

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у
структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу**

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-23ск

Андрій БАСТИЛЬ

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

БАСТИЛЬ Андрій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого
дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового
електровозу

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є визначення раціональної
схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової
електромеханічної системи двохосьового електровозу
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Особливості визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого
дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового
електровозу; II. Розрахунок раціональної схеми та визначення параметрів
згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи
двохосьового електровозу; III. Визначення оптимальних параметрів
згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи
двохосьового електровозу.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Залежність середнього значення випрямленої напруги і перших
трьох гармонік від кута відкривання тиристорів; II. Конструктивні
особливості та розміри згладжуючого дроселя.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		
III	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя	24.05.26
2	Вимоги щодо раціональної схеми та параметрів	29.05.26
3	Техніко-економічний розрахунок параметрів згладжуючого дроселя	02.06.26
4	Розрахунок типової потужності згладжуючого дроселя	07.06.26
5	Визначення оптимальних геометричних розмірів згладжуючого дроселя	11.06.26
6	Практична реалізація запропонованих рішень	14.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Андрій БАСТИЛЬ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу»

41 с., 2 рис., 35 літературних джерел

Мета роботи: Оптимізація показників енергоефективності, надійності та комутаційної стійкості тягової електромеханічної системи двохосьового електровоза шляхом наукового обґрунтування раціональної схеми включення та високоточного визначення параметрів згладжуючого індуктивного обладнання, а також обґрунтування оптимальної схемотехнічної структури та визначення раціональних електричних і масогабаритних параметрів згладжуючого дроселя для забезпечення високих показників енергоефективності, електромагнітної сумісності та надійності тягової електромеханічної системи двовісного електровозу в умовах жорстких обмежень на осьове навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Проаналізувати гармонійний склад вихідної напруги сучасних тягових перетворювачів (тиристорних випрямлячів або транзисторних чоперів) та визначити їхній негативний вплив на тепловий та комутаційний стан тягових електродвигунів (ТЕД).

Проаналізувати режими роботи та гармонійний склад струму в силовому ланцюзі двовісного електровоза при живленні від випрямно-інверторних перетворювачів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Здійснити порівняльний аналіз схемних рішень інтеграції згладжуючих дроселів (індивідуальне згладжування для кожного ТЕД проти групового загальноприводного контуру).

Оцінити вплив високочастотних та низькочастотних пульсацій струму на тепловий стан, комутаційні процеси та коефіцієнт корисної дії тягових електродвигунів.

Розробити математичну модель електромагнітних процесів у колі "імпульсний перетворювач – згладжуючий дросель – якір ТЕД" з урахуванням нелінійності кривої намагнічування феромагнітного осердя дроселя.

Провести порівняльний аналіз різних схем інтеграції згладжуючих пристроїв (індивідуальні дроселі для кожного двигуна, загальний дросель, багатофазні системи із взаємодукцією).

Розрахувати граничні параметри індуктивності та струму насичення дроселя, які забезпечують зниження коефіцієнта пульсацій струму до нормативних значень у всьому діапазоні регулювання швидкості.

Розробити комплексну методику розрахунку мінімально необхідної індуктивності дроселя, яка враховує динамічні режими роботи електровоза (пуск, боксування, гальмування).

Оцінити масо-габаритні характеристики проектного дроселя та розробити рекомендації щодо його раціонального розміщення у кузові або візку двохосьового локомотива.

Оптимізувати геометричні та конструктивні параметри дроселя (матеріал магнітопроводу, тип обмотки, система охолодження) з метою мінімізації його маси та габаритів під задані просторові обмеження двовісного ходового візка.

ДВОХОСЬОВИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, ТЯГОВА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, ЗГЛАДЖУЮЧИЙ ДРОСЕЛЬ, ІНДУКТИВНІСТЬ, ПУЛЬСАЦІЇ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СТРУМУ, МАГНІТНЕ НАСИЧЕННЯ, ВИЩІ ГАРМОНІКИ, КОМУТАЦІЯ,
ЕНЕРГЕТИЧНІ ВТРАТИ, ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	9
Розділ 1. Особливості визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу	16
1.1. Загальні положення щодо визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу	16
1.2. Вимоги щодо раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу	18
Розділ 2. Розрахунок раціональної схеми та визначення параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу	20
2.1. Техніко-економічний розрахунок параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу .	20
2.2. Розрахунок типової потужності згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу.....	23
Розділ 3. Визначення оптимальних параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу	25
3.1. Визначення оптимальних геометричних розмірів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу	25
3.2. Практична реалізація запропонованих рішень щодо визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу.....	27

Висновки	34
Список використаних джерел	36
Додаток А.....	40
Додаток Б	41

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Особливості та сфера застосування двовісних електровозів

У сучасній системі залізничного транспорту та промислової логістики важливе місце посідає маловісний тяговий рухомий склад, зокрема двовісні електровози.

Вони широко використовуються для виконання маневрових робіт на великих станціях, обслуговування внутрішньозаводських колій металургійних, гірничо-збагачувальних та хімічних підприємств, а також у кар'єрному транспорті.

Специфіка двовісних електровозів полягає в тому, що вони повинні мати високу маневровість, здатність проходити криві малого радіуса та забезпечувати значне тягове зусилля за відносно невеликої власної маси.

Оскільки кількість осей обмежена двома, виникає критична інженерна суперечність: з одного боку, необхідно забезпечити достатню зчіпну масу для реалізації сили тяги без боксування, а з іншого — суворо дотримуватися лімітів на максимальне навантаження від осі на рейку, щоб не допустити руйнування колійної інфраструктури.

Це висуває надзвичайно жорсткі вимоги до розподілу маси та габаритів усього силового електрообладнання, розміщеного на локомотиві.

Проблема гармонійних спотворень у тягових мережах

Сучасні системи керування тяговим приводом базуються на використанні напівпровідникових перетворювачів (тиристорних випрямлячів, транзисторних інверторів або імпульсних переривників).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робота цих пристроїв неминуче супроводжується викривленням форми струму та напруги, тобто появою вищих гармонійних складових (пульсацій).

У тягових електромеханічних системах постійного або пульсуючого струму ці пульсації накладаються на корисну постійну складову струму, що протікає через тягові двигуни.

Наявність змінного складника в колі живлення двигунів призводить до низки негативних наслідків:

- Погіршення комутації. У колекторних двигунах пульсації струму викликають появу додаткової реактивної ЕРС у комutowаних секціях, що провокує іскріння під щітками, прискорений знос колектора та загрозу виникнення колового вогню.

- Додаткові втрати енергії. Вищі гармоніки викликають додатковий нагрів обмоток (через ефект витіснення струму) та магнітопроводу двигуна (через втрати на вихрові струми та гістерезис), що знижує загальний ККД локомотива.

- Пульсації моменту. Змінна складова струму створює коливання електромагнітного моменту на валу двигуна. Це викликає крутильні вібрації в елементах тягового редуктора та колісних парах, що прискорює їх механічний знос та знижує коефіцієнт зчеплення коліс із рейками, провокуючи боксування.

Роль згладжуючого дроселя та конструктивний компроміс

Основним і найбільш надійним засобом придушення шкідливих пульсацій струму в силових ланцюгах є включення послідовно з двигунами згладжуючих дроселів (реакторів).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Дросель за рахунок своєї індуктивності накопичує енергію під час зростання імпульсу напруги та віддає її під час спаду, вирівнюючи графік струму.

Проте, традиційне проектування згладжуючих дроселів часто базується на принципі максимального збільшення індуктивності, що автоматично веде до значного зростання маси мідної обмотки та сталевого сердечника.

Для двовісного електровоза такий підхід є неприпустимим. Надмірна вага згладжуючого обладнання може порушити центрування локомотива, перевищити ліміт осьового навантаження або забрати корисний простір всередині кузова, який необхідний для систем охолодження чи гальмівного обладнання.

Необхідність комплексного наукового підходу

У зв'язку з цим виникає гостра потреба у визначенні саме раціональної схеми та параметрів дроселя.

Це означає, що індуктивність не повинна бути надлишковою; вона має бути точно розрахована так, щоб знизити коефіцієнт пульсацій струму до безпечного для двигунів рівня (зазвичай не більше кількох відсотків), але при цьому мати мінімально можливу вагу.

Раціональність схеми передбачає вибір варіанту взаємного підключення. Наприклад, використання одного потужного дроселя на обидва двигуни дозволяє виграти в загальній масі, але може призвести до нерівномірного розподілу струмів між осями при боксуванні.

Навпаки, індивідуальні дроселі забезпечують автономність роботи кожної осі, але збільшують кількість одиниць обладнання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Сучасні концепції також розглядають варіанти спарених дроселів із взаємодукцією, які дозволяють суттєво зменшити габарити при збереженні високої ефективності згладжування в нормальних та перехідних режимах.

Практичне значення дослідження

Таким чином, дана науково-практична робота є вкрай актуальною для сучасного транспортного машинобудування. Вона дозволяє розв'язати комплексну оптимізаційну задачу на стику силової електроніки, теорії електричних машин та динаміки рухомого складу. Результати дослідження дадуть змогу розробляти високоефективні, компактні та легкі системи фільтрації для маневрових та промислових локомотивів, що забезпечить зниження експлуатаційних витрат, підвищення надійності двигунів та покращення тягово-зчіпних властивостей електровоза в цілому.

Електромагнітна сумісність у тягових колах локомотивів

У сучасних структурах тягових електроприводів двохосьових промислових та рудникових електровозів для регулювання напруги на затискачах ТЕД постійного або пульсуючого струму застосовують напівпровідникові перетворювачі — тиристорні випрямлячі або транзисторні (IGBT) переривники (чопери).

Вихідна напруга таких пристроїв має яскраво виражений дискретний (імпульсний) характер.

Подача такої напруги безпосередньо на обмотки двигуна викликає появу значних змінних складових у тяговому струмі — пульсацій.

Пульсації струму мають вкрай негативний вплив на електромеханічну систему:

- **Тепловий перегрів:** вищі гармоніки викликають додаткові втрати в міді обмоток (через ефект витіснення струму) та в сталі магнітопроводу

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

(вихрові струми та гістерезис), що знижує ККД приводу та прискорює деградацію ізоляції.

- **Погіршення комутації:** у колекторних ТЕД змінний струм створює трансформаторну ЕРС у комутованих секціях, що призводить до сильного іскріння під щітками (кругового вогню).
- **Пульсації моменту:** нерівномірний крутний момент викликає підвищені динамічні навантаження на зубчасту передачу двох колісних пар локомотива, провокуючи механічний знос та схильність до боксування.

Для гасіння цих шкідливих ефектів послідовно в коло двигунів вмикають згладжуючі дроселі (реактори).

Математичний апарат визначення параметрів дроселя

Головним параметром згладжуючого дроселя є його індуктивність L .

Її розрахунок базується на забезпеченні допустимого розмаху пульсацій струму при найнесприятливішому режимі роботи перетворювача.

Для широтно-імпульсного регулятора (ШІР) з амплітудою вхідної напруги U , частотою комутації f та коефіцієнтом заповнення (шпаруватістю), максимальний розмах пульсацій струму спостерігається при шпаруватості 0.5 і визначається простим виразом.

Звідси необхідна індуктивність згладжуючого дроселя розраховується за не дуже складною формулою.

Допустиме значення амплітуди пульсацій (зазвичай не більше 3–5% від номінального струму ТЕД для забезпечення безіскрової комутації).

При розрахунку геометричних параметрів дроселя критично враховувати нелінійну залежність індуктивності від робочого струму через насичення магнітної системи за максимальних пускових струмів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дросель повинен мати повітряні зазори в магнітопроводі для стабілізації індуктивності при перевантаженнях.

Порівняльний аналіз схем конфігурації згладжуючих систем

Критерій порівняння	Індивідуальна схема (дросель на кожен двигун)	Груповою схема (один загальний дросель на візок)
Електрична автономність	Повна. Режими роботи одного ТЕД не впливають на інший. Проста реалізація індивідуального протибоксувального захисту.	Відсутня. Виникає електромагнітний взаємовплив паралельно або послідовно увімкнених двигунів.
Ефективність згладжування	Максимальна. Індуктивність підбирається точно під параметри конкретного типу ТЕД.	Середня. Можливий перерозподіл гармонік між гілками при паралельному з'єднанні двигунів.
Масо-габаритні показники	Вища сумарна маса обладнання через необхідність виготовлення двох окремих корпусів та магнітопроводів.	Нижча загальна маса та менший простір для розміщення у кузові електровоза.

Надійність системи	Вища. У разі виходу з ладу одного дроселя, локомотив може продовжувати рух на одному ТЕД.	Нижча. Пошкодження дроселя повністю виводить з ладу всю тягову систему електровоза.
---------------------------	---	---

Практичне значення

Визначення раціональних параметрів згладжуючого індуктивного обладнання дозволяє знайти компроміс між жорсткими обмеженнями на масу і габарити двохосьового електровоза (особливо рудникових типів, де габарити обмежені розмірами виробок шахт) та вимогами щодо забезпечення довговічності ТЕД.

Оптимально розрахований дросель знижує середню робочу температуру ізоляції двигунів на **10–15°C**, що подвоює її термін служби та мінімізує витрати на капітальні ремонти рухомого складу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Розділ 1. Особливості визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

1.1. Загальні положення щодо визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

Керований випрямний міст для живлення тягових двигунів є джерелом пульсуючої напруги, імпульси якої слідує з частотою 100 Гц.

Пульсуюча напруга характеризується наявністю як постійної складової, так і змінної.

Величина цих складових, в основному, визначається кутом відкриття тиристорів.

Отже, незалежно від параметрів силового кола, джерело генерує спектр гармонійних складових напруги.

Цим визначаються умови вибору параметрів силової схеми.

Найбільші ускладнення в роботі тягових двигунів викликають змінні складові напруги, тому забезпечення нормального режиму роботи можливе при:

- усуненні змінних складових у допустимих нормах безпосередньо на машинах, з введенням у силове коло згладжуючого пристрою

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1				Лім.	Лист	Листів
Розробив	Бастиль А.А.										
Перевірив	Сінчук І.О.									16	4
Реценз.									КНУ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук І.О.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

- врівноваженні їх на обмотках двигуна за рахунок індуктивних падінь напруги.

У даній роботі основна увага приділялась розгляду випадку зменшення гармонійних складових випрямленої напруги в тягових двигунах при живленні від мостового тиристорного випрямляча з несиметричним управлінням.

На сьогодні зменшення пульсацій випрямленої напруги в основному здійснюється шляхом введення в силові схеми додаткових індуктивних опорів, що іменуються згладжуючими пристроями.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Вимоги щодо раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

Експлуатація згладжуючого пристрою, що встановлюється на шахтному електровозі, насамперед характеризується своєрідними шахтними умовами: підвищеною вологістю, наявністю пилу в повітрі, відносною постійністю температури, різними механічними впливами (вібрацією, тряскою).

Конструкція згладжуючого пристрою повинна бути такою, щоб вона могла надійно працювати протягом строку служби електровоза, протистояти механічним впливам, зберігати працездатність при підвищеній вологості.

Згладжуючий пристрій насамперед обумовлений електрично і повинен відповідати таким вимогам:

1. забезпечення зміни індукції L у допустимих межах;
2. забезпечення допустимої пульсації випрямленого струму в тягових двигунах;
3. забезпечення допустимої температури перегріву.

Окрім електричних вимог до згладжуючих пристроїв ставляться конструктивно-економічні, головними з яких є:

1. забезпечення оптимальних розмірів для отримання мінімального значення одного з техніко-економічних показників — маси, об'єму, вартості;
2. забезпечення максимальної магнітної проникності $\mu_{\text{тах}}$ при значних величинах індукції $B_{\text{нп}}$ з метою отримання максимальної потужності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

При заданих електричних параметрах можливо спроектувати згладжувальні пристрої, які матимуть найменший можливий об'єм і масу.

Найменший об'єм і маса є першочерговими вимогами для згладжуючого пристрою, що встановлюється на шахтному електровозі, де особливо важливо зменшити об'єм апаратури.

Вибір згладжуючого пристрою виконаємо у двох випадках:

1. із застосуванням згладжуючого дроселя (ЗДр);
2. трансформаторного фільтра.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Розрахунок раціональної схеми та визначення параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

2.1. Техніко-економічний розрахунок параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

Вихідними даними для розрахунку ЗДр є його індуктивність та розрахунковий ефективний струм, що проходить через дросель.

Від правильного вибору індуктивності згладжуючого пристрою залежать: допустима пульсація струму в обмотках машин, нагрів тягових двигунів, режим роботи випрямного пристрою.

Мала величина індуктивності викликає появу в обмотках двигуна переривчастого струму, що є неприпустимим режимом роботи для тягових машин.

Одним з критеріїв вибору індуктивності згладжуючого пристрою для шахтних тягових двигунів є допустимий коефіцієнт пульсації струму, який в основному визначає допустимий нагрів машини при різних режимах її роботи.

У практиці розрахунку згладжуючих пристроїв для промислових електровозів із випрямними установками та двигунами постійного струму коефіцієнт пульсації випрямленого струму при номінальному режимі приймається в межах $K_p = 0,2-0,25$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив	Бастиль А.А.				Розділ 2	Літ.	Лист
Перевірів	Сінчук І.О.						20
Реценз.							5
Н. Контр.	Сінчук І.О.					КНУ ЗЕЕМ-23ск	
Затвердив	Пересунько І.І.						

При такому коефіцієнті пульсації додаткові втрати в двигуні від пульсації в сумі становлять 1,5% підведеної потужності.

За розрахунковий режим приймаємо такий режим, при якому сума постійної складової та амплітуд змінних складових $\Sigma \Delta I_m$ струму через дросель буде максимальною.

При цьому магнітна система дроселя лише досягне стану насичення.

Для забезпечення безперервності струму в двигуні необхідно, щоб виконувалась відповідна нерівність.

Амплітуда змінної складової основної гармоніки струму при $K_p = 0,2$ у годинному режимі: $\Delta I_m = 40$ А.

Найбільше можливе значення основної гармонійної складової U_m напруги при діючому значенні в мережі $U = 430$ В: $U_m = 550$ В (кут затримки $\alpha = 60^\circ$).

Тоді індуктивність дроселя на основній гармонійній складовій напруги та струму:

$$L_{дрн} = \frac{U_m}{I_m \omega} = \frac{430}{40 \cdot 628} = 0,0171 \text{ Гн}$$

З урахуванням того, що індуктивність згладжуючого пристрою при номінальному режимі становить $0,6L_{др}$ від ненасиченого стану, початкове значення індуктивності:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

$$L_{\text{др}} = \frac{L_{\text{дрн}}}{0,6} = 0,0285 \text{ Гн}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Розрахунок типової потужності згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

Поняття типової потужності дозволяє застосувати до розрахунку згладжуючого пристрою відомі з теорії трансформаторів закономірності, що визначають оптимальні співвідношення розмірів і маси.

Потужність дроселя:

$$P_{\text{др}} = I_p \frac{U_{\text{тр}}}{\sqrt{2}} \cdot 10^{-3} \text{ [кВА]}$$

де I_p — розрахунковий ефективний струм в обмотці дроселя, А; $U_{\text{тр}}$ — амплітуда основної гармонійної напруги, В.

У годинному режимі роботи двигунів з урахуванням основної гармонійної складової розрахунковий ефективний струм дорівнює:

$$I_p = \sqrt{I_d^2 + \frac{1}{2} I_m^2} = \sqrt{200^2 + \frac{40^2}{2}} = 202 \text{ А}$$

Потужність дроселя: $P_{\text{др}} \approx 61 \text{ кВА}$

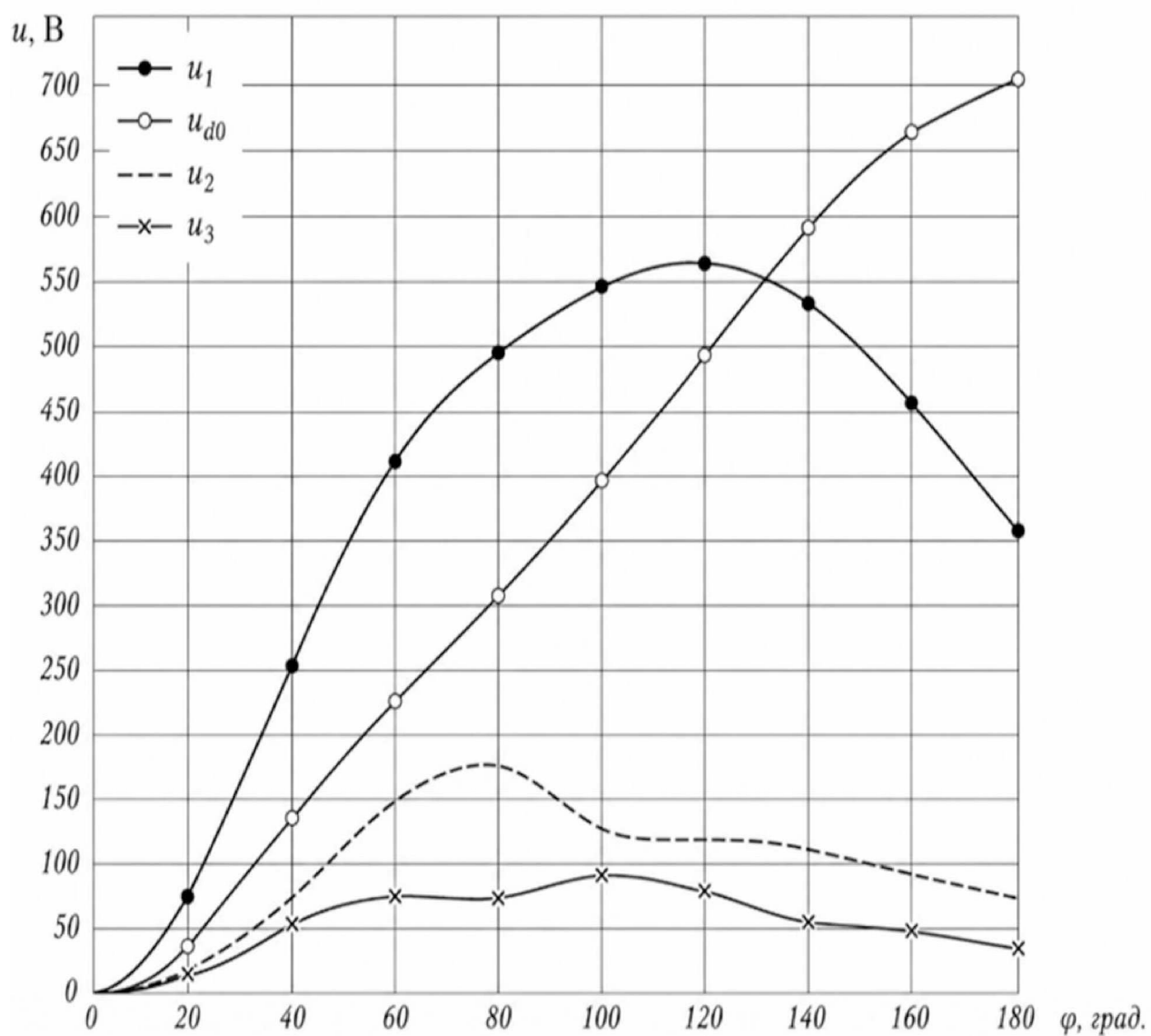


Рис. 2.1. Залежність середнього значення випрямленої напруги і перших трьох гармонік від кута відкривання тиристорів ($U_d=550\text{В}$)

Розділ 3. Визначення оптимальних параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

3.1. Визначення оптимальних геометричних розмірів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

Розрахунок згладжуючих пристроїв виконується узагальненим методом, що дозволяє наближено здійснити вибір оптимального рішення шляхом економічної оцінки досліджуваних варіантів.

Як відомо, при проектуванні трансформаторів і дроселів їх оптимальність забезпечується за рахунок техніко-економічних показників:

найменший об'єм,

маса та вартість активних матеріалів.

Оптимальність розмірів дроселя будемо шукати з умови мінімальності об'єму, що є першочерговою вимогою при виборі згладжуючих пристроїв для шахтних електровозів.

З існуючих конструкцій силових трансформаторів і дроселів найбільш поширені конструкції: броньова та стрижнева.

Приймаємо конструкцію магнітопроводу дроселя стрижневою з обмотками на двох стрижнях.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3				Лім.	Лист	Листів
Розробив	Бастиль А.А.										
Перевірів	Сінчук І.О.									25	9
Реценз.									КНУ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук І.О.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

Ставиться задача: визначити такі співвідношення між основними геометричними розмірами осердя та ярма, що забезпечують отримання максимальної потужності при найменшому об'ємі; визначити оптимальні значення магнітної індукції та густини струму залежно від типової потужності дроселя.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Практична реалізація запропонованих рішень щодо визначення раціональної схеми та параметрів згладжуючого дроселя у структурі тягової електромеханічної системи двохосьового електровозу

Об'єм активних матеріалів дроселя (листової сталі осердя, ярма та провідникового матеріалу котушок) можна представити у вигляді суми:

$$V = V_c + V_y + V_{cy} + V_k \text{ [см}^3\text{]}$$

де V_c — об'єм сталі стрижнів дроселя, V_y — об'єм ярма, V_{cy} — об'єм стиків ярма та стрижнів.

За базовий розмір дроселя приймаємо ширину стрижня осердя a .

Тоді розміри дроселя в відносних базисних одиницях дорівнюють:

$$X = \frac{C}{a}; Y = \frac{B}{a}; Z = \frac{H}{a}$$

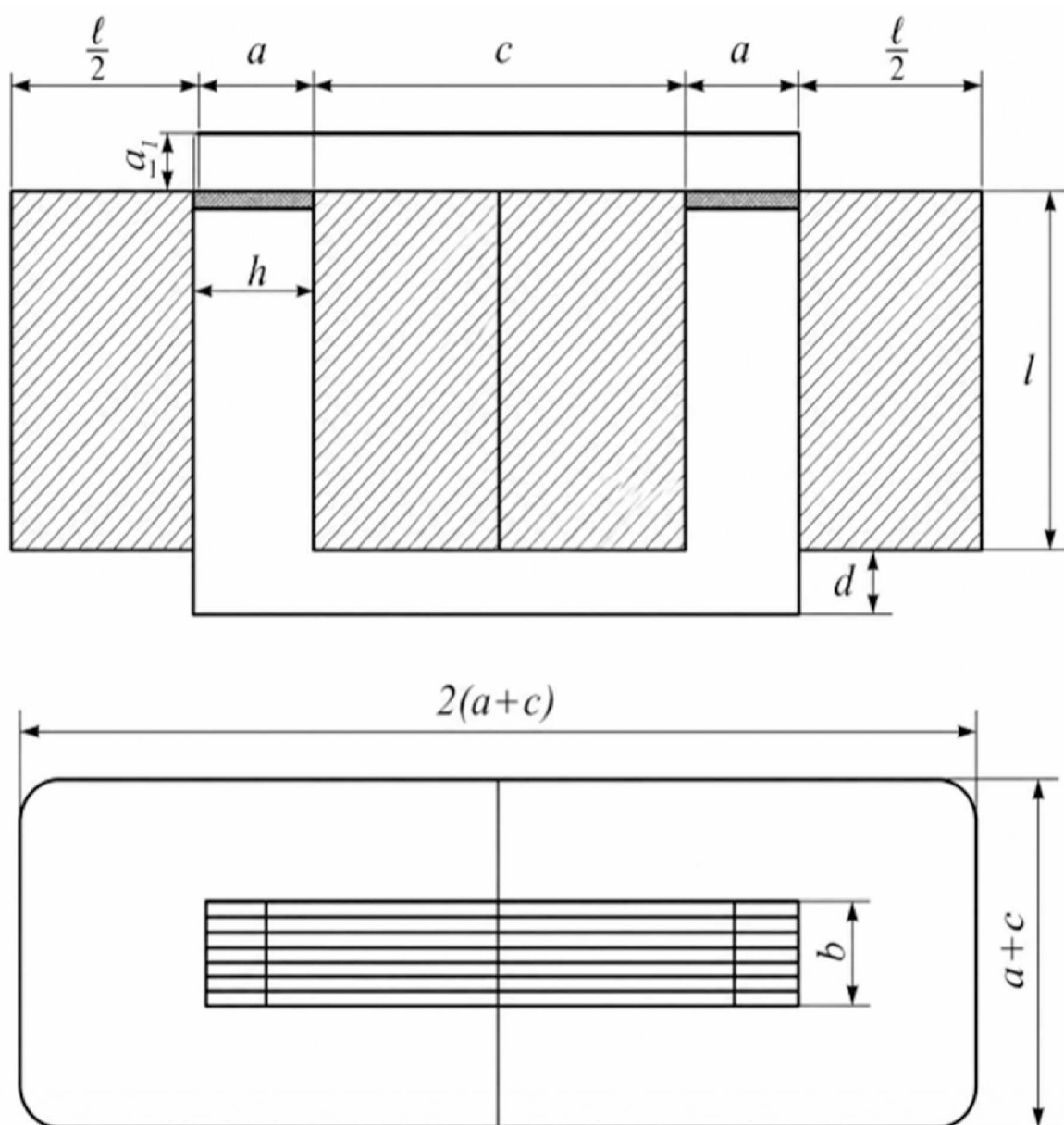


Рис. 3.1. Конструктивні особливості та розміри згладжуючого дроселя

Активні об'єми сердечника та обмотки дроселя дорівнюють:

$$V_c = 2a^3 y(x + z + 2)k_c, \text{ см}^3$$

$$V_k = 2a^3 xz(x + y + 1)k_m, \text{ см}^3$$

де, k_c і k_m - відповідно коефіцієнти заповнення магнітопроводу та обмотки.

Типова потужність трансформатора:

$$P_T = P_D = I_p \frac{U_{\text{тр}}}{\sqrt{2}}$$

Ефективне значення на трансформаторі:

$$U_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{тр}}}{\sqrt{2}} 4kf \cdot w_1 \cdot S_c \cdot k_c \cdot B_m \cdot 10^{-4}, B$$

Так як у вікні трансформатора є дві обмотки w_1 та w_2 , то приведене число витків обмотки у вікні дроселя $w_0=2w_1$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді:

$$U_{\text{тр}} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot k \cdot f \cdot w_0 \cdot S_c \cdot k_c \cdot B_m \cdot 10^{-4}, B$$

Практично можна вважати, що

$$I_p = jq, A$$

$$w_0 q = S_k k_m 10^{-2}, \text{мм}^2$$

$$S_k = cH = a^2 xz, \text{см}^2$$

Тоді:

$$P_{\text{т}} = P_{\text{др}} = 2 \cdot k \cdot f \cdot j \cdot a^4 x y z \cdot k_c \cdot k_m \cdot B_m \cdot 10^{-2}, BA$$

При заданій потужності Р габарити дроселя зменшуються зі збільшенням частоти.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виразимо об'єм дроселя через удільний техніко-економічний показник:

$$v = \frac{V}{P} = \frac{(V_c + V_k) \cdot 10^2}{2 \cdot k \cdot f \cdot a^4 x y z \cdot k_c \cdot k_m \cdot j \cdot B_m} =$$

$$= C \cdot y(x + z + 2) \cdot k_c + xz(x + y + 1) \cdot k_m, \frac{\text{см}^3}{\text{ВА}}$$

Мінімальність показника v визначають із умови:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{x^2 z k_m - y z k_c - 2 y k_c}{x^2 y^2 z^2} = 0$$

Звідки відносна активна ширина вікна:

$$X_{min} = \sqrt{\left(y + \frac{2y}{z}\right) \cdot \frac{k_c}{k_m}}$$

Матеріал осердя: електротехнічна (трансформаторна) холоднокатана сталь марки 3330 з товщиною листів 0,35 мм з лакуванням їх лаком пічного сушіння.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт K_c заповнення приймається рівним 0,94.

Коефіцієнт заповнення обмотки міддю $K_m = 0,407$ згідно таблиці.

Щоб магнітопровід дроселя не насичувався в номінальному режимі, приймаємо за розрахункову величину індукції $B_m = 1,1$ Тл.

Такому значенню індукції відповідає $H_t = 2,13$ А/см.

Густина струму в провіднику $j = 4,0$ А/мм².

За базовий розмір осердя дроселя приймаємо $a = 6,0$ см, при відносній товщині пакета стрижня $y = 2$ та висоті вікна $z = 6$.

Оптимальне значення відносної ширини вікна визначається за відповідним рівнянням.

$$X_{min} = 2,5$$

Потужність дроселя при найменшому об'ємі: $P = 61$ кВА

Попередні геометричні розміри дроселя при базовій величині $a = 6$ см:

- Ширина вікна: $c = x \cdot a \approx 16$ см
- Товщина пакета стрижня: $b = y \cdot a = 10$ см
- Висота обмотки: $H = z \cdot a = 36$ см
- Довжина: $2(a + c) = 2(6 + 16) = 44$ см
- Ширина: $(b + c) = 10 + 16 = 26$ см

Число витків обмоток дроселя: $W = 440$ витків

Переріз дроту: $q = I_p / j = 202 / 4,0 \approx 50,4$ мм²

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обмотки дроселя передбачаємо виконати з прямокутного дроту марки ПБ, найближчий переріз якого $q \approx 50,1 \text{ мм}^2$ (розміри дроту $10,0 \times 5,1 \text{ мм}$).

Кількість витків на одну обмотку $w_1 = w_2 = 220$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Проаналізувати гармонійний склад вихідної напруги сучасних тягових перетворювачів (тиристорних випрямлячів або транзисторних чоперів) та визначити їхній негативний вплив на тепловий та комутаційний стан тягових електродвигунів (ТЕД).

Проаналізувати режими роботи та гармонійний склад струму в силовому ланцюзі двовісного електровоза при живленні від випрямно-інверторних перетворювачів.

Здійснити порівняльний аналіз схемних рішень інтеграції згладжуючих дроселів (індивідуальне згладжування для кожного ТЕД проти групового загальноприводного контуру).

Оцінити вплив високочастотних та низькочастотних пульсацій струму на тепловий стан, комутаційні процеси та коефіцієнт корисної дії тягових електродвигунів.

Розробити математичну модель електромагнітних процесів у колі "імпульсний перетворювач – згладжуючий дросель – якір ТЕД" з урахуванням нелінійності кривої намагнічування феромагнітного осердя дроселя.

Провести порівняльний аналіз різних схем інтеграції згладжуючих пристроїв (індивідуальні дроселі для кожного двигуна, загальний дросель, багатофазні системи із взаємоіндукцією).

Розрахувати граничні параметри індуктивності та струму насичення дроселя, які забезпечують зниження коефіцієнта пульсацій струму до нормативних значень у всьому діапазоні регулювання швидкості.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробити комплексну методику розрахунку мінімально необхідної індуктивності дроселя, яка враховує динамічні режими роботи електровоза (пуск, боксування, гальмування).

Оцінити масо-габаритні характеристики проектного дроселя та розробити рекомендації щодо його раціонального розміщення у кузові або візку двохосьового локомотива.

Оптимізувати геометричні та конструктивні параметри дроселя (матеріал магнітопроводу, тип обмотки, система охолодження) з метою мінімізації його маси та габаритів під задані просторові обмеження двовісного ходового візка.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). Power Electronics: Converters, Applications, and Design (3rd ed.). John Wiley & Sons.
2. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrierlag.
3. Rashid, M. H. (Ed.). (2017). Power Electronics Handbook (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
4. Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). Design of Rotating Electrical Machines (2nd ed.). John Wiley & Sons.
5. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
6. McLyman, C. W. T. (2011). Transformer and Inductor Design Handbook (4th ed.). CRC Press.
7. Синчук, О. М., & Афанасьев, В. В. (2013). Системи тягового електроприводу рудникових електровозів. Кривий Ріг: КНУ.
8. Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2001). Fundamentals of Power Electronics (2nd ed.). Springer.
9. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. (Eds.). (2002). Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press.
10. Spiryagin, M., Cole, C., Sun, Y. Q., McClanachan, M., Spiryagin, V., & McSweeney, T. (2014). Design and Simulation of Rail Vehicles. CRC Press.
11. Kolar, J. W., & Ertl, H. (2002). Design and experimental evaluation of a high-power-density smoothing inductor for electric vehicle traction drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 17(5), 784-793.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

12. Staton, D. A., & Cavagnino, A. (2008). Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3509-3516. (Вплив пульсацій на тепловий стан).

13. Synchuk, O. M., & Kozakevych, I. A. (2016). Assessment of ripple current effects on commutating performance of DC traction motors. Electrical Engineering & Electromechanics, (1), 29-33.

14. IEC 60077-2:2017. Railway applications - Electric equipment for rolling stock - Part 2: Electrotechnical components - General rules. International Electrotechnical Commission.

15. Bataria, S., & Shrivastava, A. (2014). Optimization of smoothing reactor parameters in DC chopper-fed traction drives. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 58, 112-120.

16. Pivnyak, G., Volkov, A., & Shirin, L. (2014). Transport in the Mining Industry: Modern Challenges and Innovations. CRC Press.

17. Sullivan, C. R. (2001). Optimal choice of core material and winding geometry for high-frequency smoothing inductors. IEEE Transactions on Industry Applications, 37(5), 1412-1419.

18. Volkov, A., & Maly, V. (2019). Improving the smoothing efficiency in low-voltage traction networks of underground mines. E3S Web of Conferences, 105, 02011.

19. IEEE Std 11-2000. IEEE Standard for Rotating Electric Machinery for Rail and Road Vehicles. IEEE Power and Electronics Society.

20. Shchutsky, V. I., & Babokin, G. I. (2008). Electromechanical Systems of Mining Locomotives. Nedra.

21. Pyrgidis, C. N. (2016). Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation. CRC Press.
22. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
23. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). Power Electronics: Converters, Applications, and Design (3rd ed.). Wiley.
24. Rashid, M. H. (2017). Power Electronics Handbook (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
25. Kiel, E. (2008). Drive Technology: Advanced Controls for Electric Drives. Springer Science & Business Media.
26. Filippo, A., & Spagnolo, A. (2014). Analysis of current ripples in DC traction motors fed by static converters. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(4), 1540-1549.
27. Garcia-Ochandiano, J., & Zumel, P. (2011). Optimization of smoothing inductors for light rail vehicles and industrial locomotives. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 33(8), 1421-1428.
28. Emadi, A., Ehsani, M., & Miller, J. M. (2004). Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles. Marcel Dekker.
29. Su, M., & Dan, H. (2015). Design and weight minimization of smoothing reactors for industrial DC locomotives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(9), 5432-5441.
30. Zach, F. C. (2010). Power Electronics: Components, Circuits and Applications. Springer.
31. Pugi, L., Rindi, S., & Ercole, G. (2012). Modelling and simulation of a two-axle industrial locomotive with DC traction system. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 19(2), 115-134.

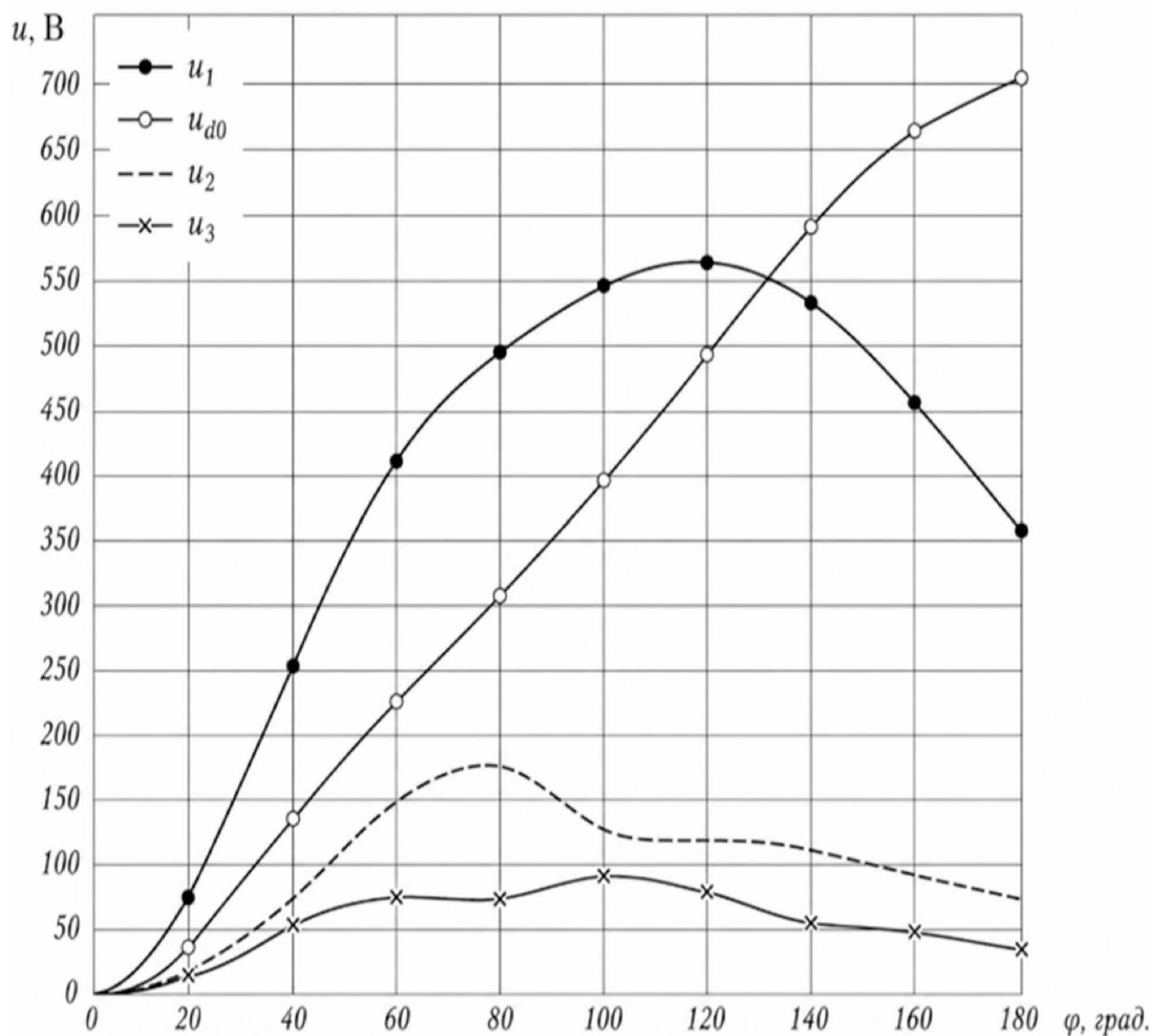
32. McLyman, T. (2011). Transformer and Inductor Design Handbook (4th ed.). CRC Press.

33. Czaininski, M., & Popescu, M. (2018). Interleaved converter configurations and shared smoothing reactors for weight reduction in light traction systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 33(2), 1025-1036.

34. Andrews, H. I. (2002). Railway Electric Traction. Butterworths.

35. Ribeiro, E., & Marques, G. D. (2007). Power quality issues and filter design in DC locomotive supply systems. European Power Electronics and Drives Journal, 17(3), 22-31.

Залежність середнього значення випрямленої напруги і перших трьох гармонік від кута відкриття тиристорів ($U_d=550\text{В}$)



Конструктивні особливості та розміри згладжуючого дроселя

