миттєву провідність $y = 1/z$. Це дозволяє детальніше зрозуміти, як зміни струму i напруги взаємно впливають на енергетичні процеси в такому ланцюгу та дозволяє здійснити точний аналіз ефективності його роботи [17].

$$v(u) = \frac{u'}{u} = \frac{(iz)'}{iz} = \frac{i'z + iz'}{iz}, \quad (2.35)$$

Звідки $v(u) = v(i) - z' / z = v(i) + v(z)$, до уваги, що $1/z = y$, отримаємо $v(i) = v(u) + y' / y = v(u) + v(y)$

При послідовному зв'язку миттєвих опорів, маємо миттєвий опір кола

$$z = z_1 + z_2 + \dots + z_n$$

З цього маємо

$$v(u) = v(i) + \frac{z_1' + z_2' + \dots + z_n'}{z_1 + z_2 + \dots + z_n}, \quad (2.36)$$

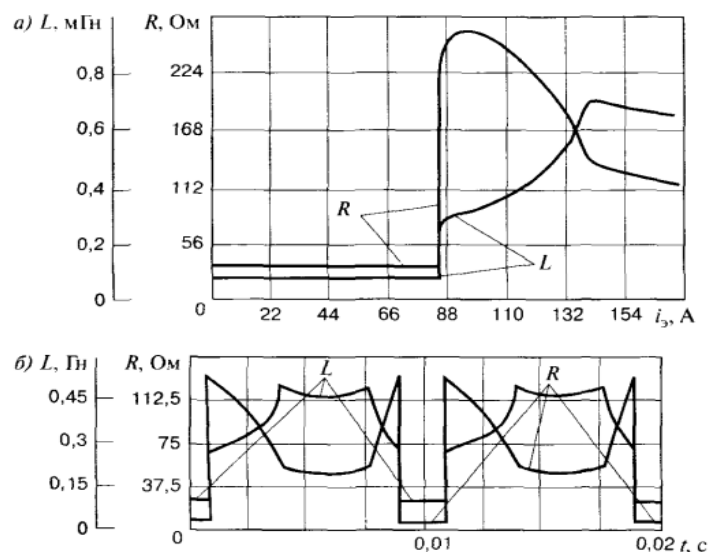


Рисунок 2.6 – Криві миттєвих значень активної та обмінної характеристик ЕРС в залежності а - від струму б - часу

У роботі [21] використано іншу методику, яка застосовна для визначення характеристик у випадку, коли функція струму навантаження має лише один екстремум на півперіоді його зміни. Цей підхід дозволяє ефективно оцінювати нелінійні характеристики навантажень, однак його застосування обмежується специфічними умовами.

Недоліком методу, описаного в роботі [22], є те, що в ньому індуктивність приймається як лінійна, що може не відображати реальну поведінку нелінійних елементів у складних електричних системах.

Водночас, у монографії [23] для розрахунку характеристик використовуються рівняння (3.1) та (3.2), однак застосований метод Рунге-Кутта є явним методом для розв'язування диференціальних рівнянь. Хоча цей метод зручний у багатьох випадках, він часто дає незадовільні результати при розрахунку жорстких систем диференціальних рівнянь (ДР), до яких відносяться, наприклад, системи, що описують електричні кола. Це пов'язано з наявністю в аналітичному розв'язку компонент, що змінюються з різними швидкостями. У таких ситуаціях рекомендується використовувати неявні методи для розв'язку ДУ, які забезпечують більшу точність і стійкість при вирішенні жорстких систем.

2.5 Висновок

Отже, моделювання енергетичних процесів у системах тягового живлення є необхідним етапом для досягнення ефективності та стабільності електричних систем. Використання активних та обмінних характеристик дозволяє точно оцінювати струмові навантаження та коригувати їх в реальних умовах експлуатації. З огляду на важливість прогнозування та корекції характеристик, що змінюються з часом, можемо перейти до основної частини розділу, де детальніше розглянемо методи аналізу та оптимізації енергетичних процесів у цих системах.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Алгоритм визначення властивостей нелінійного навантаження та моделювання системи електропостачання пакету імітаційного моделювання

У ролі нелінійного навантаження, для якого будуть отримані характеристики, обрано електровози змінного струму ВЛ 80 та ДСЗ. Вхідними даними для розрахунків є виміряні значення вхідного струму електровоза та напруги на його пантографі, отримані під час експериментів на кафедрі «Інтелектуальні системи енергопостачання».

Активна та взаємна характеристики нелінійного навантаження виражаються як функції його активного опору r (або провідності g) та індуктивності L (або ємності C) від часу. Як зазначалося раніше, загальна теорія цих характеристик викладена у [20], тому в цьому розділі наведено лише основні розрахункові вирази для активної та взаємної характеристик.

$$L = \frac{u}{i}, r = z - v(i)L, \quad (3.1)$$

$$C = \frac{y}{v(u)}, g = y - v(u)C, \quad (3.2)$$

де $v'(i)$ та $v'(u)$ – похідна відношення $\frac{i}{i}$ та $\frac{u}{u}$ відповідно;

Для моделювання та розрахунку системи електропостачання побудуємо схему заміщення у фазних координатах, що дозволить врахувати вплив однофазного нелінійного навантаження на кожен фазу системи. Метод фазних координат є ефективним для моделювання несиметричних режимів роботи енергетичних систем, включаючи різноманітні типи пошкоджень. Метою створення математичної моделі є відтворення процесів в електричних

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

мережах під час дії несиметричного та несинусоїдного тягового навантаження, що є типовим для електропостачання залізничного транспорту.

Поєднання трифазних електричних мереж із системою однофазного тягового електропостачання ускладнює використання традиційних підходів для розрахунку таких систем у сталих режимах. Зокрема, заміна трифазної мережі на однофазну схему заміщення в умовах несиметричних режимів вимагає застосування методу симетричних складових.

Оскільки досліджувана система є досить складною, доцільно проводити розрахунки електричних величин у фазних координатах. Це дозволяє коректно моделювати багатофазні електричні системи, враховуючи всі особливості підключень кожної фази. Такий підхід дозволяє детально відтворити реальні електричні схеми підключень, зокрема врахувати типи трансформаторів і порядок підключення фаз тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання.

Структурна схема досліджуваної системи електропостачання наведена на рис. 3.1. На схемі позначено: Г — джерело живлення, ТП — тягова підстанція, що представлена трансформатором. Обмотка високої напруги (ВН) отримує живлення від мережі 110 кВ, обмотка низької напруги (НН) живить електрорухомий склад (ЕРС) напругою 27,5 кВ, а обмотка середньої напруги (СН) забезпечує живлення для районних споживачів, зокрема підстанцій 35 кВ.

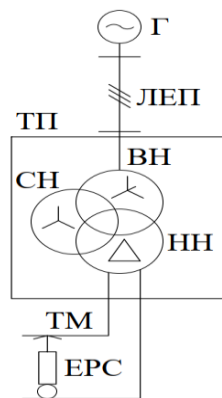


Рисунок 3.1 – Структурна схема ділянки електропостачання

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Розглянемо перше коло, яке складається з джерела трифазної напруги та обмотки високої напруги (ВН). Це коло є частиною більш складної схеми електропостачання, де джерело трифазної напруги забезпечує живлення для подальших елементів системи, зокрема для трансформатора чи інших споживачів електричної енергії.

$$e_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{d}{dt} i_1 + u_1 + \Phi_1 \frac{d}{dt} w_1 + i_n r_n + L_n \frac{d}{dt} i_n, \quad (3.3)$$

$$e_2 = i_2 r_2 + L_2 \frac{d}{dt} i_2 + u_2 + \Phi_2 \frac{d}{dt} w_1 + i_n r_n + L_n \frac{d}{dt} i_n, \quad (3.4)$$

$$e_3 = i_3 r_3 + L_3 \frac{d}{dt} i_3 + u_3 + \Phi_3 \frac{d}{dt} w_1 + i_n r_n + L_n \frac{d}{dt} i_n, \quad (3.5)$$

$$-i_n + i_1 + i_2 + i_3 = 0, \quad (3.6)$$

Третє коло представляє обмотку середньої напруги (СН), до якої підключено нескінченно великий опір у вигляді вольтметра. Як показано на рис. 3.1, районна обмотка трансформатора з'єднана за схемою зірка. У цій схемі вольтметр, що підключений до обмотки СН, вимірює напругу на цій обмотці, а нескінченно великий опір вольтметра не впливає на електричні параметри кола, оскільки він не проводить струм

$$i_6 r_7 + \Phi_1 \frac{d}{dt} w_1 + L_7 \frac{d}{dt} i_6 - \left(i_7 r_8 + \Phi_2 \frac{d}{dt} w_1 + L_8 \frac{d}{dt} i_7 \right) + i_{AB} \cdot r_{UAB} = 0, \quad (3.7)$$

$$i_7 r_8 + \Phi_2 \frac{d}{dt} w_1 + L_8 \frac{d}{dt} i_7 - \left(i_8 r_9 + \Phi_3 \frac{d}{dt} w_1 + L_9 \frac{d}{dt} i_8 \right) + i_{BC} \cdot r_{UBC} = 0, \quad (3.8)$$

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$i_6 r_7 + \Phi_1 \frac{d}{dt} w_1 + L_7 \frac{d}{dt} i_6 - \left(i_8 r_9 + \Phi_3 \frac{d}{dt} w_1 + L_9 \frac{d}{dt} i_8 \right) + i_{CA} \cdot r_{UCA} = 0, \quad (3.9)$$

$$i_6 + i_7 + i_8 = 0, \quad (3.10)$$

$$i_6 - i_{AB} - i_{CA} = 0, \quad (3.11)$$

$$i_{AB} + i_7 - i_{CA} = 0, \quad (3.12)$$

Друге коло складається з обмотки НН з'єднаної в трикутник, до якої підключено навантаження у вигляді електрорухомого складу (ЕРС).

$$i_4 r_4 + L_4 \frac{d}{dt} i_4 + i_4 r_5 + L_5 \frac{d}{dt} i_4 + i_5 r_6 + L_6 \frac{d}{dt} i_5 + \Phi_1 \frac{d}{dt} w_1 + \Phi_2 \frac{d}{dt} w_1 + \Phi_3 \frac{d}{dt} w_1 = 0, \quad (3.13)$$

$$i_4 - i_9 - i_5 = 0, \quad (3.14)$$

Для розрахунку системи з трансформатором також необхідно визначити параметри магнітоелектричної системи, як показано на рис. 3.3.

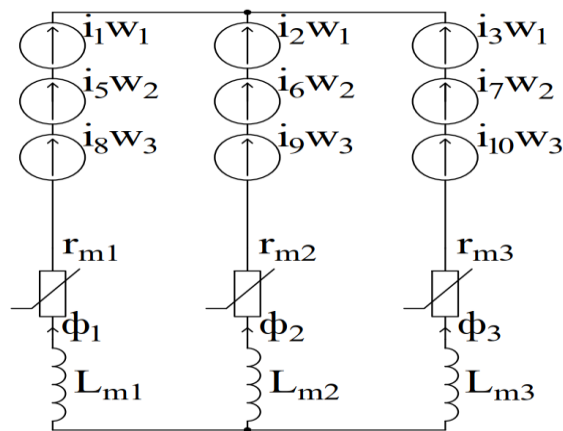


Рисунок 3.3 – Схема заміщення магнітної системи тягового трансформатора

$\phi \frac{d}{dt}$ – похідна від ϕ , Вб/с; r_m – активний магнітний опір, Гн;

L_m – магнітна індуктивність, Гн⁻¹·с.

$$i_1 w_1 + i_5 w_2 + i_8 w_3 - (i_2 w_1 + i_6 w_2 + i_9 w_3) = \phi_1 r_{m1} + \phi_1 \frac{d}{dt} L_{m1} - \left(\phi_2 r_{m2} + \phi_2 \frac{d}{dt} L_{m1} \right), \quad (3.15)$$

$$i_2 w_1 + i_6 w_2 + i_9 w_3 - (i_3 w_1 + i_7 w_2 + i_{10} w_3) = \phi_2 r_{m2} + \phi_2 \frac{d}{dt} L_{m2} - \left(\phi_3 r_{m3} + \phi_3 \frac{d}{dt} L_{m3} \right), \quad (3.16)$$

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0, \quad (3.17)$$

де ϕ – магнітний потік, Вб;

Магніторушійна сила в комплексному вигляді, яка визначається за формулою 3.16.

$$\underline{F} = \underline{\Phi} \cdot \underline{Z}_m = \underline{\Phi} \cdot R_m + \underline{\Phi} \cdot jX_m, \quad (3.18)$$

де $\underline{\Phi}$, \underline{F} , \underline{Z}_m – магнітний потік, магніторушійна сила та повний магнітний опір у комплексній формі;

R_m , X_m – активний та індуктивний опір магнітного осердя.

Вираз 3.13 можна представити у іншій формі, використовуючи символічний метод розрахунків:

$$f_{\text{мрс}} = \phi \cdot r_m + \phi \frac{d}{dt} \cdot L_m, \quad (3.19)$$

де $f_{\text{мрс}}$ – магніторушійна сила;

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\Phi \cdot r_m$ – спад магнітної напруги, який перебуває із магнітним потоком у фазі;

$\Phi \frac{d}{dt} \cdot L_m$ – спад магнітної напруги.

У фазі з магнітним потоком знаходиться індуктивна складова струму холостого ходу, яка відповідає за струм намагнічування, тоді як активна складова цього струму, що пропорційна незворотним втратам електроенергії, відноситься до другого доданку рівняння (3.14). Втрати потужності в сталевих частинах трансформатора пропорційні уявній частині виразу комплексного магнітного опору, що, в свою чергу, пов'язано з величиною «магнітної індуктивності». Ці втрати, відомі як втрати на гистерезис та втрати на струми Фуко, визначають ефективність трансформатора та його здатність до передачі енергії без значних втрат. Зменшення таких втрат досягається через використання спеціальних матеріалів з низьким гистерезисом та оптимізацію конструкції сталевих сердечників, що дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії трансформатора та знизити температуру його роботи.

$$L_m = \rho \cdot \frac{l_c}{S_c} \cdot \frac{1}{2f\pi} = \frac{P_0 d l_c}{2S_c (\pi f B_m)^2} \rho, \quad (3.20)$$

де l_c, S_c – середня лінія та переріз магнітопроводу, м та м²;

ρ – уявна частина магнітного опору, $(B\delta \cdot c) / (B\delta \cdot m)$;

P_0 – питомі активні втрати в сталі, Вт/кг;

d – густина сталі, кг/м³;

B_m – максимальна індукція, Тл;

f – частота магнітного поля, Гц.

Для кращого розуміння активного магнітного опору r_m представимо його як функцію від напруженості магнітного поля H .

$$r_m (|H|) = \frac{l_c}{\mu(|H|) S_c}, \quad (3.21)$$

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\mu(|H|)$ — функція магнітної проникності від абсолютної величини напруженості магнітного поля H .

Розв'язування диференціальних рівнянь за допомогою комп'ютерної техніки вимагає їх перетворення у явну форму. Для цього здійснюється заміна елементів рівнянь балансу струмів і магнітних потоків у вузлах на їх похідні по часу, що дозволяє перетворити систему алгебраїчно-диференціальних рівнянь у систему чисто диференціальних рівнянь. Реалізація чисельних методів у математичних програмах дає змогу записувати системи диференціальних рівнянь у матрично-векторній формі, що дозволяє застосовувати метод зворотної матриці для ефективного перетворення рівнянь у явний вигляд.

Спрощену математичну модель можна подати у вигляді: $AX' = B$

де X' — вектор невідомих похідних;

A — матриця коефіцієнтів при невідомих похідних;

B — вектор вільних членів.

3.2 Реалізація моделі у програмному середовищі Matlab

Приведена вище модель була реалізована у середовищі Matlab, на однойменній мові програмування.

Розглянемо наступні частини програмного сценарію.

```
% Моделювання характеристики ВЛ80
```

```
load('culc.mat')
```

```
StepTime = 0.0001;
```

```
BeginTime = 0;
```

```
EndTime = 0.02;
```

```
Time = BeginTime:StepTime:EndTime;
```

```
CurrentLoc = smooth(interp1(vTime_VL80, vLocI_VL80, Time), 10);
```

```
VoltageLoc = sqrt(2)*25000*sin(2*pi*50*Time + 35*pi/180);
```

```
plot(Time, CurrentLoc);
```

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Цей фрагмент коду моделює характеристики VL80. Спочатку завантажуються дані з файлу culc.mat, який містить вхідні параметри для часу та струму. Параметри часу визначаються наступним чином: крок часу (StepTime) встановлений на 0.0001 с, початковий час (BeginTime) дорівнює 0 с, а кінцевий (EndTime) — 0.02 с. На основі цих значень створюється вектор Time, який охоплює заданий часовий інтервал із визначеним кроком.

Далі здійснюється інтерполяція значень струму $vLocI_{VL80}$ за часовими мітками за допомогою функції `interp1`, а отримані результати згладжуються функцією `smooth` із вікном розміром 10, формуючи масив `CurrentLoc`. Потім генерується синусоїдальна напруга `VoltageLoc` із амплітудою 25000 В і фазовим зсувом 35 градусів. Формула враховує частоту 50 Гц і перевід градусів у радіани.

Нарешті, виконується побудова графіка струму `CurrentLoc` у залежності від часу `Time` за допомогою функції `plot`.

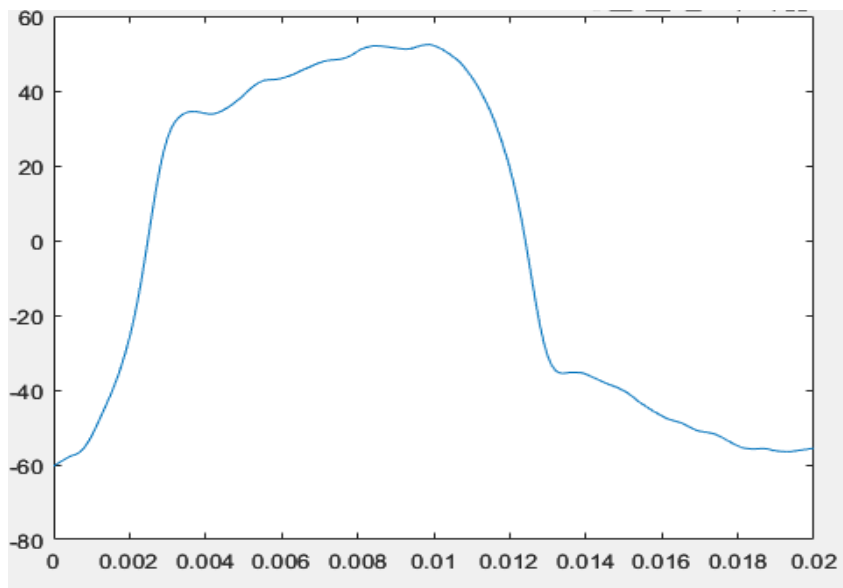


Рисунок 3.4 – Побудова графіка струму по часу

Також виконується побудова графіка напруги `VoltageLoc`

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

моменти часу, коли струм дорівнює нулю. На основі отриманих результатів задається новий часовий інтервал із кроком 0.0001 с, початковою точкою BeginTime2 і кінцевою точкою EndTime2, яка трохи розширена на три кроки часу для врахування можливих особливостей.

У новому часовому інтервалі формується часовий вектор Time2, на основі якого виконується інтерполяція значень струму з використанням функції interp1, а також згладжування результатів за допомогою функції smooth. Одночасно генерується синусоїдальний сигнал напруги з параметрами: амплітудою 25000 В, частотою 50 Гц і фазовим зсувом 35 градусів.

Далі обчислюється імпеданс z як відношення миттєвих значень напруги до струму. Для візуалізації побудовано графік залежності імпедансу від часу. Графік містить підписи осей, заголовок і сітку, що забезпечує зручність інтерпретації отриманих результатів.

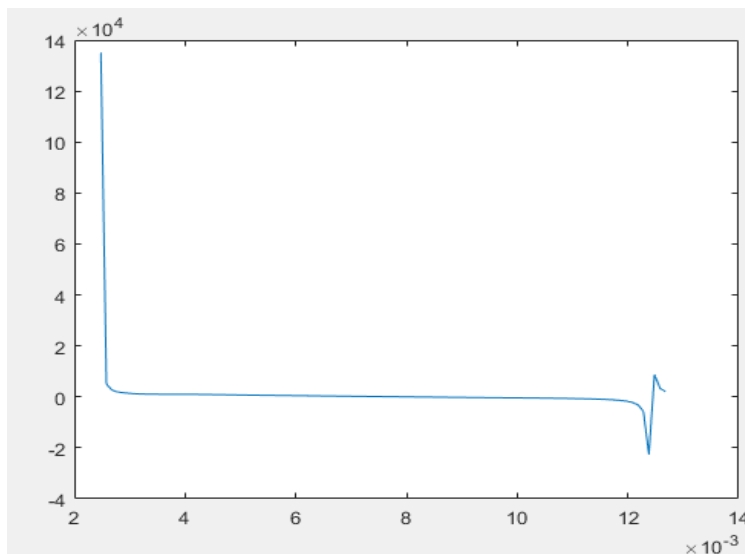


Рисунок 3.6 – Залежність опору від часу

% Обчислення потужності: Потужність дорівнює добутку напруги на струм $p = \text{VoltageLoc} .* \text{CurrentLoc}$;

`plot(Time, p);`

Цей фрагмент коду виконує обчислення потужності та побудову відповідного графіка.

Обчислення потужності:

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Потужність розраховується як добуток миттєвих значень напруги (VoltageLoc) та струму (CurrentLoc). Оскільки ці величини представлені масивами з однаковою кількістю елементів, для виконання операції використовується елементне множення (.*), яке повертає масив р із миттєвими значеннями потужності.

Візуалізація потужності:

За допомогою функції plot виконується побудова графіка, на якому:

по осі X відкладається час (Time),

по осі Y — розраховані значення потужності (p).

Графік дозволяє проаналізувати зміну потужності в заданому часовому діапазоні.

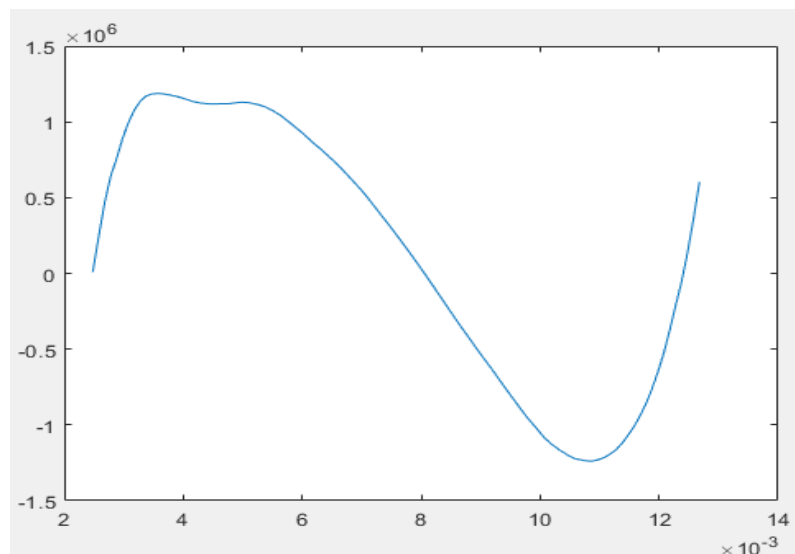


Рисунок 3.7 – Залежність потужність від часу

% Отримання розміру вектора p по другому виміру (кількість елементів)

`size(p,2)`

`P = sum(p) / size(p,2)`

`size(CurrentLoc,2)`

`I = sqrt(sum(CurrentLoc.^2) / size(CurrentLoc,2))`

`r = P / I^2`

`[dz, dtz] = df(z, Time2);`

`[di, dit] = df(CurrentLoc, Time2);`

									02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						68

plot(dit, di)

Цей фрагмент коду виконує обчислення середніх значень потужності, струму, опору та похідних.

Спочатку визначається розмір векторів p і `CurrentLoc` по другому виміру, що вказує на кількість елементів у цих масивах. Середня потужність P обчислюється шляхом ділення суми значень масиву потужності на кількість елементів.

Середній струм I розраховується як корінь квадратний із середнього квадратичного значення струму. Для цього використовується піднесення кожного елемента масиву `CurrentLoc` до квадрату, підсумовування всіх значень і ділення на кількість елементів у масиві.

Опір r визначається за формулою: середня потужність P ділиться на квадрат середнього значення струму I^2 .

Далі обчислюються похідні імпедансу z і струму `CurrentLoc` відносно часу за допомогою функції `df`, яка повертає масив значень похідної (dz, di) і відповідні часові мітки (`dtz, dit`).

Останній етап — побудова графіка, який показує залежність похідної струму від часу, де:

по осі X відкладаються часові мітки `dit`,

по осі Y — значення похідної струму `di`.

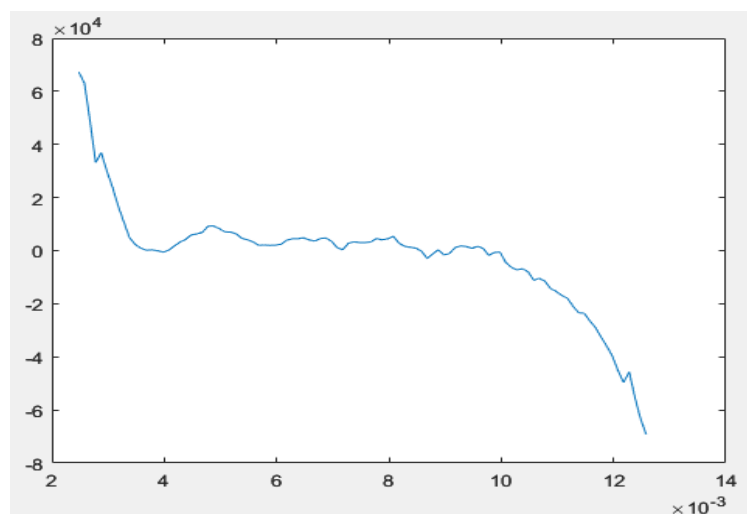


Рисунок 3.8 – Зміна струму від часу

% Обчислення вектору v як відношення похідної струму (di) до струму (CurrentLoc)

```
v = di ./ CurrentLoc(1:end-1)';  
[dv, dtv] = df(v, dit);  
L = dz(1:end-1) ./ dv';  
for ind = 1:size(L,1)  
if L(ind) == inf || L(ind) == -inf  
L(ind) = 0.000000001;  
end  
end  
r = z(1:end-2)' - L .* v(1:end-1);  
curr = (VoltageLoc(1:end-2)' - di(1:end-1) .* L) ./ r;  
size(r,1)  
Time2, CurrentLoc  
plot(dtv, curr, Time2, CurrentLoc)
```

Цей фрагмент коду виконує обчислення векторів швидкості зміни, індуктивності, нових значень опору та струму з подальшою візуалізацією результатів.

Обчислення вектору швидкості зміни v :

Вектор v визначається як відношення похідної струму di до миттєвого значення струму CurrentLoc. Оскільки похідна di на 1 елемент коротша, використовується обрізання вектора CurrentLoc до 1:end-1.

Обчислення похідної v за допомогою df :

Функція df обчислює похідну dv від вектора v по часу, повертаючи також часові мітки dtv .

Обчислення індуктивності L :

Індуктивність визначається як відношення похідної імпедансу dz до похідної швидкості зміни dv .

Обробка нескінченних значень у L :

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

У циклі for всі значення L, які є нескінченними (inf або -inf), замінюються на дуже мале значення (0.000000001), щоб уникнути помилок.

Обчислення нового значення опору r:

Опір розраховується як різниця між значеннями імпедансу z (скороченого до 1:end-2) та добутком індуктивності L на швидкість зміни v.

Розрахунок струму curr:

Новий струм curr обчислюється за формулою, яка враховує напругу VoltageLoc, похідну струму di, індуктивність L і нове значення опору r.

Побудова графіка:

На графіку порівнюються:

Струм curr (по осі Y із часовими мітками dtv по X).

Струм CurrentLoc і час Time2 для аналізу взаємозв'язку.

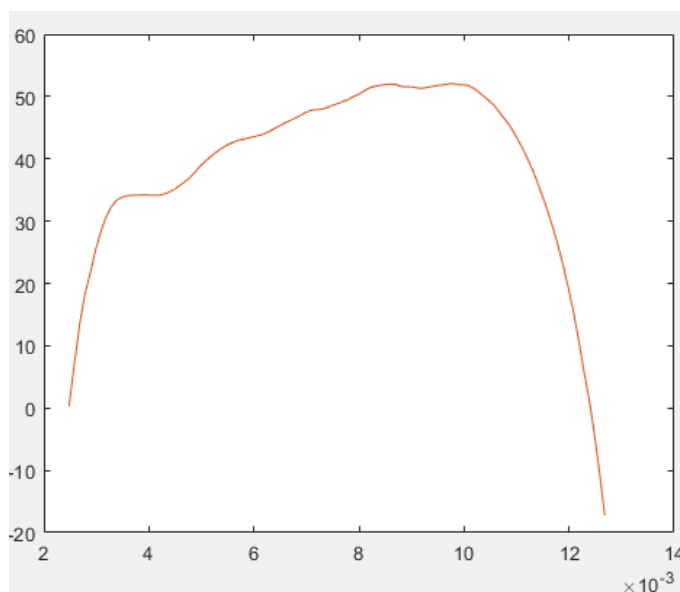


Рисунок 3.9 – Графік струму залежно від часу

% Обчислюємо струм (curr) за формулою:

% $curr = (VoltageLoc - CurrentLoc .* r) / L$, де:

% - VoltageLoc - напруга в електричному ланцюгу

% - CurrentLoc - струм в ланцюгу

% - r - опір, який було раніше обчислено

% - L - індуктивність, яку ми визначили раніше

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

```
curr = (VoltageLoc(1:end-2)' - CurrentLoc(1:end-2)'.*r)/L;
```

```
% Створюємо графік, де по осі X відкладено час (dtv), а по осі Y - струм  
curr
```

```
plot(dtv, curr)
```

Цей код моделює залежність струму від часу в електричному ланцюзі.
Для обчислення струму використовується формула, яка враховує:

VoltageLoc — значення напруги в електричному ланцюзі;

CurrentLoc — миттєві значення струму;

r — опір, що було визначено раніше;

L — індуктивність.

Побудова графіка

Графік показує залежність струму curr від часу dtv, де:

По осі X: відкладаються часові мітки dtv, отримані раніше;

По осі Y: значення струму curr.

Цей аналіз дозволяє візуалізувати зміну струму під дією змінних напруги,
опору та індуктивності в ланцюзі.

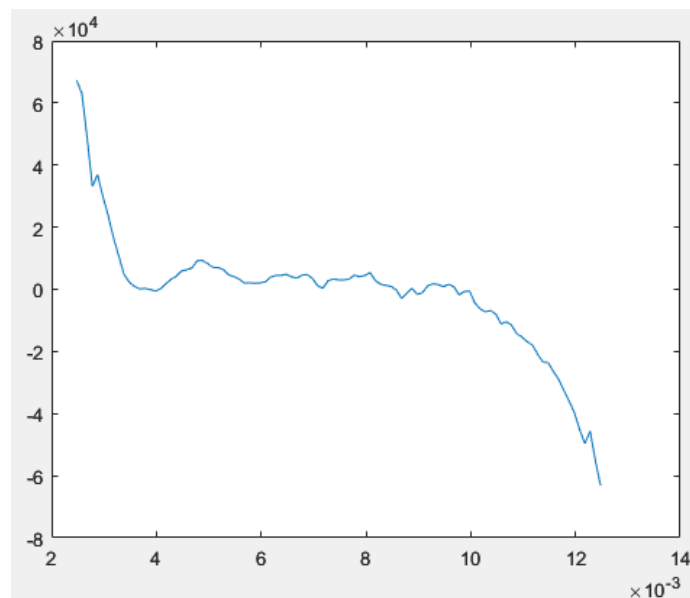


Рисунок 3.10 – Часова залежність струму

```
% Створюємо графік залежності індуктивності L від часу dtv
```

```
% По осі X відкладений час, по осі Y - значення індуктивності
```

```
plot(dtv, L)
```

Цей фрагмент коду побудовує графік залежності індуктивності L від часу dtv .

По осі X : відкладається час dtv , який отримано під час обчислення похідної швидкості зміни v .

По осі Y : відкладаються значення індуктивності L , що були розраховані раніше.

Графік дозволяє візуалізувати, як змінюється індуктивність у часі. Це дає змогу оцінити динаміку параметрів ланцюга за досліджуваній проміжок часу.

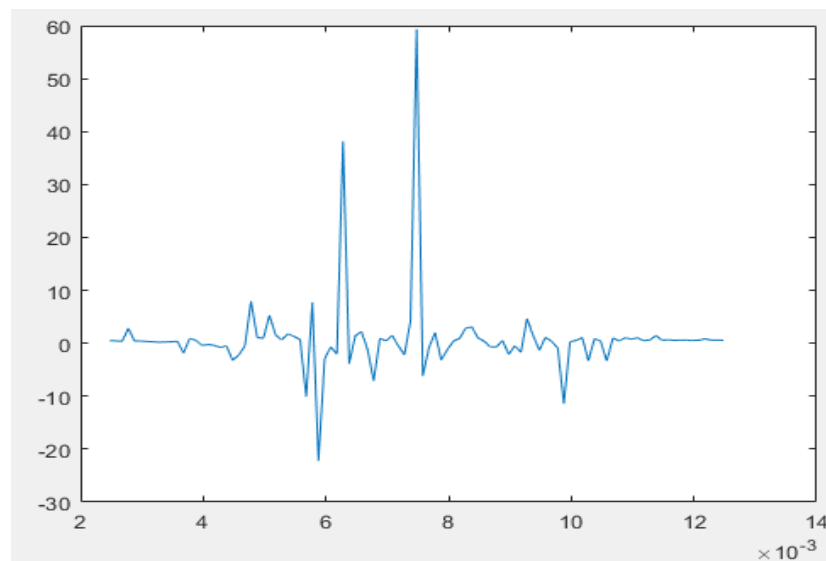


Рисунок 3.11 – Графік залежності індуктивності від часу

```
% Створюємо графік залежності опору r від часу dtv
```

```
plot(dtv, r)
```

Цей фрагмент коду будує графік, що відображає зміну опору r у часі.

По осі X : відкладається час dtv , який визначено на попередніх етапах обчислень.

По осі Y : відображаються значення опору r , що були обчислені раніше як різниця між імпедансом та добутком індуктивності на швидкість зміни.

Графік дозволяє візуалізувати, як змінюється опір електричного ланцюга у часі. Це корисно для аналізу стабільності та поведінки системи під впливом динамічних змін.

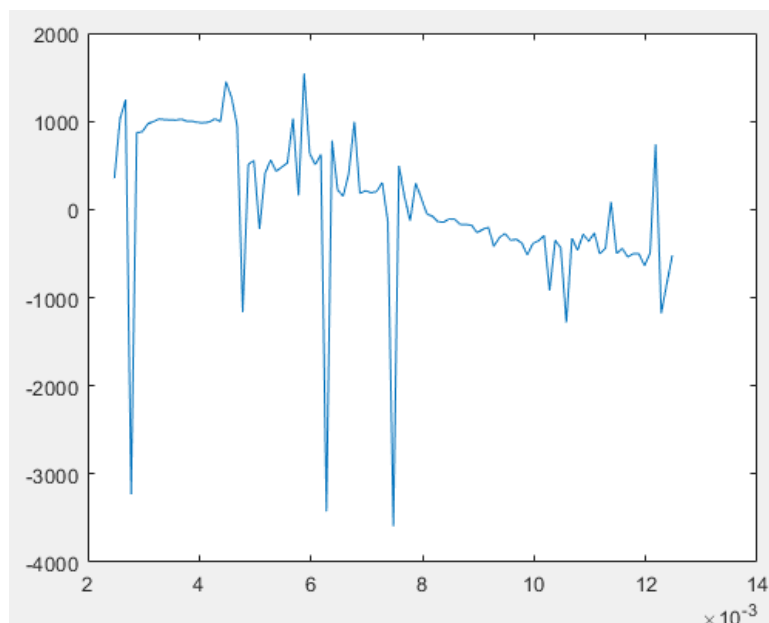


Рисунок 3.12 – Графік залежності опору від часу

Моделювання характеристики ДСЗ

% Завантаження даних з файлу 'DS3.mat', де містяться час і значення струму

```
load('DS3.mat')
```

```
StepTime = 0.0001;
```

```
BeginTime = 0 ;
```

```
EndTime = 0.02;
```

```
Time = BeginTime:StepTime:EndTime ;
```

```
CurrentLoc = smooth(interp1(vTimeDS3, vLocDS3I, Time), 10);
```

```
VoltageLoc = sqrt(2) * 25000 * sin(2 * pi * 50 * Time - 45 * pi / 180);
```

```
plot(Time, CurrentLoc);
```

Цей фрагмент коду виконує завантаження даних із файлу DS3.mat, який містить параметри часу і струму. Перш за все, визначається крок часу (StepTime), який становить 0.0001 с. Початковий час (BeginTime) встановлюється на 0 с, а кінцевий час (EndTime) — на 0.02 с. Вектор часу Time створюється на основі заданих значень початкового та кінцевого часу та кроку.

Далі, за допомогою функції interp1, здійснюється інтерполяція значень струму vLocDS3I за часовими мітками, а потім результати згладжуються за

допомогою функції `smooth` із вікном розміром 10, формуючи масив `CurrentLoc`. Потім генерується синусоїдальна напруга `VoltageLoc` з амплітудою 25000 В, частотою 50 Гц і фазовим зсувом -45 градусів, враховуючи переведення градусів у радіани.

Останнім кроком побудовується графік залежності струму `CurrentLoc` від часу `Time` за допомогою функції `plot`.

```
% Побудова графіка залежності напруги від часу (VoltageLoc)
plot(Time, VoltageLoc);
```

Цей фрагмент коду будує графік залежності напруги `VoltageLoc` від часу `Time`. Використовується функція `plot`, яка відображає значення напруги на осі `y` в залежності від часу, зазначеного на осі `x`. Графік надає візуалізацію змін напруги з часом, що дає змогу оцінити її поведінку протягом заданого інтервалу часу.

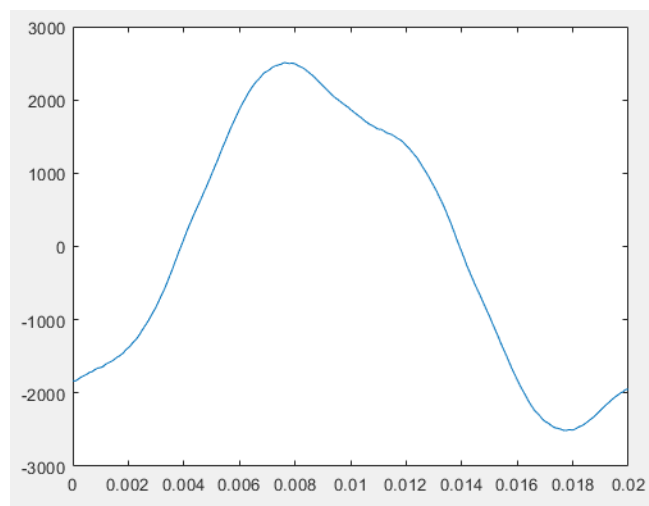


Рисунок 3.13 – Графіка залежності струму від часу

```
% Викликається функція FindRoots для знаходження коренів (перетину з нулем)
```

```
% для вектора струму CurrentLoc на проміжку часу Time.
```

```
% Функція FindRoots повертає часи, коли струм переходить через нуль,
```

```
% що відповідає моментам часу, коли струм змінює свій напрямок.
```

```
vBegEndTime = FindRoots(Time, CurrentLoc);
```

```
StepTime2 = 0.0001;
```

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

```

BeginTime2 = vBegEndTime(1);
EndTime2 = vBegEndTime(2) + StepTime2 * 3;
Time2 = BeginTime2 : StepTime2 : EndTime2;
CurrentLoc = smooth(interp1(vTimeDS3, vLocDS3I, Time2), 10)';
% VoltageLoc = interp1(vTimeDS3, vLocDS3V, Time2);
VoltageLoc = sqrt(2) * 25000 * sin(2 * pi * 50 * Time2 - 45 * pi / 180);
p = VoltageLoc .* CurrentLoc;
plot(Time2, p);

```

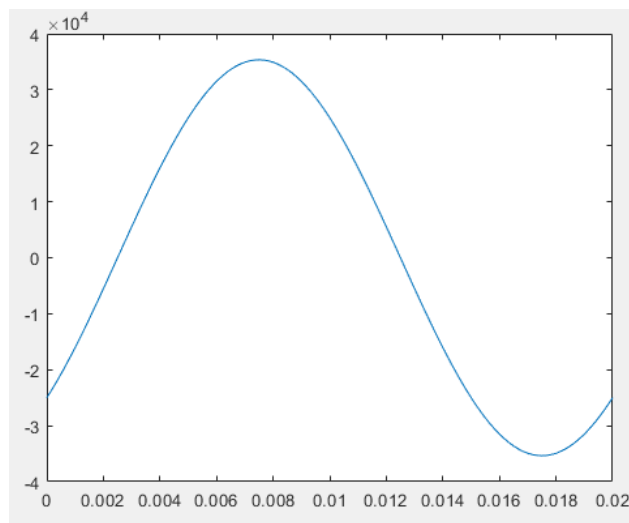


Рисунок 3.14 – Графіка залежності напруги від часу

Фрагмент коду виконує наступні кроки:

Викликається функція FindRoots, яка шукає корені (перетини з нулем) для вектора струму CurrentLoc на часовому проміжку Time. Корені позначають моменти, коли струм змінює свій напрямок, і функція повертає ці моменти у вигляді масиву vBegEndTime.

Далі визначається крок часу для другого періоду (StepTime2), який встановлюється на значення 0.0001 с.

Початковий час для другого періоду задається як перший корінь з масиву vBegEndTime, що відповідає моменту, коли струм переходить через нуль.

Кінцевий час для другого періоду обчислюється як останній корінь з масиву vBegEndTime плюс додатковий час, що дорівнює трьом крокам часу.

Створюється новий вектор часу Time2, який охоплює час від початкового до кінцевого моменту з заданим кроком часу.

Значення струму для нового вектора часу Time2 інтерполюються за допомогою функції interp1, використовуючи вхідні дані з vTimeDS3 та vLocDS3I. Потім ці значення згладжуються функцією smooth для отримання плавного графіка.

Якщо потрібно, можна використовувати інтерполяцію для напруги за допомогою закоментованого рядка, що дозволяє отримати значення напруги для кожного моменту часу.

Напруга для нового періоду моделюється як синусоїдальний сигнал з амплітудою 25000 В, частотою 50 Гц та фазовим зсувом 45 градусів, враховуючи перехід від градусів до радіан.

Потужність обчислюється як добуток струму і напруги для кожного моменту часу.

Останнім кроком будується графік потужності p в залежності від часу Time2, що дає можливість візуалізувати зміну потужності в процесі часу.

Цей фрагмент коду моделює зміну струму, напруги і потужності в електричному колі за допомогою математичних функцій і графіків, що дозволяє досліджувати їх взаємозв'язок.

% Обчислюємо кількість елементів вектора p:

size(p, 2)

% Обчислюємо середнє значення потужності (P):

P = sum(p) / size(p, 2)

size(CurrentLoc, 2)

I = sqrt(sum(CurrentLoc.^2) / size(CurrentLoc, 2))

r = P / I^2

[dz, dtz] = df(z, Time2);

[di, dit] = df(CurrentLoc, Time2);

plot(dit, di)

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

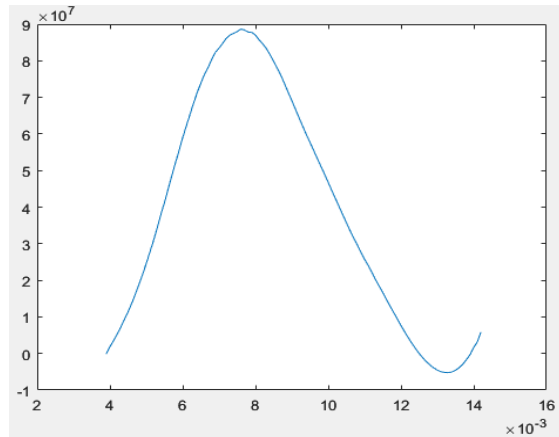


Рисунок 3.15 – Графік потужності в залежності від часу

Побудова графіка, що показує залежність похідної струму di від похідної часу dt . Це дозволяє візуалізувати зміну струму в часі, а також його швидкість зміни.

Цей фрагмент коду виконує розрахунки, які включають статистичні характеристики потужності і струму, а також похідні цих величин, що дозволяє аналізувати зміну струму та імпедансу з часом.

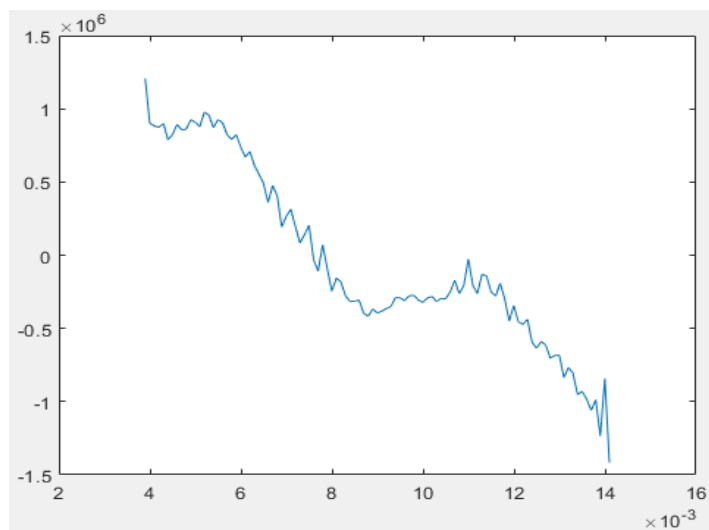


Рисунок 3.16 – Графік залежності похідних струму (di) від похідної часу

% Обчислюємо вектор v як відношення похідної струму (di) до струму (CurrentLoc)

$$v = di ./ CurrentLoc(1:end-1)';$$

```

[dv, dtv] = df(v, dit);
L = dz(1:end-1) ./ dv';
for ind = 1:size(L, 1)
if L(ind) == inf || L(ind) == -inf
L(ind) = 0.000000001;
end
r = z(1:end-2)' - L .* v(1:end-1);
curr = (VoltageLoc(1:end-2)' - di(1:end-1) .* L) ./ r;
plot(dtv, curr, Time2, CurrentLoc)

```

Цей фрагмент коду виконує серію обчислень для аналізу електричних параметрів в ланцюзі, зокрема для обчислення індуктивності, опору та струму, а також для порівняння цих значень із початковими даними.

Спочатку обчислюється вектор v , що є відношенням похідної струму до значень струму в даний момент часу. Це дозволяє отримати зміну струму відносно його значення в конкретний момент.

Далі за допомогою функції df обчислюється похідна вектора v по часу, що дає змогу оцінити, як швидко змінюється це відношення протягом часу.

Індуктивність L обчислюється як відношення похідної імпедансу dz до похідної вектора v . Це дозволяє отримати значення індуктивності в кожен момент часу.

Для уникнення числових проблем, коли індуктивність L набуває значення нескінченності, цей фрагмент перевіряє на наявність нескінченних значень і замінює їх на дуже мале значення, щоб запобігти помилкам в подальших обчисленнях.

Опір r обчислюється як різниця між значеннями імпедансу та добутком індуктивності на вектор v . Це дозволяє знайти опір на основі значень індуктивності та імпедансу.

Потім обчислюється струм $curr$ за допомогою рівняння, яке враховує напругу, похідну струму і індуктивність. Це дає можливість визначити струм в ланцюзі для кожного моменту часу.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

Нарешті, будується графік, що порівнює обчислений струм `curr` з початковим струмом `CurrentLoc`, що дозволяє візуально оцінити точність розрахунків і зміну струму в процесі часу.

Цей фрагмент коду використовується для глибшого аналізу змінних електричних величин в ланцюзі та для порівняння теоретичних результатів з отриманими експериментальними чи моделями.

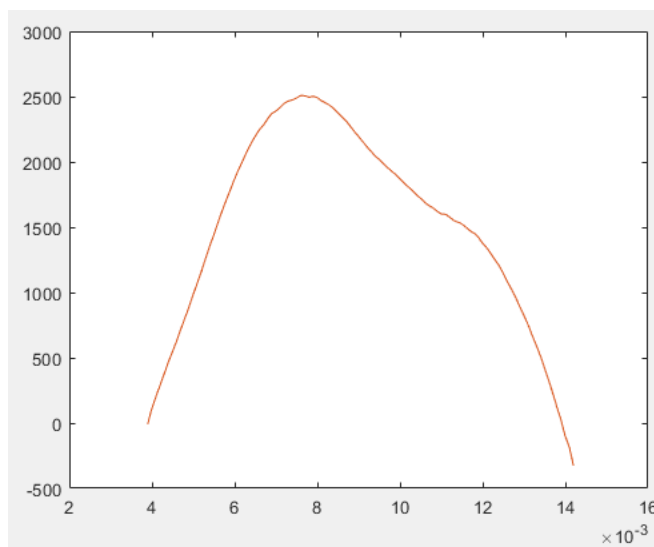


Рисунок 3.17 – Графік залежності струму від часу

% Обчислюємо струм `curr` на основі різниці між напругою (`VoltageLoc`) та струмом (`CurrentLoc`),

```
curr = (VoltageLoc(1:end-2)' - CurrentLoc(1:end-2)'.*r)./L;
```

```
plot(dtv, curr);
```

Побудова графіка залежності обчисленого струму `curr` від часу `dtv`. Графік дозволяє візуально спостерігати, як змінюється струм у часі.

Цей фрагмент коду використовується для розрахунку струму в електричному колі на основі рівнянь, що описують взаємозв'язок між напругою, струмом, опором та індуктивністю, а також для візуалізації отриманого результату через графік.

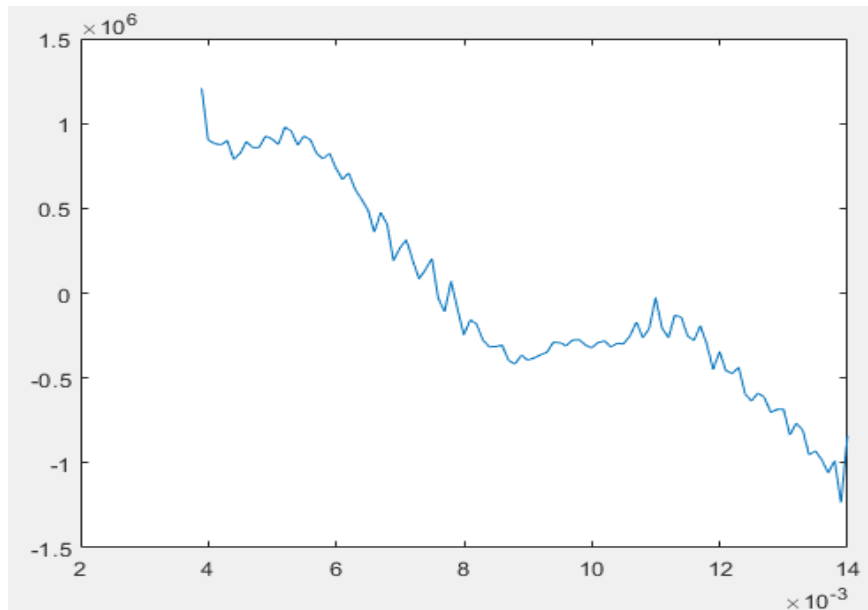


Рисунок 3.18 – Побудова графіка струму відносно часу

% Побудова графіка, де по осі X відкладено час (dtv), а по осі Y - значення індуктивності (L)

plot(dtv, L);

Цей фрагмент коду виконує побудову графіка, на якому по осі X відкладено час dtv , а по осі Y — значення індуктивності L . Графік дозволяє візуально спостерігати за змінами індуктивності в часі. На рисунку зображено залежність індуктивності від часу, що демонструє її поведінку в процесі обчислень.

Цей графік можна використовувати для аналізу змін індуктивності в часі, оцінки її динаміки та порівняння з іншими електричними параметрами системи.

% Побудова графіка, де по осі X відкладено час (dtv), а по осі Y - значення опору (r)

plot(dtv, r);

На цьому графіку зображено залежність опору від часу. Це дозволяє візуально оцінити, як змінюється опір в процесі обчислень, що може бути важливим для дослідження електричних характеристик системи. Зміни опору можуть свідчити про різні фізичні процеси, що відбуваються в ланцюзі,

наприклад, зміни в характеристиках матеріалу або зміни в умовах навантаження.

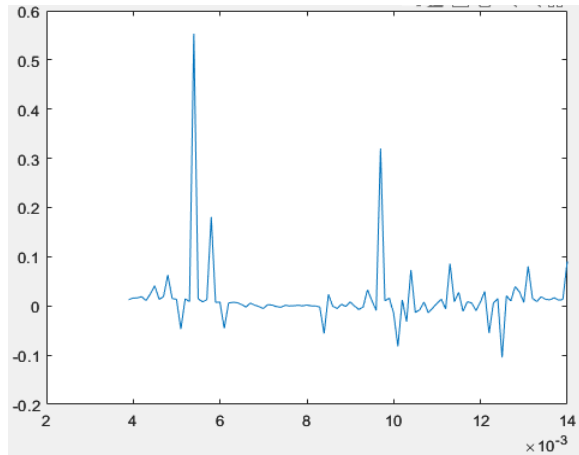


Рисунок 3.19 – Побудова графіка індуктивності відносно часу

На рисунку зображена залежність опору від часу, що дозволяє аналізувати поведінку опору в процесі динаміки електричної системи.

3.3 Оцінка характеристик та показників якості електроенергії.

За допомогою виразів (3.1) та вимірних даних можна отримати характеристики нелінійного навантаження. На рис. 3.20 показано часову діаграму струму електровоза в залежності від часу (вимірні дані).

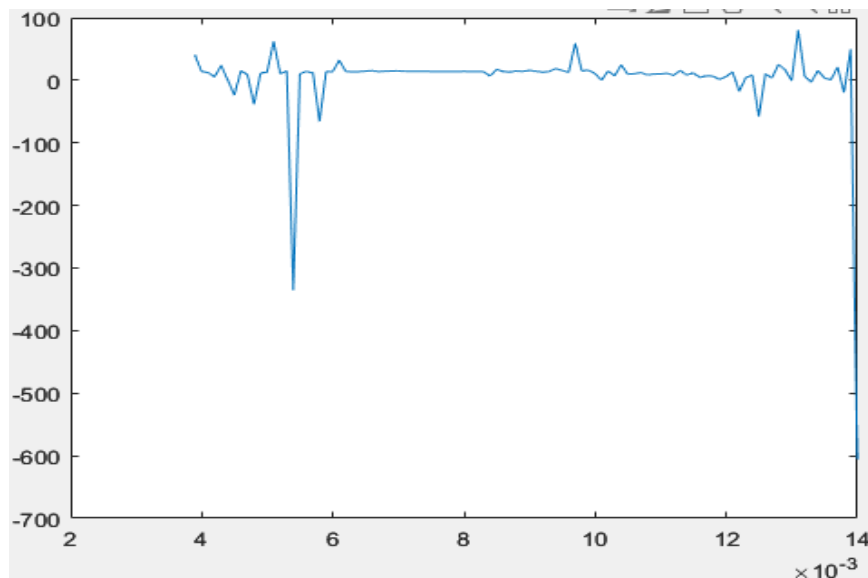


Рисунок 3.20 – Зміна опору в час

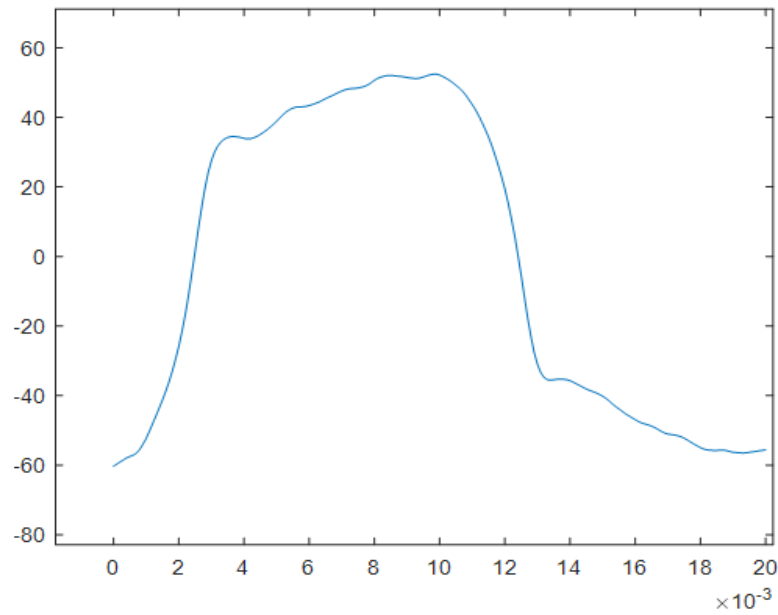


Рисунок. 3.21 – Активна характеристика ВЛ80 (зліва) та взаємна характеристика ВЛ80 (праворуч)

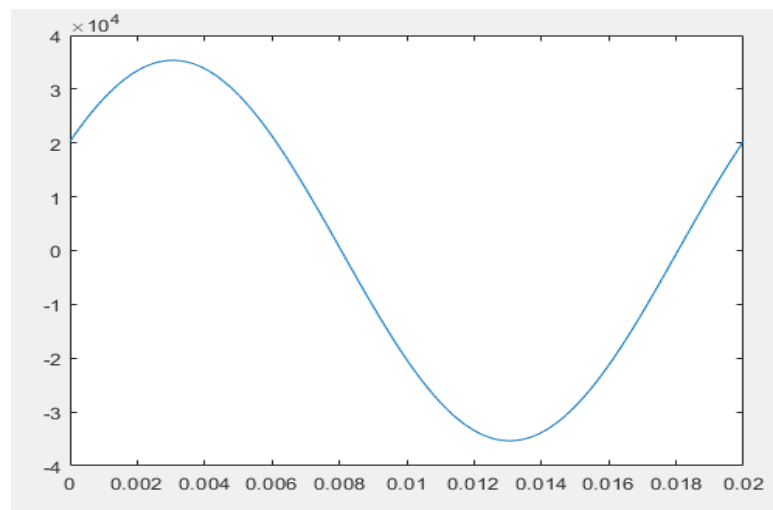


Рисунок. 3.22 – Наведено часові характеристики ВЛ80 за півперіод зміни електричної величини

На рисунку 3.24 показані часові залежності характеристик ДСЗ за півперіод зміни електричної величини.

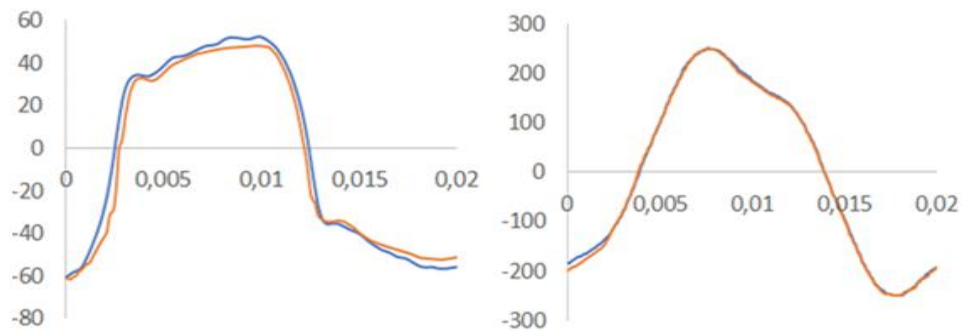


Рисунок 3.25 – Зіставлення розрахованого струму електровозу з оригіналом, ВЛ80 (ліворуч) та ДС3

Розбіжність отриманих характеристик для ДС3 не перевищує 5%, що свідчить про допустиму точність відтворення електромагнітних процесів у системі електропостачання. Відповідно, отримані значення коефіцієнта несинусоїдної напруги на виводах районної обмотки змінного струму мають такі значення: $K_{UAB} = 2\%$, $K_{UBC} = 2,5\%$, $K_{UCA} = 2,5\%$.

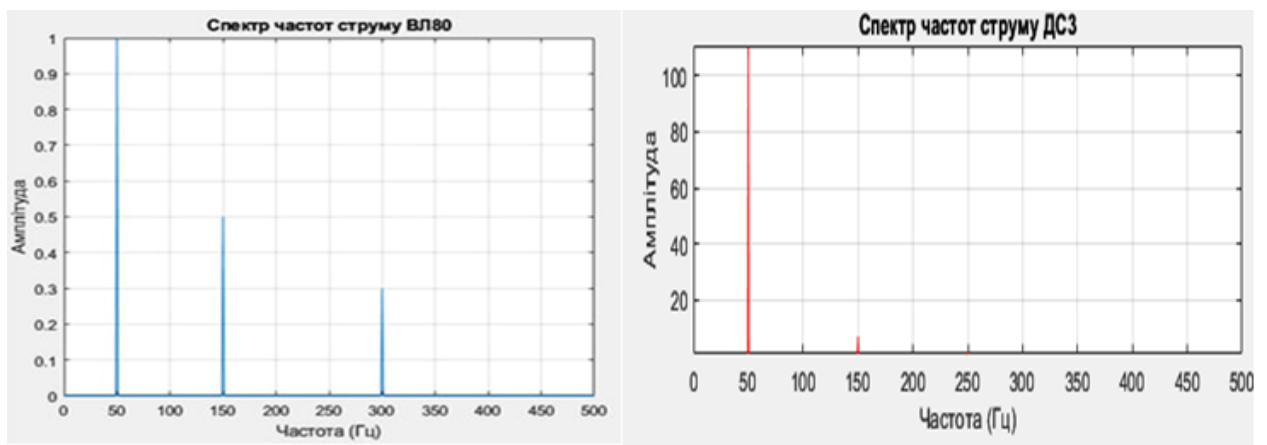


Рисунок 3.26 – Спектр частот струму, ВЛ80 та ДС3

Ця формула використовується для обчислення коефіцієнта гармонічного спотворення струму I_{THD} , який показує рівень гармонічних спотворень у струмі. Формула виглядає так [26]:

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (3.22)$$

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

На основі проведених досліджень, представлених у трьох розділах, зроблено такі проміжні висновки:

До розділу 1: аналіз проблематики моделювання електрорухомого складу для дослідження несинусоїдних режимів роботи виявив складність існуючих моделей, що ускладнює їхнє практичне застосування. Визначено ключові задачі дослідження, серед яких розробка методу розрахунку миттєвих параметрів, створення комп'ютерної моделі системи тягового електропостачання та перевірка її адекватності. Це створило основу для подальшого вдосконалення методів аналізу й оптимізації енергетичних процесів.

До розділу 2: проведене моделювання енергетичних процесів підтвердило важливість врахування активних і обмінних характеристик у системах тягового живлення для забезпечення ефективності й стабільності їхньої роботи. Удосконалено методика прогнозування й корекції характеристик, які змінюються з часом, що дозволяє точніше оцінювати струмові навантаження в умовах реальної експлуатації. Цей етап став ключовим для подальшого аналізу оптимізації енергетичних процесів.

До розділу 3: у рамках дослідження отримано активні й обмінні характеристики електровоза ДСЗ за допомогою універсального методу їх побудови. Встановлено необхідність вдосконалення чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь, зокрема використання методу зворотного диференціювання, що демонструє високу точність і стабільність розрахунків. Результати дослідження підтвердили значення показника несинусоїдності напруги при впливі однофазного нелінійного навантаження, що має вирішальне значення для оптимізації роботи електровозів.

Комплексний підхід до вирішення поставлених задач дозволив досягти таких результатів:

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Створено модель системи тягового електропостачання, що враховує миттєві параметри, яка продемонструвала високу точність і адекватність;

Запропоновано вдосконалені чисельні методи для аналізу енергетичних процесів, що сприяють підвищенню стабільності та ефективності систем;

Досліджено параметри несинусоїдності напруги, що має важливе практичне значення для модернізації електрорухомого складу.

Ці результати є вагомим внеском у розвиток теорії та практики моделювання електрорухомого складу для вирішення проблем несинусоїдних режимів роботи.

					02.15.ЕЕ2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Метод моделювання системи тягового електропостачання URL: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core-/bitstreams/bcca43d2-992b-4fab-b64d-fe7c2b29a458/content> (дата звернення: 12.11.2024).
2. Моделювання взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації електроенергії з розосередженою системою тягового електропостачання. URL: https://crust.ust.edu.ua/server/-_api/core/bitstreams/cf1d379e-9418-4868-bd6f-39bb9aeede13/content (дата звернення: 12.11.2024).
3. Гулак С., Ткаченко В. Теорія адаптивної компенсації реактивної потужності електричного рухомого складу залізниць : монографія. Вінниця, 2022. 256 с.
4. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою 35–110 кВ : навчальний посібник / ВНТУ. – Вінниця, 2018. – 110 с.
5. Казачковський М. С. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти : навчальний посібник. Дніпро, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", 2019. 320 с.
6. Про схвалення Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року // Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 16 грудня 2009р. №1555-Р.
7. Технічні характеристики тягового двигуна ДТК-820 та аналіз його роботи. URL: <https://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/7079-1/Методичні%20вказівки.pdf> (дата звернення: 17.11.2024).
8. Системи електропостачання електричного рухомого складу. URL: <https://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/2424/1/Підручник.pdf> (дата звернення: 09.01.2025).
9. Півняк Г. Г. Перехідні процеси в системах електропостачання : монографія. Дніпро, 2019. 345 с.
10. Транспортна стратегія України на період до 2020 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.12.2010р. №2818-VI.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

11. Мелешко В. В. Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу : дис. ... д-ра філософії : 141. Дніпро, 2020. 194 с.

12. Підвищення ефективності передачі електроенергії для нетягових споживачів електрифікованих залізниць змінного струму URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/b2e42cd7-b69e-4e3a-b5fd-35c5efbe3afc/full> (дата звернення: 19.11.2024).

13. Теорія електричних кіл URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/fb141f21-c1b6-45ba8b7cf86acd7c-01-e4-/content> (дата звернення: 19.11.2024).

14. Підвищення ефективності передачі електроенергії для нетягових споживачів електрифікованих залізниць змінного струму URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/b2e42cd7-b69e-4e3a-b5fd-35c5efbe3afc/full> (дата звернення: 19.11.2024).

15. Національний репозитарій академічних текстів України URL: <https://nrat.ukrintei.ua/> (дата звернення: 19.11.2024).

16. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги: монография в 2 т. / Днепрпетровск: Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 2. 364 с.

17. Підвищення точності визначення показників якості електричної енергії URL: <https://ela.kpi.ua/server/-api/core/bitstreams/21eb30c1-705d-44d8-ba30-17cd86ea8efc/content> (дата звернення: 19.11.2024).

18. Прогнозний баланс електроенергії об'єднаної електроенергетичної системи України на 2021 року станом на 24.09.2021 URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245582199&cat_id=245183250 (дата звернення: 19.11.2024).

19. Прогнозний баланс електроенергії об'єднаної електроенергетичної системи України на 2022 року станом на 11.11.2021 URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245605720&cat_id=245183250 (дата звернення: 20.11.2024).

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

20. Косарев Б. І., Щуров А. І., Фролов А. В., Силкін В. М. Активні та обмінні характеристики електричних ланцюгів при несинусоїдальних струмах і напругах. *Електрика*. 1989. № 9. С. 43–47.

21. Земський Д. Р. Підвищення ефективності передачі електроенергії для нетягових споживачів електрифікованих залізниць змінного струму : дис. ... канд. техн. наук : 141. Дніпро, 2020. 194 с.

22. Серебряков А. С., Герман Л. А., Максимова А. А. Моделювання кривої струму тягового навантаження залізниць. *Електрика*. 2016. № 8. С. 37-46.

23. Косарев А. Б. Основи теорії електромагнітної сумісності систем тягового електропостачання змінного струму. Київ, 2004. 272 с.

24. Yagup V. G., Krasnov O. O. Mathematical modeling of 2e15 electric locomotive electric traction system. Collected scientific works of ukrainian state university of railway transport. 2017. № 170. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.170.2017.111231> (дата звернення: 24.11.2024).

25. Zemskiy D. R., Sychenko V. G., Bosyi D. O. Simulation of the parallel operation of external and railway ac traction power supply system taking into account unbalanced conditions. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. Т. 2020. № 2. С. 74–85.

26. Міщенко Т.М. Босий Д.О Гармонійний аналіз первинних напруги та струму нових типів електровозів змінного струму [Електрон.ресурс]/ Режим доступу: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/f25b630f-27f4-4a9b-aaa5-2be5be080086/content> (дата звернення: 13.12.2024).

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90