

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: Дослідження енергетичних процесів при рекуперації електроенергії в системі тягового електропостачання

за освітньою програмою Електротехнічні системи електроспоживання

зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи: ЕС2121

Студент групи ЕС2121

/ Ганна КРАСНОЦОКОВА /

Керівник:

/ зав.каф. Дмитро БОСИЙ /

Нормоконтролер:

/ доцент Віталій ПЕРЦЕВИЙ /

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

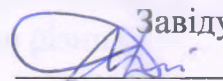
Студент

Дніпро – 2022 рік

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними процесами
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
Освітня програма: Електротехнічні системи електроспоживання
Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

 Завідувач кафедри ISE
Дмитро БОСІЙ

Дата 05.09.22

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістр з електротехнічних систем
електроспоживання

студенту КРАСНОЩОКОВІЙ Ганні Віталіївні

1. Тема роботи: Дослідження енергетичних процесів при рекуперації електроенергії в системі тягового електропостачання постійного струму
Керівник роботи: Босій Дмитро Олексійович, д.т.н., доцент

затверджені наказом від " 14 " 04 2022 р. № 318ст

2. Строк подання студентом роботи: 12.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи:

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

4.1 Аналіз стану електричних процесів в процесах передачі, перетворення та споживання енергії різними видами.

4.2 Рекуперація електричної енергії. Використання накопичувачів в системах електропостачання постійного струму.

4.3 Дослідження ефективності використання накопичувачів електроенергії для різних видів транспорту.

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

5.1. Обсяги споживання електроенергії залізницями України;

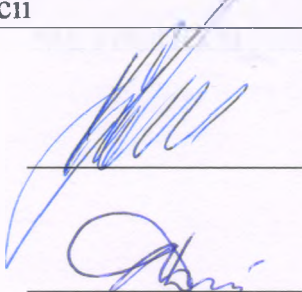
5.2. Залізничний транспорт товарів за видами транспорту, для основних підприємств у 2016 році - у% від загальної кількості транспортованих тонн;

5.3. Зовнішня характеристика (в.а.х.) і графік навантаження тягової підстанції при рекуперативному гальмуванні.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз стану електричних процесів в процесах передачі, перетворення та споживання енергії різними видами транспорту	15.09.2022	30%
2	Рекуперація електричної енергії. Використання накопичувачів в системах електропостачання постійного струму	19.10.2022	20%
3	Дослідження ефективності використання накопичувачів електроенергії для різних видів електротранспорту	22.11.2022	30%
4	Висновки та рекомендації	30.11.2022	10%
5	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	12.12.2022	5%
6	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	21.12.2022	5%

Студент


Ганна КРАСНОЩОКОВА

Керівник роботи


Дмитро БОСИЙ

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОЦЕСАХ ПЕРЕДАЧІ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ РІЗНИМИ ВИДАМИ ТРАНСПОРТУ	10
1.1 Функціонування транспортного сектору.....	10
1.2 Основа інтелектуалізації електроенергетичних систем.....	17
1.3 Системи енергозабезпечення транспорту.....	24
1.4 Висновок до розділу	35
2. РЕКУПЕРАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ. ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	36
2.1 Рекуперація інверторами на тягових підстанціях	38
2.2 Застосування накопичувачів енергії	50
2.3 Використання накопичувачів енергії та сучасні розробки автономного електричного транспорту	53
2.4 Висновок до розділу	56
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РІЗНИХ ВИДІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	57
3.1 Використання накопичувачів електроенергії для метрополітену	57
3.2 Використання накопичувачів електроенергії для наземного транспорту.....	71
3.3 Висновок розділу	81
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	82
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	83

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження енергетичних процесів при рекуперації електроенергії в системі тягового електропостачання постійного струму	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробник		Краснощогова					7	84
Керівник		Босий		19.02.22		УДУНТ, ІСЕ, гр. EC2121		
Н. контр.		Перцевий						
Зав. каф.		Босий		19.02.22				

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 84 сторінки, 3 частини, 61 рисунок, 4 таблиці, 17 використаних джерел.

Аналіз стану електричних процесів в процесах передачі, перетворення та споживання енергії різними видами транспорту через основи інтелектуалізації електроенергетичних систем та системи енергозабезпечення транспорту; Вивчення рекуперації електричної енергії через застосування накопичувачів енергії та процесу рекуперації інверторами на тягових підстанціях постійного струму; Дослідження ефективності використання накопичувачів електроенергії для метрополітену та міського наземного транспорту.

Ключові слова: РЕКУПЕРАЦІЯ, НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ІНВЕРТОРИ, СТРУМОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ, СТРУМОПРИЙМАЧІ, МЕТРОПОЛІТЕН, МІСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, ПАСАЖИРООБІГ

ВСТУП

Актуальність роботи. Електровози, електропоїзди, електромобілі та інші мобільні споживачі електроенергії, що дозволяють здійснювати швидке та ефективне переміщення пасажирів і вантажів, потребують спеціальних систем забезпечення їхнього живлення.

Практичне використання систем електропостачання у своїй більшості передбачає знання фахівцями галузі теорії фізичних (електромагнітних, перехідних) процесів, адже одного разу розроблене, сконструйоване та введене експлуатацію сучасне обладнання має працювати десятиріччями без необхідності його обслуговування та ремонту.

Звідси виникає потреба в розгляді та аналізі процесу передачі енергії від електростанцій через розподільні пристрої та лінії електропередач до кінцевого споживача – електротранспорту, який, як відомо, є особливим високопотужним споживачем. На цьому шляху виникає безліч проблем, вирішення яких продовжується і зараз: зменшення втрат при передачі енергії, задачі запобігання аварійних режимів, підвищення екологічності, надійності і ресурсу використовуваного обладнання та ін.

Якісному фахівцю-інженеру необхідно володіти основами знань про різновиди схем, режими роботи, показники якості електричної енергії, засоби захисту, умови електричної взаємодії системи електропостачання та електрорухомого складу, а також іншими питаннями, що дозволяють стати експертом у галузі.

При цьому слід мати на увазі, що, незважаючи на фізичну та моральну застарілість існуючих вітчизняних пристроїв електропостачання, що використовуються досі, такі знання не стануть на заваді при освоєнні принципів роботи і фізики процесів нового обладнання.

Для цього необхідно мати уявлення про закордонний досвід, перспективи розвитку електрифікації залізниць і їх зв'язок з досягненнями науково-технічного прогресу для впровадження найперспективніших систем в Україні.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Зв'язок роботи з науковими напрямками діяльності кафедри. Обране дослідження безпосередньо пов'язане з виконанням науково-дослідних робіт в Українському державному університеті науки та технологій.

Мета і завдання роботи. Дослідити процес рекуперації електроенергії в системі тягового електропостачання постійного струму.

Об'єкт дослідження - процес рекуперації електроенергії в системі тягового електропостачання постійного струму.

Предмет дослідження - економія електроенергії в системі рекуперації

Методи дослідження – вивчення розподілу та споживання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту, імітація моделювання схеми електропостачання метрополітену та міського транспорту.

Наукова новизна одержаних результатів. Для дослідження процесу рекуперації в метрополітені та міському транспорті створена імітаційна схема електропостачання з різними варіантами накопичувачів, що дає можливість побачити ефект застосування накопичувачів енергії

Практичне значення отриманих результатів. Придатні до використання у роботі міського електротранспорту.

Особистий внесок здобувача. Результати магістерської роботи впровадженні до науково-дослідних робіт в Українському державному університеті науки та технологій. Здобувачем самостійно проведено зіставлення та аналіз отриманих результатів, комп'ютерне моделювання розрахунків, формулювання висновків.

Публікації. Краснощоківа Г.В., Дослідження енергетичних процесів при рекуперації електроенергії в системі тягового електропостачання постійного струму /Транспортна інженерія [електронний ресурс]: збірник тез доповідей секції 14 міжнародна науково-практична конференція студентів молодих вчених імені Георгія Кірпи «Сучасні транспортні технології», яка проводилась Львівським інститутом Українського державного університету науки і технологій 08 грудня 2022 р. – Львів, 2022. – 145-146 с.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОЦЕСАХ ПЕРЕДАЧІ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ РІЗНИМИ ВИДАМИ ТРАНСПОРТУ

1.1 Функціонування транспортного сектору

Транспортний сектор є необхідною складовою для функціонування і сталого розвитку економіки держави. Працюючи у тісній взаємодії з виробництвом і споживанням, транспорт є каталізатором активності економіки і руху товарно-матеріальних потоків, підтримує мобільність робочої сили та задовольняє потреби населення у перевезеннях. Розвинена транспортна інфраструктура створює контури території і є базою для територіального розподілу праці, обумовлює динамічність і ефективність соціально-економічного розвитку як окремих регіонів, так і країни в цілому.

Сучасний стан транспортної галузі України переживає період глибокої системної кризи. Зазначене обумовлюється наявною системою управління транспортним комплексом, станом виробничо-технічної бази і технологічним рівнем організації перевезень, який за багатьма параметрами не відповідає потребам суспільства та європейським стандартам якості надання транспортних послуг, перешкоджає підвищенню ефективності функціонування та потребує докорінного реформування та модернізації.

На думку експертів, транспортна галузь досі не одержала комплексного розвитку, в основу якого покладені сучасна прогресивна організаційна структура та ефективна економічна модель розвитку, побудована на принципах конкуренції, запровадженні ефективних механізмів державного регулювання ринку, використанні інституту державно-приватного партнерства в реалізації крупних інвестиційних проектів, активізації інновацій в транспортній сфері, інтеграції національної транспортної системи до європейської та азійської транспортних систем, підвищення конкурентоздатності національної транспортної системи на світовому ринку обслуговування транснаціональних маршрутів [1].

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

За всю історію функціонування залізниць України частка електрифікованих залізниць із загальної експлуатаційної довжини залізничних колій, починаючи з 1980 р. і до цього часу постійно збільшується (рис. 1.1), складаючи станом на 2014 р. близько 10 000 км, що у відношенні до загальної експлуатаційної довжини складає 47 % [3]. Головною передумовою постійного збільшення електрифікованих залізниць протягом останніх 35 років є те, що питомі витрати електричної тяги менше від тепловозної у 1,8-2,2 рази [2].

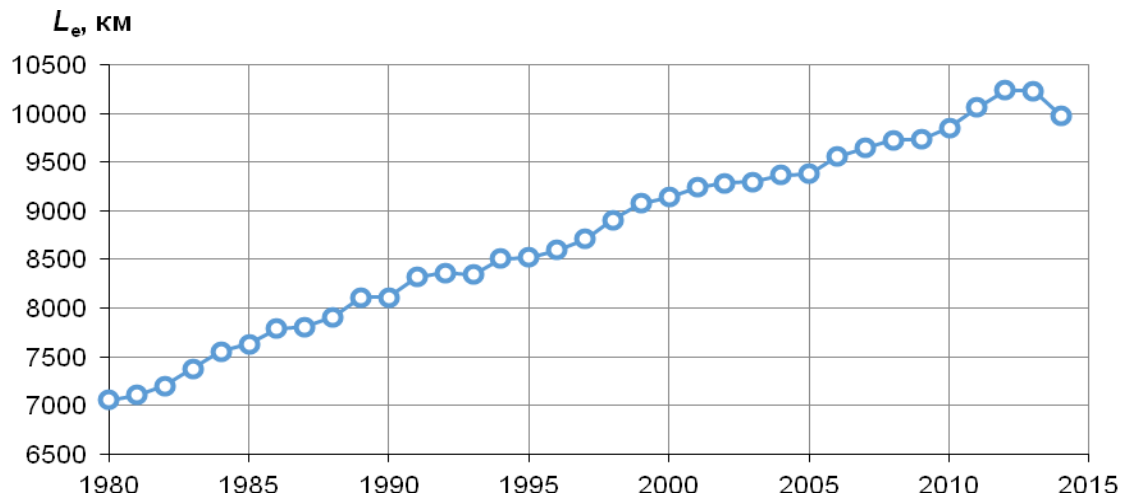


Рисунок 1.1 - Динаміка електрифікації залізниць України за роками

Динаміка обсягів вантажних і пасажирських перевезень в Україні у розрізі видів транспорту відображає характерні періоди нестабільності, які є наслідком кризових явищ в економіці країни (рис. 1.2). Загальні обсяги перевезень вантажів за останні роки знижуються, у порівнянні з максимальними показниками, які зафіксовані 2007 р., залізничні перевезення скоротились майже на 32 %. Криза в економіці та складна обстановка на сході України негативно позначається на показниках роботи транспортної галузі. Дохідна частина від перевезень на залізничному транспорті на 90 % формується транспортуванням вантажів

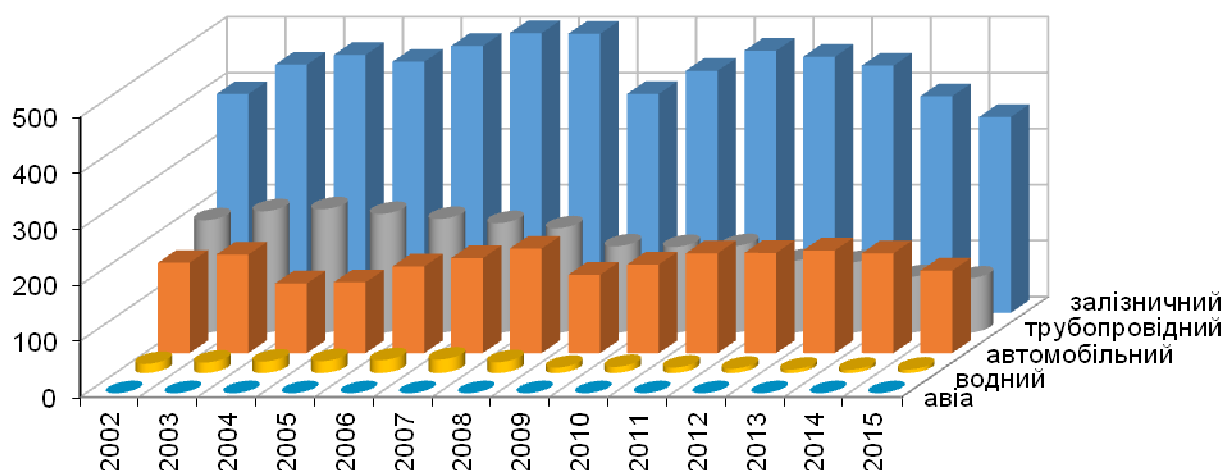


Рисунок 1.2 - Вантажні перевезення за видами транспорту, млн. т.

Структура вантажних перевезень за останні 10 років у межах України визначається наступним чином: залізничні – 57 %, трубопровідний та автомобільний – 20-21 %, водний – до 2 %, авіаційний – менше 1 %. Для порівняння, в країнах Євросоюзу залізничні вантажні перевезення складають лише 10,5 % [4]. За вантажообігом (рис. 1.3) залізничні перевезення займають провідне місце – до 55 %, у порівнянні з трубопровідним – до 35 %, автомобільним – 8-9 %, водним – до 2,5 % та авіа транспортом – менше 1 %.

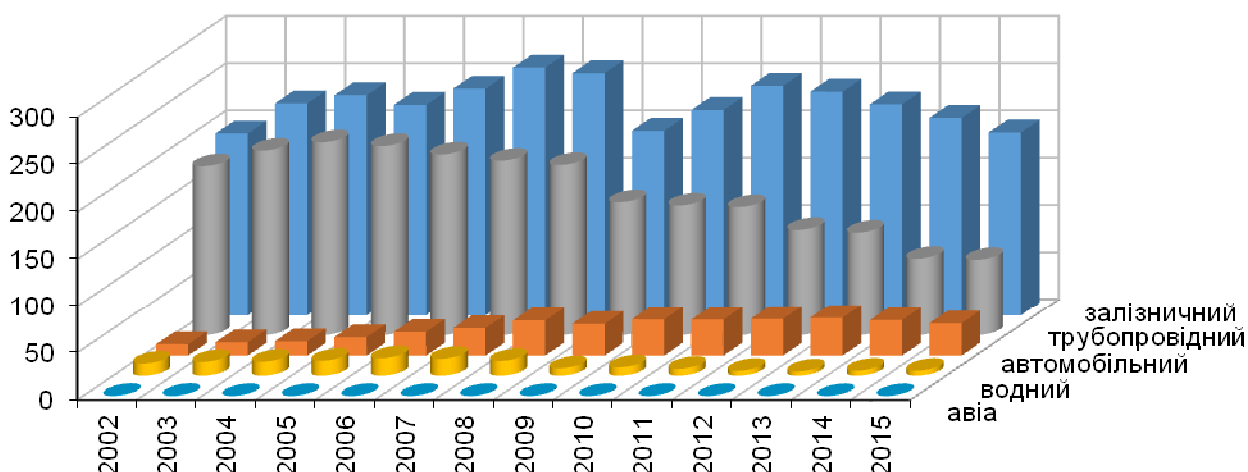


Рисунок 1.3 - Вантажообіг за видами транспорту, млрд. т-км

Відображаючи загальноекономічні тенденції, падіння обсягів вантажних перевезень демонструють практично всі види транспорту, за винятком автомобільного. У загальній структурі перевезень вантажів залізничний транспорт становить найбільшу частку, що суттєво впливає на динаміку перевезень вантажів в цілому по Україні.

За абсолютною чисельністю перевезених пасажирів (рис. 1.4) на першому місці традиційно знаходиться автомобільний транспорт – 51 %, далі міський електротранспорт – 43 %, залізничний – 6 %, водний та авіа – до 1 %.

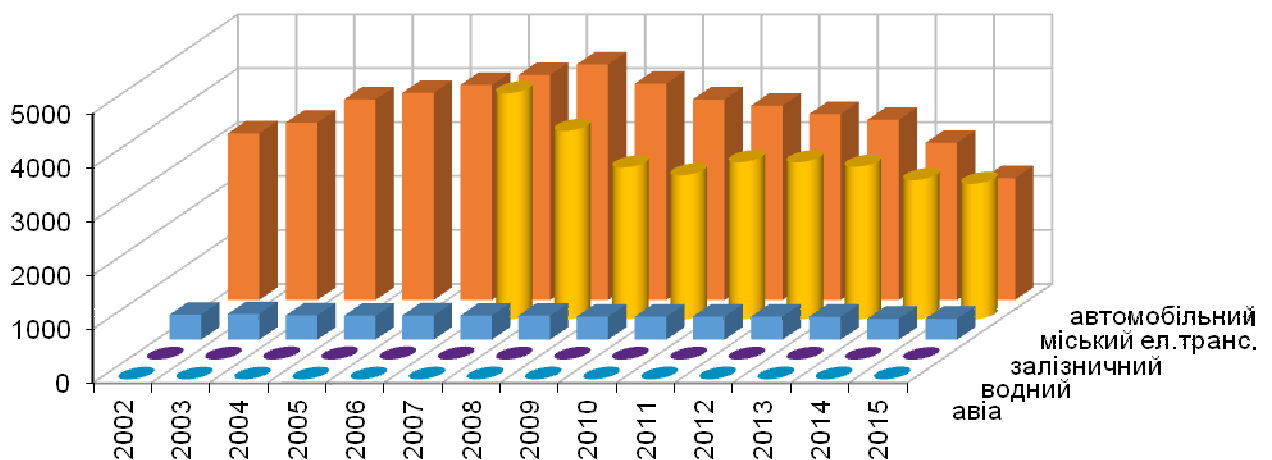


Рисунок 1.4 - Пасажирські перевезення за видами транспорту, млн. пас.

За пасажирообігом (рис. 1.5) залізничний транспорт складає найближчу конкуренцію автомобільному – 37 % проти 40 %. Міський електротранспорт – 14,5 %, авіаційний – 9 %, водний – менше 1 %. Загалом пасажиропотоки останні роки мають негативну динаміку залізничних та автомобільних перевезень, яка пояснюється скороченням попиту на транспортні послуги населення внаслідок зменшення їхніх доходів, зростанням тарифів на проїзд, а також переорієнтацією частини пасажирів на послуги нелегальних перевізників. Міський електричний транспорт останні роки демонструє зниження 2-3% за рахунок перевезень трамваями і тролейбусами, на відміну від метрополітенів, які користується стабільно високим попитом населення

пояснюється консерватизмом галузі, яка звикла до відпрацьованих рішень, а по-друге - відносно низькою вартістю СКА.

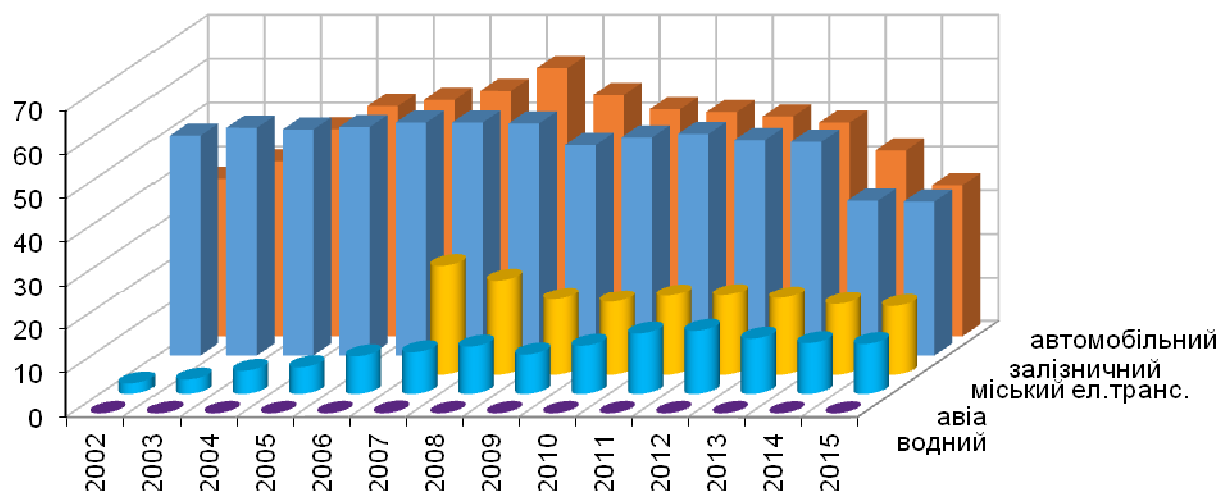


Рисунок 1.5 - Пасажирообіг за видами транспорту, млрд. пас-км

Питома вага електричної тяги в енерговитратах на залізничному транспорті складає близько 80 %. У собівартості залізничних перевезень енергетична складова сьогодні оцінюється на рівні 21...25 % і має тенденцію до зростання. Так, не зважаючи на коливання за роками обсягів споживання електроенергії (рис. 1.6), вартість спожитих її обсягів постійно зростає (рис. 1.7).

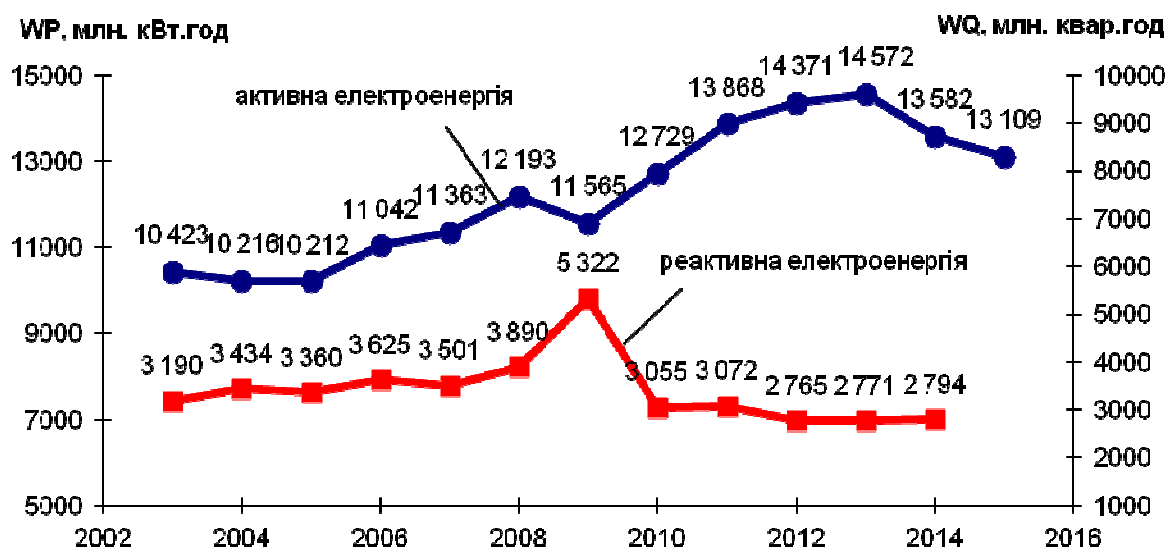


Рисунок 1.6 - Обсяги споживання електроенергії залізницями України

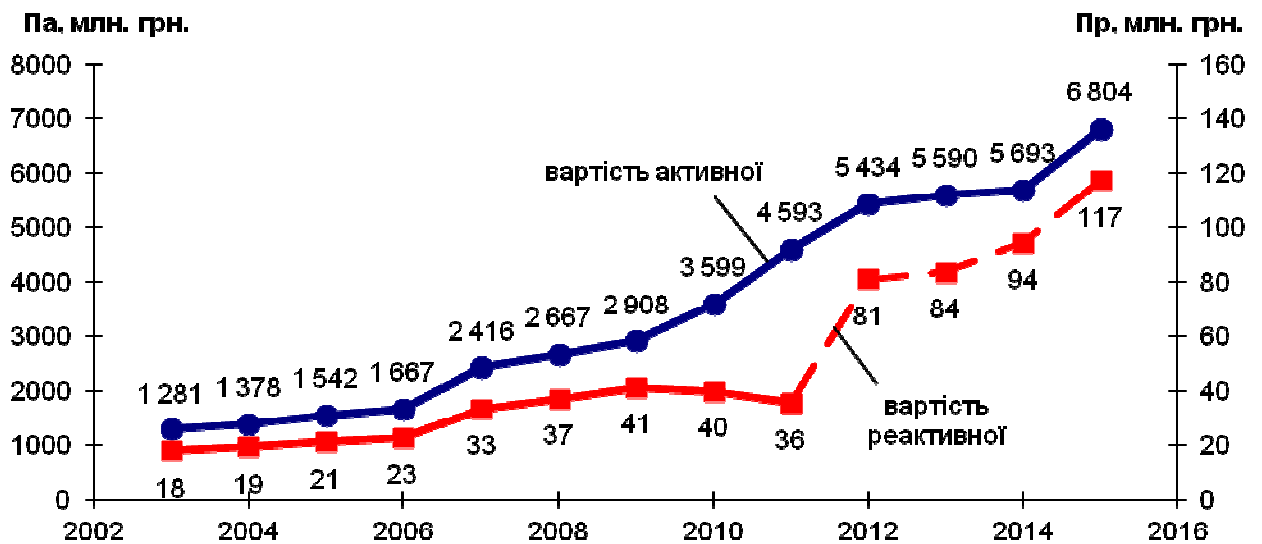


Рисунок 1.7 - Вартість спожитої активної та реактивної електроенергії

Слід зазначити, що з 2011 року від ліцензованої діяльності залізниць в якості постачальників електроенергії вартість реактивної електроенергії відноситься до сукупного доходу Укрзалізниці.

Однією з причин зростання вартості спожитої електроенергії на загальному фоні зниження обсягів перевезень є постійне підвищення тарифів на електроенергію (рис. 1.8). Так, у порівнянні з 2007 р. тариф на електроенергію 1-го класу зріс більше ніж у 4 рази.

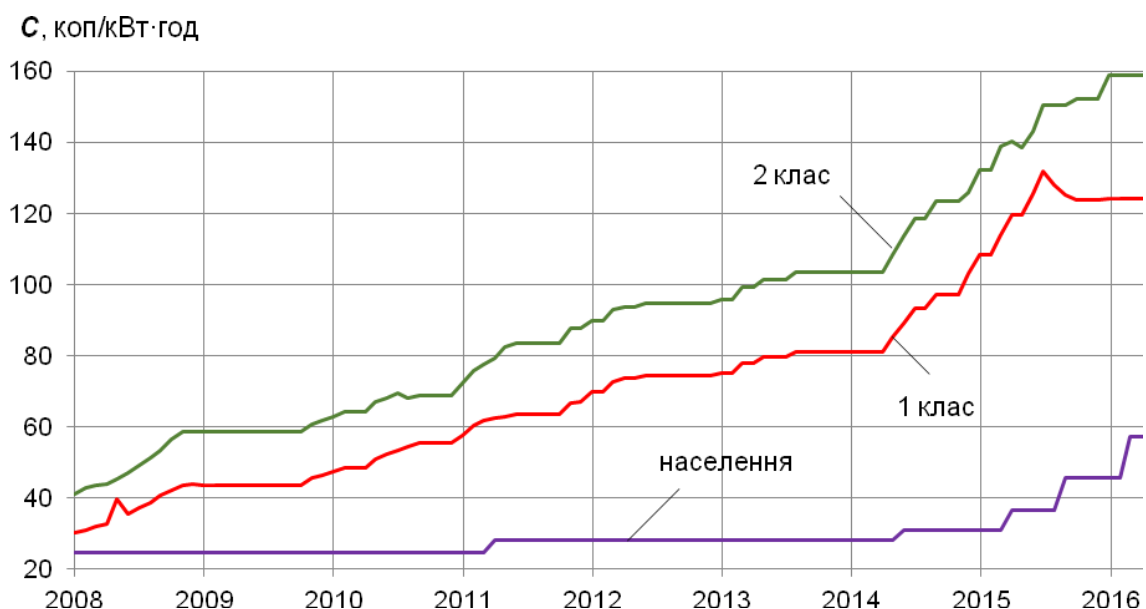


Рисунок 1.8 - Динаміка зміни тарифів на електроенергію

Окрім підвищення вартості електроенергії значний вплив на сукупну вартість електроенергії має рівень втрат в системах електропостачання. В загальнодержавному енергетичному балансі втрати енергетичних ресурсів при транспортуванні та розподіленні складають від 3,1 % до 3,5 %. Серед цих втрат найбільшу частку мають втрати електроенергії, на них припадає до 52 % усіх втрат, на теплову енергію – 25 %, природний газ – 14 %, вугілля і торф – 9 %, нафта і нафтопродукти – менше 1 % [4].

На фоні зниження енергоспоживання в країні, відносні втрати електроенергії останні роки незначно знижуються і сягають величини 10,7..11,9 %. В розрізі систем електропостачання залізничного транспорту рівень технологічних втрат відповідно до статистики [2] змінюється в досить широких межах, від 5 до 24 %. Найменшим рівнем втрат (5-8 %) характеризуються ділянки залізниць, електрифіковані змінним струмом. Ділянки з системою постійного струму, мають втрати, що більше середнього рівня в балансі України, а саме 14-16 %, і подекуди до 24 %. Оскільки для розвинених країн оптимальним рівнем втрат електроенергії вважається рівні 6-8 % [4], то для залізничного транспорту і, насамперед, для систем електричної тяги постійного струму повинні бути якомога скоріше запропоновані радикальні заходи підвищення енергетичної ефективності (рис. 1.9).

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

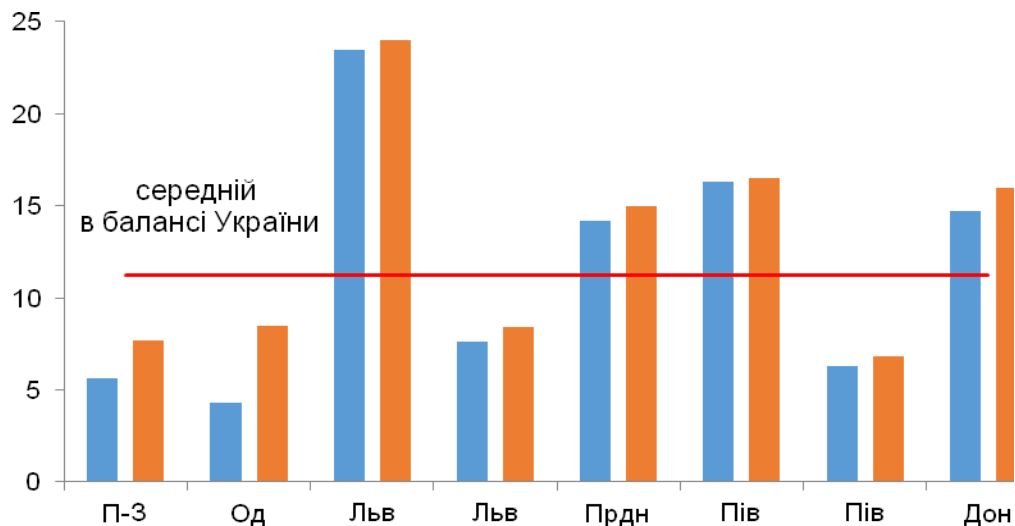


Рисунок 1.9 - «Умовні втрати» по залізницям відповідно до середнього по Україні

Окремо слід зазначити про складність обліку електроенергії на тягу в умовах залізниць та, як наслідок, достовірність обліку втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання. Всі тягові підстанції на головних приєднаннях обладнані сучасними системами комерційного обліку електроенергії. Проте цього не можна сказати про тягові одиниці електрорухомого складу. Використання застарілих схемних рішень при вимірюванні та невідповідність приладів вимогам до комерційного обліку унеможливають оперативне проведення контролю і аналізу причин раціонального використання електроенергії на тягу поїздів. Тому для аналізу ефективності систем електричної вдаються до поняття «умовних втрат», які можуть і не відповідати фізичній суті протікаючих процесів, а лише орієнтовно визначають втрати електричної енергії.

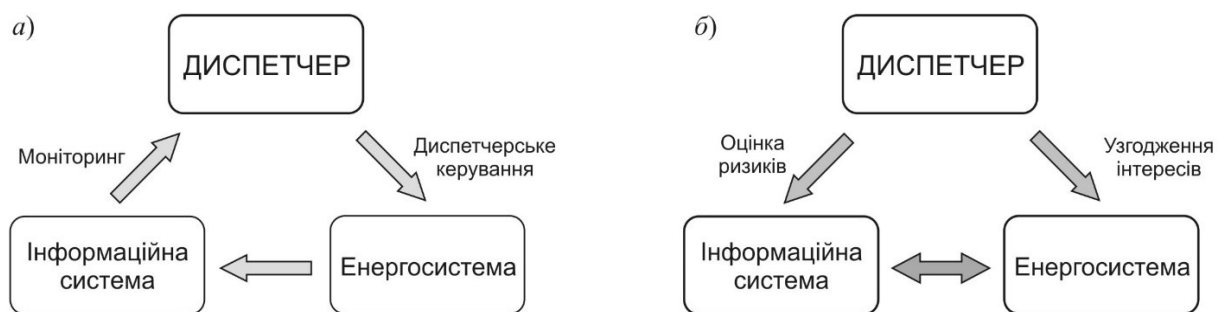
1.2 Основа інтелектуалізації електроенергетичних систем

Стратегія розвитку «інтелектуальних» мереж передбачає насамперед розробку стандартів для забезпечення сумісності інтелектуальних систем і пристроїв, що забезпечують керування режимами енергосистем, створення умов для обміну інформацією і забезпечення, при цьому, високого рівня надійності. Розвиток технологічної електро- та комунікаційно-інформаційної структури дозволить динамічно оптимізувати системні операції

та забезпечити керування попитом за безпосередньою участю кінцевого споживача

Архітектура інтелектуальної електроенергетичної системи в загальному виді являє собою окрему структуру взаємодіючу між складовими її частинами зі складною топологією зв'язків.

Спрощено із врахуванням принципів мультиагентного керування [5] нова електроенергетика являє собою не тільки силову, а й єдину ергатичну енергоінформаційну систему за участю людини, як особи, що приймає не поточні рішення, а координуючі рішення щодо рішень мультиагентної системи керування та оцінює ризики дії такої системи (рис. 1.10).



а – ієрархічне керування; б – мультиагентне керування

Рисунок 1.10 - Способи керування енергетичними системами:

Узагальнено інтелектуальними можна вважати модернізовані електроенергетичні мережі, що використовують інформаційно-комунікаційну систему для автоматичного збирання даних та реагування на таку інформацію у тріаді «генерація – мережа – навантаження» з метою покращення ефективності, економічності та стійкості виробництва, розподілу та споживання електроенергії [6].

За таких умов виникає реальна конкуренція не між різними постачальниками і централізованим розподілом потужності та електроенергії, а між децентралізованими і централізованими системами енергопостачання. В обох випадках зберігається системний принцип, коли споживач і виробник об'єднуються або безпосередньо в рамках однієї організаційно-технологічної системи, або за допомогою регіональних енергосистем з єдиним балансом потужностей [7].

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

При цьому енергетичний самобаланс таких систем доповнюється можливістю міжсистемних перетоків, які оптимізуються на основі конкуренції між власними і кредитними енергетичними та фінансовими ресурсами.

Слід відзначити, що термін «Smart Grid» більш точний [8,9], ніж термін «інтелектуальні» або «розумні» електроенергетичні системи, оскільки включає в собі не тільки інтелект, але й зручність, безпеку та комунікабельність. Під «розумною» розуміється енергоефективна система, яка адекватно та оптимально реагує на будь-які зовнішні та внутрішні технологічні збурення, забезпечуючи при цьому зручність, екологічність та безпеку для довкілля та суспільства. Таким чином, інтелектуалізація електроенергетики в частині впровадження новітніх інформаційних технологій управління, захисту та моніторингу стану обладнання і систем для підвищення керованості енергосистем є однією з важливіших тенденцій розвитку електричних мереж ХХІ ст.

Основою інтелектуалізації електроенергетичних систем є підвищення автокерованості на основі нових інформаційних технологій, застосування новітніх системних силових пристроїв FACTS, автоматизованих цифрових систем управління а також систем контролю стану обладнання в режимі реального часу.

Фахівці [10] виділяють три рівні інтелектуалізації електроенергетичних систем: верхній – інтелектуалізація енергосистеми в цілому, як єдиної мегасистеми; середній – інтелектуалізація комплексів обладнання; нижній – інтелектуалізація окремих видів силового обладнання і технологічних комплексів споживачів. Усі три рівні пов'язані між собою, інтелектуальну електроенергетичну систему слід розглядати як єдиний технологічний комплекс, що складається з електростанцій, магістральних і розподільчих електричних мереж, пристроїв локального електропостачання споживачів, спеціальних системних пристроїв, а також сучасних систем управління, працюючих в режимі реального часу та взаємопов'язаних між собою.

Образно «розумну» енергосистему представляють у вигляді деякого єдиного організму, який спирається на подвійну основу інтелектуальне силове обладнання

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та інформаційну інфраструктуру.

Інструментами адаптивного підлаштування до внутрішніх та зовнішніх технологічних змін середовища є силові пристрої FACTS (пристрої гнучкої передачі електроенергії змінним струмом) та електронні пристрої тонкого налаштування IED (інтелектуальні електронні пристрої). Інтелектуальні електронні пристрої багатofункціональні та використовуються, в перше чергу, в якості процесорів та засобів автоматизації. Пристрої IED виконують збір даних, виконують додаткові розрахунки та реалізують логіку прийнятого алгоритму. В додаток до поточних значень ці прилади записують інформацію про стан, експлуатаційні характеристики та історію об'єкту. Управління енергосистеми виконується з центру обробки інформації, що включає базу даних, технологічні системи управління, операторів та диспетчерів. Таким чином, «розумна» енергосистема незалежно від її рівня складає єдиний інтелектуальний технологічний комплекс.

Реалізація концепції Smart Grid має на меті досягнення цільових показників стосовно керування критичними перетіканнями в енергосистемі, зниження пікових навантажень та підвищення надійності електропостачання, підвищення системної ефективності використання енергетичних ресурсів, підвищення частки використання розосереджених та відновлювальних джерел енергії. Наведений підхід до інтелектуальних електроенергетичних систем відповідає баченню Smart Grid й у провідних країнах світу. Наприклад, у США розуміння Smart Grid визначено у прийнятому ще 2007 р. документі «Про енергетичну незалежність та безпеку» («Energy Independence and Security Act»).

Створення Smart Grid – це модернізація усього комплексу генерації та досилання електроенергії на основі удосконаленого управління, захисту, оптимізації технологічних елементів електроенергетичної системи у їх взаємозв'язку – від централізованої і розосередженої генерації, передачі електроенергії високою напругою, її розподілу, систем автоматизації, пристроїв накопичення та компенсації безпосередньо до кінцевих споживачів.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки системи Smart Grid оперують двосторонніми потоками електроенергії та інформації, то їх реалізація передбачає перехід до системи розподілених обчислень та комунікацій для забезпечення доставки інформації в режимі реального часу, а також розрахунок миттєвого балансу попиту і пропозиції електроенергії в будь-якій точці.

Основні параметри Smart Grid засновані на результатах роботи американського науково-дослідного центру EPRI у програмі IntelliGrid [11], проектах Modern Grid Initiative (MGI) та Grid Wise Architectural Council (GWAC) [11]. В цих роботах сформульовані бачення, архітектурні принципи, обмеження, переваги, необхідні технології та технічна політика стосовно Smart Grid.

До системних силових пристроїв перш за все відносяться FACTS – статичні тиристорні компенсатори, керовані поздовжні компенсатори, фазоповоротні трансформатори, керовані реактори, вставки постійного струму і т. ін. Ці пристрої здатні забезпечувати векторне керування параметрів мережі та якість електропостачання.

Сучасний стан енергетики в промислово-розвинених країнах світу характеризуються тенденціями зростання навантажень, об'єднанням електричних мереж різних компаній, неоптимальним розподілом потужності в неоднорідних мережах, ринковими відносинами в електроенергетиці, використанням найбільш дешевих джерел електроенергії, системними аваріями та екологічними вимогами при спорудженні нових об'єктів. Окрім вказаного, слід відзначити, по-перше, широке застосування засобів силової електроніки, а також збільшення потужності пристроїв, що використовують електронні системи; по-друге, появу споживачів, що ставлять жорсткі вимоги до якості електричної енергії.

Загальний напрям вирішення цих проблем полягає у збільшенні пропускної спроможності окремих ліній та перерізів, керуванні потоками потужності, стабілізації напруги у вузлах електричної мережі, усуненні спотворень якості електроенергії. Для вирішення вказаних задач необхідні системи моніторингу та спеціальні пристрої, яким останнім часом приділяється велика увага, чому сприяє успішний розвиток силової електроніки.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Поняття моніторингу в електроенергетиці зовсім нове і заслуговує певного уточнення. В іноземних публікаціях це поняття з'явилося в середині минулого сторіччя тільки по відношенню до довкілля. У зв'язку із все більш широкою інформатизацією діяльності людства виникла потреба у введенні такого поняття і для інших сфер діяльності, в тому числі і для електроенергетики. Моніторинг в енергетиці – спеціально організоване систематичне автоматичне спостереження за технологічними процесами в енергетиці з оцінкою або без оцінки їхнього стану. Принциповим у визначення є те, що моніторинг вже розглядається і як спостереження, так і спостереження та оцінка стану. При цьому під оцінкою стану вважається не тільки поточна оцінка, а і ретроспективний аналіз та прогнозування стану.

Результатом моніторингу є інформація у вигляді показань, даних, суджень, графіків тощо, яка відображає як результати спостереження поточного стану, так і одержану оцінку технічного та технологічного стану енергетики в різноманітних умовах експлуатації, що дуже важливо при технологічних порушеннях та аваріях.

Сучасні системи моніторингу режимних параметрів електроенергетичних систем WAMS (Wide Area Measurement System), у яких на об'єктному рівні все більше застосовуються пристрої синхронізованих вимірювань векторів напруги PMU (Phasor Measurement Units), надають якісно нові можливості для вирішення задач керування режимами електроенергетичних систем та їх об'єднань. Так, зокрема, покращується спостережність електроенергетичної системи, та, разом з іншими вимірюваннями режимних параметрів, надається інформація системним операторам для візуалізації чи використовується для вирішення задач аналізу та оцінки стану електроенергетичної системи.

В окрему наукову задачу виділяються критерії та методи розстановки пристроїв PMU [6], від яких залежить як можливість виявлення оперативно-диспетчерським персоналом випадків виникнення аномальних режимних ситуацій, так і можливість рішення актуальних задач керування режимами електроенергетичних систем в режимі реального часу.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

При виборі місць розстановки РМУ керуються технічними міркуваннями, які зазвичай не підкріплюються формальними обґрунтуваннями та не сприяють їх оптимальному розташуванню.

Як відомо, встановлення пристроїв РМУ на об'єктах електроенергетичних систем тягне за собою організацію каналів передачі відповідної інформації до центру керування. Вказані затрати, безумовно, окупаються, якщо інформація забезпечує вирішення актуальних задач ефективного використання пропускної спроможності контрольованих перерізів основної мережі електроенергетичної системи. Досягнення максимальної рентабельності від впровадження пристроїв РМУ можливе при багатоцільовому і системному характері використання виданої інформації для рішення усієї сукупності задач керування електроенергетичними системами.

За думкою фахівців, створення системи WAMS в Україні повинно підпорядковуватись вирішенню першочергових задач оперативного керування енергетичними об'єднаннями та завершуватись створенням проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів. До таких задач відносяться оцінка допустимості поточних режимів та попередження небезпечного збільшення амплітуд низькочастотних коливань режимних параметрів, що призводить до коливального порушення стійкості енергетичних об'єднань. Вказані задачі актуальні для багатьох електроенергетичних систем зі слабкими як міжсистемними, так і внутрішньо системними зв'язками, оскільки обмеження величин перетоків активної потужності в перерізах основної мережі є тим фактором, який може створювати істотний вплив на розташування резервів активної потужності та ціноутворення на ринку електроенергії [8].

В сучасному етапі розвитку систем керування технологічними процесами широко застосовуються інформаційні технології, в тому числі й з використанням формалізованих знань, методів та засобів штучного інтелекту. Проблема інтелектуалізації керування в електроенергетиці пов'язана, в першу чергу, зі створенням проблемно-орієнтованих програмних систем, наділених властивостями інтелектуальності.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для сучасного етапу розвитку інтелектуальних систем характерним є створення гібридних систем, в яких в різних поєднаннях експертні системи, засоби математичного моделювання, штучні нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми та ін. Дослідження шляхів побудови та розвитку інтелектуальних систем моніторингу проводяться в багатьох розвинених країнах світу, проте вітчизняні розробки скоріше є винятком і обмежуються частковою реалізацією систем моніторингу на основі реєстрації інформації або інформаційно-довідковими системами щодо поточного стану об'єкту [8].

Особливої актуальності процес прийняття рішень при оперативному керуванні набуває при постійному дефіциті часу, з чого випливає, що використання нових технологій лише для передачі і обробки інформації у випадку керування енергетичними об'єктами оперативним персоналом не посилює інтелектуальних можливостей електроенергетичних мереж в цілому. Для вирішення таких задач відомі системи підтримки прийняття рішень, які поєднують у собі дві важливі функції – відображення оперативної інформації та інформації про режимні параметри, які безпосередньо не вимірюються. Для реалізації останньої застосовують підсистему моделювання режимів на основі математичної формалізації задач. Сучасні досягнення при розробці систем підтримки прийняття рішень дозволили використовувати їх у складі інтегрованих систем автоматизованого керування технологічними процесами електроенергетичних об'єднань, що підвищує оперативність та правильність прийняття рішень в різних режимах експлуатації.

Таким чином, можна підсумувати, що практично єдиним способом подальшого підвищення ефективності електроенергетичних систем є розвиток інтелектуальних Smart Grid технологій, для якого першочергового значення набуває моніторинг стану об'єктів енергосистеми з наступним коригуванням режиму роботи елементів електроенергетичних систем, що за оцінками може ефект до 20 % збільшення пропускної спроможності.

1.3. Системи енергозабезпечення транспорту

Використання поновлюваних джерел енергії має багато потенційних переваг,

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

включаючи зменшення викидів парникових газів,, диверсифікацію поставок енергії та зменшення залежності від ринків (зокрема, нафти та газу) на органічному паливі. Відновлювані джерела енергії включають енергію вітру, сонячну енергію (теплові, фотогальванічні та концентровані), гідроенергетику, приплив енергії, геотермальну енергію, біопаливо та відновлювану частину відходів.

Зростання відновлюваних джерел енергії також може стимулювати зайнятість у ЄС шляхом створення робочих місць за допомогою нових "зелених" технологій.

В останні роки відновлювана енергетика в ЄС сильно зросла. Більш конкретно, частка енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому споживанні енергії в останні роки зросла майже вдвічі - з 8,5% у 2004 році до 17,0% у 2016 році.

Такий позитивний розвиток зумовлений юридично обов'язковими цілями збільшення частки енергії з відновлюваних джерел, затвердженої Директивою 2009/28 / ЄС про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел. Незважаючи на те, що ЄС в цілому намагається досягти своїх цілей на 2020 рік, деяким державам-членам потрібно буде докласти додаткових зусиль для виконання своїх зобов'язань щодо двох основних цілей: загальна частка енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому споживанні енергії (див. рис. 1.11) та питома частка енергії з відновлюваних джерел у транспорті (див. рис. 1.12).

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

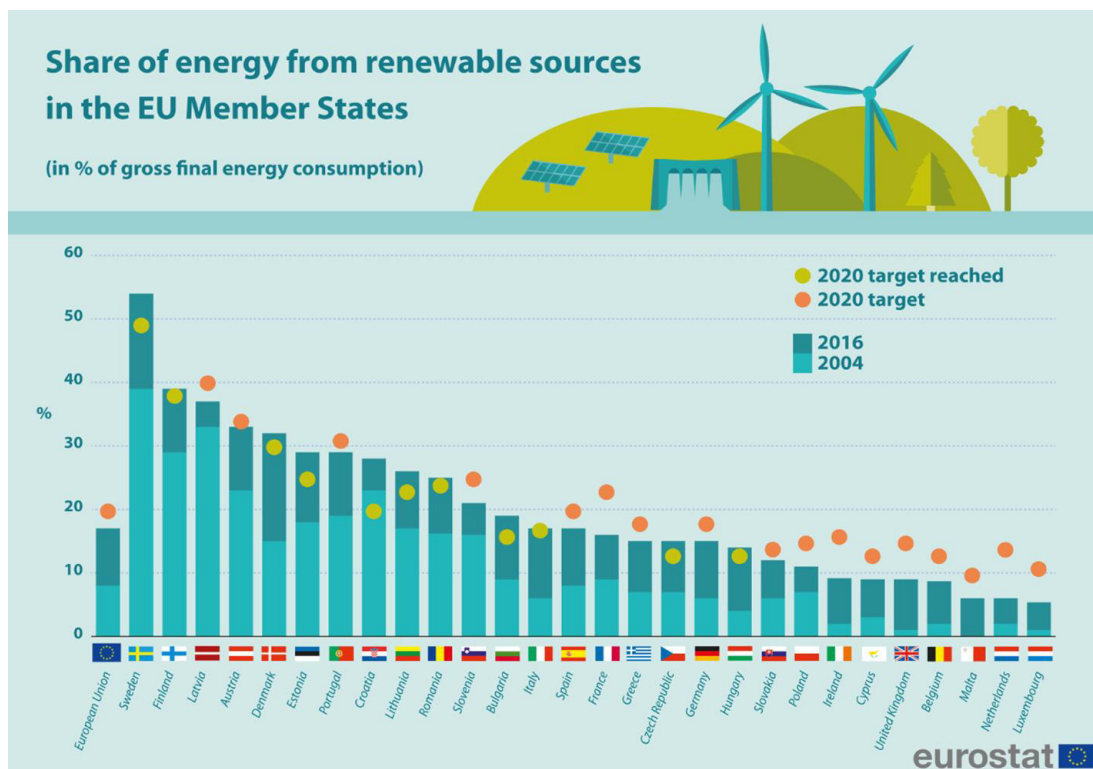


Рисунок 1.11 - Частка енергії з відновлюваних джерел у 2004 та 2016 роках

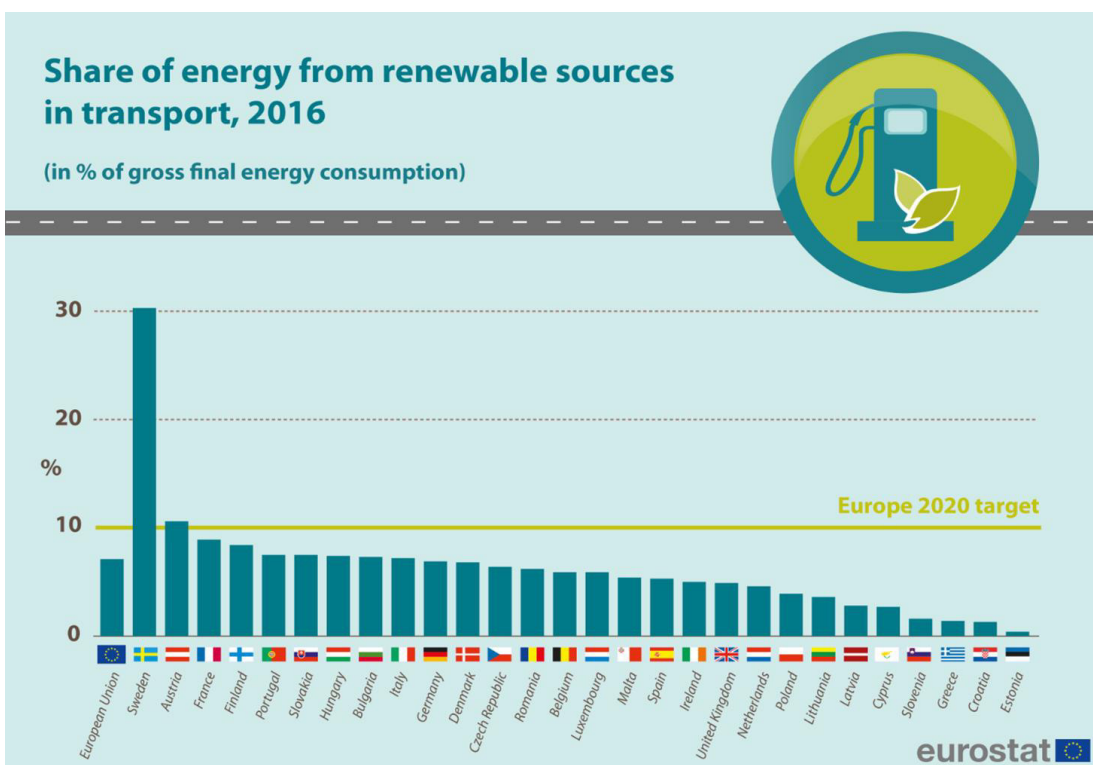


Рисунок 1.12 - Частка відновлюваних джерел енергії у транспорті, 2016 рік

Частка енергії з відновлюваних джерел – електроенергія

У 2016 році виробництво електроенергії з відновлюваних джерел становило понад чверть (29,6%) до загальної ваги електроенергії ЄС-28. Гідроенергетика - це найважливіше джерело, за яким слід уважно стежити за енергією вітру (див. рис 1.13).

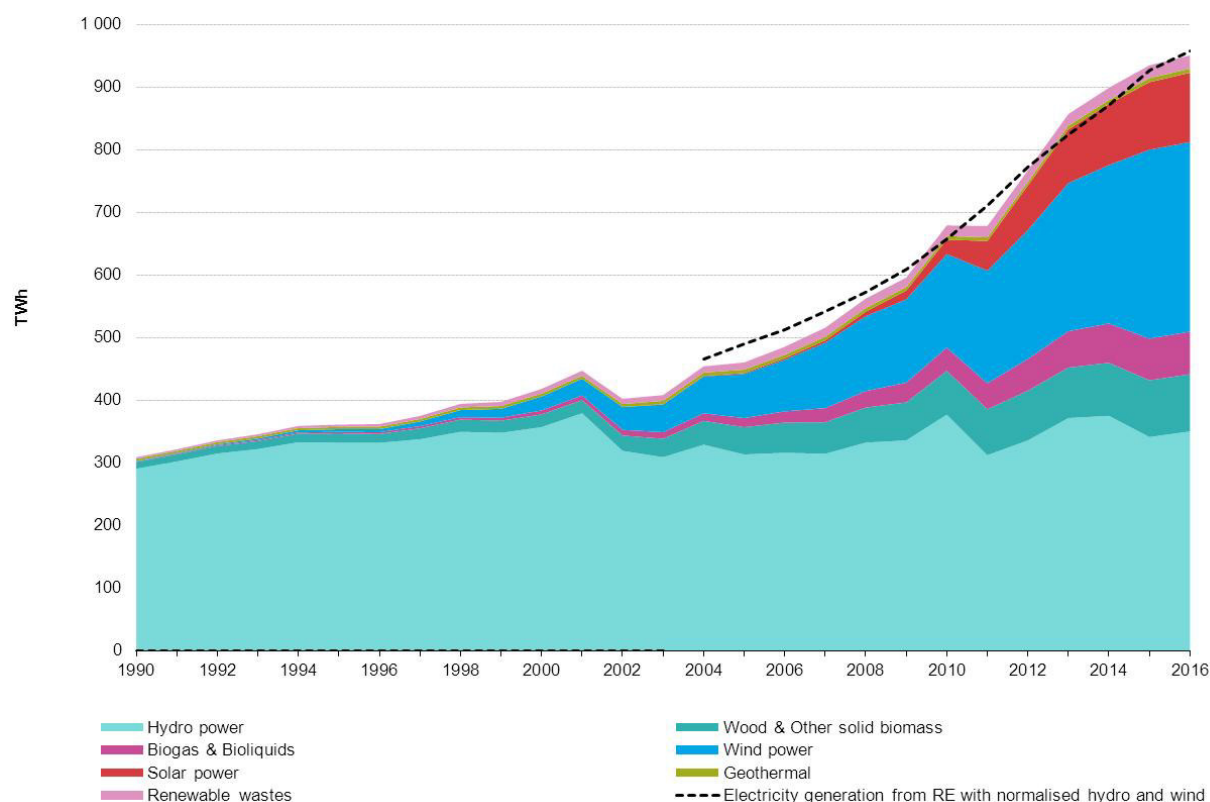


Рисунок 1.13 - Валове виробництво електроенергії з відновлюваних джерел, ЄС-28, 1990-2016 роки

Слід враховувати, що правила обліку в Директиві 2009/28 / ЄС передбачають, що електроенергія, вироблена гідроенергетикою та енергією вітру, повинна бути нормалізована з урахуванням щорічних погодних коливань (гідроелектрична станція нормалізується протягом останніх 15 років і вітер над останні 5 років). Зростання електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії в період з 2006 по 2016 рр., в значній мірі відображає збільшення трьох поновлюваних джерел енергії в ЄС, головним чином, енергію вітру, а також сонячну енергію та тверде біопаливо (включаючи відновлювані відходи) [12].

Незважаючи на те, що гідроенергетика залишалася єдиним найбільшим джерелом для виробництва відновлювальної електроенергії в ЄС-28 в 2016 році

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

(36,9% від загального обсягу), кількість електроенергії, виробленої таким чином, була відносно схожою з рівнем, зафіксованим десять років тому, коли виробництво зросло 10,8% в цілому. На відміну від цього, кількість електроенергії, виробленої в ЄС-28 від сонячної енергії та вітрових турбін, у 446 разів була найвищою в 2016 році, як це було в 2006 році; в результаті частка енергії вітру та сонячної енергії в загальному обсязі електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії, зросла до 31,8% та 11,6% відповідно до 2016 року. Зростання електроенергії від сонячної енергетики стало драматичним, збільшившись у порівнянні з 2,5 TWh в 2006 році, щоб обігнати геотермальну енергію в 2008 році до рівня 110,8 TWh в 2016 році. Протягом цього 10-річного періоду внесок сонячної енергії в усі вироблені електроенергії в ЄС-28 від відновлюваних джерел енергії зросла з 0,3% до 11,6%. Потужність припливу, хвилі та океану становила лише близько 0,05% від загального обсягу електроенергії, виробленої від відновлюваних джерел енергії, у ЄС-28 у 2016 році.

Основні статистичні висновки

Потужність пасажирських перевезень залізницею продовжувала відновлюватися в 2016 році. На основі щоквартальних даних, показники залізничного пасажирського транспорту на рівні ЄС-28 продовжували зростати на 5 млрд. пасажиро-кілометрів у період між 2015 і 2016 роками (+1,1%). Це збільшення вплинуло переважно на перший та останній квартали 2016 року (+1.6% та +1.8% відповідно порівняно з відповідними кварталами минулого року).

Другий та третій квартали також продемонстрували позитивну тенденцію у порівнянні з відповідними кварталами минулого року (+0,5% та + 0,7% відповідно) [13].

У 2016 році в ЄС-28 було перевезено менше товарів у порівнянні з 2015 роком, але на більших відстанях. Еволюція вантажних перевезень ЄС-28 між 2006 та 2016 роками представлена на рисунку 1, як у тонах, так і в ткм.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дві аналогічні тенденції відбулися на тони та ткм до 2013 року. З 2014 року видно тенденцію невеликого збільшення на ткм, але зменшення на тонни. Це можна пояснити меншою кількістю вантажів, що перевозяться залізницями, але на великі відстані.

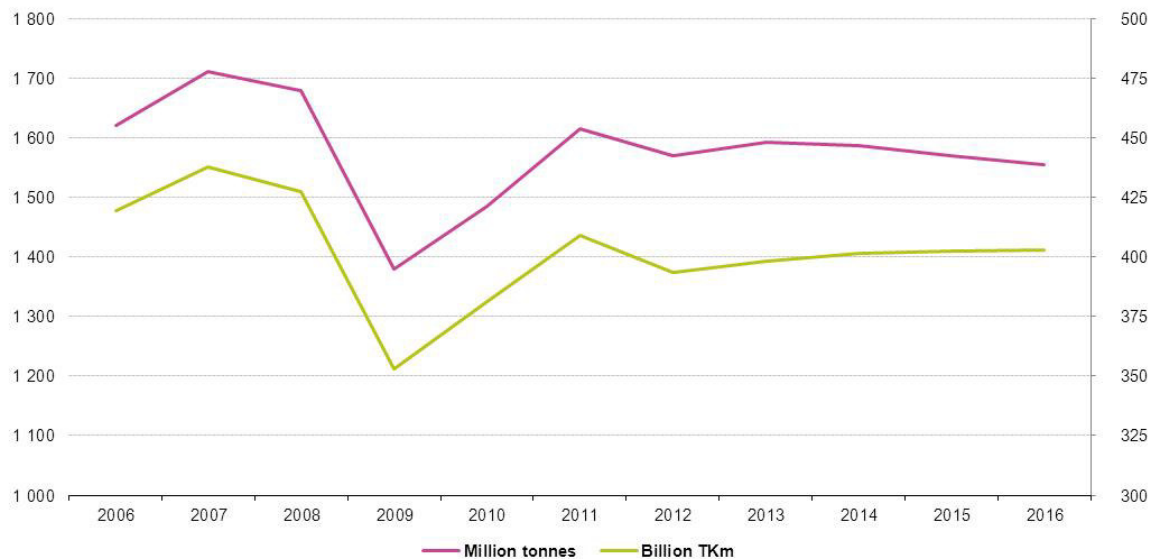


Рисунок 1.14 - Еволюція вантажних перевезень ЄС-28 для основних підприємств, 2006-2016 роки

Перевезення вантажів залізничним транспортом ЄС-28 досягло 438 мільярдів ткм та 1 710 мільярдів тонн у 2007 році після збільшення на 4,4% та 5,6% порівняно з 2006 роком (рис.1.14). Різке зниження спостерігалось в період між 2008 та 2009 роками (-17,4% за ткм, -17,8% за тонну), до 353 млрд. т. км та 1 380 млн. тонн внаслідок економічної кризи. Відновлення негайно відбувалося із стійким зростанням у 2010 та 2011 роках (+8% та +7.3%, за тис. км, +7,7% та +8,7% за тонну). Після падіння у 2012 р. (-3,8% та -2,7% відповідно за ткм і тонн) вантажні залізничні перевезення у тис. км залишилися відносно стабільним у період з 2013 по 2016 рр. (+1,1%), тоді як вантажні перевезення залізничним транспортом у тоннах скоротились на 2,5%.

Рік на рік (щорічний) розвиток квартального транспорту суттєво відрізняється по країнах

Еволюція вантажного транспорту ЄС-28 на кварталному рівні представлена на рис.1.15 як у тонах, так і в ткм. На кварталному рівні рухи були більш нестабільними. Відсутність сезонної картини може бути визначена відповідно до спостережуваної тенденції. Пост економічна криза, пік активності був досягнутий у 2-му кварталі 2011 року з 104 млрд. ткм і 409 млн. тонн. Починаючи з цього періоду, транспортна продуктивність не перевищувала 93 млрд. тонн (нижня оцінка досягнута в першому кварталі 2013 року), а вантажоперевезення завжди перевищували 373 млрд. Тонн (досягнення нижчого рівня в II кварталі 2016 року).

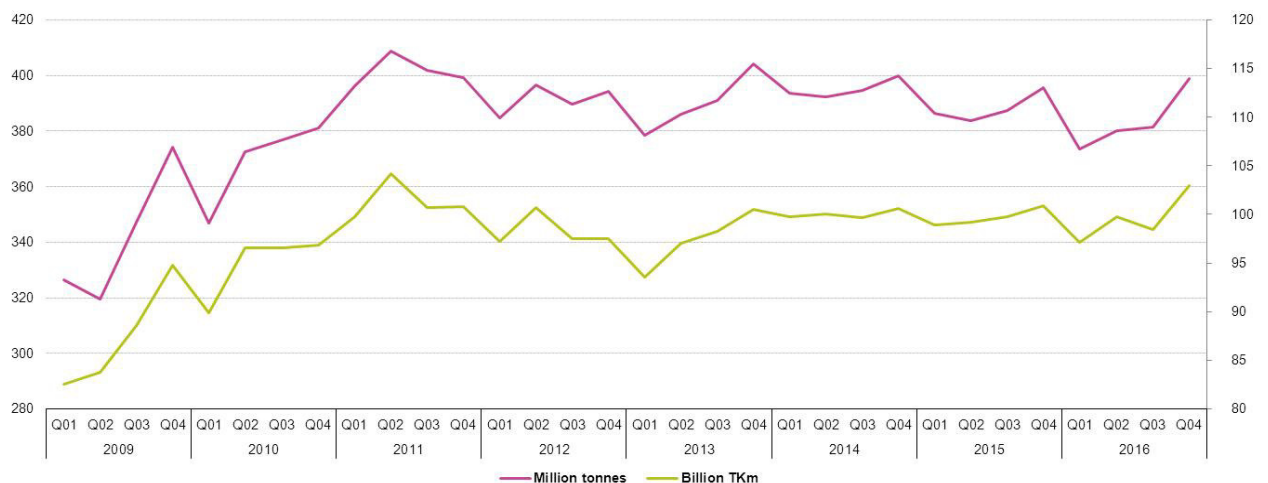


Рисунок 1.15 - Еволюція товарного вантажного транспорту ЄС-28 на кварталному рівні для основних підприємств, 2009-2016 р.р

Зосереджуючись на 2016 р., транспортні показники скоротилися в першому кварталі порівняно з аналогічною чвертю минулого року (-1,8%) і порівняно з попереднім кварталом (-3,7%) [13]. Аналогічно, транспортувані товари також скоротилися (-3.4% у порівнянні з аналогічним кварталом попереднього року та порівняно з попереднім кварталом).

У другому кварталі ефективність транспортних операцій збільшилась порівняно з попереднім кварталом та відповідною чвертю попереднього року (+2,7% та +0,6% відповідно), тоді як переміщувані товари зменшились порівняно

з аналогічною чвертю попереднього року (- 0,9%), але зросли порівняно з попереднім кварталом (+1,8%). У III кварталі обсяги транспорту та ткм скоротилися порівняно з аналогічним кварталом попереднього року (-1.3% та -1.5% відповідно), ефективність транспорту також зменшилась порівняно з II кварталом (-1.4%), але товарами перевезено трохи збільшилося (+0,3%). У останньому кварталі 2016 року обсяги транспорту та транспортування товарів суттєво зросли порівняно з попереднім кварталом (+4,7% та +4,5% відповідно). Зростання було більш помірним порівняно з аналогічною чвертю минулого року (+2,1% за ткм та + 0,8% за тонни).

Зміна ефективності транспорту між 2015 і 2016 роком представлена для кожної країни, що звітує, на рис.1.16. Збільшення ефективності транспорту в період між 2015 і 2016 роками може бути помічено для тринадцяти країн-членів ЄС та Туреччини. У абсолютному вираженні Латвія відзначила найбільше скорочення між 2015 і 2016 роком (-3,0 млрд. ткм), за нею йде Об'єднане Королівство (- 2,3 млрд. ткм) та Франція (-1,7 млрд. ткм) [14]. На противагу цьому, дві країни повідомили про абсолютне збільшення понад 1 млрд. тонно-кілометрів за цей же період, а саме Італія (+4,1 млрд. ткм) та Австрія (+1,7 млрд. ткм).

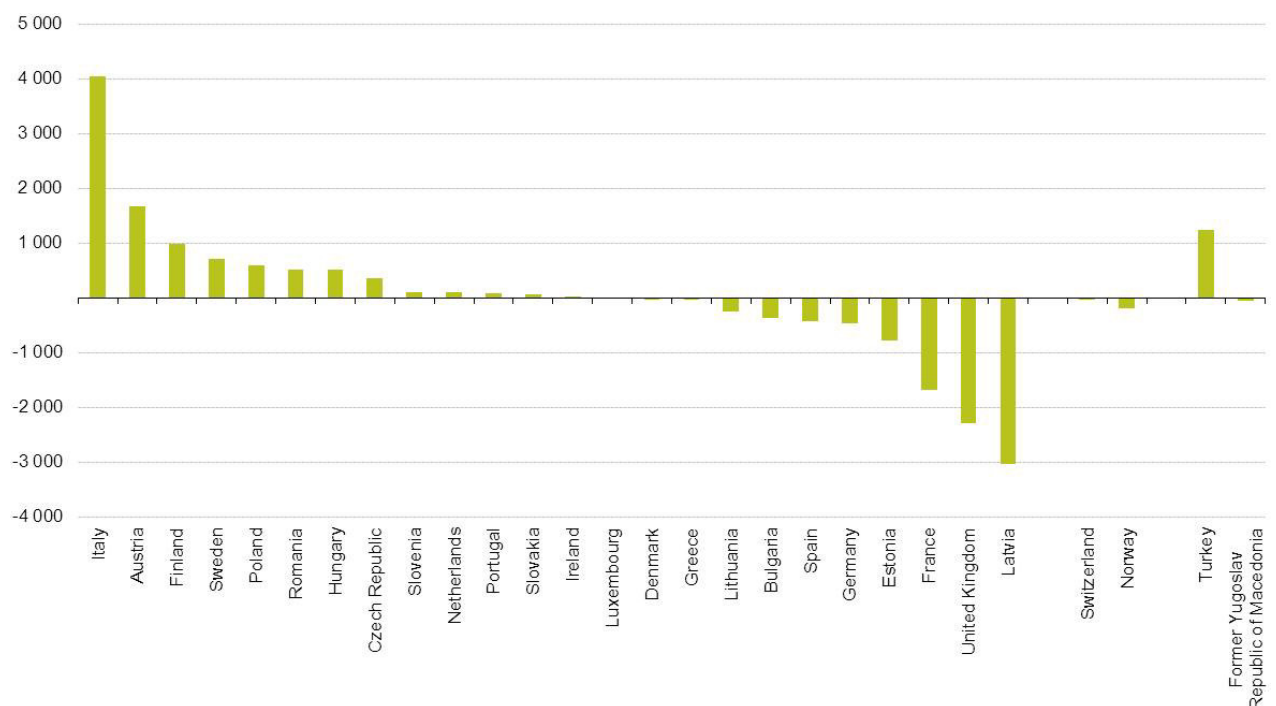


Рисунок 1.16 - Розвиток залізничного транспорту для основних підприємств: зміна між 2015 і 2016 роком - у мільйон ткм

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Зміна ваги вантажів, що перевозяться між 2015 і 2016 роками, представлена для кожної країни, що звітує, на рис.1.17. Дивлячись на тонни перевезених вантажів, рис. дещо інший. Дійсно, одинадцять країн-членів ЄС, Норвегія, Швейцарія та Туреччина зареєстрували збільшення в період між 2015 і 2016 роком, тоді як спостерігалось зниження показників для тринадцяти країн-членів ЄС та колишньої Югославської Республіки Македонії.

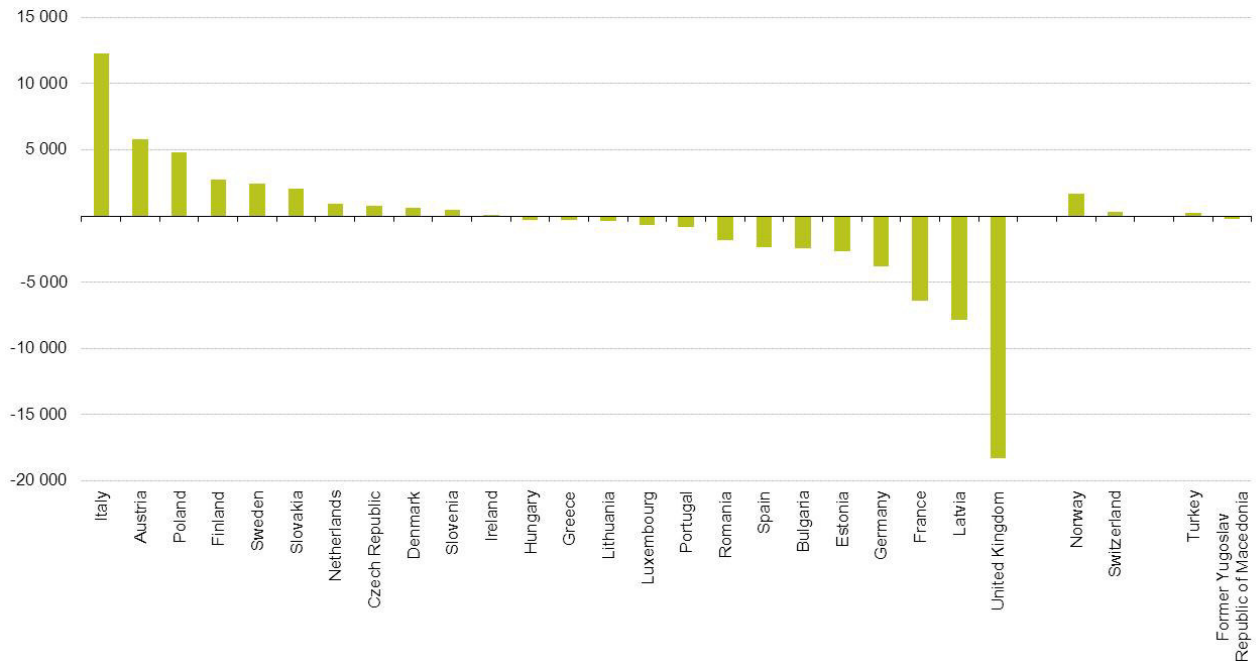


Рисунок 1.17 - Розвиток залізничного транспорту для основних підприємств: зміна між 2015 і 2016 роками - у тисячах тонн

Географічне розташування країн відіграє ключову роль у частці міжнародних перевезень.

Вантажні перевезення за типом транспорту (національний, міжнародний вантаж / вивантаження та транзит) у загальному ткм виконані, наведені на рис.1.18. Частка міжнародних перевезень у різних країнах сильно пов'язана з їх географічним положенням у Європі. Для ЄС-28 в цілому частка міжнародних навантажень може оцінюватися майже на 17% в 2016 році, міжнародна вивантаження - на 23%, транзит на 11% та національний - майже на 50% [14].

Країни, які реєструють найбільшу частку міжнародних перевезень, знаходяться у ключових коридорах на європейському ринку. У країнах Балтії Латвії та Естонії, розташованих на кордоні між ЄС та Росією, міжнародні вивантаження становили

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

відповідно 90% та 68% від загальної ефективності транспорту в 2016 році. Нідерланди, стратегічно розташовані в самому центрі європейського ринку, зареєстровані частка міжнародних навантажень 66% у загальному ткм виконана. Головний імпортер порт Роттердаму, який має великі морські / залізничні перевезення вантажів, відправлений в межах Європейського Союзу, сильно впливає на ці цифри.

Натомість країни з певними географічними характеристиками (на периферії Європейського Союзу або острови) зафіксували низьку частку міжнародних перевезень залізницею. Малі частки спостерігаються для Сполученого Королівства (3%) та Данії (11%). Для таких країн переважним режимом для міжнародного вантажного транспорту залишається морський транспорт, товари постачаються у найближчому порту до пункту їх призначення, а потім перевозяться в країні головним чином автомобільним транспортом, а також залізницею (враховується як національний транспорт). Туреччина також записала низький відсоток (4%), що також може бути пов'язане з його периферійною позицією.

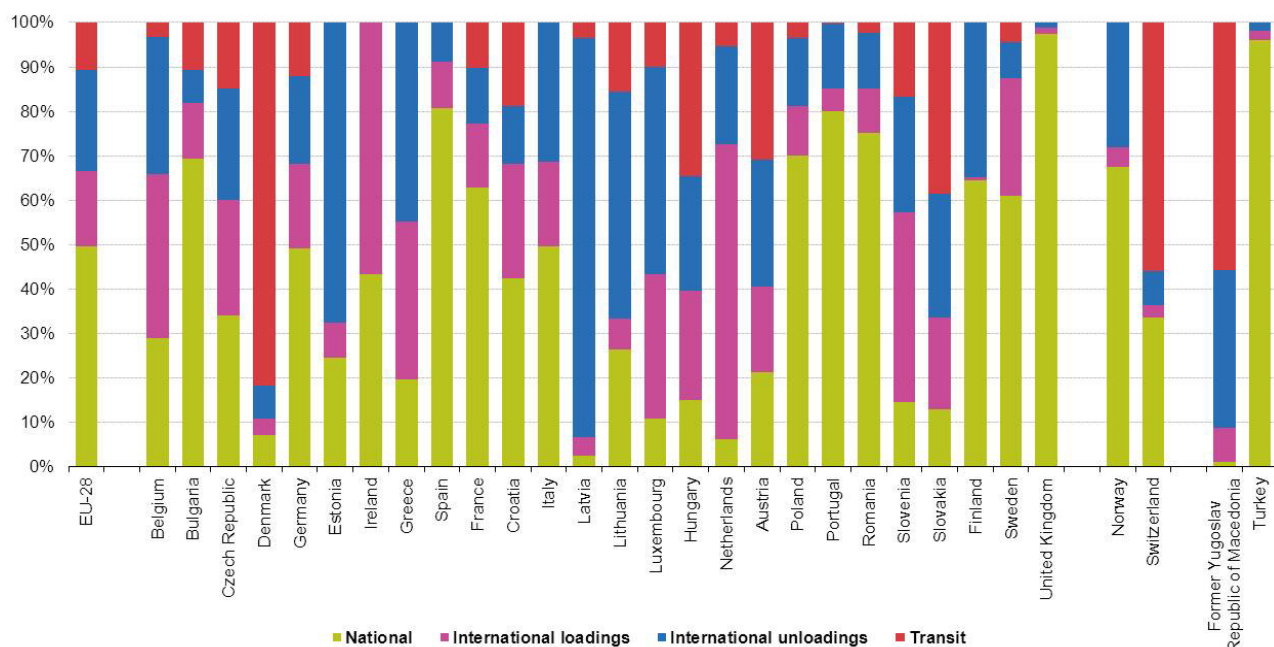


Рисунок 1.18 - Залізничні перевезення товарів за видами транспорту, для основних підприємств у 2016 році - у% від загальної кількості виконаних ткм

Розглядаючи національний транспорт, найбільші частки спостерігалися в 2016 році для Сполученого Королівства (97%), Іспанії (81%) та Португалії (81%). Натомість національний транспорт становив лише 2% у Латвії, 6% в Нідерландах та 7% в Данії. Що стосується транзитних перевезень, то в 2016 році Данія зареєструвала найбільшу частку - 83%. На відміну від цього, 6 держав-членів ЄС та Норвегія не повідомляли про транзитний транспорт.

Вантажні перевезення за типом транспорту (національні, міжнародні навантаження / розвантаження та транзит) в тоннах наведені на рис 1.19. Картина за тонни цілком подібна до ткм. Для ЄС-28 в цілому частка транзиту та національності дещо відрізняється (відповідно 7% та 53%). У 2016 році 99% вантажів у тоннах стосується національного транспорту в Об'єднаному Королівстві, але лише 3% в Латвії. Нідерланди зареєстрували частку 64% міжнародних навантажень. На відміну від цього, в 2016 році Фінляндія має лише 1% міжнародних навантажень. Зареєстровані акції міжнародного вивантаження в 2016 році є найвищими в Латвії (88%) серед усіх країн, тоді як Ірландія не має міжнародних розвантажень. У 2016 році транзит становив 72% вантажів, перевезених залізничним транспортом у Данії.

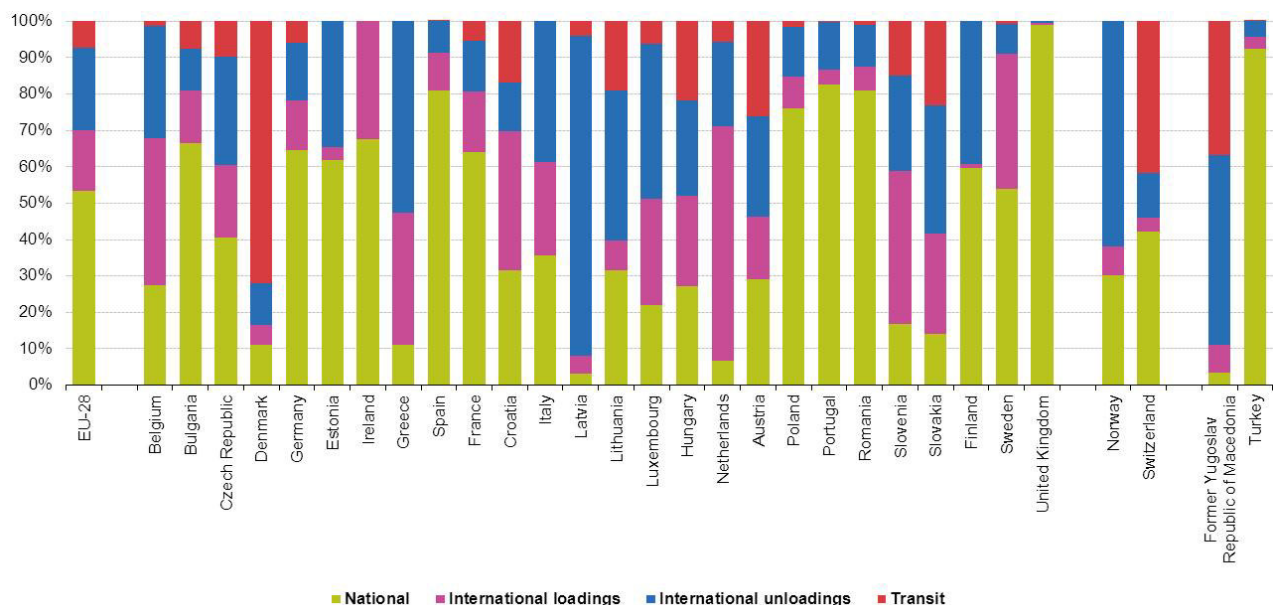


Рисунок 1.19 - Залізничний транспорт товарів за видами транспорту, для основних підприємств у 2016 році - у% від загальної кількості транспортованих тонн

На рівні ЄС-28 спостерігалось зменшення на 2,8% для національних вантажних перевезень залізничним транспортом, тоді як загальний міжнародний транспорт збільшився на 0,5% (+2,3% для навантажень і -0,7% для вивантаження) та транзитного транспорту на 4,7% [14].

На національному рівні найбільше зростання між 2015 і 2016 роками було зареєстровано в Італії (+30,4%). На відміну від цього найбільше зниження спостерігається в Люксембурзі (-37,3%). Звернувшись до міжнародних перевезень, Фінляндія зареєструвала найбільше зростання (+14,6%), тоді як Сполучене Королівство спостерігало найбільше зниження (-27%). Транзитний транспорт Португалії вдвічі зменшився, якщо порівнювати 2016 рік з 2015 роком.

1.4 Висновки до розділу

Таким чином, в ефективності функціонування транспортного сектору держави головну роль відіграють залізниці, ефективність функціонування яких за рівнем втрат майже у два рази гірше розвинених європейських країн. Крім цього енергетика країни має потенціал для розвитку технологій ефективного транспортування та розподілення.

Відзначимо, що для розвитку інтелектуальних технологій є, насамперед, розробка доступних технічних засобів деталізованого моніторингу стану електроенергетичної системи. Ефективна реалізація моніторингу, як правило, ускладнюється через те, що дослідні об'єкти утворюють розподілену систему. В цьому випадку для проведення вимірювань вимагається велика кількість датчиків та канали передачі інформації з високою пропускнуою спроможністю.

Передумовою розвитку інтелектуальних технологій управління режимів електроспоживання є розробка систем моніторингу та розвиток методів розрахунку з можливістю здійснення керованих впливів на основі підходів штучного інтелекту.

2 РЕКУПЕРАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ. ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Електричний локомотив має можливість здійснювати особливий вид гальмування – рекуперативне, засноване на використанні принципу оборотності електричних двигунів. При гальмуванні або на ухилі тягові двигуни можуть працювати в генераторному режимі, при якому кінетична енергія поїзда перетворюється в електричну. Ця енергія називається надлишковою, а струми, споживані приймачами, називаються надлишковими струмами рекуперації. При рекуперації локомотив працює паралельно з тяговими підстанціями і може розглядатися як тягова підстанція.

Для визначення способу рекуперування енергії насамперед необхідно визначення роду струму, на якому працює рухомий склад. На ділянках залізниць змінного струму постійний струм тягових двигунів, переведених у генераторний режим, за допомогою інверторів перетворюється в однофазний струм 206 частотою 50 Гц на електрорухомому складі і повертається в тягову мережу. На ділянках постійного струму надлишкова енергія рекуперації постійного струму може перетворюватись в енергію трифазного струму за допомогою трифазних інверторів, встановлених на тягових підстанціях.

На сучасному рухомому складі з асинхронними або синхронними двигунами для перетворення струму і регулювання частоти використовуються автономні інвертори, які в режимі рекуперативного гальмування перетворюють трифазний змінний струм двигунів у постійний, який надходить безпосередньо в тягову мережу постійного струму, або за допомогою чотириквadrантного перетворювача повертається в тягову мережу змінного однофазного струму [14].

Рекуперація електричної енергії можлива при виконанні деяких умов:

1) швидкість поїзда повинна бути не менше 50 км/год, щоб е.р.с. двигунів, що працюють у режимі генератора, була більше напруги в контактній мережі;

2) машиніст електровоза повинен перейти з тягового режиму роботи електровоза на схему рекуперативного гальмування, при якому змінюється режим

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи обмотки збудження тягового двигуна, що дозволяє управляти величиною напруги на струмоприймачі електровоза;

3) потрібно в будь-який момент часу мати споживача, готового прийняти електричну енергію.

У якості приймачів енергії рекуперації можуть бути використані:

1. Резистори на рекуперуючому електровозі.
2. Баластні резистори (поглинальні пристрої) на підстанціях і між пістанціями, у яких отримувана електрична енергія перетворюється в теплову і розсіюється.
3. Локомотиви в режимі тяги, які знаходяться поблизу.
4. Інверторні агрегати на тягових підстанціях.
5. Високоємнісні накопичувачі (акумулятори, іоністори) як на рухомому складі, так і на тягових підстанціях.

Очевидно, що перші два способи є неефективними в плані енергоефективності та енергозбереження (у першу чергу рекуперація розглядається з такою метою), а тому розглядати їх детально недоцільно.

Застосування накопичувачів енергії

Зважаючи на те, що практично всі проекти з застосування накопичувачів знаходяться на випробувально-дослідній стадії, можна виокремити та резюмувати лише основні тенденції : 1. Для використання накопичувачів енергії з метою запасання і видачі в потрібний момент енергії рекуперації при гальмуванні поїздів найбільш прийнятними є маховики, літій-іонні акумулятори та суперконденсатори.

2. Окрім прямого ефекту з економії споживаної енергії накопичувачі мають позитивний вплив на енергосистеми зменшують перепади напруги при нерівномірному графіку споживання енергії; знижують необхідність великого резервування потужності підстанцій і тим самим капітальні затрати при їх будівництві і ремонті; знижують знос обладнання тягових підстанцій.

3. Переважна більшість пілотних проектів орієнтовані на стаціонарне застосування накопичувачів з метою незбільшення витрат енергії при транспор-

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

туванні на борту масивних накопичувачів і не бути обмеженими за габаритами. Однак при цьому зростає і кількість накопичувачів на борту.

4. Економічна ефективність на пілотних проектах показана досить суттєва – до 40 %, причому ефективність маховикових накопичувачів суттєво вище, ніж у суперконденсаторів.

5. Найбільш поширеними та перспективними є проекти з застосування накопичувачів на підстанціях і перегонах метрополітені.

2.1 Рекуперація інверторами на тягових підстанціях.

Особливістю роботи енергосистем електрифікованого транспорту є велика нерівномірність тягового електроспоживання і можливість значної рекуперації енергії (до 30...40 % від тягового електроспоживання). Проблемою раціонального використання рекуперативної енергії в системі неавтономного електротранспорту є складність забезпечення тягового навантаження в зоні рекуперації, що є випадковим процесом і не може в повній мірі регулюватися оптимізацією транспортного потоку.

При відсутності в тяговій мережі відповідного рівня поїзного навантаження рекуперація стає неможливою і на електротранспорті застосовується режим реостатного або механічного гальмування, при якому генерована енергія утилізується гальмівними пристроями. Розв'язання зазначеної проблеми для системи електротяги на сьогодні реалізується за кількома напрямками, основними з яких є локалізація надлишкової енергії гальмування електротранспорту стаціонарними або бортовими накопичувачами, її передача через тягові підстанції (ТП) в живлячу енергосистему або на суміжні міжпідстанційні зони до віддалених тягових навантажень. В даній роботі розглядається ефективність передачі рекуперативної енергії електротранспорту до мереж зовнішнього електропостачання.

Особливістю режиму рекуперації на електрифікованому транспорті є його суттєва залежність від рівня напруги в тяговій мережі, що визначається двома основними факторами:

1. режим тягового електроспоживання в зоні рекуперації;

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. режим напруги на шинах суміжних ТП.

Одним з варіантів розв'язання даної проблеми в системі тяги постійного струму є передача надлишкової рекуперативної енергії електротранспорту з тягової мережі до живлячої енергосистеми. В такому разі у періоди дефіциту тягового навантаження реверсивні ТП постійного струму перемикаються з випрямляючого режиму на інверторний. При цьому забезпечується обмеження напруги в тяговій мережі і на струмоприймачі рекуперативного навантаження в допустимих межах. Однак треба зауважити, що такий підхід до розв'язання зазначеної проблеми володіє і певними недоліками, а саме:

- ускладнення обладнання ТП;
- короткочасний характер генерованої потужності (особливо на міському електротранспорті і метрополітенах);
- перетік енергії по тяговій мережі при нерівності напруг на шинах суміжних ТП;
- низька якість енергії на виході інверторів;
- погіршення режимів живлення нетягових споживачів;
- підвищення напруги в тяговій мережі.

Для забезпечення якості енергії рекуперації згідно вимог ГОСТ 13109-97 необхідно значне вдосконалення і ускладнення обладнання ТП, що виконує прийом і передачу енергії в первинну енергосистему.

Умовою переходу неавтономного електротранспорту при електричному гальмуванні в режим рекуперації є

$$U_{\text{км}}(t) < U_{\text{с}}(t) < U_{\text{с}}^{\text{max}} \quad (2.1)$$

де $U_{\text{км}}(t)$, $U_{\text{с}}(t)$, $U_{\text{с}}^{\text{max}}$ – відповідно напруги в контактній мережі, на струмоприймачі транспортного засобу і граничнодопустима напруга на струмоприймачі (в тяговій мережі) згідно. Значення напруги $U_{\text{с}}^{\text{max}}$ визначається максимально допустимою напругою між колекторними пластинами тягових електродвигунів постійного струму у випадку їх прямого приєднання до тягової мережі, або максимальною напругою на виході перетворювача при безконтактному регулюванні потужності.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За цієї умови забезпечується протікання генераторного струму в мережу

$$I_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{с}}(t) - U_{\text{км}}(t)}{\sum R}, \quad (2.2)$$

де $\sum R$ – еквівалентний опір контуру струму рекуперації.

Режим рекуперації в системі електричної тяги супроводжується збільшенням напруги на струмоприймачі рекуперативного поїзда і в тяговій мережі, що особливо проявляється в умовах обмеженого тягового електроспоживання в зоні рекуперації. При наявності інверторів на ТП постійного струму режим напруги в тяговій мережі може бути поліпшено за рахунок передачі енергії гальмування в мережу середньої (високої) напруги за умови, що її прийом узгоджений як в технічному так і комерційному аспектах, таких як:

- максимально допустима короткочасна потужність, що приймається мережею;
- прийнятні гармоніки;
- готовність обленерго до рефінансування.

У вітчизняному секторі електропостачання неавтономного електротранспорту інвертуючими ТП на сьогодні обладнані лише деякі гірські ділянки Львівської залізниці з затяжними ухілами (до 30 ‰). Дані ТП постійного струму з інверторами забезпечують передачу надлишкової рекуперативної енергії поїздів з тягової мережі постійного струму (3,3 кВ) до живлячої мережі змінного струму (110 кВ). Оскільки ці ділянки рекуперації є протяжними (10...12 км), то при існуючих швидкостях руху поїздів режими рекуперації є достатньо тривалими і робота інверторів на ТП може вважатись усталеною. Вмикання інверторів відбувається коли напруга на шинах ТП сягає відповідного значення уставки, що для ТП досліджуваних ділянок складає 3550...3600 В [14].

Для аналізу ефективності роботи інверторних перетворювачів ТП постійного струму на Львівській залізниці були проведені синхронізовані вимірювання параметрів енергії рекуперації одночасно на двох суміжних ТП і рухомому по ділянці між ними поїзді в режимі рекуперації (інших споживачів на дослідній ділянці не було).

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для дослідження була обрана двоколійна міжпідстанційна зона Скотарське – Воловець, оскільки в напрямку ст. Воловець на ділянці ухил (спуск) сягає 28,4 ‰ і з метою обмеження швидкості поїздів є обов’язковим для використання електричного гальмування. При виконанні вимірювань на ТП застосовані аналізатори якості електроенергії EDL-175, PNA-296. Для вимірювань в силових колах електровозу постійного струму розроблені вимірювальні комплекти з оптичною та радіо-канальною розв’язками з використанням мікроконтролерів ATxmega128A3, ATmega128RFA1 та оптичних прийомо-передавачів HFBR-2521 / HFBR-1521. Загальна схема проведення вимірювань приведена на рис. 2.1.

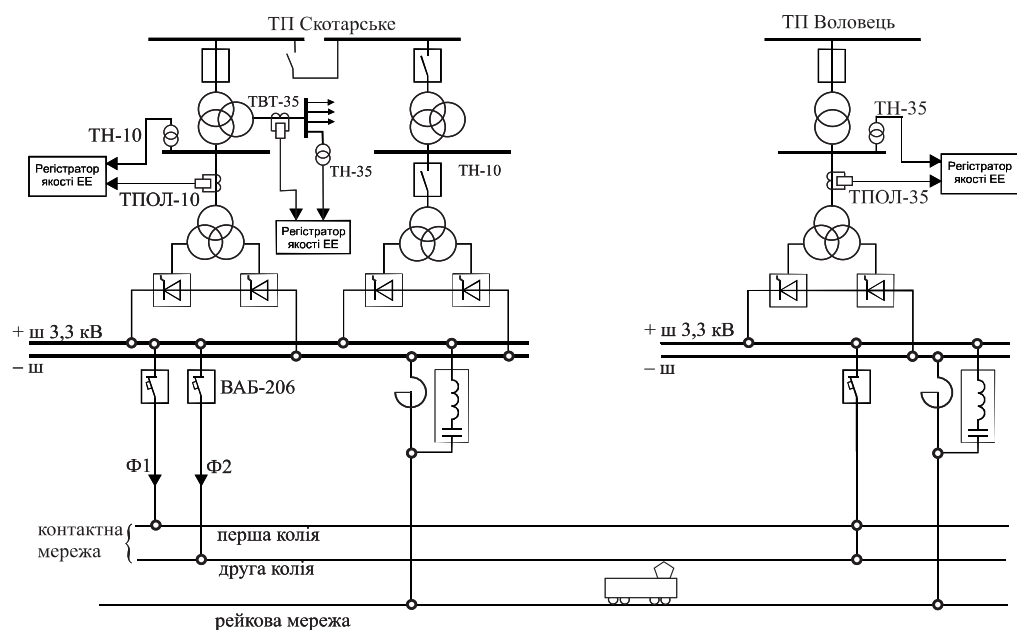


Рисунок 2.1 - Загальна схема проведення експериментальних вимірювань

Схема приєднання розроблених вимірювальних пристроїв до силових кіл електровозу ВЛ11М приведена на рис. 2.2. Зовнішній вигляд ділянки напруги з пристроєм узгодження та макетною платою радіопередавача ATmega128RFA1 зображено на рис. 2.3.

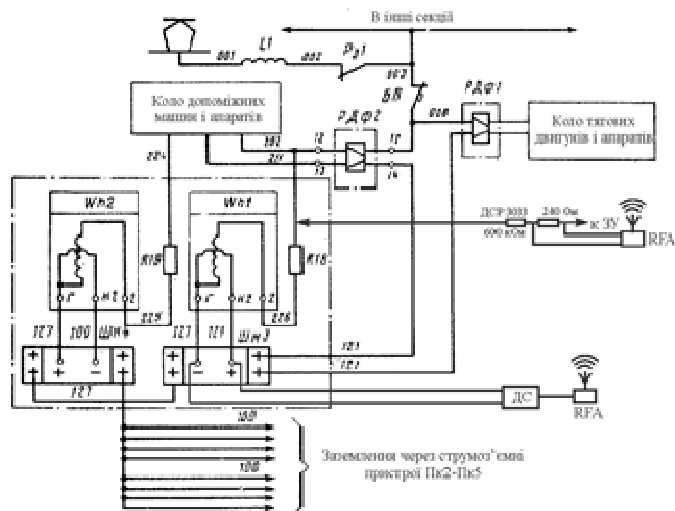


Рисунок 2.2 - Схема підключення вимірювальних пристроїв до силових кіл електровозу

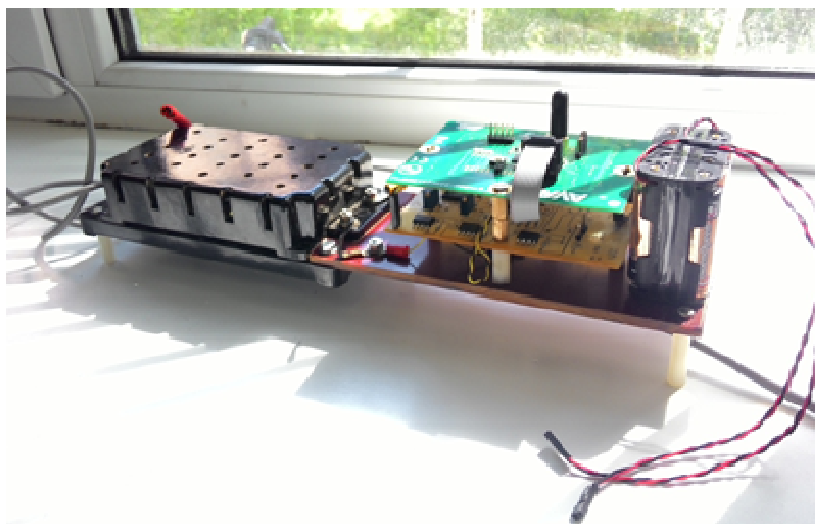
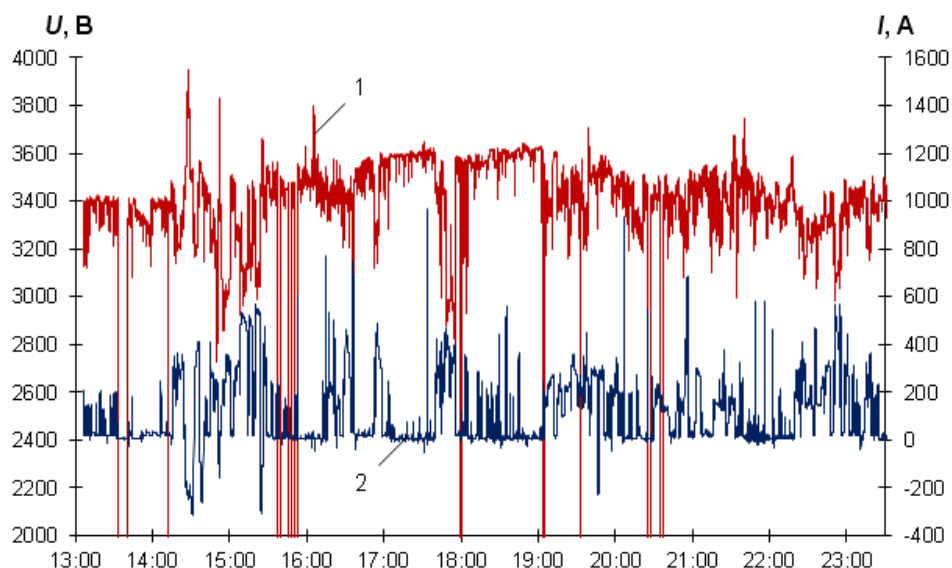


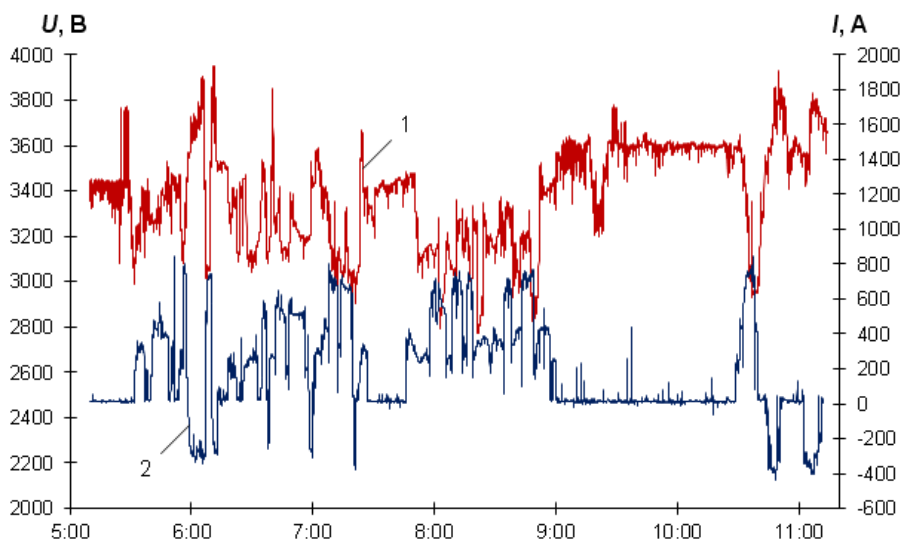
Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд розробленого пристрою для вимірювання напруги в мережі 3,3 кВ

Напередодні проведення основного експерименту проведені пробні вимірювання на ділянці Клепарів – Стрий – Ходорів та у зворотному напрямку. Дана ділянка особлива консольним живленням тягової мережі у одноколійному напрямку ст. Ходорів, при русі якою спостерігались зниження напруги нижче 3,0 кВ. Для цього випадку зафіксоване значення напруги величиною 2727 В при загальному струмі електровозу 506 А. результати вимірювань параметрів електроспоживання (напруги на струмоприймачі і струму в режимах тяги, вибігу і рекуперації) електровоза ВЛ11М на дослідних ділянках приведенні на рис. 2.4, 2.5.



1 – напруга на струмоприймачі; 2 –тяговий струм (рекуперація при струмі $I < 0$)

Рисунок 2.4 - Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М в напрямку
Клепарів-Стрий – Ходорів



1 – напруга; 2 – струм (рекуперація при струмі $I < 0$)

Рисунок 2.5 - Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М на ділянці
Клепарів – Стрий – Воловець

Попередній аналіз отриманих результатів показав, що для нормально встановленої схеми живлення режим напруги в тяговій мережі відповідав встановленим вимогам. Мінімальне значення напруги для двосторонньої схеми складало 2770 В у режимі тяги при загальному струмі електровозу 1220 А.

Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації яке складає 3947,7 при загальному струмі рекуперації електровозу 760 А.

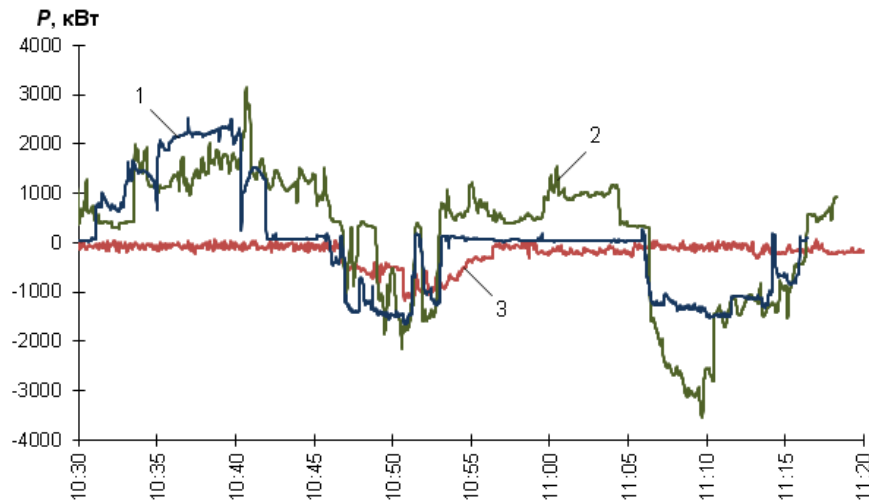
					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Співставлення потужності дослідного електровозу з потужностями двох суміжних ТП по стороні змінного струму (на вводах 35 кВ тягових трансформаторів), які характерно відображають перехід перетворювачів ТП з випрямного в інверторний режим приведені на рис. 2.6.

Для приєднань на ТП не зафіксовано значних порушень вимог щодо рівня напруги. Максимальне значення потужності, яка генерувалась зі сторони тягового навантаження, зафіксована на рівні 1100 кВт для однієї підстанції і на рівні 3000 кВт для іншої. В інверторному режимі роботи тягової підстанції спостерігалось загальне підвищення коефіцієнта сумарних гармонійних спотворень, що є технологічною особливістю роботи тиристорного інвертора. В табл. 2.1 наведені значення основних показників якості енергії рекуперації, виміряні зі сторони живлячої мережі 35 кВ[14].

Таблиця 2.1 Основні показники якості електроенергії в режимі рекуперації

Показники по напрузі	Значення	Показники по струму	Значення
Відхилення, %	9,38	Гармонійні спотворення, %	20,8
Гармонійні спотворення, %	3,8	в т.ч. непарними, %	20,7
в т.ч. непарними, %	3,1	парними, %	1,8
парними, %	0,3	інтергармоніками, %	0,6
інтергармоніками, %	0,2	Коефіцієнт амплітуди	1,55
Несиметрія, %	0,5	Коефіцієнт форми	1,09
Частота, Гц	50,0	Несиметрія, %	1,39



1 – дослідний; 2 – ТП Воловець; 3 – ТП Скотарське

Рисунок 2.6 - Співставлення потужностей дослідного електровозу та тягових підстанцій електровоз

Крім того, в деяких випадках було зафіксовано, що сумарна потужність рекуперації на вводах суміжних ТП перевищувала потужність рекуперації поїзда (рис. 2.6, проміжок часу 11:05...11:15). Оскільки за технічними умовами проведення вимірів на досліджуваній ділянці інших поїздів графіком руху не передбачалося і рекуперація застосовувалась лише на одному електровозі, дане явище може пояснюватися лише перетоками енергії по тяговій мережі від сусідніх ТП (працюючих у випрямному режимі), що знаходилися за межами дослідної ділянки [14].

На тяговій підстанції інвертор підключається до загальних шин паралельно з випрямними агрегатами (рис. 2.7). Інвертор виконано за трифазною мостовою схемою. Струм випрямлячів IdB направлений від позитивної шини в контактну мережу, а струм інвертора навпаки – з контактної мережі до позитивної шини. При холостому ході випрямляча напруга на шинах підстанції 3300 В, перехід підстанції в режим приймання надлишкової енергії рекуперації супроводжується збільшенням напруги холостого ходу, яка не повинна перевищувати максимально допустимого значення 3800 В.

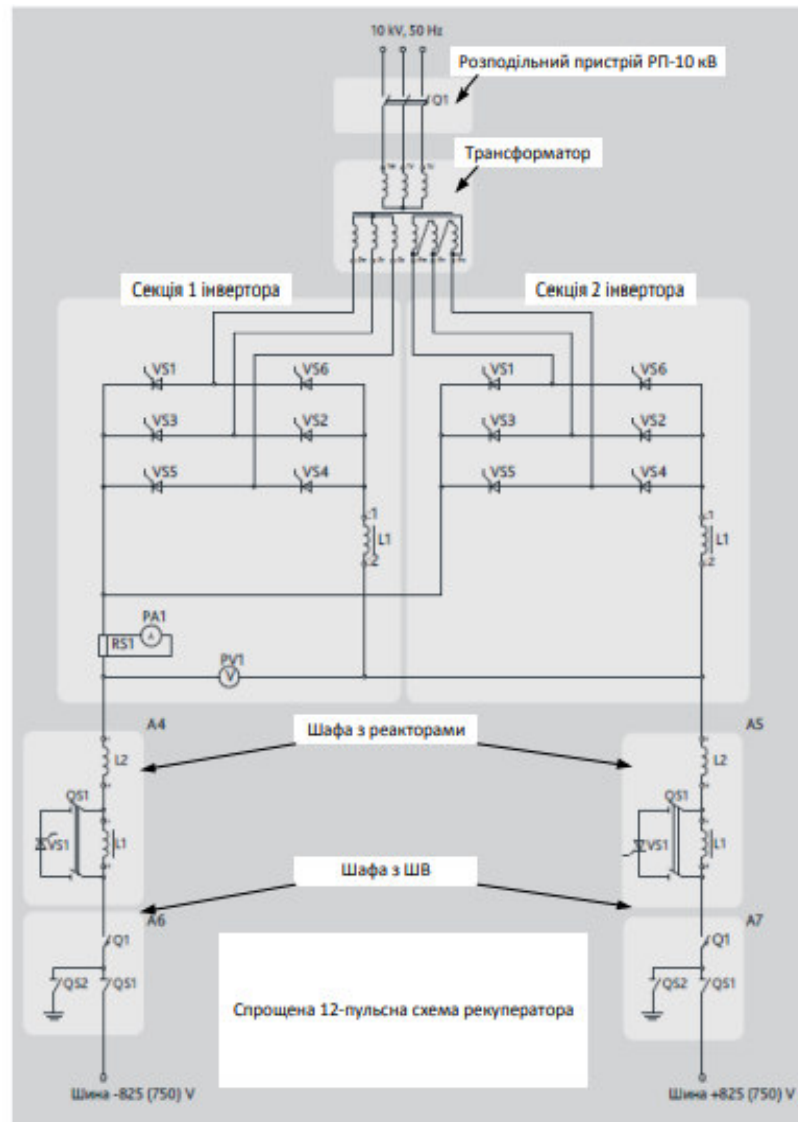
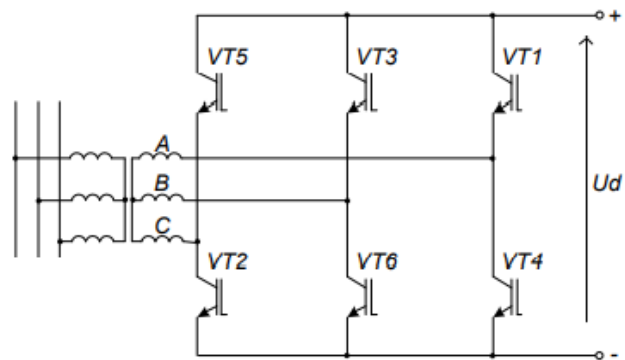


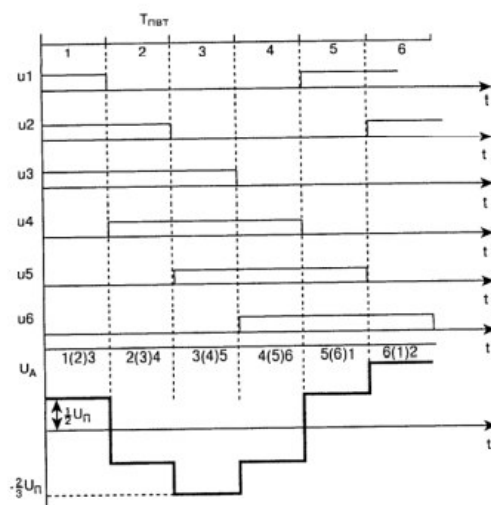
Рисунок 2.8 - Рекуператор підстанції метрополітену

Принцип роботи інвертора. Інвертор служить для перетворення напруги постійного струму в змінний. Щоб це реалізувати, на керовані ключі подаються імпульси управління в певній послідовності. Існує декілька способів управління ключами інвертора, серед яких 180-градусне управління, широтно-імпульсна модуляція PWM (pulse width modulation) і просторововекторна широтно-імпульсна модуляція SVPWM (space vector PWM).

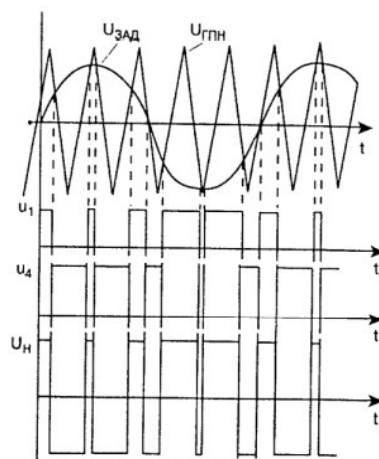
Найбільш просте – 180- градусне управління – полягає в тому, що протягом $1/6$ періоду вихідної напруги ввімкнено 3 ключі (рис. 2.9). Їх послідовність легко запам'ятати: 123, 234, 345, 456, 561, 612. У результаті утворюється напруга ступінчастої (пірамідальної) форми, а струм за рахунок індуктивності матиме майже синусоїдальну форму з високим процентним вмістом сторонніх гармонік.



Інвертор



180-градусна модуляція



Синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція

Рисунок 2.9 - Дворівневий трифазний мостовий інвертор і способи управління його ключами

Умови рекуперації електричної енергії на ділянках постійного струму залежать від характеристик приймачів надлишкової енергії. Як видно з в.а.х., підстанції при зміні струму в широкому діапазоні зміни напруги незначні. Різний нахил характеристики в правій і лівій частині обумовлений тим, що, як правило, для роботи в інверторному режимі призначений лише один агрегат, у той час як у випрямному режимі працює звичайно декілька перетворювачів, ввімкнених паралельно. При додатковому регулюванні процесів інвертування та випрямлення можна отримати горизонтальну (плоску) характеристику.

Слід зазначити, що якщо струм тягової підстанції від'ємний (нижче осі абсцис на рис. 2.10), це означає, що відбувається рекуперація.

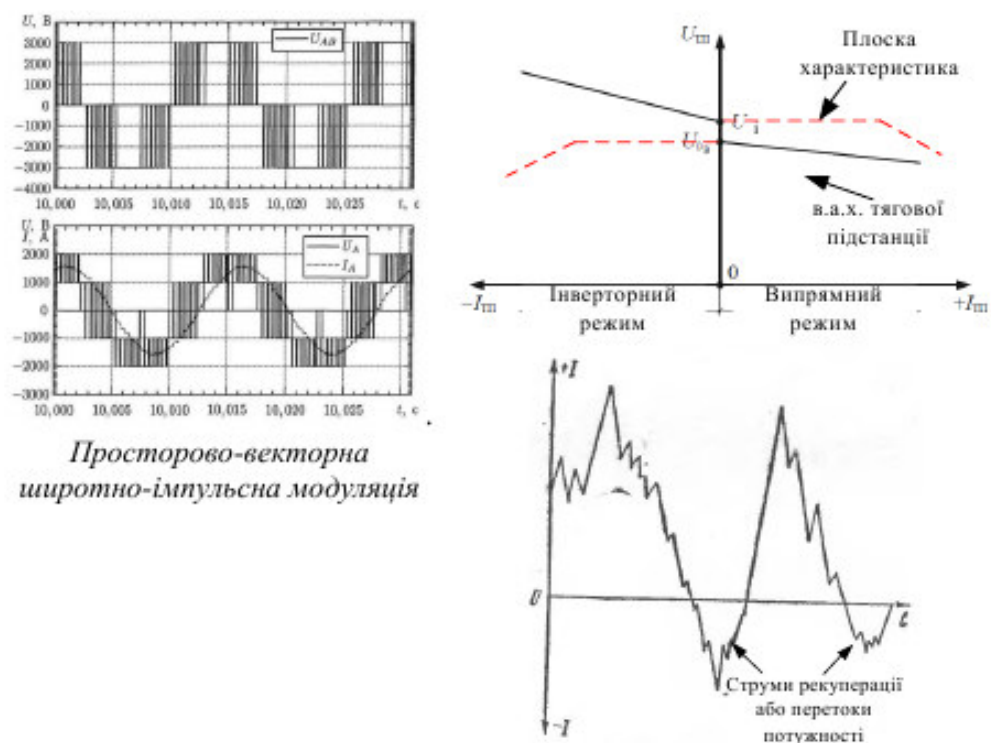


Рисунок 2.10 - Зовнішня характеристика (в.а.х.) і графік навантаження тягової підстанції при рекуперативному гальмуванні

Не завжди від'ємні викиди струму свідчать про рекуперацію. Це також може свідчити про перетоки потужності через шини тягової підстанції з однієї зони на інші. Про те, що даний перетік є наслідком рекуперації, говорить той факт, що тягова підстанція «зачинилась», тобто струм тягової підстанції дорівнює нулю.

До основних причин, що впливають на виникнення перетоків потужності в тяговій мережі можна віднести:

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

- різницю рівнів напруги на шинах суміжних тягових підстанцій;
- різні режими роботи і характеристики обладнання суміжних тягових підстанцій.

Перетоки потужності призводять до виникнення додаткових технічних втрат електроенергії і погіршують показники ефективності системи електропостачання.

На залізницях змінного струму, де підстанції обладнані трансформаторами, передача енергії з тягової мережі в лінію не має яких-небудь труднощів, що виникають на ділянках постійного струму.

2.2 Застосування накопичувачів енергії.

В світових енергетичних системах все більшого значення набувають системи накопичення і зберігання енергії. На сьогодні їх сукупна потужність у світі досягла майже 170 ГВт. Найбільші потужності зосереджені в Китаї (19% від світових), Японії (17%), США (14%) і країнах Європи (Іспанія, Італія, Німеччина та інших). За прогнозами до 2030 року потужність накопичувачів енергії може зрости в три рази. Основними причинами цього є поширення відновлюваних джерел енергії та поява нових вимог до електроенергетичних систем. Абсолютне лідерство в структурі накопичувачів займають гідроакумуючі електростанції, частка яких в сукупній потужності світових систем зберігання енергії становить 96%, але роль інших видів накопичувачів енергії досить швидко зростає.

Динамічний розвиток технологій накопичення електроенергії може помітно змінити енергосистеми. Це певною мірою знизить попит на викопні палива, оскільки накопичувачі все більше замінюватимуть теплову генерацію в ролі балансувальника електроенергетичних систем. Накопичувачі енергії стануть таким же елементом енергосистеми, як генерація, передача, розподіл і збут, які забезпечують вартісну ефективну гнучкість їх функціонування.

Основний ефект від застосування накопичувачів в мережах полягає в забезпеченні безперебійного електропостачання груп споживачів, які вимагають за своїми технологічними процесами і соціальним значенням в житті суспільства підвищеного рівня надійності, зниження втрат електроенергії і потужності в електричних мережах, скорочення інвестицій в будівництво генеруючих і

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромережних об'єктів, розвантаження мереж від реактивної потужності і підвищення їх пропускної здатності, стабілізації напруги в вузлах мережі, часткової нейтралізації наслідків розвитку системних аварій.

Залежно від конкретних умов і цілей зберігання енергії вибір типу накопичувачів може залежати від вимог до видаваної потужності, тривалості зберігання енергії, питомих витрат, коефіцієнту корисної дії, терміну служби і кількості циклів заряду, території розміщення і впливу на навколишнє середовище.

Як відомо енергосистема кожної країни має свій характерний графік навантаження. Виходячи з цього можна зробити висновок, що в певні періоди часу графік має відповідні піки та провали споживання електричної енергії. І це зумовлено в основному ритмом життя людей. Дані перепади споживання електричної енергії негативно впливають на її якість, а також відповідно призводять до збільшення втрат потужності в мережі, це в першу чергу обумовлено тим що зростають струмові навантаження. На сьогоднішній день дана проблема вирішується за допомогою використання гідроакумуючих електростанцій. Як повідомляє джерело , використання накопичувачів може мати такий позитивний ефект:

1. ефект для генерації: використання накопичувачів дозволить оптимізувати процес виробництва електроенергії за рахунок вирівнювання графіка навантаження на найдорожчому генераторному обладнанні, а також позбавити дорогу теплову генерацію від регулятора ролі;

2. ефект для державного регулювання: накопичувачі дозволяють створити енергетичний резерв без надмірної роботи генеруючих потужностей, оптимізувати режим роботи електростанцій, забезпечити спокійне проходження нічного мінімуму і денного максимуму навантажень;

3. ефект для споживачів: електроенергія стає дешевше, підвищується надійність енергопостачання, можна забезпечити роботу критичного обладнання при перебоях з живленням і створити резерв на випадок аварій [15].;

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ефект для енергосистеми: накопичувачі знижують пікове навантаження на електричні підстанції і витрати на модернізацію мережевої інфраструктури, підвищують якість і надійність енергопостачання споживачів.

Для використання накопичувачів енергії з метою запасання і видачі в потрібний момент енергії рекуперації при гальмуванні поїздів найбільш прийнятними є маховики, літій-іонні акумулятори та суперконденсатори.

Окрім прямого ефекту з економії споживаної енергії накопичувачі мають позитивний вплив на енергосистеми: зменшують перепади напруги при нерівномірному графіку споживання енергії; знижують необхідність великого резервування потужності підстанцій і тим самим капітальні затрати при їх будівництві і ремонті; знижують знос обладнання тягових підстанцій.

Переважає більшість пілотних проектів орієнтовані на стаціонарне застосування накопичувачів з метою незбільшення витрат енергії при транспортуванні на борту масивних накопичувачів і не бути обмеженими за габаритами. Однак при цьому зростає і кількість накопичувачів на борту. Економічна ефективність на пілотних проектах показана досить суттєва – до 40 %, причому ефективність маховикових накопичувачів суттєво вище, ніж у суперконденсаторів.

Найбільш поширеними та перспективними є проекти з застосування накопичувачів на підстанціях і перегонах метрополітенів.

На рис. 2.11 у якості прикладу показано схему та зовнішній вигляд стаціонарних накопичувачів енергії, що виробляються компанією Toshiba.

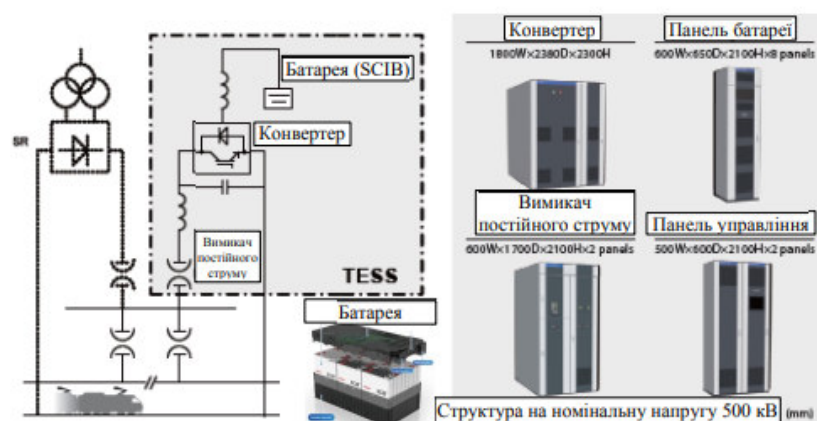


Рисунок 2.11 - Система зберігання тягової енергії TESS виробництва Toshiba

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

2.3 Використання накопичувачів енергії та сучасні розробки автономного електричного транспорту.

Одним з відомих напрямків зниження енергоємності та підвищення енергетичних показників систем електрифікованого транспорту є використання силових накопичувачів енергії. Через наявність в режимах електроспоживання коливань, що викликані інерційністю руху та можливістю рекуперативного гальмування, застосування накопичувачів дозволяє демпфірувати ці коливання, підвищити ефективність використання рекуперованої енергії, знизити втрати енергії та встановлену потужність системи тягового електропостачання. Крім цього, тимчасове зберігання енергії рекуперації в накопичувачах має суттєву перевагу перед її поверненням в первинну мережу, оскільки не залежить від режимів роботи районних навантажень та не викликає організаційних питань при компенсації вартості відданої енергії в систему зовнішнього електропостачання.

До використання енергоємних пристроїв вдаються також і автовиробники в результаті пошуку альтернативних видів палива для автомобілів. Цьому сприяє розвиток технологій виготовлення пристроїв накопичення і зберігання електроенергії та перетворювальної техніки.

Перший у світі масовий гібридний автомобіль Toyota Prius з'явився у 1997 році, для приводу якого застосовувався двигун внутрішнього згорання сумісно з електродвигуном. Через 13 років з'явився електромобіль Tesla, здатний проїхати на одному заряді до 300 км. Саме поява автомобіля Tesla започаткувала еру автономного електричного транспорту. Після цього більшість автовиробників зі світовим ім'ям налагодили випуск електрокарів, працюючих від акумуляторних батарей.

На сьогодні нараховується більше 3 млн. електромобілів та їх кількість неперервно зростає. Лідером серед країн світу за темпами переходу на електромобілі є Норвегія, серед зареєстрованих 2,6 млн. авто близько 100 тис. припадає на електромобілі. В Україні експлуатується близько 4 тис. електромобілів. В Росії та Польщі зареєстровано по 700 електрокарів.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Через зростаючу кількість фактів використання енергоємних пристроїв виникає задача налагодження їх ефективної взаємодії з енергетичною інфраструктурою електрифікованого транспорту для зниження енергоємності перевізного процесу. На даний час існує позитивний досвід експлуатації НЕ на метрополітенах і міському електротранспорті. На ТП переважно використовуються інерційні механічні НЕ, як найбільш узгоджені з електромеханічними характеристиками транспортних навантажень. Комплекс з 2-5 енергоблоків дозволяє акумулювати енергію потужністю 1,5...2,5 МВт, що дозволяє забезпечувати пуск та розгін двох електропоїздів до швидкості 60 км/год.

Використання суперконденсаторних та надпровідних індуктивних НЕ в тягових мережах на даний час не отримало масового розповсюдження та знаходиться на стадії експериментальної експлуатації наведені в табл. 2.2 [1-4].

Таблиця 2.2 – Енергетичні та розрядні показники різних типів НЕ

Тип НЕ		Питома енергія, Дж/г	Час виводу енергії, с
Зі статичною активною зоною	Хімічний	$10^2 \dots 10^5$	$1 \dots 10^5$
	Індуктивний	$1 \dots 10$	$10^{-3} \dots 10$
	Ємнісний	$0,1 \dots 0,5$	$10^{-6} \dots 10^{-2}$
З динамічною активною зоною	Механічний	$10 \dots 10^3$	$1 \dots 10^3$
	Електромеханічний	$1 \dots 10$	$10^{-2} \dots 10$
	Електродинамічний	$0,05 \dots 1$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$

На рис. 2.12 показано деякі обрані типи НЕ, причому для порівняння ефективності їх застосування наведені питомі енергії (відношення накопиченої енергії до маси накопичувача) та питомі потужності (відношення потужності заряду/розряду до маси накопичувача).

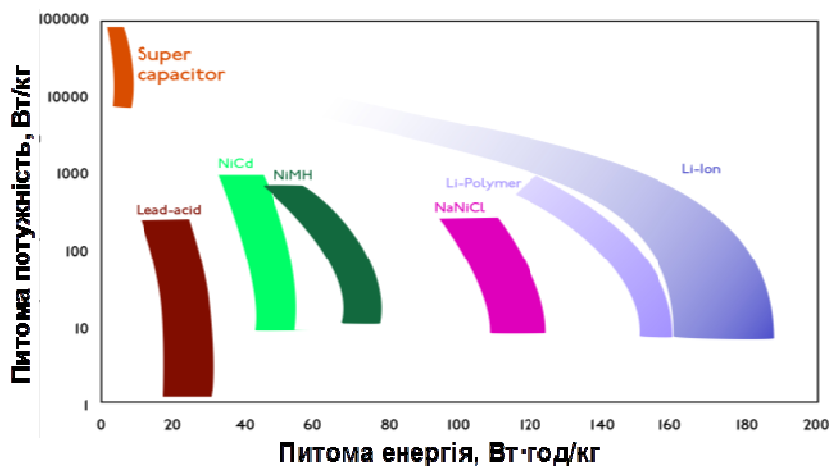


Рисунок 2.12 – Типи накопичувачів енергії

На сьогодні високими темпами розвивається електромобілебудування як персонального так і громадського електротранспорту. Так на 11-й щорічній найбільшій міжнародній виставці транспортної техніки і технологій InnoTrans 2017 (Берлін) було продемонстровано унікальний експонат – зчленований електробус моделі E433 Vitovt Max Electro (рис. 2.13, г) виробництва "Белкоммунмаш". Свою техніку також представила польська компанія Solaris Bus & Coach S.A., голландська VDL Bus & Coach bv і німецько-турецька Sileo GmbH.



а) польський Urbino 12 electric, компанія Solaris Bus & Coach S.A.

б) голландський VDL Citea SLF-120 Electric, компанія VDL Bus & Coach bv

в) німецько-турецький E-Bus S18, компанія Sileo GmbH

г) білоруський Vitovt Max Electro, компанія Белкоммунмаш

Рисунок 2.13 - Сучасні електробуси різних виробників

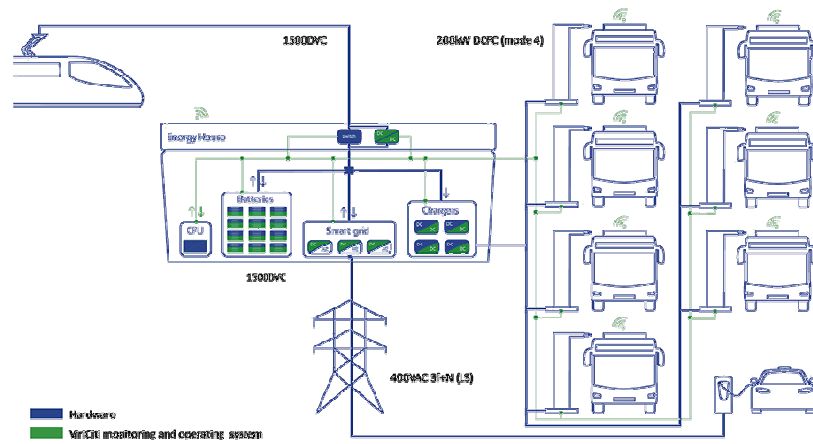


Рисунок 2.14 - Структурна схема взаємодії енергетичних інфраструктури міського електротранспорту та електрифікованої залізниці

При цьому забезпечується гарантована рекуперація поїздів незалежно від наявності тягових навантажень на лінії. Кількість енергії, яка може бути отримана таким чином відповідає потребам автобусних компаній невеликих міст.

Таким чином, виконаний огляд літератури дозволяє підсумувати, що зараз в якості накопичувачів на транспорті можуть використовуватись різні типи акумуляторних елементів, вибір яких повинен забезпечувати покриття як короткочасних, так і тривалих періодів електроспоживання та рекуперації. При цьому для стаціонарного розташування, як правило, використовуються механічні або хімічні вторинні джерела електроенергії, а при бортовому розташуванні необхідна комбінація хімічних і суперконденсаторних елементів. В якості бортових накопичувачів в перспективі можна розглядати і самі електромобілі при їх перевезенні в пасажирських поїздах між містами [7,12].

2.4 Висновок до розділу.

На ділянках тягового електропостачання з інверторними ТП можливі порушення режимів рекуперації енергії за умовами граничнодопустимої напруги на струмоприймачі транспортних засобів. На ефективність перетоків надлишкової рекуперативної енергії з тягової мережі 3,3 кВ до живлячої мережі середньої (високої) напруги суттєвий вплив здійснює режим роботи живлячої енергосистеми, тобто при недостатньому її навантаженні у вузлах приєднання ТП існує обмеження допустимого рівня напруги на виході інвертора.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РІЗНИХ ВИДІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

На сьогоднішній день стрімкий розвиток науки та техніки призвів до значних досягнень в сфері накопичення електричної енергії. Проблема накопичення енергії залишається досить актуальною по сьогоднішній день. Оскільки електроенергія – є досить специфічним видом ресурсу, вона потребує негайного використання з моменту її виробництва. Однак на даний момент, дана проблема може вирішитися лише частково. На допомогу вирішенню даної проблеми приходять накопичувачі електроенергії. Використання накопичувачів можливе бути досить актуальним для таких сфер: загалом в енергетиці та в системах електричної тяги.

3.1 Використання накопичувачів електроенергії для метрополітену.

Для аналізу ефективності використання накопичувачів в системах електричної тяги, будемо проводити аналіз для схеми тягового електропостачання метрополітену (рис. 3.1). Для розрахунку задаємося початковими умовами. Для цього на рис. 3.2 має струми вагонів метро, які слідує в парному напрямку, тобто від підстанції 1 до підстанції 3. А на рис. 3.3 маємо графіку струмів вагонів, що слідує у зворотному напрямку, тобто від підстанції 3 до підстанції 1.

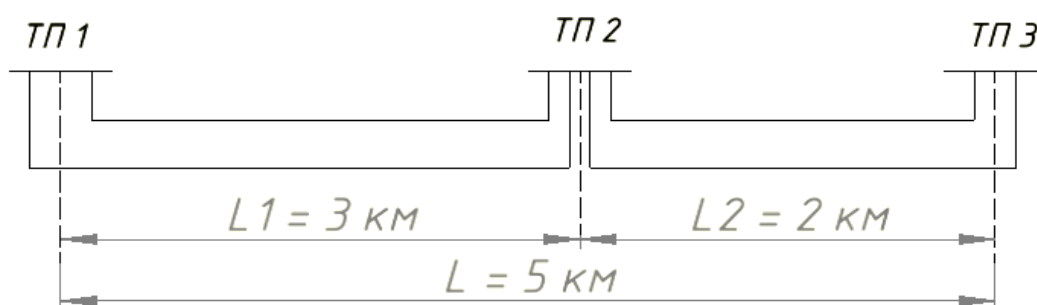


Рисунок 3.1 – Схема тягового електропостачання

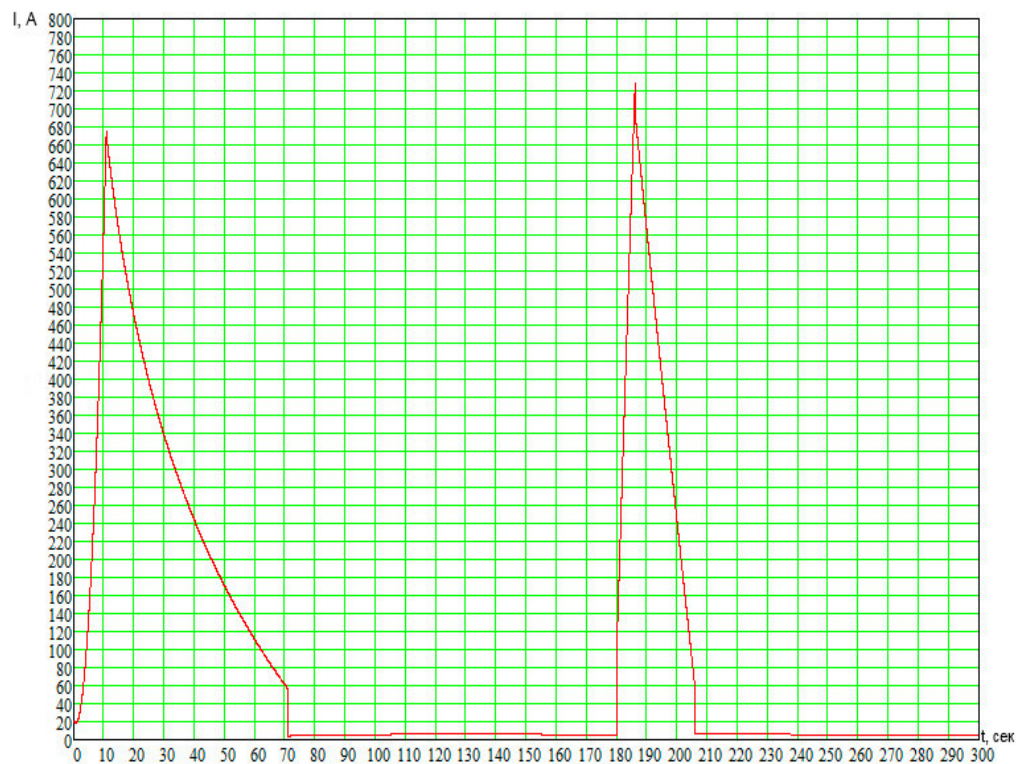


Рисунок 3.2 – Графік струмів вагонів, що слідують в парному напрямку

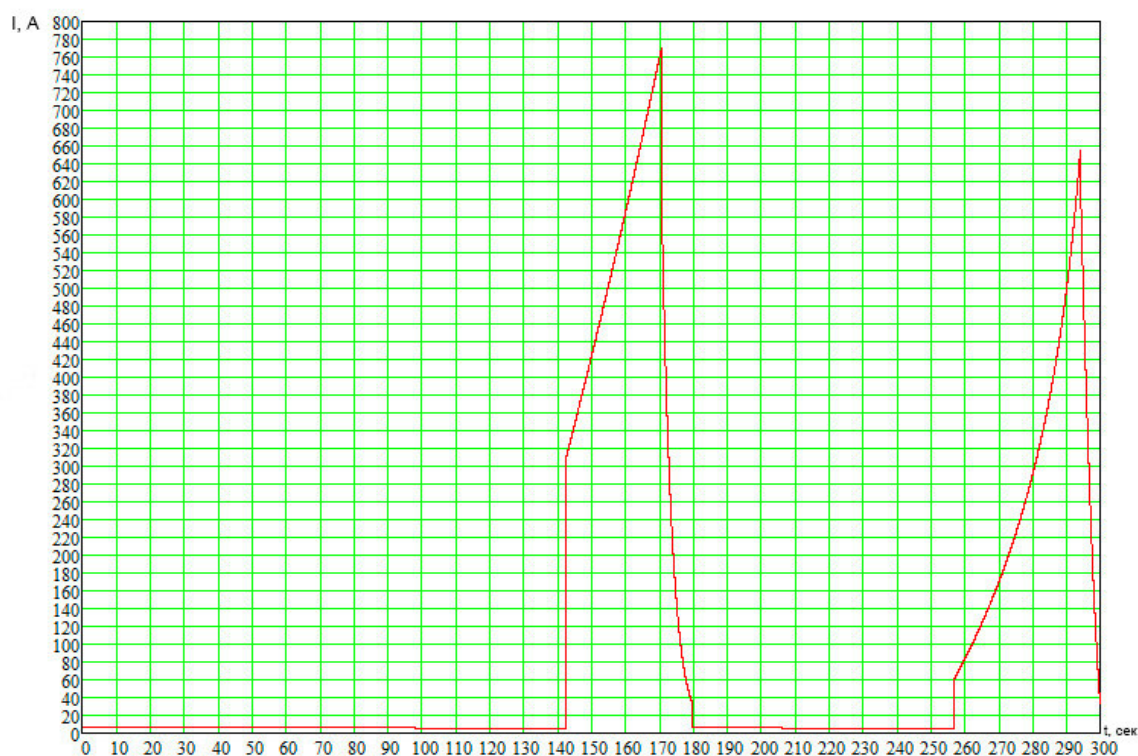
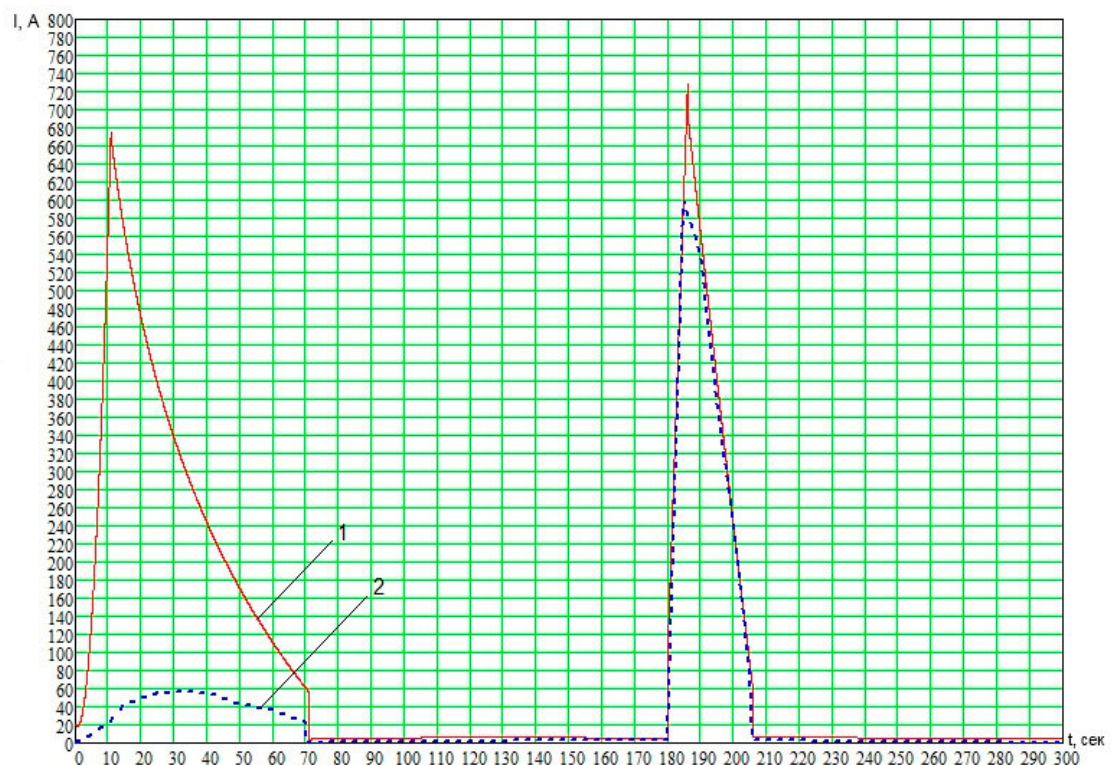


Рисунок 3.3 – Графік струмів вагонів, що слідують в не парному напрямку

Також приймемо, що за одну годину на заданому перегоні «підстанція 1 – підстанція 3», проходить 40 пар вагонів, тобто маємо, що інтервал слідування становить 1.5 хв. Графік руху вагонів зображений на рис. 3.6 а.

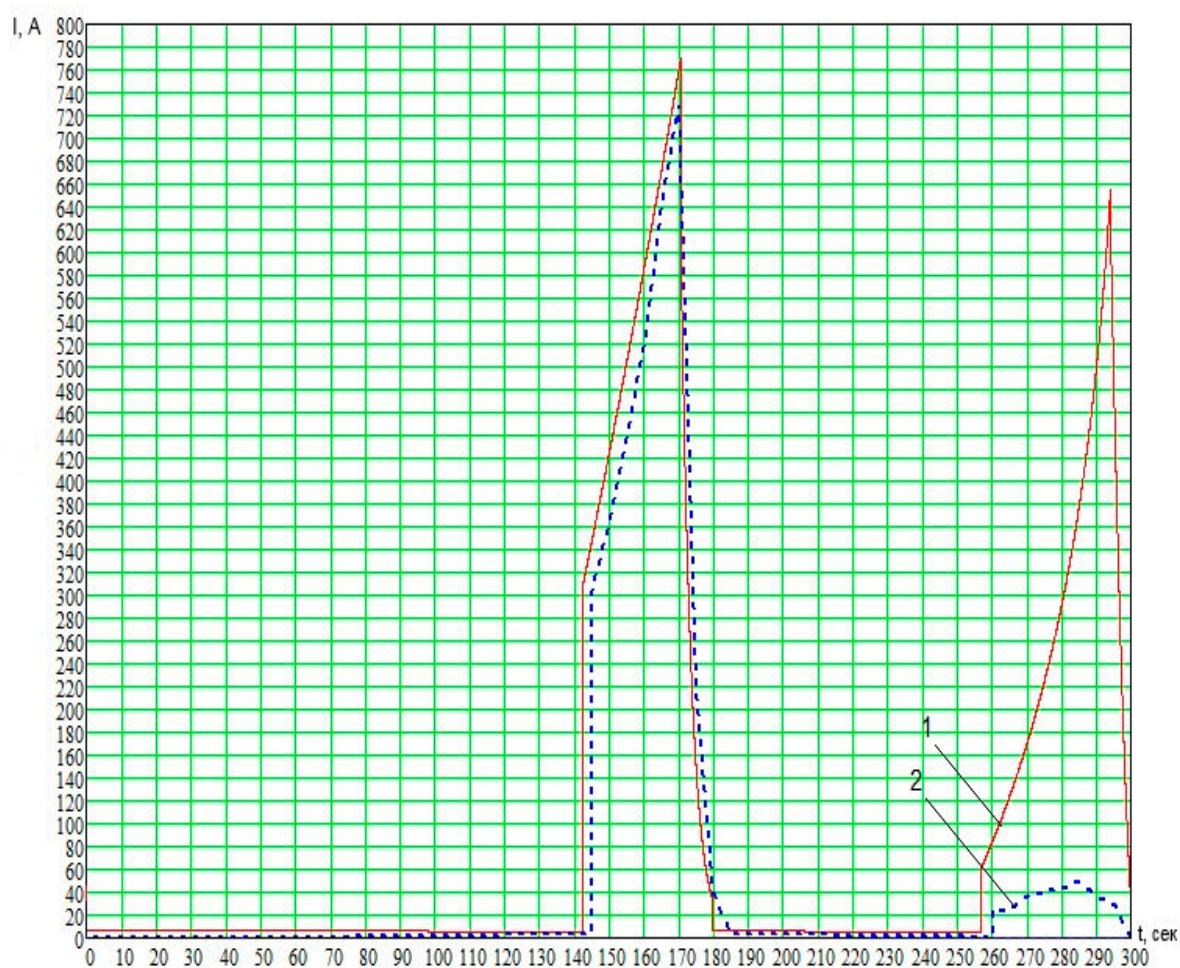
Для початку розрахунку, приймемо що розрахунковою підстанцією, буде підстанція 2. Тоді наступним кроком, за допомогою графічного методу знаходимо струми фідерів розрахункової підстанції. На рисунку 3.4 та 3.5 зображені струми фідерів підстанція що живлять парний та непарний напрямок руху вагонів метро відповідно.

Отримані струми фідерів підстанції справедливі лише для варіанту, що по розрахункового перегону прослідує одна пара вагонів, тому для достовірності розрахунку, приймемо до уваги, що за одну годину по розрахунковому перегону слідує 40 пар вагонів. Врахувавши дану умову, на рис. 3.6 б, зображений струм підстанції з урахуванням графіку руху поїздів.



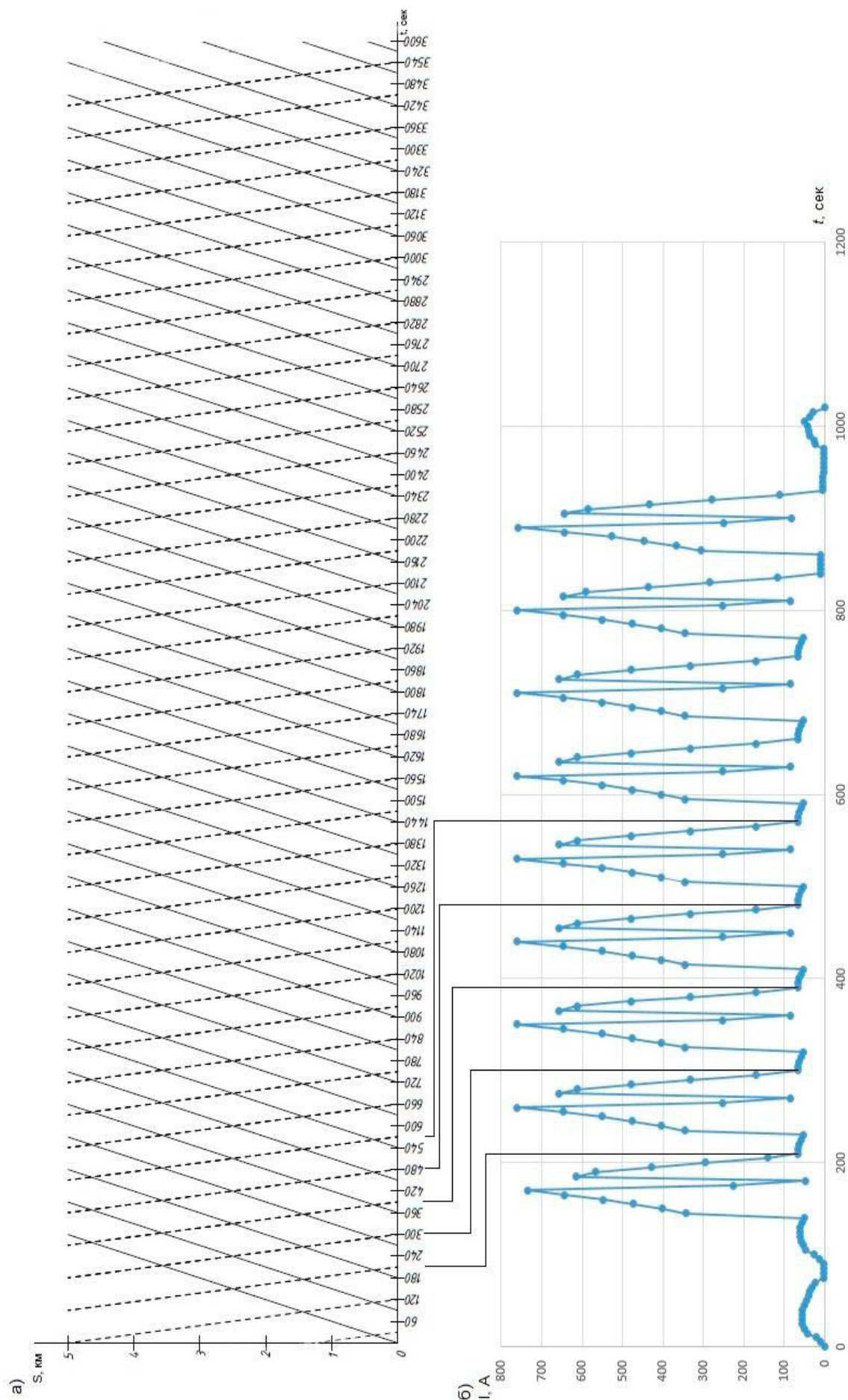
1 – струм вагонів, 2 – струм фідерів підстанції.

Рисунок 3.4 – Струми фідерів підстанції, що живить парний напрямок руху



1 – струм вагонів, 2 – струм фідерів підстанції

Рисунок 3.5 – Струми фідерів підстанції, що живить парний напрямок руху



а) графік руху; б) струм підстанції
Рисунок 3.6 – Струм розрахункової підстанції з урахуванням графіка руху

Отримавши значення струму (рис. 3.6 б), маємо, що струм має період повторювання рівний 90 секундам, тому для подальшого розрахунку приймемо дане значення струму. В модель системи електропостачання метрополітену, яка зображена на рис.3.7. Дане значення струму виступає в ролі навантаження, тому його будемо вносити в блок «Signal Editor», який контролює джерело струму. Додатково задаємося такими умовами:

- внутрішній опір підстанції рівний 0.01 Ом;
- опір розрахункової мережі рівний 0.155 Ом;
- напруга в мережі рівна 825 В.

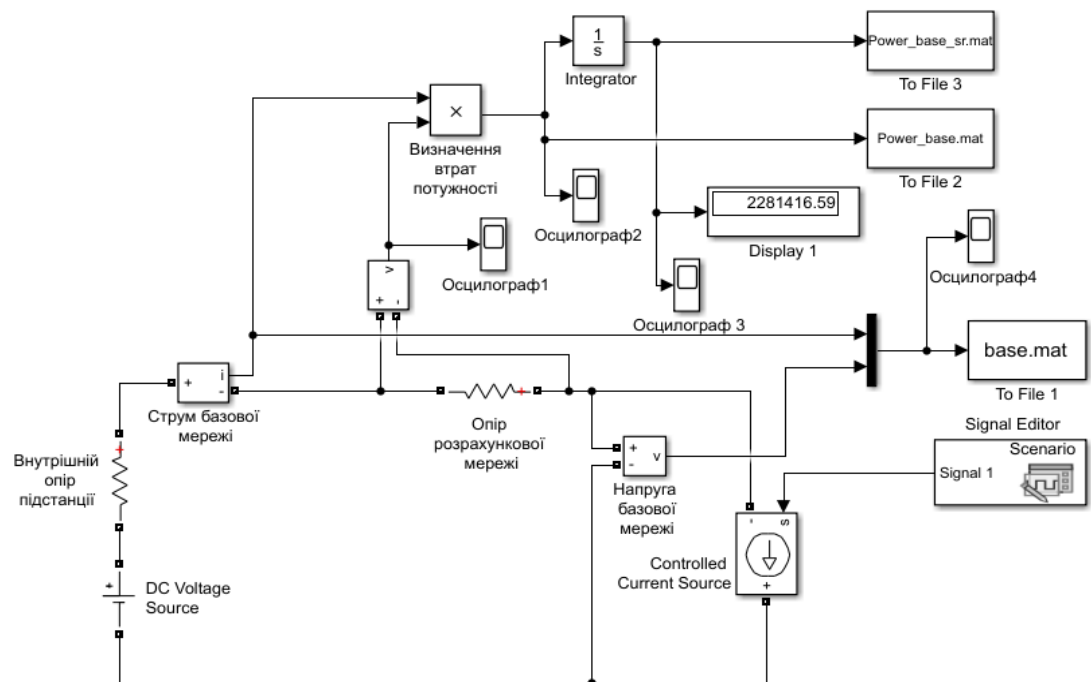


Рисунок 3.7 – Модель системи електропостачання метрополітену

В ході моделювання отримали графіки струму, напруги та втрат потужності в мережі. Значення струму та напруги можна побачити за допомогою блоку «Осцилограф 4», також дані графіки зображені на рис. 3.8. Також значення втрати потужності відображає блок «Осцилограф 2», його значення показано на рис. 3.9. Додатково було визначена повна втрата потужності контактної мережі, дане значення відображає блок «Display 1».

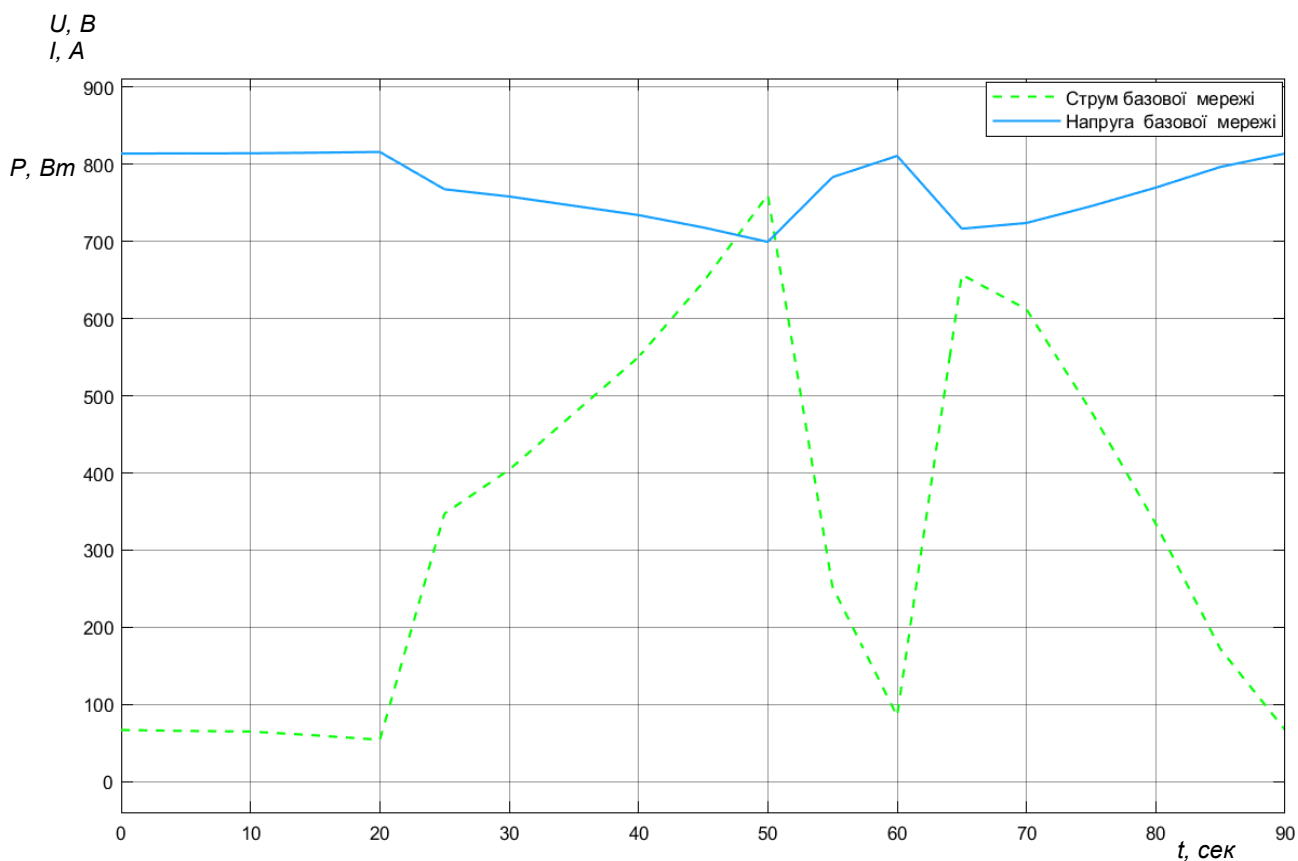


Рисунок 3.8 – Графік струму та напруги базової мережі

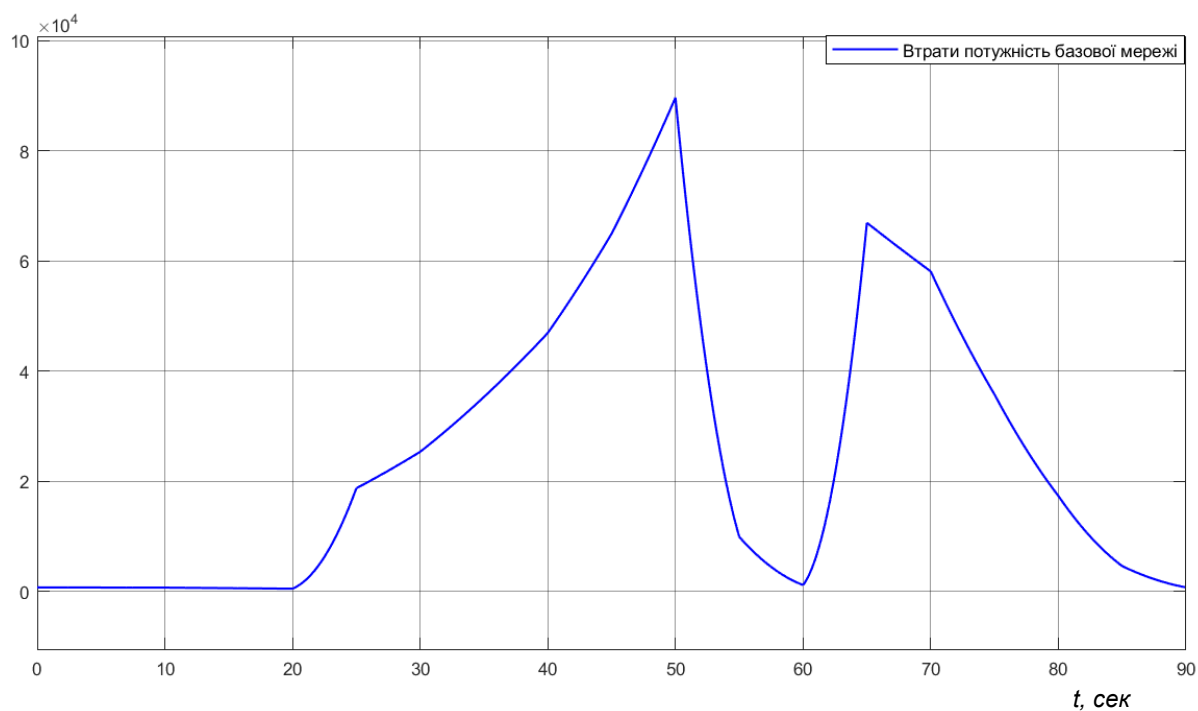


Рисунок 3.9 – Графік втрат потужності базової мережі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ

Арк.

63

Для моделювання системи електропостачання метрополітену з використанням накопичувача, необхідно для початку вибрати найбільш підходящі варіанти накопичувачів. Як зазначено раніше, для системи електричної тяги в даній роботі розглядаються акумулятори та іоністори, а до того ж акумулятори мають значну кількість типів та класифікацій, задаємося додатковою умовою: на систему накопичення електроенергії виділяється 1млн. грн. Проаналізувавши ціни на накопичувачі електроенергії станом на 15.01.18, зведемо дані в таблицю III.1 в якій зазначимо кількість елементів, ємність, кількість послідовно паралельно з'єднаних елементів.

Розрахунок для приклад проведемо для одного типу накопичувача – Li-ion. Першочерговим завданням для збирання накопичувальної системи є: забезпечення необхідної напруги мережі. Оскільки один елемент має напругу 3.7 В, визначимо кількість послідовно з'єднаних елементів [17]:

$$N_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{мережі}}}{U_{\text{бат}}} = \frac{825}{3.7} = 223 \text{ шт.} \quad (3.1)$$

Визначимо ціну однієї послідовно з'єднаної вітки:

$$C_{\text{посл}} = N_{\text{посл}} \cdot C_1 = 223 \cdot 180 = 40140 \text{ грн.} \quad (3.2)$$

де – C_1 ціна одного елемента.

Визначимо кількість паралельно з'єднаних віток, яку можна зібрати на суму 1 млн. грн.:

$$N_{\text{парал}} = \frac{10^6}{C_{\text{посл}}} = \frac{10^6}{40140} = 24 \text{ шт.} \quad (3.3)$$

Визначимо затрачену суму на систему накопичення енергії:

$$C = C_{\text{посл}} \cdot N_{\text{парал}} = 40140 \cdot 24 = 963360 \text{ грн.} \quad (3.4)$$

Визначимо ємність зібраної системи:

$$C = C_1 \cdot N_{\text{парал}} = 3.4 \cdot 24 = 81.6 \text{ А} \cdot \text{год.} \quad (3.5)$$

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Для визначення ємності суперконденсатора застосовуємо формулу:

$$C = \frac{C_1}{N_{\text{посл}}} \quad (3.6)$$

де – C_1 ємність одного елемента.

Таблиця 3.1 – Параметри варіантів накопичувальних систем

Параметр	Тип накопичувача				
	Li-ion	Ni-Cd	Ni-Mh	Свинцево-кислотний, (OPzS)	Суперконденсатор
Ціна одного елементу, грн	180	55	61	14692	492.1
Ємність одного елементу, А• год	3.4	2	2	100	400 Ф
Напруга одного елементу, В	3.7	1.2	1.2	12	2.7
Кількість послідовно з'єднаних елементів	223	688	688	69	306
Кількість паралельних віток	24	26	23	1	6
Загальна ємність системи, А• год	81.6	52	46	100	1.3 Ф
Загальна напруга системи, В	825.1	825.6	825.6	828	826.2
Затрачена сума, тис. грн	963.36	983.84	965.264	1013.748	903.496

В таблиці 3.1 для свинцево – кислотного типу акумулятора довелося взяти більшу суму, це обумовлене тим, що необхідно забезпечити потрібну напругу мережі. Проаналізувавши дані (див. табл. 3.1), для моделювання системи з акумуляторною батареєю, яка зображена на рисунку 3.10, обираємо для базового варіанту систему акумуляторних батарей на основі свинцево – кислотного типу (OPzS).

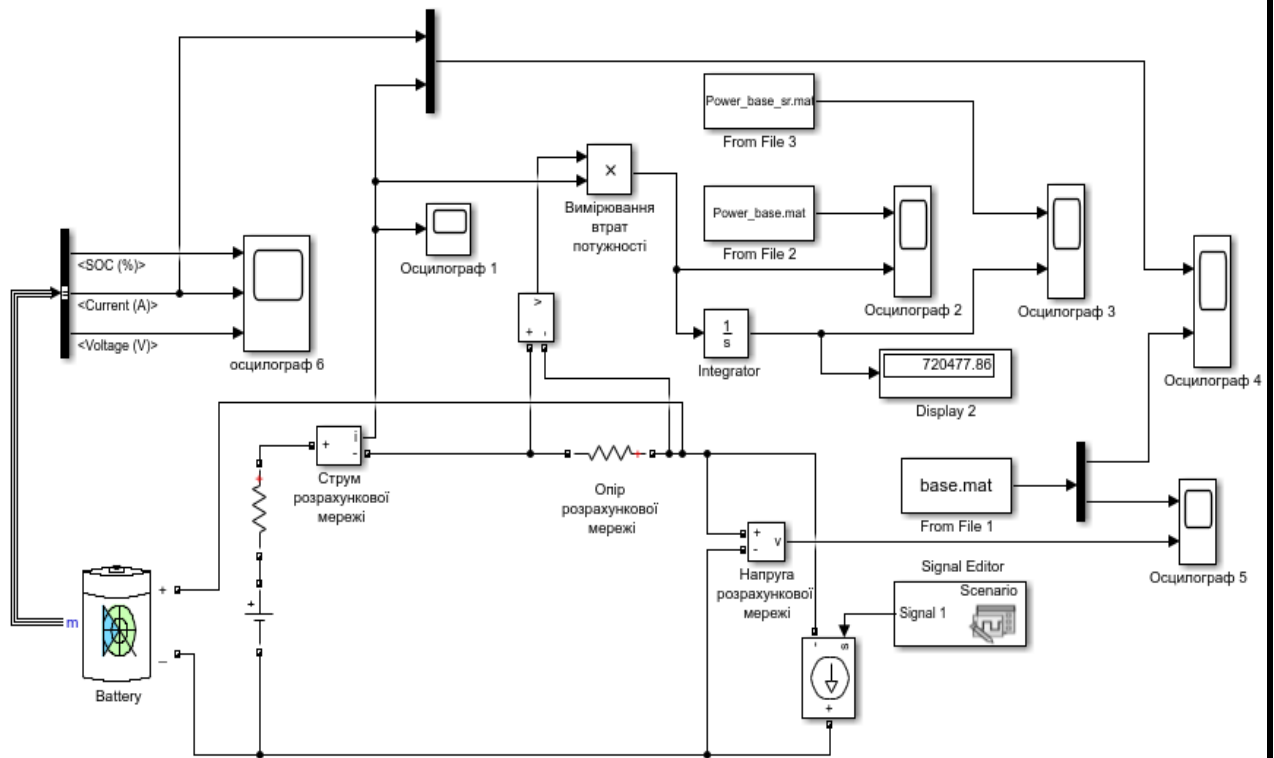


Рисунок 3.10 – Модель системи електропостачання метрополітену з використанням акумуляторної батареї

В ході моделювання було отримано осцилограма напруги мережі, яка порівняна з напругу базової мережі без ефекту застосування акумуляторної системи. Дані осцилограми зображені на рисунку 3.11.

U, B

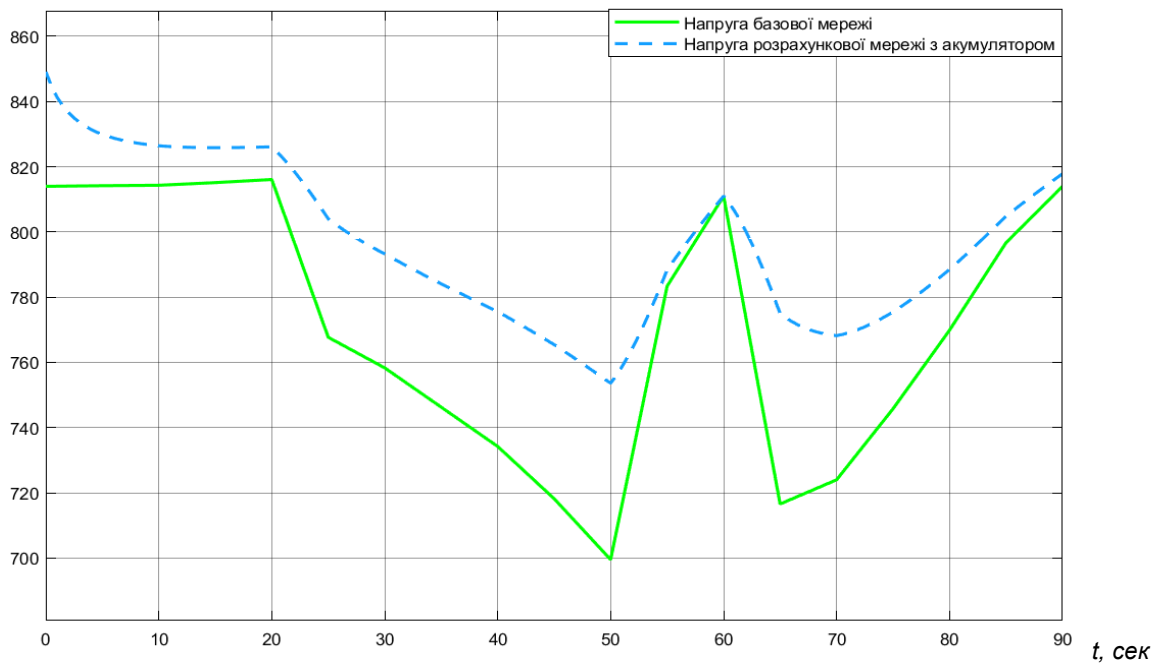


Рисунок 3.11 - Порівняльний графік напруги базової та розрахункової мережі

За допомогою блоку «Осцилограф 4» (див. рис. 3.9), можна побачити осцилограми струмі базової та розрахункової мережі, які зображені на рисунку 3.12.

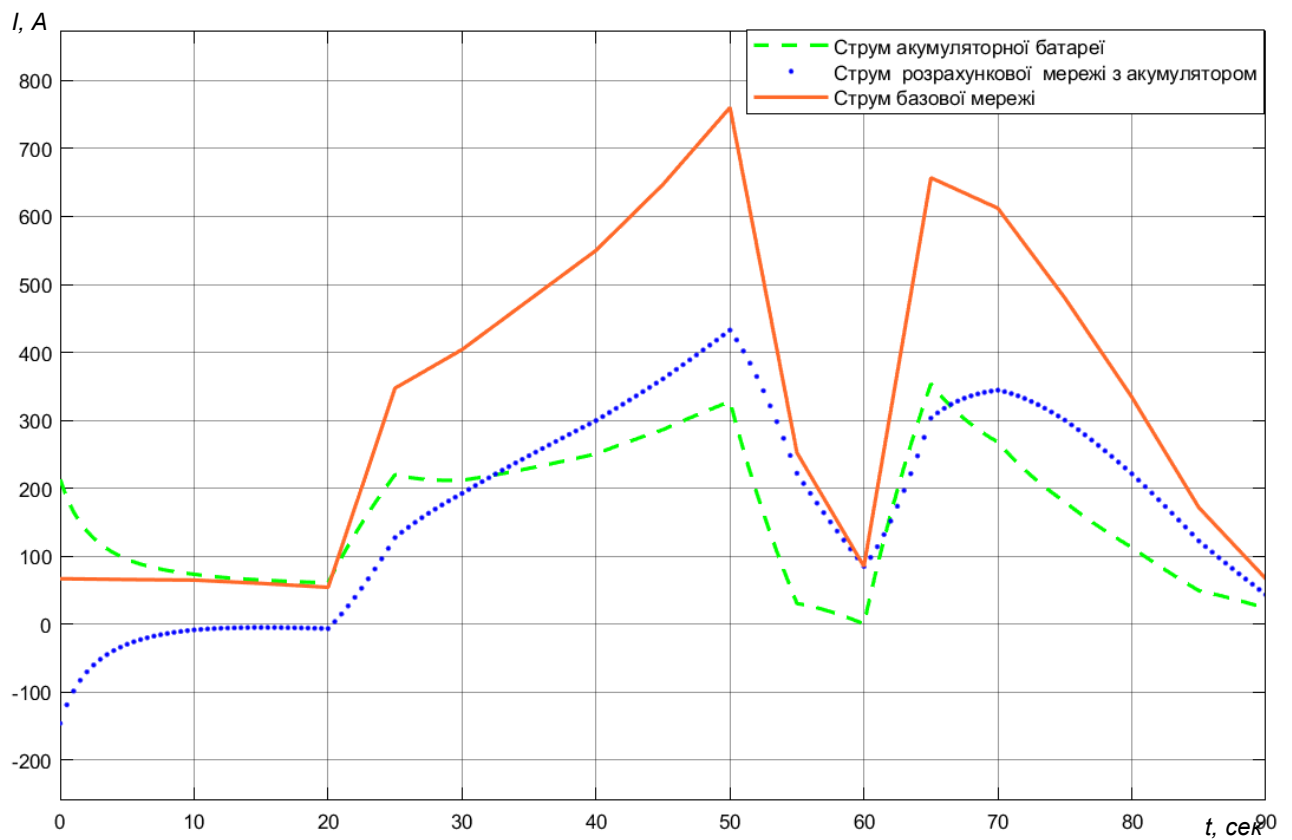


Рисунок 3.12 – Порівняльний графік струмів розрахункової та базової мережі

Також за допомогою блоку «Осцилограф 2» (див. рис. 3.10), отримали осцилограму втрати потужності мережі з використанням акумуляторної системи, які зображені на рисунку 3.13. Додатково було розрахована загальна втрата потужності за допомогою блоку «Integrator» та виведена на блок «Display 2» (див. рис.3.10). Також були отримані дані для інших типів акумуляторів.

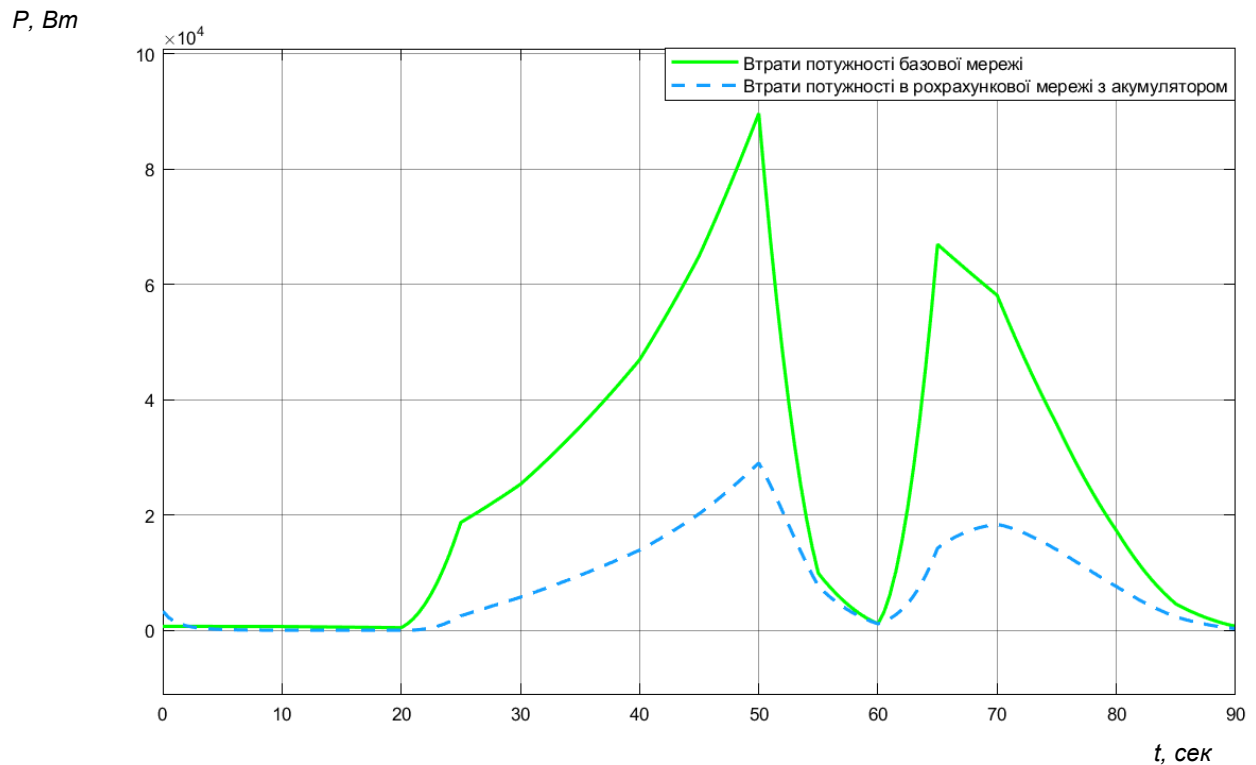


Рисунок 3.13 – Графік порівняння втрат потужності в базовій та розрахунковій мережі

Використавши дані (див. табл. 3.1), промодельюємо схему електропостачання метрополітену з використанням суперконденсатора в ролі накопичувача електричної енергії. Схема імітаційної моделі зображена на рисунку 3.14.

Аналогічно до імітаційної моделі з використанням акумулятора, а даній моделі також відображена осцилограма порівняння напруги базової мережі з розрахунковою, що містить суперконденсатор. Осцилограми виводяться з допомогою блоку «Осцилограф 5» (див. рис. 3.14), та зображені на рисунку 3.15.

В ході моделювання були отримані струми тягової мережі, які зображені на рисунку 3.16, та порівнянні з базовою мережею.

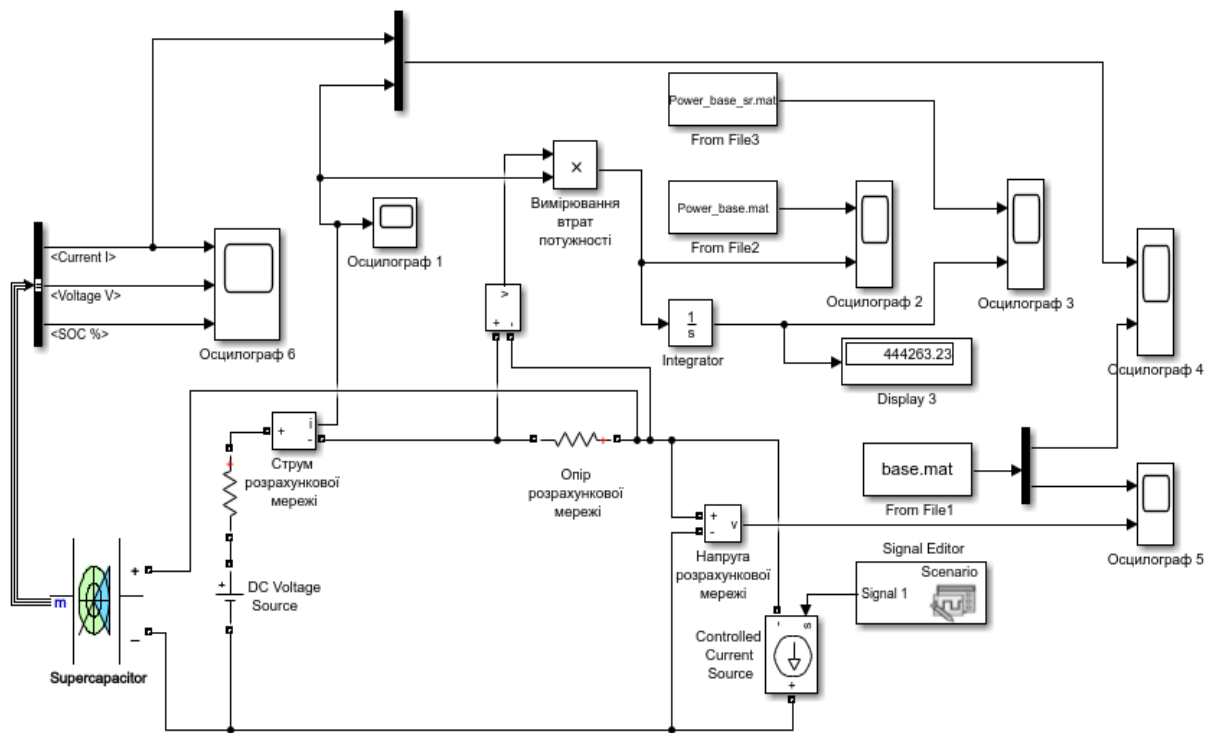


Рисунок 3.14 – Модель системи електропостачання метрополітену з використанням суперконденсатора

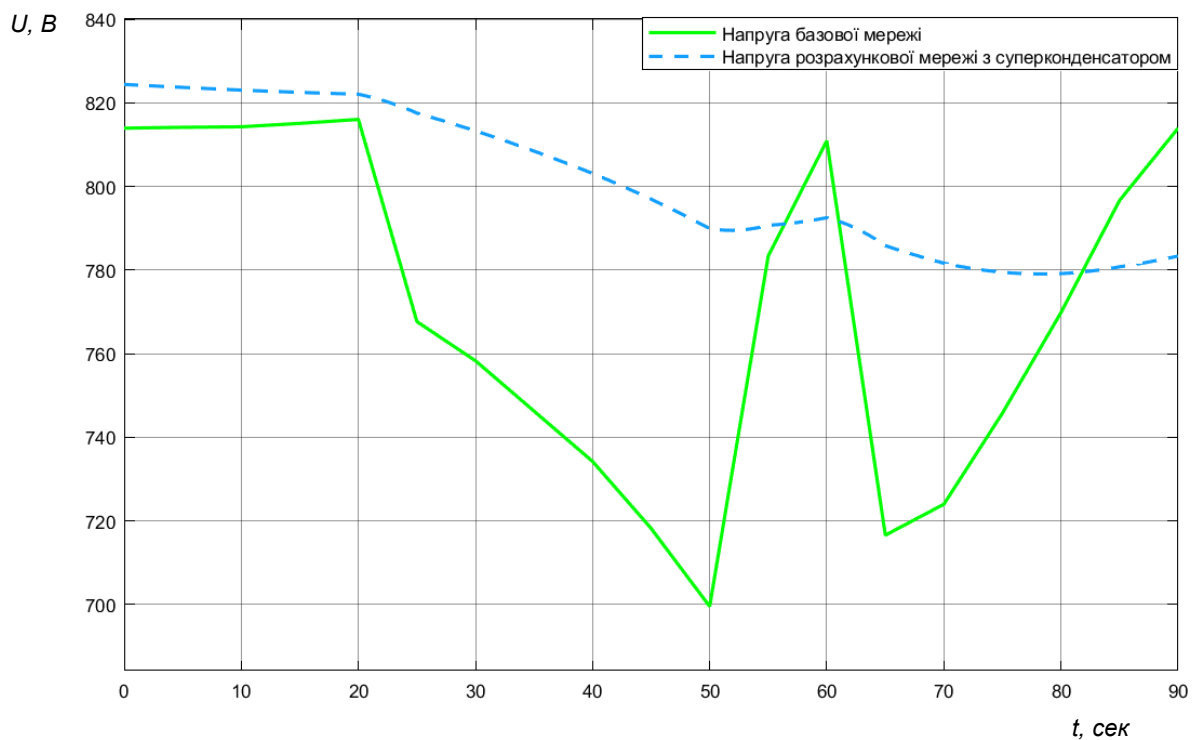


Рисунок 3.15 - Графік порівняння напруги базової мережі та мережі з використанням суперконденсатору

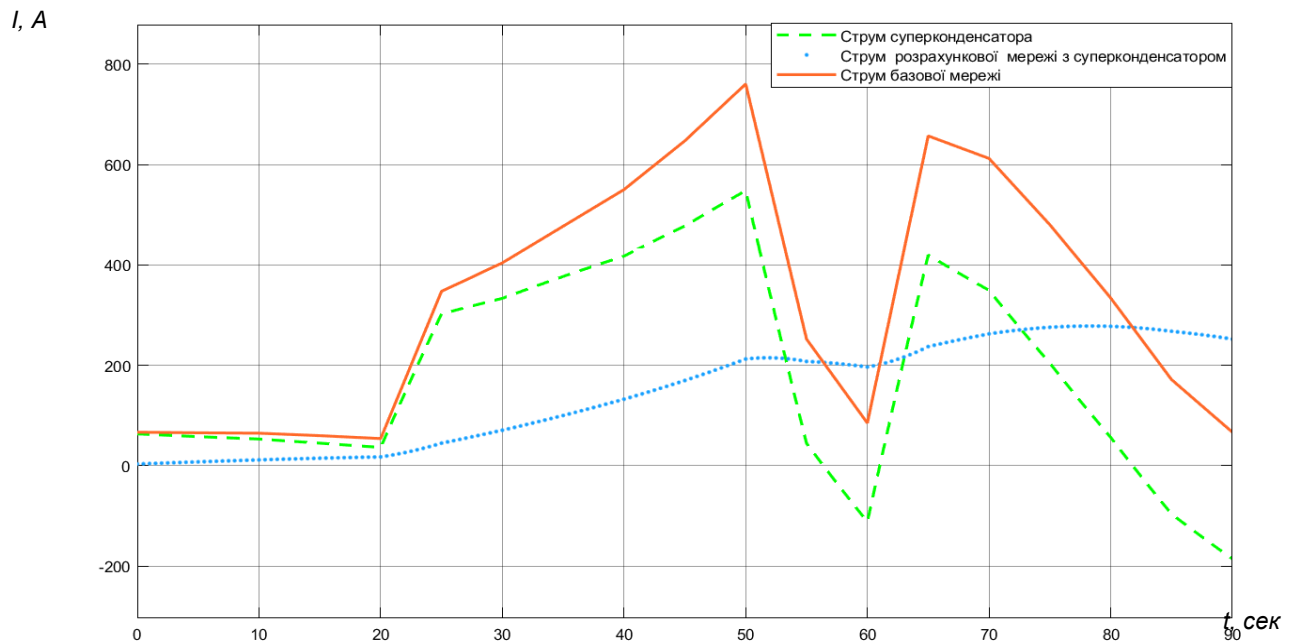


Рисунок 3.16 - Графік порівняння струмів базової мережі та мережі з використанням суперконденсатору

За допомогою блоку «Осцилограф 2» (див. рис. 3.14), маємо осцилограму втрат потужності, яка свою чергу порівняна з базовою мережею та зображені на рисунку 3.17. Також маємо, що дані загальної втрати потужності, які відображаються в блоку «Display 3» (див. рис. 3.14).

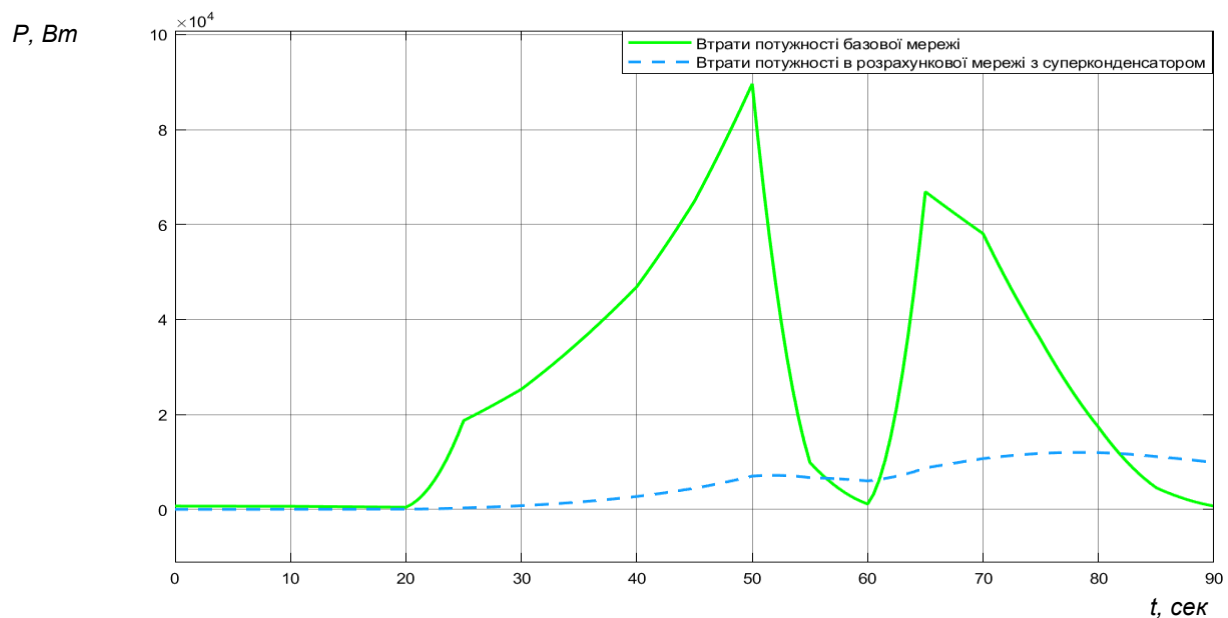


Рисунок 3.17 – Порівняльний графік втрат потужності базової мережі та мережі з використанням суперконденсатору

Як видно на осцилограмах, застосування накопичувачів позитивно впливає на систему електропостачання метрополітену, це в першу чергу зумовлено тим, що зменшується струмове навантаження, а це призводить до зменшення втрат потужності в тяговій мережі. Дані по втратах потужності при використанні різних типів накопичувачі приведемо в таблиці III.2.

Визначимо значення отриманого ефекту від застосування системи накопичення електроенергії:

$$E = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\Delta P_1} \cdot 100\% = \frac{2281416.59 - 720477.6}{2281416.59} \cdot 100\% = 68.4\% \quad (3.7)$$

Таблиця 3.2 – Втрати потужності в тяговій мережі

Варіант накопичувальної системи	Втрати потужності в тяговій мережі, Вт	Зменшення втрат від застосування накопичувача, %
Без накопичувача (базова схема)	2281416.59	-
Свинцево – кислотний	720477.6	68.4
Li - ion	378371.88	83.4
Ni- Cd	475115.77	79.1
Ni - Mh	531598.06	76.6
Суперконденсатор	444263.23	80.5

3.2 Використання накопичувачів електроенергії для наземного транспорту.

Розглянемо випадок, коли ділянкою проходять три поїзди за графіком руху (рис. 3.18) таким чином, що великоваговий поїзд, обладнаний рекуперацією, слідує між двома легковаговими.

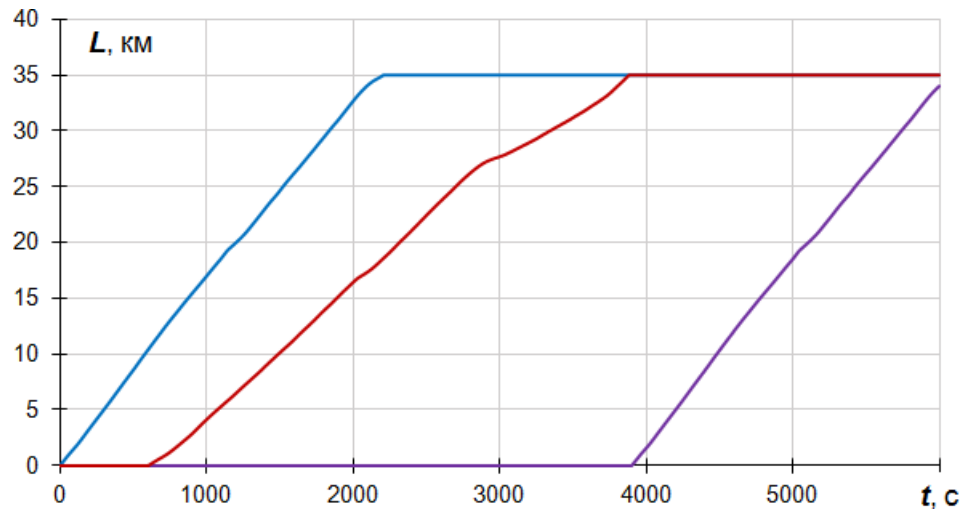


Рисунок 3.18 – Графік руху поїздів на ділянці

Профіль колії на ділянці обрано таким, що поїзди на ділянці ТП 1-2 знаходяться в режимі тяги та вибігу, а на ТП 2-3 частково в режимі вибігу та рекуперативного гальмування. Режим руху поїздів обрано такими, що процеси тягового електроспоживання і рекуперації поїздів на суміжних ділянках не співпадають в часі, що є найбільш розповсюдженим випадком, тому для отриманого надлишку електроенергії необхідно визначити найбільш ефективний спосіб її реалізації. Надлишковий струм рекуперації в такому разі буде описуватися як:

$$I_{\text{надл.р}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } I_{\text{т}}(t) \geq I_{\text{р}}(t) \\ I_{\text{т}}(t) - I_{\text{р}}(t) & \text{при } I_{\text{т}}(t) \leq I_{\text{р}}(t) \end{cases} \quad (3.8)$$

Після виходу поїзда 1 за межі розглядуваної ділянки і входу великовагового поїзда 2 на ділянку ТП 2-3, на ділянку ТП 1-2 заходить поїзд 3, що споживає енергію за тим же графіком що і поїзд 1 (рис.3.19). При цьому поїзд 3 частково може підживлюватись від накопичувача. На основі тягових розрахунків для даної ділянки (ТП 1-3) визначенні графіки струмів поїздів (рис. 3.20), що формуються профілем, режимом руху та масою поїзда.

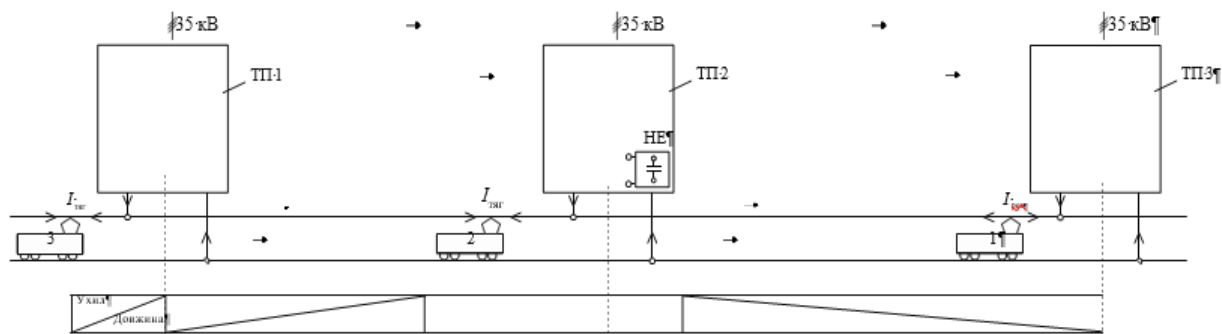


Рисунок 3.19 – Структурна схема дослідної ділянки

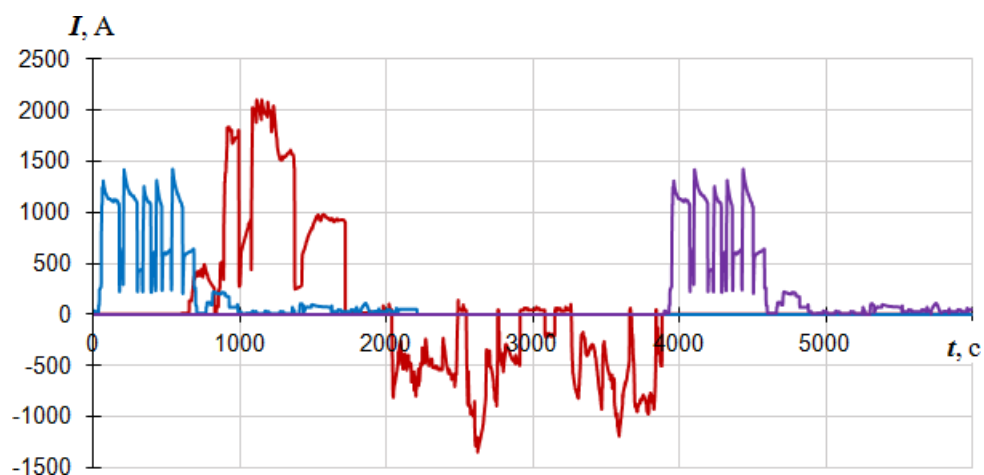
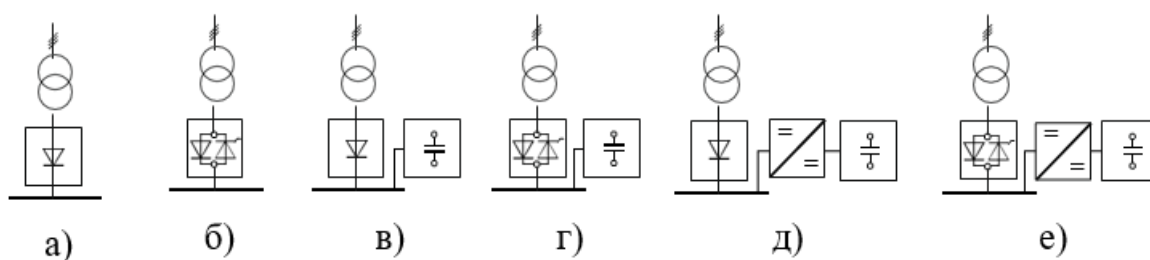


Рисунок 3.20 – Вихідні графіки струмоспоживання поїздів

Розглядались наступні варіанти комплектації обладнання тягової підстанції:

- випрямний та інверторний перетворювач;
- випрямний перетворювач з керованим та некерованим накопичувачем;
- інверторний перетворювач з керованим та некерованим накопичувачем.

Варіанти структурних схем, що використовувались при моделювання приведені на рис. 3.21.



а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.21 – Варіанти структурної схеми ТП

На рис. 3.22 представлена вольт-амперна характеристика зарядно-розрядного пристрою, що представляє собою перетворювач постійно-постійної напруги та призначений для керування енергообмінним режимом накопичувача в необхідних межах. Параметрами перетворювача виступають напруги $U_1 \dots U_4$ та струми I_0 , $I_{\min}$ та $I_{\max}$, значеннями яких можливо регулювати глибину та швидкість заряду і розряду накопичувача.

Для всіх випадків напруга холостого ходу тягової підстанції приймалась на рівні 3,5 кВ.

Для забезпечення рівних умов моделювання в різних структурних схемах початковий рівень заряду накопичувача обирався наступним чином.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

В схемах з некерованим накопичувачем початковий рівень заряду суперконденсаторів дорівнює напрузі холостого ходу в точці підключення, що виключає наявність перехідного процесу в початковий момент моделювання та його вплив на загальну витрату електроенергії. Для схем з керованим накопичувачем – таким чином, щоб початковий рівень заряду накопичувача дорівнював його заряду в кінці розглядуваного інтервалу часу [17].

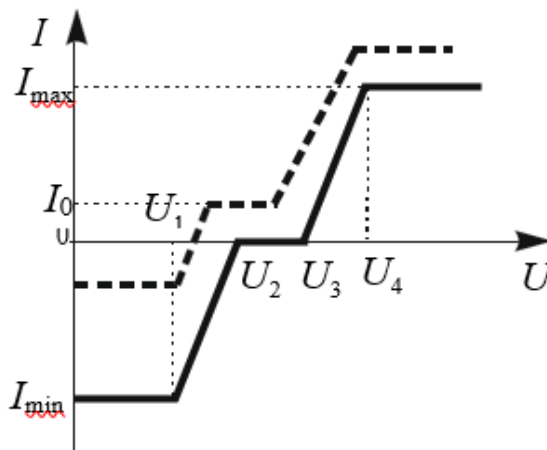


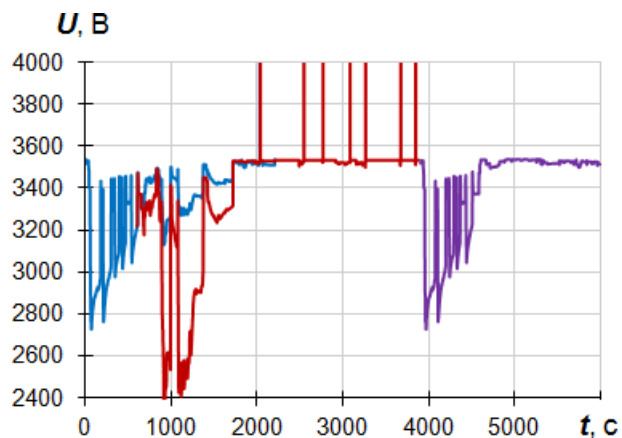
Рисунок 3.22 – Загальний вигляд вольт-амперної характеристики зарядно-розрядного перетворювача накопичувача

В результаті моделювання роботи різних структур ТП СТЕ (рис. 3.21) були визначені часові залежності напруг на струмоприймачах поїздів (рис. 3.23), струмів електровозів в режимах тяги і рекуперації (рис. 3.24), напруги на шинах тягових підстанцій, їх струмів та струмів накопичувача енергії (рис. 3.25).

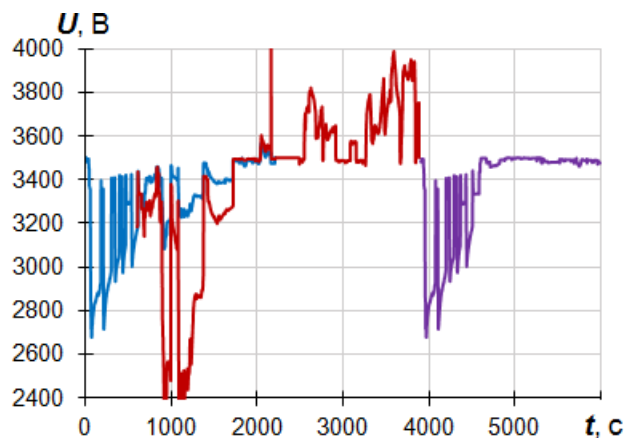
З рис. 3.23, а за вираженими стрибками напруги на струмоприймачі видно моменти зривів рекуперації. При використанні інверторів стрибки відсутні, надлишкова енергія перетікає до зовнішньої мережі (рис. 3.23, б). При використанні лише некерованих накопичувачів також мають місце стрибки напруги і зриви рекуперації (рис. 3.23, в).

З аналізу струмів електровоза в режимі рекуперації при різних структурах ТП 2 випливає, що реалізація енергії рекуперації в повному обсязі (100 %) має місце лише для випадків при наявності на ТП інвертора, або керованого накопичувача (рис. 3.24, б, г, д, е). У випадках рис. 3.24, (а, в) енергія рекуперації реалізується лише частково, в обсязі 2 та 12 % відповідно.

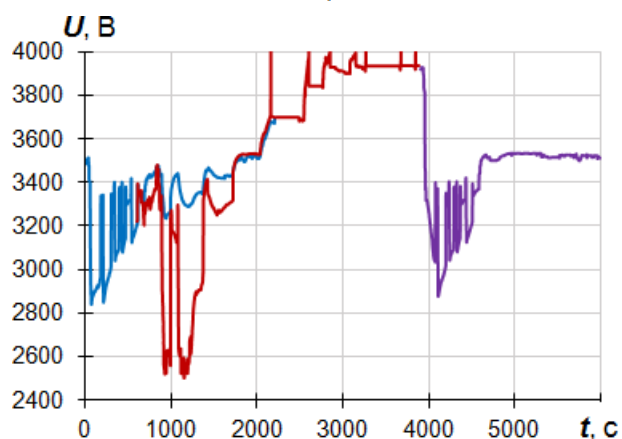
					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75



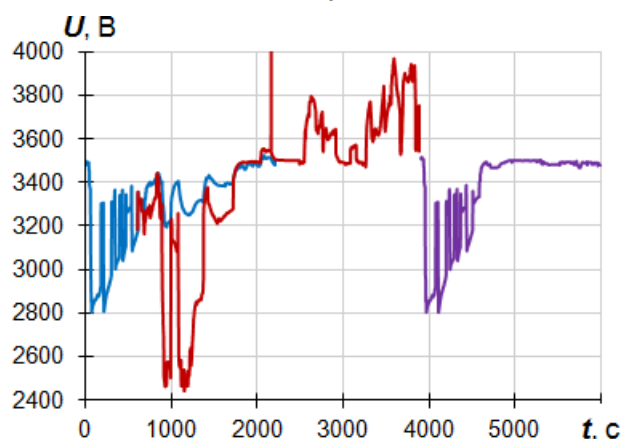
а)



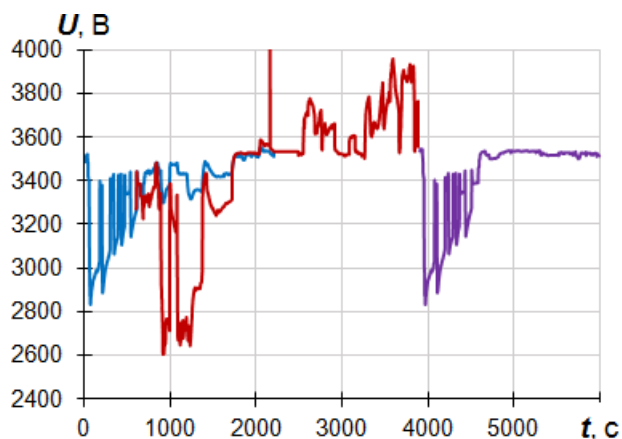
б)



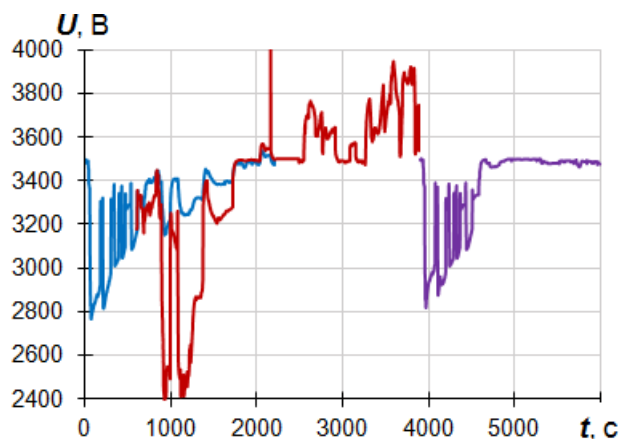
в)



г)



д)

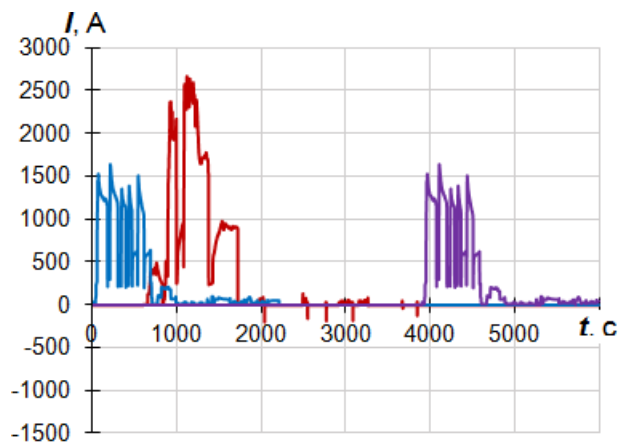


е)

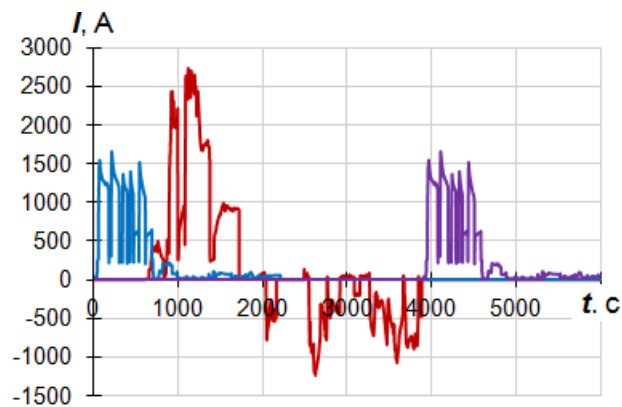
а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.23 – Напруги на струмоприймачах електровозів в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції

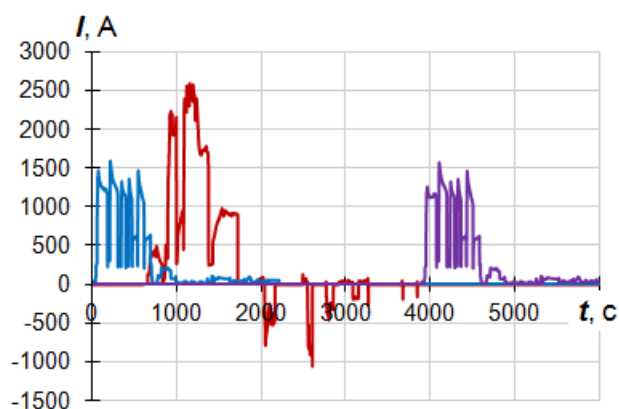
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



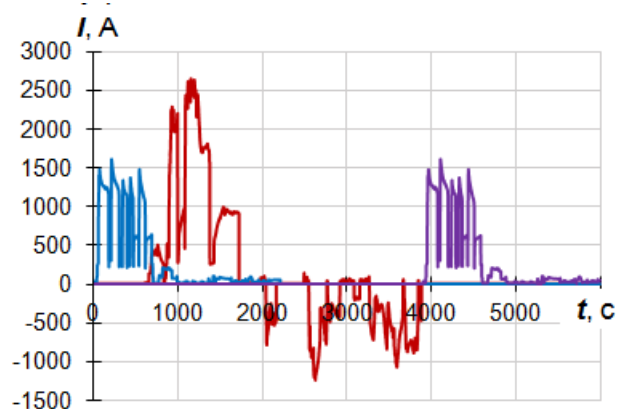
а)



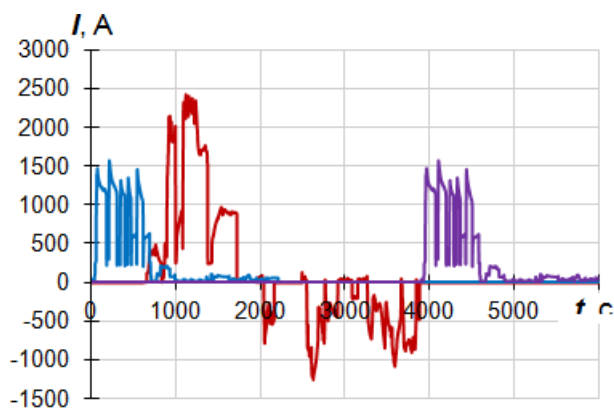
б)



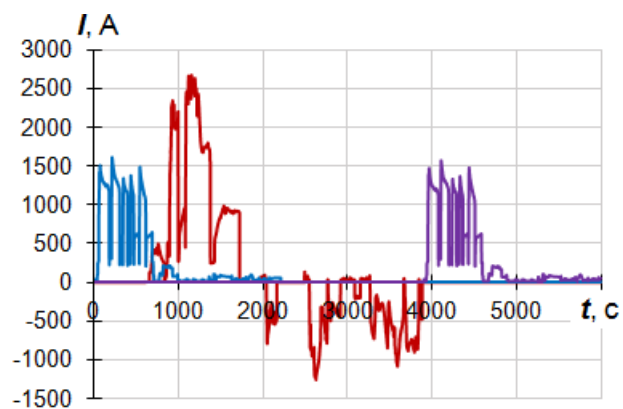
в)



г)



д)

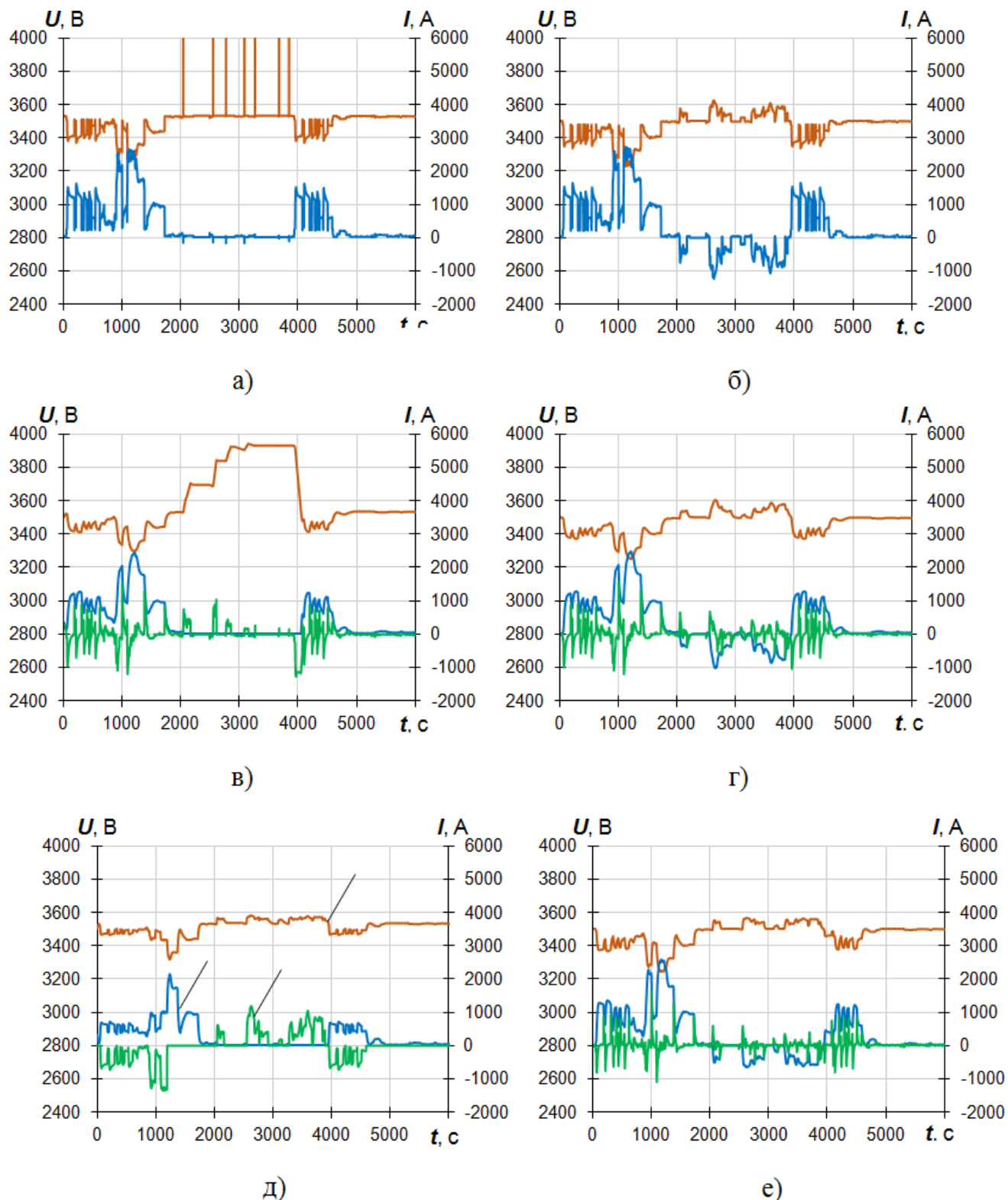


е)

а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.24 – Струми електровозів в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

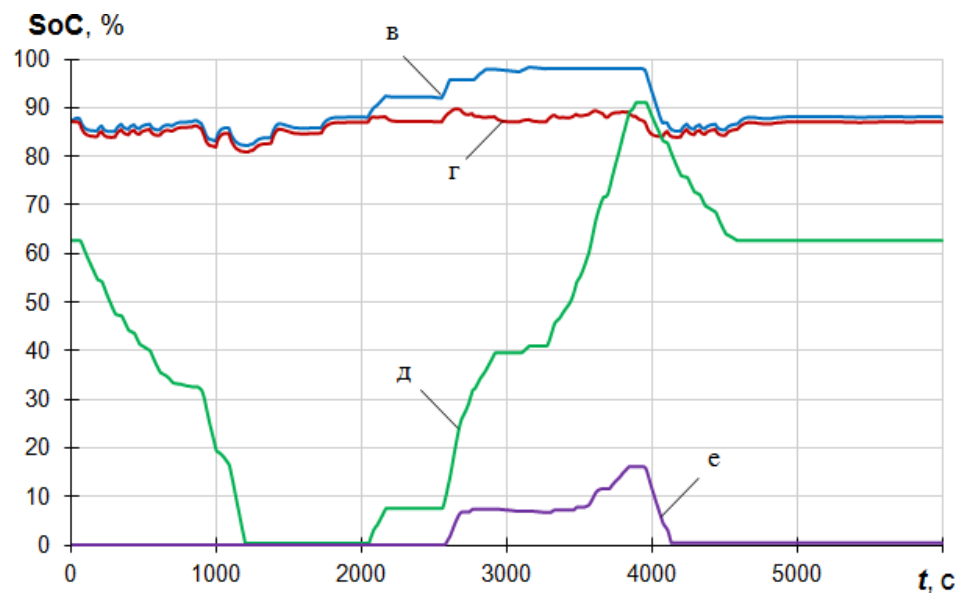


а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.25 – Напруги на шинах тягової підстанції 1, струми підстанції 2, струминакопичувачів в різних режимах роботи 3

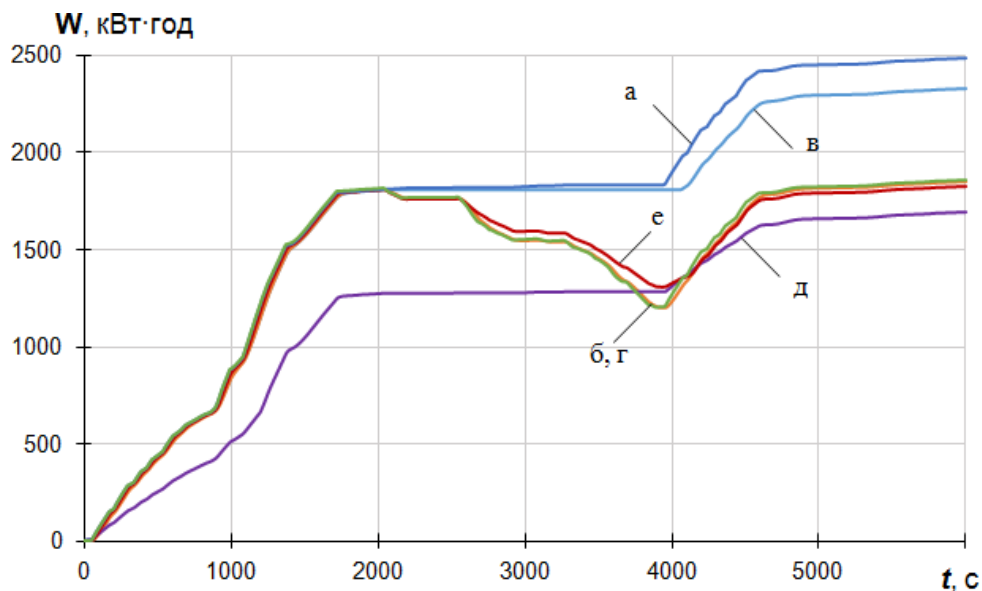
При аналізі графіків рис. 3.25 можна спостерігати, що при наявності накопичувача на ТП зменшується піковість і різкозмінність характеру споживання струму ТП з зовнішньої мережі. Так коефіцієнт форми струму ТП для рис. 3.8, д становить 3,25 у порівнянні з 4,8 для рис. 3.8, е. Найбільш енергоефективною схемою виявляється варіант д.

Рівень заряду накопичувача в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції показано на рис. 3.26, а витрати електроенергії в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції на рис. 3.27.



а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.26 – Рівень заряду накопичувача в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції



а – випрямляч без накопичувача; б – інвертор без накопичувача; в – випрямляч з некерованим накопичувачем; г – інвертор з некерованим накопичувачем; д – випрямляч з керованим накопичувачем; е – інвертор з керованим накопичувачем

Рисунок 3.27 – Витрати електроенергії в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції

Результати визначення витрат електроенергії в різних режимах роботи обладнання тягової підстанції представлені в таблиці 3.3 та на рисунку 3.28. Як видно з даної таблиці найбільша економія електроенергії складає 31,8 % для структурної схеми з випрямлячем з керованим накопичувачем [17].

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку витрат електроенергії

Режим роботи обладнання	Витрата електроенергії, кВт·год	Економія електроенергії, кВт·год	Економія електроенергії, %
а)	2482,5	—	—
б)	1858,1	624,4	25,2
в)	2333,1	149,4	6,0
г)	1849,2	633,3	25,5
д)	1692,0	790,5	31,8
е)	1829,3	653,2	26,3

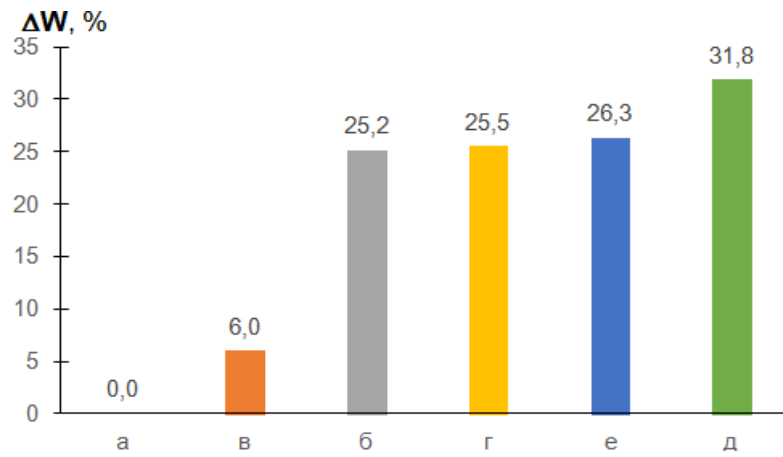


Рисунок 3.28 – Економія витрат електроенергії при різних режимах роботи обладнання

3.3 Висновок розділу.

За результатами моделювання та аналізу струмів електровоза в режимі рекуперації при різних структурах впливає, що реалізація енергії рекуперації в повному обсязі (100 %) має місце лише для випадків при наявності на ТП інвертора, або керованого накопичувача, а найкращими характеристиками, по економії витрат електроенергії при різних режимах роботи обладнання, володіють схеми з випрямлячем та з керованим накопичувачем.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській роботі було проведено дослідження ефективності використання накопичувачів енергії. В ході роботи було розкрито значення застосування накопичувачів енергії в енергетиці. Також при аналізі електричних процесів в процесі передачі, перетворення та споживання енергії різними видами було встановлено, що для аналізу ефективності систем електричної вдаються до поняття «умовних втрат», які можуть і не відповідати фізичній суті протікаючих процесів, а лише орієнтовно визначають втрати електричної енергії.

Створено комп'ютерні моделі тягової мережі метрополітену та імітаційна модель тягової мережі наземного транспорту з різними варіантами накопичувачів, що дає можливість побачити ефект застосування накопичувачів енергії. При застосуванні системи накопичення енергії, було досягнуто зменшення втрат потужності за рахунок зменшення струмових навантажень в тяговій мережі.

За результатами дослідження тягової мережі та наземного транспорту в режимі рекуперації при різних структурах зроблено висновок, що реалізація енергії рекуперації в повному обсязі (100 %) має місце лише для випадків при наявності на ТП інвертора, або керованого накопичувача, а найкращими характеристиками, по економії витрат електроенергії при різних режимах роботи обладнання, володіють схеми з випрямлячем та з керованим накопичувачем

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Механізми ефективного використання та розвитку потенціалу транспортно-дорожнього комплексу України. – К.: Національний інститут стратегічних досліджень, 2014.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання (за роками 2005-2015) [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2006-2016.
3. Транспорт (1980-2015): Державна служба статистики України [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/tz/tz_rik/tz_u/ts_u.htm
4. Енергетичний баланс України (за роками 2007-2014): Державна служба статистики України [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/energ/en_bal/arh_2012.htm
5. Стогній Б. С. Підвищення пропускної здатності «слабких» перетинів енергосистем з використанням технології гнучкої передачі змінним струмом (ГПЗС, FACTS) / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, В. В. Павловський, А. В. Левконюк // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 2.
6. Буткевич О. Ф. Штучний інтелект та гібридні системи у розв'язанні задач електроенергетики: поточний стан та тенденції / О. Ф. Буткевич, В. В. Павловський // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2003. – № 1.
7. Кириленко О. В. Системи підтримки прийняття рішень оперативним персоналом електроенергетичних об'єктів / О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич, Л. М. Лук'яненко, Є. В. Парус // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 3.
- Терешкевич Л. Б. Дослідження впливу компенсувальних установок на додаткові втрати активної потужності від несиметрії режиму / Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, І. О. Бандура // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 4.
8. Босий Д. О. Інтелектуальні системи в керуванні режимами систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць / Д. О. Босий // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4.

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Grid Wise Architectural Council : <http://www.gridwiseac.org>
10. Петрушенко О. Ю. Розв'язання двоїстої задачі оптимального керування нормальними режимами ЕЕС з застосуванням нейро-нечіткого моделювання / О. Ю. Петрушенко, Ю. В. Петрушенко, О. О. Рубаненко // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2.
11. Bosiy D. O. Calculation of the traction power supply systems using the functions of resistance / D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // Problemy kolejnictwa. – 2015. – Vol. 59, Issue 168.
12. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий // Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна / Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс». – Дніпропетровськ, 2015. – ISBN 978-966-97463-8-2.
13. Сиченко В. Г. Дослідження електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму: проблеми, технічні засоби та реалізація / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, Д. О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 2.
14. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму/О.І. Саблін, Д.О. Босий, В.Г. Кузнецов, М.О. Баб'як [та ін.]// Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2016. – № 2. – С. 41-45.
15. Toshiba. Railway power supply systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.toshiba-railway.com.
16. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену [Текст] /О. І. Саблін // Восточно-европейский журнал передових технологий. – 2014. – № 8 (72). – С. 9–13.
17. Bosiy D., Sablin O., Kosariev Ye. Computing and Optimization for DC Power Systems of Electric Transport. London: World Scientific Publishing Europe Ltd, 2020p. DOI:10.1142/q0229

					02.15.EC2121.KPM.2022–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

