Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕТЕМ
_____ /Андрій МУХА/
(підпис)
Дата 30.01.25

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Зменшення втрат електричної енергії у системі живлення нетягових споживачів шляхом підвищення номінальної напруги мережі під час її реконструкції»
за освітньою програмою: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»
зі спеціальності: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Виконав: студент групи «ЕЕ2326» _____ (підпис студента) /Олександр БИРСАН/ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: _____ (підпис) /доц. Олег БОНДАР/ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер: _____ (підпис) /доц. Оксана КАРЗОВА/ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

_____ (назва розділу) _____ (підпис) // _____ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ (назва розділу) _____ (підпис) // _____ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ (назва розділу) _____ (підпис) // _____ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ (назва розділу) _____ (підпис) // _____ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент _____ (підпис)

Дніпро – 2025 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Faculty «Management of energy and economic processes»

Department «Electrical engineering and electromechanics»

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: «Decreasing of electrical energy losses in the power supply system of non-traction loads by increasing the nominal voltage of the network during its reconstruction»
according to educational curriculum «Energy and electromechanical systems in transport»
in the Speciality: «141 Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics»

Done by the student of the group EE2326: /Oleksandr BYRSAN/

Scientific Supervisor: /Oleh BONDAR/

Normative controller: /Oksana KARZOVA/

Supervisors

(Chapter title heading)	/ / (position, name, surname)
(Chapter title heading)	/ / (position, name, surname)
(Chapter title heading)	/ / (position, name, surname)
(Chapter title heading)	/ / (position, name, surname)

Dnipro – 2025

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»
Кафедра: «Електротехніка та електромеханіка»
Рівень вищої освіти: магістр
Освітня програма: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»
Спеціальність: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу магістра
студенту Бирсану Олександру Олександровичу
1. Тема роботи: «Зменшення втрат електричної енергії у системі живлення нетягових споживачів шляхом підвищення номінальної напруги мережі під час її реконструкції»
Керівник роботи: Бондар Олег Ігорович, доцент
затверджені наказом № 246 ст від 01.04.2024
2. Строк подання студентом роботи: 10.01.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: Схема живлення дослідної ділянки мережі живлення нетягових споживачів а також дані про її електричні навантаження, структурна схема центрального розподільчого пункту (ЦРП).

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):
4.1 Аналітична частина: застосування матричного методу для аналізу режимів електричних мереж; особливості структури досліджуваної електричної мережі середньої напруги.

4.2 Основна частина: прогнозування електричних величин в мережі напругою 6 кВ; прогнозування електричних величин напругою 10 кВ; порівняння втрат електроенергії у мережі при напрузі 6 кВ та 10 кВ.

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища: основні правила безпеки під час роботи на кабельних лініях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень структурна схема електропостачання залізничного вузла; однолінійна схема ЦРП; граф і матриця інциденцій для схеми живлення; порівняння втрат електроенергії в лінії напругою 6 та 10 кВ.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Основна частина	**Бондар О.І.**	02.09.24	02.09.24
Охорона праці та захист навколишнього середовища	**Бондар О.І.**	02.09.24	02.09.24

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	*Примітка*
1	Вступ, аналітична частина – 30%	10.11.24	
2	Основна частина – 60%	15.12.24	
3	Охорона праці	15.12.24	
4	Графічні роботи, 100% готовності диплому	10.01.25	
5			
6			
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	13.01.25	
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	20.01.25	

Студент _____ Олександр БИРСАН
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи _____ доц. Олег БОНДАР
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

№ рядка	Формат	Позначення	Назва	Кільк. арк.	№ екз.	Прим
1			Документація загальна			
2			Заново розроблена			
3	А4	7.141.236204.ПЗ	Пояснювальна записка	62		
4						
5			Запозичена			
6						
7			Графічна частина			
8			Заново розроблена			
9	А4	7.141.236204.01	Структурна схема	1		
10			електропостачання			
11			залізничного вузла	1		
12	А4	7.141.236204.02	Однолінійна схема ЦРП			
13	А4	7.141.236204.03	Граф і матриця інциденцій	1		
14			для схеми живлення			
15	А4	7.141.236204.04	Порівняння втрат напругою			
16			електроенергії в лінії	1		
17			6 та 10 кВ			
18						
19						
20						
21			Запозичена			
22						
23			Електронна частина			
24						

Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	7.141.236204.ВР		
Розробив		Бирсан О.О.		10.01.25	Відомість кваліфікаційної роботи	Літ.	Арк. 5 / Аркушів 62
Керівник		Бондар О.І.		10.01.25			
Консульт						МОН України. УДУНТ Кафедра ЕТЕМ, група ЕЕ2326	
Н. контр.		Карзова О.О.		10.01.25			
Зав. каф.		Муха А.М.		10.01.25			

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему «Зменшення втрат електричної енергії у системі живлення нетягових споживачів шляхом підвищення номінальної напруги мережі під час її реконструкції» містить: 62 с., 10 рис., 7 табл., 1 додаток, 22 джерела.

Об'єкт розробки – електрична мережа живлення залізничного вузла середньої напруги.

Мета роботи – прогнозування зменшення втрат електричної енергії у системі електропостачання нетягових споживачів залізничного вузла шляхом підвищення номінальної напруги живлення на основі матричного методу аналізу електричних кіл.

Метод дослідження – прогностичні розрахунки по аналітичних виразах, які мають у своїй основі фундаментальні положення теорії кіл та теорії графів.

В 1 розділі проаналізовано особливості структури та електричних навантажень досліджуваної мережі залізничного вузла. Зазначений аналіз було покладено в основу доцільності застосування матричної моделі на основі рівнянь вузлових потенціалів для здійснення моделювання усталеного режиму роботи дослідної мережі.

У 2 розділі на основі вихідних даних за допомогою матричного методу виконано порівняльні прогностичні електричні розрахунки мережі живлення залізничного вузла при номінальній напрузі 6 та 10 кВ. Зроблені розрахунки дозволили виконати порівняння річних втрат електроенергії при обох варіантах напруги мережі.

В 3 розділі викладено основні правила безпеки які є обов'язковими під час виконання робот на кабельних лініях у відповідності до діючих нормативних документів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА, НЕТЯГОВІ НАВАНТАЖЕННЯ, ГРАФ СХЕМИ, МАТРИЧНИЙ МЕТОД, ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА 11
1.1 Особливості структури та електричних навантажень дослідної мережі живлення залізничного вузла 11
1.2 Застосування матричного методу в задачах аналізу складнозамкнених мереж 16
1.3 Висновки до розділу 1 20
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА 21
2.1 Розрахунок параметрів і величин матричної моделі 21
2.1.1 Визначення активних та реактивних потужностей навантажень 21
2.1.2 Визначення опорів віток схеми 23
2.1.3 Визначення задаючих струмів 25
2.2 Моделювання мережі 6 кВ на основі матричного методу вузлових напруг 26
2.3 Моделювання розподільчої мережі 10 кВ 31
2.4 Порівняння втрат електричної енергії у лініях напругою 6 та 10 кВ 35
2.5 Висновки до розділу 2 41
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 42
3.1 Особливості основного обладнання кабельних ліній 42
3.2 Види робіт, які виконуються на кабельних лініях 44
3.3 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації кабельних ліній 48

					7.141.236204.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Бирсан О.О.		10.01.25	Зменшення втрат електричної енергії у системі живлення нетягових споживачів шляхом підвищення номінальної напруги мережі під час її реконструкції	Літ.	Арк. 7 / Аркушів 62
Перевір.		Бондар О.І.		10.01.25			
Н. контр.		Карзова О.О.		10.01.25		МОН України. УДУНТ Кафедра ЕТЕМ, група ЕЕ2326	
Затв.		Муха А.М.		10.01.25			

3.4 Заходи безпеки під час виконання робіт в електроустановках, які містять у своєму складі кабельні лінії 49
3.5 Висновки до розділу 3 50
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 54
СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ 57
ДОДАТОК А 58

ВСТУП

Цілком очевидно, що енергетична галузь на сьогодні є фундаментом економіки України. Основні напрями розвитку цієї надважливої галузі щодо забезпечення енергетичної безпеки і переходу до енергоефективного та енергоощадного використання енергоресурсів із впровадженням інноваційних технологій, та покращення показників надійності сформульовано в [1]. Ефективним механізмом реалізації зазначених стратегічних завдань є реконструкція електричних мереж із застосуванням нового високоефективного обладнання. Великий обсяг необхідних для здійснення зазначених заходів капіталовкладень обумовлений тим, що на кінець другого десятиріччя XXI ст. розподіл електричної енергії в Україні здійснювався з допомогою близько 800 тис. км повітряних ліній напругою 0,4–220 кВ, 71,9 тис. км кабельних ліній 0,4 – 110 кВ та 208 тис. підстанцій, та розподільних пунктів усіх рівнів первинної напруги [2]. Одночасно станом на 2020 рік близько 50% електричних мереж потребували капітального ремонту, реконструкції або повної заміни через їх велику зношеність та багаторічне недофінансування робіт з оновлення електричних мереж а термін експлуатації майже всього обладнання в енергосистемі України перевищує 30 років [3]. Руйнування внаслідок бойових дій суттєвим чином загострили ситуацію яка на сьогодні склалася внаслідок вичерпання ресурсу наявного обладнання електричних мереж.

Усе вище викладене повною мірою є характерним і для електричних мереж середньої напруги від яких отримують живлення нетягові споживачі залізничного транспорту. Про значущість означеного питання говорять наступні цифри. Загальна довжина повітряних ліній електропостачання нетягових споживачів Укрзалізниці напругою 10 кВ складає 14277 км а кабельних ліній 1931 км. [4]. Передача електроенергії електромережами залізниць стороннім споживачам складає близько 7 800 млн. кВт·год, в тому числі 800 млн·кВт·год споживачам, що отримують живлення безпосередньо

від мереж залізниці. [4]. Згідно з даними НКРЕКП та Міністерства енергетики та захисту довкілля за 2018 р. [5], [6] технологічні втрати електроенергії (ТВЕ) при її передачі у мережах залізниць становлять 408 млн кВт·год або 6,7 % відпуску електроенергії у мережу.

У свою чергу потреба у наданні економічного обґрунтування заходів щодо реконструкції електричних мереж зумовлює необхідність здійснення передбачення впливу означених заходів на основні показники ефективності передачі електроенергії у мережі. На нашу думку найбільш ефективним шляхом реалізації подібного прогнозування є математичне моделювання усталених електромагнітних процесів у реконструйованій мережі яке одночасно містить у своїй основі фундаментальні положення теорії кіл та теорії графів. В роботах [7] та [8] продемонстровано можливості використання аналогічного підходу з метою обґрунтування раціонального обсягу компенсації реактивної потужності в електричних мережах нетягових споживачів залізничного транспорту і визначення доцільних точок приєднання статичних компенсаторів до мереж середньої напруги. При цьому обсяг заходів по модернізації існуючих елементів мережі є мінімальним і відповідно такий підхід не в змозі як вирішити проблеми відновлення ресурсу основного електротехнічного обладнання та радикального скорочення втрат електроенергії під час її розподілу через дану мережу. Отже представляється доцільним розповсюдити апробований підхід і на питання більш глибокої модернізації електричних мереж середньої напруги від яких отримують живлення нетягові споживачі залізничного транспорту, зокрема з метою прогнозування впливу збільшення рівня напруги мережі на величину втрат електроенергії в процесі її розподілу.

Тому метою цієї роботи є прогнозування зменшення втрат електричної енергії у системі електропостачання нетягових споживачів залізничного вузла шляхом підвищення номінальної напруги живлення на основі матричного методу аналізу електричних кіл.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Особливості структури та електричних навантажень дослідної мережі живлення залізничного вузла

Головним завданням мереж електропостачання залізничного вузла є забезпечення безперебійного постачання нетягових споживачів електричною енергією, а також забезпечення нормального функціонування всіх пристроїв і устаткування трансформаторних підстанцій. Тобто основними вимогами, яким має відповідати дана мережа є надійність роботи, забезпечення показників якості електричної енергії у точках приєднання споживачів, економічність, безпека і зручність експлуатації а також наявність можливостей подальшого розвитку структури та інтеграцію нових споживачів.

Існуюча структурна схема електропостачання дослідного залізничного вузла представлена на рис. А1 (додаток А). Район електричних мереж згаданої залізничної станції отримує живлення від тягової підстанції «С» системи тяги постійного струму та основне живлення від "Доненерго" (ТП-4) напругою 6 кВ. Схема електропостачання 6 кВ містить тринадцять трансформаторних підстанцій та шістнадцять з'єднуючих кабельних ліній. Навантаження, що підключені до цих підстанцій, включають нетягових споживачів, такі як дистанція зв'язку (ШЧ), дистанція колії (ПЧ), обчислювальні машини (ЕОМ), освітлення, електропостачання майстерень та побутових приміщень; приватні підприємства.

Трансформаторні підстанції (ТП) отримують живлення від центрального розподільчого пункту ЦРП (Рис. А2, додаток А). ЦРП має дві секції шин 6 кВ, які секціоновані секційним масляним вимикачем ВМГ-10. ВМГ-10 нормально вимкнений.

Перша секція шин ЦРП 6 кВ живиться від вводу № 1 підстанції ТП-4 (Доненерго) − основне живлення по кабельній лінії. Друга секція шин

живиться від вводу № 2 (знаходиться у роботі) і вводу № 3 (резерв) тягової підстанції «С». Перша секція шин 6 кВ живить трансформаторну підстанцію ТП-83 (резервно) − на ЦРП масляний вимикач ВМГ-10 вимкнений. Має ячейку приєднання силового трансформатору №1 потужністю 630 кВА, трансформатор напруги НТМИ-6. Друга секція шин 6 кВ живить ТП-26 і ТП-31 (резервно), ТП-277 і ТП-28. ТП-32 живиться кабелем АСБ-3×95 довжиною 280 м. На другій секції шин також приєднаний силовий трансформатор № 2 потужністю 630 кВА, трансформатор напруги НТМИ-6.

Секції шин 0,4 кВ секціоновані секційним рубильником, який при роботі обох силових трансформаторів вимкнений. Від першої секції шин 0,4 кВ живиться приєднання ТП-26. Головними споживачами є резерв посту електричної централізації (ЕЦ), трансформатор СЦБ ТП-30, комірки гарантованого живлення. Для компенсації реактивної потужності встановлені дві ячейки статичних конденсаторів загальною потужністю кожної комірки 225 квар. Ці комірки встановлені на обох секціях шин 0,4 кВ.

Комірка гарантованого живлення живиться нормально від другої секції шин 0,4 кВ ЦРП та резервно живиться від трансформатора СЦБ ТП-30. Комірка гарантованого живлення має два рубильника, нормально ввімкнених і два контактори КТ-160 А. КТ від II секції шин нормально ввімкнений, КТ від трансформатора СЦБ ТП-30 нормально вимкнений. У випадку зникнення основного живлення від ЦРП, контакти змінюють своє положення і комірка гарантованого живлення працює від трансформаторної підстанції ТП-30.

ТП-28 живиться від ТП-277 кабелем марки АСБ-3×70 довжиною 700 м. До шин 6 кВ підключено два силових трансформатори 2-ТМ-400 кВА, один з яких працює в режимі неробочого ходу. До секції шин 0,4 кВ підключена комірка статичних конденсаторів загальною потужністю 78 квар.

ТП-28А має одну секцію шин 6 кВ і 0,4 кВ. До секції шин 6 кВ підключено один силовий трансформатор ТМ-400 кВА. Від РУ-6 кВ цієї ТП йде живлення кабельною лінією АСБ-3×70 довжиною 660 м на

трансформаторну підстанцію ТП-83.

ТП-277 має дві секції шин 6 кВ, секціонованих двома секційними роз'єднувачами. ТП-277 нормально живиться від ЦРП кабелем АСБ-3×70 довжиною 2886 м, до шин 6 кВ підключені два трансформатори ТМ-180 і ТМ-250 кВА. Від ТП-277 живиться ТП-77 (район електричних мереж, РЕМ) ,ТП-131 (РЕМ) і друга секція шин ТП-28.

Трансформаторна підстанція ТП-34 має дві секції шин 6 кВ ,до яких підключені два силових трансформатори ТМ-100 (резерв) і ТМ-160 кВА в роботі. ТП-34 живиться від ТП-33 кабелем марки АСБ-3×95 довжиною 804 м.

ТП-284 має дві секції шин 6 кВ секціоновані двома секційними роз'єднувачами нормально ввімкненими. ТП-284 живиться від ТП-83 кабелем АСБ-3×70 довжиною лінії 120 м. До I секції шин підключений ТМ-160 кВА, який знаходиться в роботі, до II секції шин підключений резервний ТМ-250 кВА.

ТП-43 живиться від ТП-32 кабелем марки ААБ-3×120 довжиною 304 м. До шин 6 кВ підключено два силових трансформатори ТМ-400 кВА і ТМ-250 кВА, один з яких працює в режимі неробочого ходу.

ТП-83 живиться від тягової підстанції «С» двома кабельними лініями, які приходять на I секцію шин (АСБ-3×185 довжиною 1506 м і АСБ-3×95 довжиною 35 м). II секція шин живиться резервно від ТП-35 кабелем АСБ-3×150 довжиною 280 м. До РУ-6 кВ підключено два силових трансформатори 2-ТМ-400 кВА.

Трансформаторна підстанція ТП-35 (рис.1.1) має одну секцію шин 6 кВ. ТП-35 живиться від ТП-83 і живить ТП-31 кабелем АСБ-3×150 довжиною 512 м. До секції шин 6 кВ підключені ТМ-160 (в резерві) і ТМ-250, який постійно знаходиться в роботі.РУ-0,4 кВ також має одну секцію шин. Комірка гарантованого живлення нормально живиться від приєднання «Вокзал» (ТП-35) і резервно від приєднання «Ресторан» (ЦРП). Комірка має два рубильника нормально ввімкнених і два контактори – КТ-1 нормально

вимкнений, КТ-2 ввімкнений. Комірка гарантованого живлення живить вокзал станції «С».

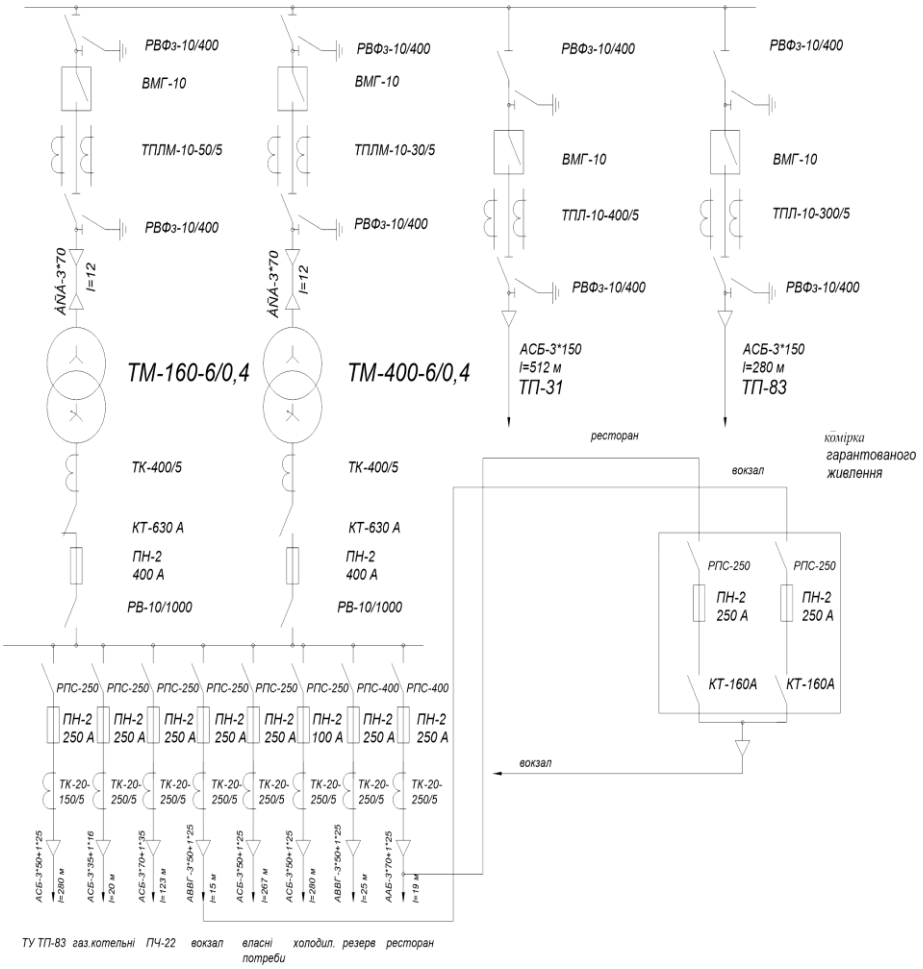

Рисунок 1.1 – Однолінійна схема трансформаторної підстанції ТП-35

ТП-31 має дві секції шин 6 кВ, секціонованих секційним рубильником, нормально вимкненим. ТП-31 резервно живиться від ЦРП кабелем АСБ-3×95 довжиною 694 м (I секція шин) і нормально живиться від ТП-35 I секція шин (АСБ-3×150, 512м), а II секція шин живиться від тягової підстанції «С» кабелем АСБ-3×125 довжиною лінії 25м.До I секції шин 6 кВ підключені два трансформатори ТМ-1000 і ТМ-630 кВА. До II секції шин 6 кВ підключений ТМ-630 кВА. Від ТП-31 живиться ТП-33 кабелем АСБ-3×95, 210 м.

ТП-33 має одну секцію шин 6 кВ, два силових трансформатори ТМ-180 (знаходиться в резерві під охоронною напругою), ТМ-400 кВА в роботі.

Основні споживачі ТП-33 − це котельна і технікум.

ТП-25 має дві секції шин 6 кВ, підключені ТМ-630 і ТМ-400 кВА, обидва силові трансформатори знаходяться в роботі. ТП-25 отримує живлення з ТП-26 кабельною лінією АСБ-3×95 довжиною 410 м.

ТП-26 має одну секцію шин 6 кВ, два силових трансформатори ТМ-400 (знаходиться в резерві), і ТМ-630 кВА в роботі. Має два вводи від ЦРП двома паралельними кабельними лініями – АСБ-3×70 (185 м) і ААШВ-3×185 (53 м). Живить ТП-25. Головний споживач ТП-26 − це вагонне депо.

ТП-32 має одну секцію шин 6 кВ. До секції підключені два силових трансформатори ТМ-160 і ТМ-100 кВА. ТП-32 отримує живлення від ЦРП кабелем АСБ-3×95 довжиною 280 м. Від трансформаторної підстанції ТП-32 отримує живлення ТП-43 кабельною лінією ААБ-3×120, 304 м.

Вихідними даними для аналітичних досліджень виконаних у роботі є перед усім потужності кожної з трансформаторних підстанцій, які представлено на схемі рис. А1, додаток А. У розрахунках фігурує також усереднений коефіцієнт завантаження кожної із них, приймаємо його рівним $\beta = 0{,}8$.

Розрахуємо повну потужність кожної трансформаторної підстанції за наступною формулою:

$$S = S_{\text{ном}} \cdot \beta \qquad (1.1)$$

Дані про встановлені потужності трансформаторів підстанцій та результати розрахунків повних потужностей їх навантажень згідно з виразом (1.1) наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Повні потужності підстанцій досліджуваної мережі

№ вузла	Об'єкт	Номінальна потужність трансформаторів $S_{ном}$, кВА	Потужність із урахуванням коефіцієнта завантаження S, кВА
1	ТП-31	$2 \times 630 + 1000 = 2260$	1808
2	ТП-33	$180 + 400 = 580$	464
3	ТП-34	$100 + 250 = 350$	280
4	ТП-32	$100 + 160 = 260$	208
5	ТП-43	$400 + 240 = 640$	512
6	ТП-26	$630 + 400 = 1030$	824
7	ТП-25	$630 + 400 = 1030$	824
8	ТП-28	$2 \times 400 = 800$	640
9	ТП-277	$180 + 250 = 430$	344
10	ТП-83	$2 \times 400 = 800$	640
11	ТП-284	$160 + 250 = 410$	328
12	ТП-28А	400	320
13	ТП-35	$160 + 400 = 560$	448

1.2 Застосування матричного методу в задачах аналізу складнозамкнених мереж

Як було продемонстровано у п. 1.1 розглядувана електрична мережа представляє собою складнозамкнену систему. Розрахунок такої системи на основі рівнянь електромагнітного стану кола дуже громіздкий, тому що вона має велику кількість вузлів і замкнених контурів. Для розрахунку таких мереж застосовуються спеціальні методи еквівалентування схем заміщення електричних мереж. В цьому випадку зручно використовувати матричні методи розрахунків [9], [10]. Вони засновані на використанні алгебри матриць і елементів теорії графів.

Зокрема використовується аналітичне представлення схеми або направлений граф електричної мережі. Аналітичне представлення схеми

виконується за допомогою матриць інциденцій. При такому представленні схеми мережі забезпечується компактний і наочний узагальнений запис основних співвідношень між параметрами схеми, що дуже зручно при виконанні необхідних перетворень і складання алгоритму розв'язування. Графом називають сукупність вузлів та віток, що їх з'єднують. Кожний граф характеризується своєю інформацією про те, якими вітками з'єднані один з одним окремі вузли графа та яка провідність кожної вітки.

Нагадаємо, що під віткою розуміють ділянку кола з послідовним з'єднанням активних і пасивних елементів, по якій протікає один і той самий струм.

У свою чергу вузлом в теорії електричних кіл називається точка схеми, до якої приєднано три або більше віток. Однак при розрахунках режимів роботи електричних мереж у ряді випадків у поняття «вузол» включають також точки мережі, в яких з'єднується і менша кількість віток: точка з'єднання двох віток або точка прикладення задаючого струму (якщо в цих точках потрібна, наприклад, фіксація напруги). Вузли бувають незалежні та залежні (вузол балансу).

Контур – будь-який замкнений шлях уздовж віток кола, що починається та закінчується у одній точці. Розрізняють незалежні (контури, що містять хоча б одну нову вітку у порівнянні з іншими контурами) та залежні контури.

Для коректного виконання розрахунків дуже важливим є узгодження позитивних напрямків для всіх використовуваних величин у розрахунку. Оскільки ці напрямки потрібні для визначення не тільки струмів у вітках, але й ЕРС та напруг, то необхідно їх відносити безпосередньо до кожної вітки схеми. Позитивні напрямки являються умовними та приймаються довільно.

Уся схема, що містить будь-яку кількість віток із вибраними напрямками, називається направленим (орієнтованим) графом. Напрямок кожної вітки вказується стрілкою від її початкової вершини (вузла) до

кінцевої. При цьому вузли називаються вершинами графа, а вітки – його ребрами.

Рівняння Кірхгофа для будь-якого вузла *i* схеми (перше рівняння стану) має вигляд:

$$\sum_{j=1}^{в} m_{ij} \underline{I}_j = \underline{J}_i, \qquad (1.2)$$

де $\underline{I}_j$ – комплексна величина струму у вітці *j*;

$\underline{J}_i$ – комплексне значення задаючого струму у вузлі *i*;

m_{ij} – коефіцієнт, що може приймати лише одне із трьох значень:

$m_{ij} = +1$, якщо струм $\underline{I}_j$ по вітці *j* направлений від вузла *i*;

$m_{ij} = -1$, якщо струм $\underline{I}_j$ по вітці *j* направлений до вузла *i*;

$m_{ij} = 0$, якщо вітка *j* не з'єднана з вузлом *i*.

Для схеми з обраними позитивними напрямками віток можна скласти матрицю $[M]$. Кожний рядок цієї матриці *i* відповідає конкретному незалежному вузлу схеми, що має той же номер *i*. Кожний стовпець *j* цієї матриці відповідає вітці з тим же номером *j*. На перетині рядка *i* та стовпця *j* цієї матриці ставиться:

+1, якщо вітка *j* направлена від вузла *i*;

– 1, якщо вітка *j* направлена до вузла *i*;

0, якщо вітка *j* не з'єднана з вузлом *i* безпосередньо.

У кожному рядку матриці $[M]$ має бути не менше однієї додатної або від'ємної одиниці, оскільки її відсутність означатиме, що даний вузол не з'єднаний з іншою частиною схеми. Кількість додатних одиниць у рядку вказує на кількість віток, що виходять із вузла (з'єднані з ним своєю початковою вершиною). Кількість від'ємних одиниць у рядку вказує на кількість віток, що входять у вузол (з'єднані з ним своєю кінцевою вершиною).

У кожному стовпці матриці $[M]$ може бути лише одна додатна та одна від'ємна одиниці. Ці одиниці вказують на початкову та кінцеву вершини даної вітки. Якщо у стовпці є лише одна одиниця, значить що другою вершиною вітка з'єднана з базисним вузлом. Таким чином перевіряється правильність складеної матриці.

Матриця $[M]$ – прямокутна. Вона має стільки рядків, скільки коло має незалежних вузлів, та стільки стовпців, скільки у колі віток. Ця матриця необхідна для складання першого рівняння стану кола.

На нашу думку серед усіх методів аналізу лінійних електричних кіл в усталеному режимі для досягнення поставленої у роботі мети найбільш раціональним є використання рівняння вузлових напруг у матричній формі. Зазначене рівняння має наступний вигляд:

$$[\underline{Y}_{\text{у}}][\underline{U}_{\Delta}]=[\underline{J}], \tag{1.3}$$

де $[\underline{Y}_{\text{у}}]$ – квадратна матриця комплексних вузлових провідностей;

$[\underline{U}_{\Delta}]$– матриця комплексних спадів напруги від кожного з вузлів до базисного.

Задача знаходження напруг при заданих струмах у вузлах мережі має єдиний розв'язок тоді, коли в одному із вузлів напруга задана. В якості такого вузла приймається балансуючий (точка загального приєднання мережі до джерела живлення). Комплексна напруга в ньому позначається $\underline{U}_0$. Комплексні напруги $\underline{U}$ решти вузлів доцільно визначати відносно базисної величини $\underline{U}_0$ як комплексний спад напруги від кожного з незалежних вузлів схеми до базисного

$$[\underline{U}_{\Delta}]=[\underline{U}]-\underline{U}_0[1], \tag{1.4}$$

де $[1]$ – одинична матриця.

Для вирішення поставленої задачі необхідно визначити вектор $[\underline{U}_{\Delta}]$ через вектор задаючих струмів $[\underline{J}]$. Ці струми зв'язані зі струмами у вітках

$[\underline{I}]$ першим законом Кірхгофа , а вектор $[\underline{I}]$ згідно закону Ома визначає спади напруги у вітках.

Знайдемо вектор комплексних спадів напруги на кожній вітці $[\underline{U}_{\text{в}}]$:

$$[\underline{U}_{\text{в}}]=[M]_{\text{T}}[\underline{U}_{\Delta}]. \tag{1.5}$$

Для того, щоб зв'язати шуканий вектор $[\underline{U}_{\Delta}]$ зі струмами у вітках, у рівняння треба підставити вираз для $[\underline{U}_{\text{в}}]$,

$$[\underline{Z}_{\text{вд}}][\underline{I}]=[M]_{\text{T}}[\underline{U}_{\Delta}]. \tag{1.6}$$

Із формули (1.6) струми у вітках $[\underline{I}]$ дорівнюють

$$[\underline{I}]=[\underline{Z}_{\text{вд}}]^{-1}[M]_{\text{T}}[\underline{U}_{\Delta}], \tag{1.7}$$

далі отримаємо шукану залежність між задаючими струмами $[\underline{J}]$ та шуканими комплексними спадами напруг $[\underline{U}_{\Delta}]$

$$[\underline{J}]=[M][\underline{Z}_{\text{вд}}]^{-1}[M]_{\text{T}}[\underline{U}_{\Delta}]. \tag{1.8}$$

Якщо обернену матрицю опорів замінити матрицею комплексних провідностей віток $[\underline{Y}_{\text{вд}}]=[\underline{Z}_{\text{вд}}]^{-1}$, то вираз (1.8) спроститься до наступного:

$$[\underline{Y}_{\text{у}}]=[M][\underline{Z}_{\text{вд}}]^{-1}[M]_{\text{T}}=[M][\underline{Y}_{\text{вд}}][M]_{\text{T}}. \tag{1.9}$$

Квадратна матриця $[\underline{Y}_{\text{у}}]$ порядку n-1 називається матрицею вузлових провідностей. Таким чином, кінцева форма запису (1.8) вузлових рівнянь має вигляд:

$$[\underline{Y}_{\text{у}}][\underline{U}_{\Delta}]=[\underline{J}]. \tag{1.10}$$

Важливою особливістю матриці $[\underline{Y}_{\text{у}}]$ є її мала наповненість – більшість недіагональних елементів дорівнюють нулю, оскільки кожен з вузлів зв'язаний вітками лише з кількома найближчими. Ця властивість відіграє вирішальну роль у спрощенні обчислювальної процедури при

розв’язанні системи рівнянь (1.4).

1.3 Висновки до розділу 1

1. Аналіз структурної схеми електропостачання дослідного залізничного вузла показує, що зазначена мережа за своєю структурою представляє собою складнозамкнену систему, яка має у своєму складі 13 трансформаторних підстанцій з діапазоном потужностей навантажень від 208 кВА до 1808 кВА та 16 з’єднуючих кабельних ліній виконаних трифазними кабелями з алюмінієвими жилами перерізом від 70 до 185 мм^2.

2. Враховуючи вказані вище особливості мережі живлення нетягових навантажень, на нашу думку, для здійснення прогностичних порівняльних розрахунків щодо можливостей зниження втрат електроенергії у мережі за рахунок збільшення її номінальної напруги з 6 до 10 кВ доцільно використати математичну модель на основі рівняння вузлових напруг представлену у матричній формі. Такий підхід наряду з компактною і лаконічною формою моделі має забезпечити значне зменшення обсягу розрахункової роботи у порівнянні із застосуванням класичних рівнянь електромагнітного стану кола в усталеному режимі. Також він цілком придатний для автоматизації здійснення розрахунків за допомогою відповідного програмного забезпечення такого, наприклад, як система комп’ютерної математики Mathcad.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок параметрів і величин матричної моделі

2.1.1 Визначення активних та реактивних потужностей навантажень

Оскільки у табл. 1.1 вказані лише повні потужності трансформаторних підстанцій, то для подальшого моделювання необхідно визначити активні та реактивні її складові через коефіцієнти потужності $\cos\varphi$ споживачів підстанцій.

Активна потужність визначається наступним чином:

$$P = S \cdot \cos\varphi, \tag{2.1}$$

де S – повна потужність із врахуванням коефіцієнта завантаження, кВА.

Реактивна потужність визначається наступним чином:

$$Q = S \cdot \sin\varphi, \quad \text{або } Q = P \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad \text{або } Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{2.2}$$

Результати розрахунків по виразах (2.1) та (2.2) наведено у табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Активні та реактивні потужності навантажень дослідної схеми

№ вузла	Потужність S, кВА	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$	Активна потужність, кВт	Реактивна потужність, квар
1	1808	0,63	1140	1400
2	464	0,75	348	306,9
3	280	0,81	226,8	164,2
4	208	0,87	180,96	102,55
5	512	0,76	389,12	332,76
6	824	0,80	659,2	494,4
7	824	0,82	675,68	471,63
8	640	0,84	537,6	347,26
9	344	0,79	271,76	210,91
10	640	0,81	518,4	375,32
11	328	0,84	275,52	177,97
12	320	0,78	249,6	200,25
13	448	0,75	336	296,32

2.1.2 Визначення опорів віток схеми

Електрична схема заміщення кола характеризується параметрами, які залежать від властивостей обладнання, яке до нього входить, і зокрема від опорів лінії.

Знаючи типи кабельних ліній, що з'єднують підстанції, та їхні довжини, визначимо опори кожної вітки, користуючись довідковими даними.

Розрахунок ведеться за наступними формулами [10]:

для активного опору

$$R = r_0 \cdot l\,, \tag{2.3}$$

де r_0 – питомий активний опір лінії, Ом/км;

l – довжина лінії, км;

для індуктивного опору

$$X = x_0 \cdot l\,, \tag{2.4}$$

де x_0 – питомий індуктивний опір лінії, Ом/км.

Повний комплексний опір кожної вітки розраховується як

$$\underline{Z} = R + jX\,. \tag{2.5}$$

Для напруги мережі $U = 6$ кВ розраховані дані представлені у табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Опори кабельних ліній напругою 6 кВ

№ вітки	№ вузлів, які з'єднує вітка	Тип лінії	Питомий опір, Ом/км		Довжина ЛЕП l, км	Повний комплексний опір лінії $\underline{Z}$, Ом
			r_0	x_0		
1	2	3	4	5	6	7
1	0-1	АСБ 3×95	0,326	0,078	0,694	0,226+j0,054
2	1-2	АСБ 3×95	0,326	0,078	0,210	0,068+j0,016
3	2-3	АСБ 3×95	0,326	0,078	0,804	0,262+j0,062
4	0-4	АСБ 3×95	0,326	0,078	0,280	0,091+j0,022
5	4-5	ААБ 3×120	0,258	0,076	0,304	0,078+j0,023

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7
6	2-5	АСБ 3×95	0,326	0,078	0,168	0,055+*j*0,013
7	0-6	АСБ 3×70	0,443	0,080	0,185	0,082+*j* 0,015
		ААШВ 3×185	0,167	0,073	0,053	0,008+*j* 0,004
8	6-7	АСБ 3×95	0,326	0,078	0,410	0,134+*j*0,032
9	6-8	АСБ 3×70	0,443	0,080	2,486	1,076+*j*0,199
10	0-9	ААБ 3×70	0,443	0,080	2,886	1,278+*j*0,231
11	8-9	АСБ 3×70	0,443	0,080	0,700	0,310+*j*0,056
12	0-10	АСБ 3×150	0,206	0,074	0,402	0,083+*j*0,029
13	10-11	АСБ 3×70	0,443	0,080	0,120	0,053+*j*0,009
14	10-12	АСБ 3×70	0,443	0,080	0,660	0,292+*j*0,053
15	10-13	АСБ 3×150	0,206	0,074	0,280	0,058+*j*0,021
16	1-13	АСБ 3×150	0,206	0,074	0,512	0,105+*j*0,004

Комплексний опір вітки № 7 складається із двох паралельно приєднаних кабелів та розраховується наступним чином:

$$\underline{Z}_7 = \frac{\underline{Z}'_7 \cdot \underline{Z}''_7}{\underline{Z}'_7 + \underline{Z}''_7}, \qquad (2.6)$$

де $\underline{Z}'_7$ – повний комплексний опір першого кабелю, Ом;

$\underline{Z}''_7$ – повний комплексний опір другого кабелю, Ом.

$$\underline{Z}_7 = \frac{(0,082 + j0,015)\cdot(0,008 + j0,004)}{(0,082 + j0,015)+(0,008 + j0,004)} = 0.0073 + j0.0034 \text{ Ом.}$$

Для мережі напругою 10 кВ дані для розрахунку опорів візьмемо з таблиці 2.2. Тобто розрахунок мережі 10 кВ будемо робити виходячи з незмінності марки і довжини кабельних ліній.

2.1.3 Визначення задаючих струмів

Оскільки вихідними даними даної схеми є потужності трансформаторних підстанцій, необхідно визначити комплексні струми навантажень кожного вузла схеми. За базовий (вектор з нульовою початковою фазою) приймаємо вектор напруги мережі $\underline{U}$.

Комплексна потужність у симетричному трифазному колі визначається за формулою:

$$\underline{S} = \sqrt{3} \cdot \underline{U} \cdot \underline{I}'', \tag{2.7}$$

де $\underline{I}''$ – комплексно-спряжене значення струму навантаження.

З формули (2.7) струм навантаження визначається як

$$\underline{I}'' = \frac{\underline{S}}{\sqrt{3}\underline{U}}. \tag{2.8}$$

Якщо відомі комплексні струми навантаження вузлів, то отримати значення задаючих струмів можна наступним чином:

$$\underline{J} = -\underline{I}. \tag{2.9}$$

Розраховані значення задаючих струмів для величин номінальної напруги мережі $U = 6$ кВ та $U = 10$ кВ наведені у таблиці 2.3.

На підставі виконаного аналізу дослідної схеми мереж залізничного вузла «С», визначившись зі всіма необхідними вихідними даними, можна здійснити моделювання роботи цієї схеми як при існуючій напрузі 6 кВ, так і при підвищеній в процесі модернізації напруги до 10 кВ.

Як вже було зазначено у розділі 1 складнозамкнена структура дослідної схеми зумовлює доцільність рішення про розрахунок мережі матричним методом на основі застосування елементів теорії графів та рівняння вузлових напруг у матричній формі у відповідності зі співвідношеннями п.1.2.

Таблиця 2.3 – Комплексні задаючі струми вузлів досліджуваної схеми

№ вузла	Повна потужність $\underline{S}$, кВА	$\underline{J}$ при $U = 6$ кВ, А	$\underline{J}$ при $U = 10$ кВ, А
1	1140+*j*1400	-109,6+*j*135,1	-65,8+*j*81,1
2	348+*j*306,91	-33,5+*j*29,5	-20,1+*j*17,7
3	226,8+*j*164,2	-21,8+*j*15,8	-13,1+*j*9,5
4	180,96+*j*102,55	-17,4+*j*9,9	-10,4+*j*5,9
5	389,12+*j*332,76	-37,4+*j*32	-22,5+*j*19,2
6	659,2+*j*494,4	-63,4+*j*47,6	-38,1+*j*28,5
7	675,68+*j*471,63	-65+*j*45,4	-39+*j*27,2
8	537,6+*j*347,26	-51,7+*j*33,4	-31+*j*20
9	271,76+*j*210,91	-26,2+*j*20,3	-15,7+*j*12,2
10	518,4+*j*375,32	-49,9+*j*36,1	-29,9+*j*21,7
11	275,52+*j*177,97	-26,5+*j*17,1	-15,9+*j*10,3
12	249,6+*j*200,25	-24+*j*19,3	-14,4+*j*11,6
13	336+*j*296,32	-32,3+*j*28,5	-19,4+*j*17,1

2.2 Моделювання мережі 6 кВ на основі матричного методу вузлових напруг

З метою реалізації процесу моделювання усталеного режиму роботи досліджуваного кола на основі зазначених вище принципів тобто із застосуванням матриць по методу вузлових напруг, нами запропоновано здійснити таке моделювання у відповідності із алгоритмом або структурною схемою представленою на рис. 2.1.

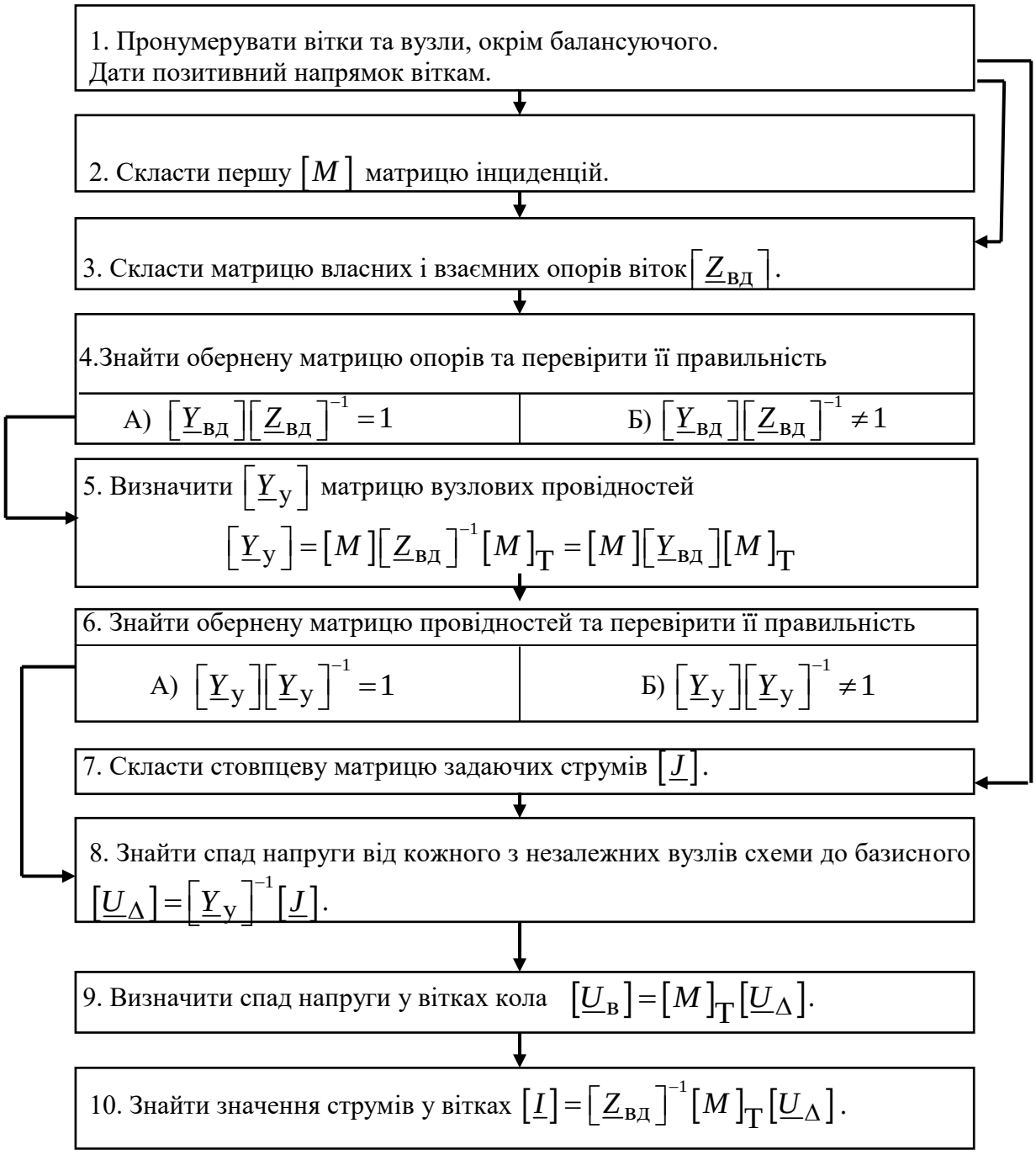

Рисунок 2.1 − Структурна схема прогнозування струморозподілу у складно-замкнутій мережі матричним методом рівнянь вузлових напруг на ЕОМ

Усі приведені нижче розрахунки виконано у середовищі Mathcad. Граф розрахункової схеми показано на рис. А.4, додаток А. При його побудові заздалегідь було зафіксовано всі характерні елементи мережі − вітки, незалежні вузли, незалежні замкнуті контури. Усі вітки і вузли графа довільно пронумеровано, окрім балансуючого вузла. За балансуючий вузол

обрано найбільш потужне джерело живлення, вузол балансу поєднується з базисним вузлом, в якому відома напруга. Віткам графа надано позитивний напрямок.

Далі складається перша матриця інциденцій для розглядуваного графа, її наведено на рис. А.3, додаток А.

На наступному кроці слід скласти матрицю комплексних опорів віток $\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}}\right]$, потрібні для цього дані наведені в табл.2.2: Відповідно маємо наступні значення її елементів

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}1,1}\right] = 0{,}226+\text{j}0{,}054$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}2,2}\right] = 0{,}068+\text{j}0{,}016$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}3,4}\right] = 0{,}262+\text{j}0{,}062$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}4,4}\right] = 0{,}091+\text{j}0{,}022$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}5,5}\right] = 0{,}078+\text{j}0{,}023$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}6,6}\right] = 0{,}055+\text{j}0{,}013$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}7,7}\right] = 0.0073 + j0.0034$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}8,8}\right] = 0{,}134+\text{j}0{,}032$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}9,9}\right] = 1{,}076+\text{j}0{,}199$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}10,10}\right] = 1{,}278+\text{j}0{,}231$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}11,11}\right] = 0{,}310+\text{j}0{,}056$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}12,12}\right] = 0{,}083+\text{j}0{,}029$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}13,13}\right] = 0{,}053+\text{j}0{,}009$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}14,14}\right] = 0{,}292+\text{j}0{,}053$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}15,15}\right] = 0{,}058+\text{j}0{,}021$ Ом

$\left[\underline{Z}_{6\text{кВ}16,16}\right] = 0{,}105+\text{j}0{,}004$ Ом

Обернена матриця опорів віток описується наступним співвідношенням:

$$\left[\underline{Y}\right]_{6\text{kV}} = \left[\underline{Z}\right]_{6\text{kV}}^{-1}, \tag{2.10}$$

де $\left[\underline{Y}\right]_{6\text{kV}}$ – матриця комплексних провідностей віток.

Перевірка правильності складених матриць проводилася за співвідношенням:

$$\left|\left[\underline{Y}\right]_{6\text{kV}} \cdot \left[\underline{Z}\right]_{6\text{kV}}\right| = 1. \tag{2.11}$$

Вираз за яким складено матрицю вузлових провідностей наступний

$$[\underline{Y}]_{y6kV} = [\underline{M}] \cdot [\underline{Y}]_{6kV} \cdot [\underline{M}]^{T}, \quad (2.12)$$

де $[\underline{M}]$ – перша матриця інциденцій;

$[\underline{Y}]_{6kV}$ – матриця комплексних провідностей віток;

$[\underline{M}]^{T}$ – транспонована матриця інциденцій.

Складену обернену матрицю комплексних вузлових провідностей перевірено на правильність за співвідношенням:

$$\left| [\underline{Y}]_{y6kV} \cdot [\underline{Y}]^{-1}_{y6kV} \right| = 1. \quad (2.13)$$

Вектор задаючих струмів представлений в ідентифікаторах Mathcad показано на рис. 2.2:

$J_{6kV} =$

	1
1	-109.6+135.1i
2	-33.5+29.5i
3	-21.8+15.8i
4	-17.4+9.9i
5	-37.4+32i
6	-63.4+47.6i
7	-65+45.4i
8	-51.7+33.4i
9	-26.2+20.3i
10	-49.9+36.1i
11	-26.5+17.1i
12	-24+19.3i
13	-32.3+28.5i

Рисунок 2.2 – Скріншот вектору задаючих струмів для мережі з номінальною напругою 6 кВ в системі Mathcad

Знаходимо вектор комплексних спадів напруги від кожного незалежного вузла схеми до базисного:

$$\Delta[\underline{U}]_{6kV} = [\underline{Y}]^{-1}_{y6kV} \cdot [\underline{J}]_{6kV}. \quad (2.14)$$

Результати розрахунку показано на рис. 2.3.

$\Delta U_{6kV} =$

	1
1	-24.518+14.278i
2	-24.544+13.56i
3	-31.235+16.348i
4	-11.909+6.475i
5	-20.934+11.207i
6	-1.666+0.312i
7	-11.829+4.316i
8	-53.523+23.534i
9	-50.526+22.823i
10	-17.118+7.235i
11	-18.677+7.903i
12	-25.149+11.598i
13	-21.839+10.079i

Рисунок 2.3 – Скріншот результатів розрахунку вектору комплексних спадів напруги від кожного незалежного вузла схеми до базисного для мережі з номінальною напругою 6 кВ в системі Mathcad

Знаходимо комплексні спади напруги на кожній вітці схеми (результати див. рис. 2.4):

$$\left[\underline{U}\right]_{6kV} = \left[\underline{M}\right]^{T} \cdot \Delta\left[\underline{U}\right]_{6kV}. \qquad (2.15)$$

$U_{6kV} =$

	1
1	24.518-14.278i
2	0.026+0.717i
3	6.691-2.788i
4	11.909-6.475i
5	9.025-4.733i
6	3.61-2.353i
7	1.666-0.312i
8	10.163-4.004i
9	51.857-23.222i
10	50.526-22.823i
11	2.996-0.711i
12	17.118-7.235i
13	1.558-0.668i
14	8.031-4.364i
15	4.721-2.844i
16	2.68-4.199i

Рисунок 2.4 – Скріншот результатів розрахунку вектору комплексних спадів напруги на кожній вітці схеми для мережі з номінальною напругою 6 кВ в системі Mathcad

Далі перейдемо до визначення вектора комплексних струмів у вітках

схеми за виразом (2.16):

$$\left[\underline{I}\right]_{v6kV} = \left[\underline{Z}\right]^{-1}_{6kV} \cdot \left[\underline{M}\right]^{T} \cdot \Delta\left[\underline{U}\right]_{6kV} . \qquad (2.16)$$

Результати розрахунку у системі Mathcad представлено на рис. 2.5.

$I_{v6kV} =$

	1
1	88.349-84.285i
2	2.711+9.911i
3	21.8-15.8i
4	107.389-97.111i
5	89.989-87.211i
6	52.589-55.211i
7	171.141-122.487i
8	65-45.4i
9	42.741-29.487i
10	35.159-24.213i
11	8.959-3.913i
12	156.662-141.903i
13	26.5-17.1i
14	24-19.3i
15	56.262-69.403i
16	23.962-40.903i

Рисунок 2.5 – Скріншот результатів розрахунку вектора комплексних струмів у вітках схеми для мережі з номінальною напругою 6 кВ в системі Mathcad

2.3 Моделювання розподільчої мережі 10 кВ

Як відомо, значення номінальної напруги мережі суттєво впливає на техніко-економічні показники мережі. Зокрема логічно передбачати, що із збільшенням номінальної напруги мережі зменшуються втрати потужності , електричної енергії і напруги, виникають можливості для зменшення витрат матеріалу на кабельні лінії або, наприклад, полегшується подальший розвиток електричної мережі через можливості приєднання нових навантажень. Одночасно зрозуміло, що підвищення напруги потребує значних капіталовкладень на модернізацію обладнання електричної системи. Тому здійснення економічного обґрунтування заходів щодо модернізації потребує прогнозування зміни показників ефективності передачі енергії на основі математичного моделювання.

Моделювання усталеного режиму електричної мережі при номінальній напрузі 10 кВ також виконано матричним методом на основі рівнянь вузлових напруг. Усі приведені нижче розрахунки проведені у середовищі Mathcad.

Граф розрахункової схеми при цьому лишається без змін і приведений на рис. А.4, додаток А. Відповідно лишається без змін також і перша матриця інциденцій для розглядуваного графа, яку показано на рис. А.3, додаток А.

Як і в п.2.2 складаємо матрицю комплексних опорів віток $\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}}\right]$, на основі даних наведених у табл.2.2: Відповідно маємо наступні значення її елементів

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}1,1}\right] = 0{,}226+\text{j}0{,}054$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}2,2}\right] = 0{,}068+\text{j}0{,}016$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}3,4}\right] = 0{,}262+\text{j}0{,}062$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}4,4}\right] = 0{,}091+\text{j}0{,}022$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}5,5}\right] = 0{,}078+\text{j}0{,}023$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}6,6}\right] = 0{,}055+\text{j}0{,}013$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}7,7}\right] = 0.0073 + j0.0034$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}8,8}\right] = 0{,}134+\text{j}0{,}032$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}9,9}\right] = 1{,}076+\text{j}0{,}199$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}10,10}\right] = 1{,}278+\text{j}0{,}231$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}11,11}\right] = 0{,}310+\text{j}0{,}056$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}12,12}\right] = 0{,}083+\text{j}0{,}029$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}13,13}\right] = 0{,}053+\text{j}0{,}009$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}14,14}\right] = 0{,}292+\text{j}0{,}053$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}15,15}\right] = 0{,}058+\text{j}0{,}021$ Ом

$\left[\underline{Z}_{10\text{кВ}16,16}\right] = 0{,}105+\text{j}0{,}004$ Ом

Обернена матриця опорів віток описується наступним співвідношенням аналогічним до використаного у п.2.2:

$$\left[\underline{Y}\right]_{10\text{kV}} = \left[\underline{Z}\right]_{10\text{kV}}^{-1}, \qquad (2.17)$$

де $\left[\underline{Y}\right]_{10kV}$ – матриця комплексних провідностей віток для схеми з напругою 10 кВ.

Перевірка правильності складених матриць знову проводилася за співвідношенням:

$$\left|\left[\underline{Y}\right]_{10\text{kV}} \cdot \left[\underline{Z}\right]_{10\text{kV}}\right| = 1. \qquad (2.18)$$

Ппіввідношення за яким обчислено матрицю вузлових провідностей наступний

$$\left[\underline{Y}\right]_{\text{y10kV}} = \left[\underline{M}\right] \cdot \left[\underline{Y}\right]_{10\text{kV}} \cdot \left[\underline{M}\right]^{\text{T}}, \qquad (2.19)$$

де $\left[\underline{M}\right]$ – перша матриця інциденцій;

$\left[\underline{Y}\right]_{10\text{kV}}$ – матриця комплексних провідностей віток схеми напругою 10 кВ;

$\left[\underline{M}\right]^{T}$ – транспонована матриця інциденцій.

Утворену обернену матрицю комплексних вузлових провідностей віток схеми перевірено на правильність за співвідношенням:

$$\left|\left[\underline{Y}\right]_{\text{y10kV}} \cdot \left[\underline{Y}\right]^{-1}{}_{\text{y10kV}}\right| = 1. \qquad (2.20)$$

Вектор задаючих струмів схеми складаємо використовуючи дані з табл.2.3:

Знаходимо вектор комплексних спадів напруги від кожного незалежного вузла схеми до базисного у схемі напругою 10 кВ:

$$\Delta\left[\underline{U}\right]_{10\text{kV}} = \left[\underline{Y}\right]^{-1}{}_{\text{y10kV}} \cdot \left[\underline{J}\right]_{10\text{kV}}. \qquad (2.21)$$

Результати відповідного розрахунку показано на рис. 2.6.

Знаходимо комплексні спади напруги на кожній вітці схеми напругою 10 кВ:

$$\left[\underline{U}\right]_{10\text{kV}} = \left[\underline{M}\right]^{\text{T}} \cdot \Delta\left[\underline{U}\right]_{10\text{kV}}. \qquad (2.22)$$

Результати цього розрахунку показані на рис. 2.7.

$\Delta U_{10kV}=$

	1
1	-14.719+8.571i
2	-14.735+8.139i
3	-18.757+9.816i
4	-7.148+3.884i
5	-12.569+6.726i
6	-0.999+0.186i
7	-7.096+2.583i
8	-32.088+14.109i
9	-30.291+13.69i
10	-10.274+4.348i
11	-11.209+4.751i
12	-15.094+6.972i
13	-13.109+6.053i

Рисунок 2.6 – Скріншот результатів розрахунку вектору комплексних спадів напруги від кожного незалежного вузла схеми до базисного для мережі з номінальною напругою 10 кВ в системі Mathcad

$U_{10kV}=$

	1
1	14.719-8.571i
2	0.016+0.432i
3	4.021-1.677i
4	7.148-3.884i
5	5.421-2.841i
6	2.167-1.414i
7	0.999-0.186i
8	6.096-2.397i
9	31.088-13.923i
10	30.291-13.69i
11	1.797-0.419i
12	10.274-4.348i
13	0.935-0.403i
14	4.82-2.624i
15	2.835-1.705i
16	1.61-2.518i

Рисунок 2.7 – Скріншот результатів розрахунку вектору комплексних спадів напруги на кожній вітці схеми для мережі з номінальною напругою 10 кВ в системі Mathcad

Нарешті визначаємо вектор комплексних струмів у вітках схеми з напругою 10 кВ за виразом (2.23):

$$[\underline{I}]_{v10kV} = [\underline{Z}]^{-1}_{10kV} \cdot [\underline{M}]^{T} \cdot \Delta[\underline{U}]_{10kV} . \quad (2.23)$$

Результати розрахунку у системі Mathcad представлено на рис. 2.8.

$I_{10kV} =$

	1
1	53.039-50.6i
2	1.642+5.967i
3	13.1-9.5i
4	64.458-58.267i
5	54.058-52.367i
6	31.558-33.167i
7	102.723-73.378i
8	39-27.2i
9	25.623-17.678i
10	21.077-14.522i
11	5.377-2.322i
12	94.003-85.233i
13	15.9-10.3i
14	14.4-11.6i
15	33.803-41.633i
16	14.403-24.533i

Рисунок 2.8 – Скріншот результатів розрахунку вектора комплексних струмів у вітках схеми для мережі з номінальною напругою 10 кВ в системі Mathcad

2.4 Порівняння втрат електричної енергії у лініях напругою 6 та 10 кВ

Значення втрат активної та реактивної потужностей, а також значення втрат електричної енергії передусім характеризують економічність режиму роботи мережі. Очевидно, що саме величина втрат енергії в електричній мережі істотним чином впливає на щорічні експлуатаційні витрати і собівартість електроенергії. Усереднено втрати активної потужності ΔP можуть складати орієнтовно складають порядку 10% від усієї передаваної потужності [10].

Втрати потужності у трифазній мережі при симетричному навантаженні визначаються наступним чином:

$$\Delta \underline{S} = \sqrt{3} \cdot \Delta \underline{U} \cdot \underline{I}'', \qquad (2.24)$$

де $\Delta \underline{U}$ – комплексний спад напруги у вітці;

$\underline{I}''$ – комплексно-спряжене значення струму у вітці.

Результати розрахунку зведені у таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Втрати потужності у вітках схеми

№ вітки	Втрати потужності у мережі 6 кВ, ВА	Втрати потужності у мережі 10 кВ, ВА
1	5836+*j*1394	2103+*j*502,614
2	12,43+*j*2,92	4,51+*j*1,063
3	328,941+*j*77,837	63,642-*j*104,214
4	3304+*j*798,737	1190+*j*287,759
5	2122+*j*625,55	765,26+*j*225,691
6	553,837+*j*130,891	199,678+*j*47,198
7	560,036+*j*260,964	201,383+*j*93,874
8	829,329-*j*1250	524,712+*j*125,276
9	5025+*j*929,377	1806+*j*333,982
10	4034+*j*729,111	1450+*j*262,132
11	51,309+*j*9,237	15,051-*j*11,129
12	6423+*j*2244	2315+*j*808,796
13	91,296+*j*15,484	32,939+*j*5,582
14	479,725+*j*87,057	172,939+*j*31,396
15	801,931+j290,365	288,933+j104,608
16	408,712+j15,595	147,16+j5,597

Із розрахунку видно, що втрати потужності у мережі напругою 6 кВ приблизно у 2,5 рази перевищують втрати потужності у мережі 10 кВ, що може бути аргументом при розгляді доцільності переведення району електричних мереж на живлення напругою 10 кВ.

Далі переходимо до визначення втрат електричної енергії в лініях 6 та 10 кВ. Передусім слід відзначити, що витрати електричної енергії в електричній мережі залізничного вузла «С» нормуються окремо для кожної категорії споживачів [11], [12].

Норма витрати електричної енергії – це економічно обґрунтована витрата електроенергії на виконання роботи, випуск продукції, надання послуг за визначений період на основі фактичного обсягу цієї роботи та встановлених питомих норм.

Норма питомої втрати – це затверджений Кабміном України показник їх використання на одиницю виконаних робіт, виробленої продукції, орієнтований на пргресивне виробництво. Норми витрат електроенергії служать для планування споживання енергоресурсів, оцінки ефективності їх використання. Виконання встановлених норм витрати електроенргії є обов'язковим.

Норми питомих витрат електроенергії на залізничному транспорті поділяються:

- за ступенем агрегації – на індивідуальні і групові;
- за складом витрат – на технологічні та загальновиробничі;
- за часом дії – на річні та квартальні.

Індивідуальною називається норма питомої витрати електроенергії на виробництво одиниці продукції, яка визначається для окремих агрегатів, установок, машин, технологічних процесів.

Груповою називається норма питомої витрати електроенергії, яка визначається на групу агрегатів , установок, технологічних процесів, укрупнену номенклатурну групу прдукції для різних рівнів управління суспільним виробництвом (дільниця, цех, підприємство, міністерство, тощо).

Технологічною називається норма питомої витрати електричної енергії, що враховує їх виробниче споживання в основних і допоміжних виробничих процесах, технічно немінучі втрати, пов'язані лише зі здійсненням основних

та допоміжних технологічних процесів виробництва продукції даного виду.

Загальновиробничою називається норма питомої витрати електричної енергії, яка враховує, окрім її виробничого споживання, технічно неминучі витрати в основних та допоміжних технологічних процесах, а також умовно постійну складову (допоміжні потреби), пов'язану з виробництвом продукції.

Склад норм питомих витрат енергії встановлюється відповідними галузевими інструкціями, розробленими з урахуванням особливостей виробництва продукції. Довільна зміна складу норм не допускається.

До норми витрат електроенергії на виробництво продукції не входять витрати на будівництво і капітальний ремонт обладнання, пуск і налагодження нового технологічного обладнання, науково-дослідні експериментальні роботи. Витрата електроенергії на ці потреби повинна нормуватися окремо. Витрата електричної енергії на одиницю виробленої продукції нормується в кіловат-годинах (кВт·год).

В основу методики визначення норм витрат електроенергії для стаціонарних споживачів залізниць покладено:

- єдині для всіх залізниць науково обґрунтовані вихідні величини та поправочні коефіцієнти, які враховують місцеві умови роботи об'єктів залізниць;

- основним показником обсягу роботи, відносно якого визначається норма питомої витрати, є одиниця перевізної роботи (10000 ткм брутто).

До норми питомої втрати електроенергії на основний показник нормування для окремої залізниці входить витрата електроенергії на основні та допоміжні технологічні процеси; на допоміжні потреби виробництва (загальновиробничі цехові і деповські потреби, на освітлення, вентиляцію, опалювання тощо), а також технічно неминучі втрати енергії.

Загальна кількість електроенергії, що переробляється пристроями електропостачання залізниць включає в себе:

- електроенергію, що витрачається на тягу поїздів;

- електроенергію, що передається стороннім споживачам (які не пов'язані з залізничним транспортом);

- електроенергію, що витрачається на надання послуг стороннім організаціям.

Електроспоживання стаціонарних об'єктів включає в себе електроенергію на експлуатаційні потреби залізниць. До витрат електроенергії на експлуатаційні потреби залізниць входять витрати на основні і допоміжні технологічні процеси в електромережах.

Втрати активної потужності ΔP обумовлюють втрати електроенергії ΔW в мережі, що в свою чергу приводить до додаткових витрат енергоносіїв − палива і води, внаслідок чого зростає собівартість електричної енергії. Втрати відбуваються у всіх ланках електричної мережі. Метою даного розрахунку є порівняння втрати електричної енергії в кабельних лініях при номінальній напруги 6 та 10 кВ.

Для розрахунку втрат електричної енергії в кабельній лінії даної схеми скористаємося наступною формулою:

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau, \tag{2.25}$$

де ΔP – втрати активної потужності в лінії, яку визначено на основі зроблених раніше розрахунків як дійсну частину $\mathrm{Re}[\Delta \underline{S}]$ втрат потужності $\Delta S = \Delta P + j\Delta Q$;

τ– час максимальних втрат для річних графіків навантажень, який визначено за емпіричною формулою [бонд]

$$\tau = \left(0{,}124 + \frac{T_{\max}}{10000}\right)^2 \cdot 8760, \tag{2.26}$$

де $T_{\max}$ – час використання максимального навантаження, у розрахунках приймаємо $T_{\max} = 4200$ год.

Таким чином за виразом (2.26) маємо

$$\tau = \left(0{,}124 + \frac{4200}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 2592{,}4 \text{ год.}$$

Отримані результати розрахунків занесемо до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Річні втрати електроенергії у вітках схеми

№ вітки	Втрати електроенергії у мережі 6 кВ, кВт×год	Втрати електроенергії 10 кВ, кВт×год
1	15130	5452
2	32,22	11,69
3	852,7	165
4	8565	3085
5	5501	1984
6	1436	517,6
7	1452	522,1
8	2150	1360
9	13030	4682
10	10460	3759
11	133	39,02
12	16650	6001
13	236,7	85,39
14	1244	448,3
15	2079	749
16	1060	381,5
Σ	80011,62	29242,6

Для наочного порівняння втрат електроенергії, отримані значення представлено у вигляді гістограми, яку наведено на рис. А5, додаток А.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Як видно із табл. 2.5, зі збільшенням номінальної напруги у мережі з 6 до 10 кВ сумарні втрати електроенергії у ній зменшуються з 800011 кВт·год до 29242 кВт·год, тобто майже у 2,74 рази. Нескладно помітити, що зазначене змінення майже пропорційно квадрату відношення номінальних напруг мережі до та пля реконструкції, оскільки $(10/6)^2 = 2,78$. Також можна відзначити, що згадані співвідношення близькі при розгляді втрат електроенергії в цілому, але по окремих вітках вони можуть різнитись.

2. Розрахунки показують, що у подальшому із зростанням вартості електроенергії та у наслідок наявного дефіциту генеруючих потужностей питання реконструкції мереж електропостачання дослідного залізничного вузла «С» з підвищенням номінального значення живлячої напруги з 6 кВ на 10 кВ буде все більш актуальним . Така заміна є тим більш доцільною, тому що, як можна побачити зі схеми рис. А2, додаток А основне обладнання ЦРП розраховано на номінальну напругу 10 кВ, і відповідно негайної заміни не потребуватиме.

3. Щодо наявних кабельних ліній, то проглядаються 2 можливі стратегії їх модернізації. Перша з них передбачає прокладання кабельних ліній зменшеного перерізу із меншими капіталовкладеннями, що стає можливим унаслідок зниження струмових навантажень. Зазначимо, що реалізація такої стратегії потребує обов'язкового прогнозування режиму напруги у точках приєднання споживачів при їх живленні по лініях зменшеного перерізу. Розроблена модель цілком дозволяє отримати необхідну інформацію шляхом математичного моделювання при відомих нових параметрах ліній. Друга стратегія полягає у тому, що можна залишити кабельні лінії з наявним перерізом, щоб у перспективі використовувати їх для приєднання нових споживачів у разі збільшення навантаження мережі. Але прогнозування значень сталого відхилення напруги на приймачах має бути здійснене і у цьому випадку.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Як обсяг, так і внутрішнє наповнення даного розділу у повній мірі корелюється із рекомендаціями наведеними у [13], [14] а також відповідають вимогам чинних нормативних документів [15], [16].

3.1 Особливості основного обладнання кабельних ліній

Сукупність машин, апаратів, ліній і допоміжного устаткування (разом із спорудами і приміщеннями, в яких вони встановлені), призначених для виробництва, перетворення, трансформації, передачі і розподілу електричної енергії, називається електроустановками. Електроустановки підрозділяють на відкриті, або зовнішні (на відкритому повітрі), і закриті, або внутрішні (у закритому приміщенні).

Залежно від навколишнього середовища приміщення, в яких розташовані електроустановки, підрозділяють на сухі, вологі, сирі, особливо сирі, жаркі, запорошені і з хімічно активним або органічним середовищем. У сухих приміщеннях відносна вологість повітря не перевищує 60 %, у вологих від 60 до 75 %, у сирих — тривало перевищує 75 % і особливо сирих вологість близька до 100 % (стеля, стіни і предмети покриті вологою). У жарких приміщеннях температура перевищує постійно або періодично (більше 1 доби) 35 °С (приміщення з сушарками, котельні і т. д.). У запорошених приміщеннях за умовами виробництва виділяється технологічний пил, який може осідати на проводах, проникати всередину машин, апаратів і тому подібне В приміщеннях з хімічно активним або органічним середовищем постійно або протягом тривалого часу містяться агресивні пари, гази, рідини, утворюються відкладення або цвіль, що діють руйнівно на ізоляцію і струмоведучі частини електроустаткування.

Сучасний розвиток пристроїв зв'язку, автоматики і телемеханіки на залізничному транспорті нерозривно пов'язаний з необхідністю широкого застосування кабельних ліній. Роль кабельних ліній на транспорті особливо

зросла у зв'язку з впровадженням електричної тяги однофазного змінного струму, оскільки заміна повітряній лінії кабельною є основним засобом захисту пристроїв зв'язку від небезпечних і таких, що заважають електромагнітних впливів, що створюються тяговими струмами.

Конструкція, спосіб установки електричних машин, апаратів, приладів і іншого електроустаткування, а також кабелів повинні відповідати умовам навколишнього середовища. Найбільшу кількість оброблень і приєднань кабелів виконують в РУ і на трансформаторних підстанціях.

Кабелем є сукупність декількох провідників (жил), ізольованих один від одного і від землі і замкнених в загальну захисну оболонку. Жили кабелю служать для передачі електричної енергії. Розрізняють кабелі силові і контрольні, силові кабелі призначені для передачі і розподілу електричної енергії в освітлювальних і силових електроустановках і в тих випадках, коли їх застосування економічно або технічно доцільніше,ніж проводів. Основне призначення захисної оболонки − це створення повної герметичності, що захищає кабель від проникнення в нього вологи і вологого повітря. Силовий електричний кабель загального застосування з просоченою паперовою ізоляцією складається зі струмоведучих жил (з міді або алюмінію) круглої або сегментної форми.

Кабельна арматура є устаткуванням, за допомогою якого здійснюється з'єднання кінців будівельних довжин кабелю, пристрій відгалужень кабелю і крайових включень його. До складу кабельної арматури входять кабельні сполучні і крайові муфти, кабельні стійки і ящики, бокси, розподільні коробки, групові муфти і тому подібне.

Кабельні лінії залежно від способу прокладки кабелю розділяють на підземні, підводні і повітряні. Кабельна лінія служить для передачі електроенергії або окремих її імпульсів і складається з одного або декількох кабелів із сполучними або кінцевими муфтами. Кабель складається з трьох основних елементів: струмопровідної жили, ізоляції і герметичних оболонок

із захисними покровами. Завдяки високій надійності в роботі найбільш широкого поширення на залізничному транспорті набули підземні кабельні лінії.

Кабелі прокладають в конструкціях, лотках (у виробничих приміщеннях, в тунелях); по стінам будівель і споруд, в траншеях і блоках (по території підприємства або міста). Монтаж кабелів в траншеях є найбільш поширеним і легко здійснимим, оскільки при цьому способі основна робота зводиться до риття траншей і укладання в них кабелів. Недоліком цього способу є можливість механічного пошкодження кабелів, що знаходяться в землі, і нещасних випадків з людьми при виробництві земляних робіт поблизу кабельної траси.

Надійність електропостачання багато в чому залежить від правильно виконаних оброблень і підключень кабелів. Прокладка і підключення кабелів повинні виконуватися з урахуванням мінімальних допустимих відстаней між неізольованими струмоведучими частинами різних фаз, а також між струмопровідними і неструмоведучими металевими частинами.

3.2 Види робіт, які виконуються на кабельних лініях

Всі роботи по випробуванням і оглядам можуть проводитися персоналом, що допущений до цих робіт і має відповідну відмітку в посвідченні по техніці безпеки [17] При проведенні цих робіт можна користуватися тільки випробувальними і вимірювальними установками, що пройшли перевірку і щорічну атестацію.

При технічному обслуговуванні кабельних ліній (КЛ) періодично проводять їх огляди з метою візуального виявлення несправностей і дефектів.

КЛ на напругу до 35 кВ, прокладені відкрито, повинні оглядатися не рідше за 1 раз на 6 місяців; прокладені в землі − не рідше за 1 раз на 3 місяці. Не рідше за 1 раз на 6 місяців вибіркові огляди КЛ повинні проводитися адміністративно-технічним персоналом.

Позачергові огляди КЛ повинні проводитися в період паводків і після

зливових дощів, коли можливі зрушення ґрунту і попадання ґрунтових вод в підземні кабельні споруди, а також після відключення КЛ релейним захистом.

Правилами охорони електричних мереж для КЛ, прокладеної в землі, встановлюється охоронна зона у розмірі 1 м з кожного боку від крайніх кабелів. Будь-які роботи в охоронній зоні КЛ повинні виконуватися з дозволу і під спостереженням організації, що експлуатує кабель [18].

Огляди КЛ, прокладених в кабельних спорудах (тунелях, естакадах і інших), повинні проводити дві людини. В першу чергу перевіряється за допомогою газоаналізатора відсутність в кабельних спорудах газів, стан освітлення і вентиляції. Машині, механізми, пристосування і інструмент, що застосовуються в електроустановках, повинні бути справні і випробувані відповідно до чинних нормативних документів і строків. Перевіряється: загальний стан кабельних споруд, наявність засобів пожежогасіння, відсутність сторонніх предметів. Всі металеві конструкції кабельних споруд повинні бути покриті негорючим антикорозійним складом.

Контроль режиму навантаження КЛ здійснюється зняттям графіків навантаження, що виконується не рідше за 2 рази на рік. Причому один раз контроль здійснюється в період зимового максимуму навантаження.

Особлива увага при технічному обслуговуванні КЛ приділяється кабельній ізоляції. Одним із засобів контролю стану ізоляції є вимірювання її опору, що виконується мегаомметром. Схеми вимірювання фазної і міжфазної ізоляції кабелю показані на рис.3.1. Відлік величини опору ізоляції здійснюється приблизно через 1 хвилину після початку процесу вимірювання. Опір ізоляції кабелів на напругу до 1 кВ повинно бути не менше 0,5 МОм. Опір ізоляції кабелів на напругу вище 1 кВ не нормується.

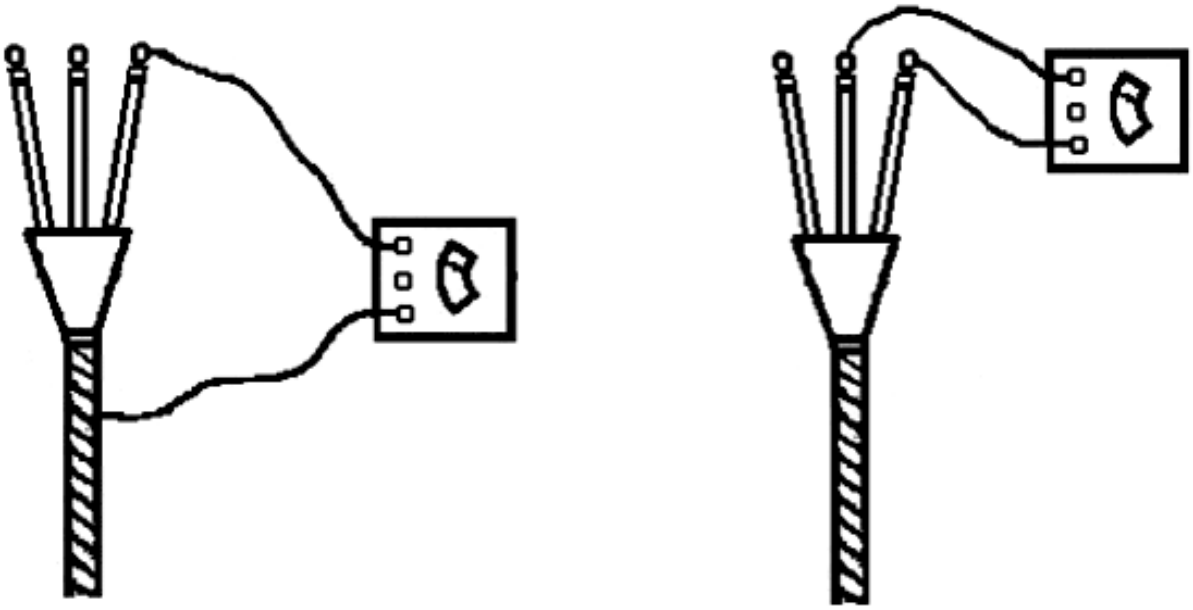

Рисунок 3.1 – Схема вимірювання опору:

а) фазної і б) міжфазної ізоляції кабелю

Кабельні тунелі повинні бути обладнані засобами для відведення зливових і ґрунтових вод. Ці засоби повинні знаходитися в справному стані.

По температурі усередині кабельних споруд побічно контролюється тепловий режим кабелів. Температура повітря усередині споруд повинна перевищувати температуру зовнішнього повітря не більше ніж на 10°С.

Обхід і огляд кабельних ліній персоналом електричних мереж:

- Нагляд за кабельними лініями і трасами, за кабельними спорудами і кінцевими пристроями проводиться в цілях перевірки їх стану шляхом періодичного обходу і огляду в терміни, приведені в табл. 3.1.

Туди ж заносяться дефекти трас. Майстер зобов'язаний щодня контролювати журнал огляду трас. Намічати і здійснювати роботи по усуненню дефектів.

При обходах і оглядах трас кабельних ліній по маршрутах на відкритих територіях необхідно:

- виявляти всі зміни ситуації на місцевості: знос, перенесення, зведення нових споруд, до яких прив'язані траси кабелів, зміна нумерації будинків, перейменування вулиць, проїздів і ін.;

Таблиця 3.1 – Перелік заходів з періодичного обходу і огляду кабельних ліній

№	Характер траси	Ким оглядається	Періодичність огляду 1 раз в к-ть місяців. До 35 кВ
1	Траси кабелів в землі, на пустирях	монтер по нагляду, майстер	3 24
2	Траси кабелів під вдосконаленим покриттям на вулицях, дорогах	монтер по нагляду, майстер	12 24
3	Траси кабелів прокладених в тунелях і кабельних спорудах	майстер, монтер	6
4	Траси кабелів по закритих територіях	монтер по нагляду, майстер	12 24
5	Кабельні колодязі	майстер	24
6	Кінцеві муфти, розташовані:		
	на центрах живлення	майстер	24
	у РП і ТП (при огляді РП і ТП)	майстер	6
	на кабельних введеннях до 1 кВ, включаючи щитові	монтер по нагляду	24
7	Підводні переходи	монтер по нагляду	За мірою необхідності

- стежити, щоб на трасі не проводилися не узгоджені в електричних мережах роботи;

- оглядати місця перетину кабельних трас із залізницями, звертаючи увагу на наявність попереджувальних знаків і на надійне з'єднання стиків рейок електрифікованих залізниць;

- оглядати стан кабельних ліній, прокладених по мостах, естакадах, галереях і інших подібних спорудах;

- перевіряти в місцях переходу кабельних ліній з берега в річку або інше водоймище наявність, стан і бачимість з води берегових сигнальних знаків.

При огляді і обході кабельних трас, прокладених на закритих територіях або в інженерних спорудах слідує:

- перевірити наявність на підприємстві генплану, узгодженого з електричними мережами, на якому нанесені охоронні зони кабелів;

- на будівельних майданчиках охоронна зона кабелю в місцях перетину і зближення з в дорогами повинна бути захищена залізобетонними плитами і позначена пізнавальними знаками;

- траса повинна оглядатися не рідше за 1 раз на місяць.

3.3 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації кабельних ліній

При обслуговуванні трас кабельних мереж можуть мати місце наступні небезпечні і шкідливі виробничі чинники:

1) підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, що спричиняє за собою електротравми;

Електротравма − це травма, викликана дією електричного струму або електричної дуги. Дія струму призводить до електричних опіків, дугових опіків ,металізації шкіри.

2) підвищена напруженість електричного і магнітного полів;

При незначному перевищенні нормативів викликає загальне зростання захворюваності,а також захворювання окремими хворобами органів дихання, травлення та ін.

3) машини і механізми , що рухаються;

4) низька температура повітря робочої зони;

5) загазованість кабельних тунелів і шахт;

6) недостатня освітленість робочої зони;

7) шкідлива дія небезпечних речовин.

3.4 Заходи безпеки під час виконання робіт в електроустановках, які містять у своєму складі кабельні лінії

Для захисту від ураження електричним струмом необхідно використовувати: діелектричні рукавички, боти, галоші, накладки, ковпаки, переносні і стаціонарні заземляючі пристрої, покажчики напруги, що ізолює оперативні штанги і кліщі, слюсарно-монтажний інструмент з ізолюючими рукоятками [19].

При недостатній освітленості робочої зони слід застосовувати додаткове місцеве освітлення. Місцеве освітлення повинно бути надійним і простим в експлуатації. Необхідно створювати на робочій поверхні освітленість, що відповідає характеру зорової роботи і не є нижчою за встановлені норми. Не повинно чинити засліплюючої дії від джерел освітлення, забезпечити достатню рівномірність та постійність рівня освітленості ,щоб уникнути переадаптації органів зору,не створювати на робочій поверхні різких та глибоких тіней (особливо рухомих). Не створювати небезпечних та шкідливих виробничих факторів (шум , теплові випромінювання, небезпечне ураження струмом, пожежна та вибухова небезпека світильників). В [20] вісім розрядів зорової роботи, із яких перші шість характеризуються розмірами об`єкту розпізнавання. Для I-V розрядів нормовані значення залежать ще й від контрасту об`єкта з фоном. Найбільша нормована освітленість складає 5000 лк, а найменша – 30 лк.

Адаптація – пристосування ока до зміни умов освітленості.

Періодично, не рідше одного разу на рік ,необхідно перевіряти рівень освітленості в контрольних місцях виробничого приміщення. Основний прилад для вимірювання освітленості - люксметр.

При роботі в зоні впливу електричного поля необхідно обмежувати час перебування в цій зоні залежно від рівня напруженості електричного поля або застосовувати екрануючі пристрої, або екрануючі комплекти одягу [18]. Відповідно до Закону України «Про охорону праці» [21] на роботах із

шкідливими та небезпечними умовами праці, в особливих температурних умовах ,в забрудненому середовищі робітникам видаються спецодяг, спецвзуття та інші засоби індивідуального захисту.

При огляді кабелів, прокладених по кабельним і іншим естакадам, необхідно користуватися тільки стаціонарними пристроями по обслуговуванню кабелів або із землі із застосуванням бінокля.

Для захисту голови від ударів необхідно при виконанні роботи носити захисну каску, застебнуту ременем підборіддя. До роботи приступати можна тільки в спеціальному одязі. Засоби захисту голови дозволяють не допустити травмування голови при виконанні робіт.

При перетинанні вулиць слід виконувати правила дорожнього руху [22]. Розташування виробничого обладнання, машин і механізмів на робочих місцях не повинно бути небезпечним для персоналу.

При зниженій температурі повітря необхідно користуватися теплим спецодягом і чергувати роботу за часом із знаходженням в теплому приміщенні.

Захист від шкідливої дії речовин в кабельних лініях та засоби попередження забруднення повітряного середовища включає :

- вилучення шкідливих речовин;
- удосконалення технологічних процесів та устаткування;
- герметизація виробничого устаткування;
- кондиціювання повітря, очистка викидів в атмосферу;
- контроль за вмістом шкідливих речовин в повітрі робочої зони;
- використання засобів індивідуального захисту.

3.5 Висновки до розділу 3

1. У процесі монтажу, та на протязі усього терміну експлуатації збереження життя та здоров’я працівників об’єктів галузі електроенергетики в нормальному та аварійному режимах роботи забезпечується точним та безумовним додержанням усього комплексу вимог, які регламентовані нормативною документацією в області охорони праці та безпечної експлуатації електрообладнання. Зміст окремих положень ключового документу [14] стисло викладено у матеріалах даного розділу.

2. В електричній системі розподілу електроенергії середньої напруги вагома частина ремонтних робіт припадатиме на кабельні лінії, виконання робіт на яких пов’язано із дією на персонал підвищеної кількості небезпечних та шкідливих факторів. Відповідно під час виконання даного розділу основну увагу було приділено правилам безпеки при виконанні робіт саме на електроустановках, які містять у своєму складі кабельні лінії.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

На підсумок виконаних у цій кваліфікаційній роботі досліджень, як передбачено в [13], вважаємо необхідним викласти наступні основні висновки та рекомендації.

1. Актуальність досліджень у області реконструкції електричних мереж середньої напруги обумовлена трьома ключовими факторами. Першим з них є обмеженість енергетичних ресурсів у широкому сенсі цього поняття. Зокрема до цього фактора можна віднести нестачу генеруючих потужностей, наявність технічних обмежень у можливих обсягах передачі електроенергії через елементи енергосистеми та ускладнення доступу до вичерпних невідновлюваних енергетичних ресурсів. Другим фактором є високий ступінь зношеності основного обладнання зазначених мереж через значний термін його експлуатації, що перевищує на сьогодні 30 років. І, нарешті, третім фактором є постійне зростання вартості електроенергії.

2. Процес реконструкції нерозривно пов’язаний з питаннями обґрунтування економічної ефективності відповідних капіталовкладень. На нашу думку, перспективним шляхом отримання інформації, необхідної для такого обґрунтування є математичне моделювання усталених режимів роботи того чи іншого варіанту реконструйованої мережі із визначенням на цій основі основних показників ефективності процесу передачі електроенергії в мережі.

3. Враховуючи особливості структури досліджуваної складнозамкненої мережі живлення нетягових споживачів залізничного вузла в роботі розроблено матричну модель зазначеної мережі на основі рівнянь вузлових напруг. На її основі із використанням системи комп’ютерної математики Mathcad виконано прогнозування зниження втрат електроенергії в досліджуваній мережі при збільшенні її номінальної напруги з 6 до 10 кВ під

час реконструкції. Моделювання показало, що у цьому разі існує можливість знизити вказані втрати у 2,74 рази.

4. Потенціал розробленої у роботі моделі не вичерпується виключно колом питань, які детально розроблялися у даній кваліфікаційній роботі. Зокрема використане у роботі матричне рівняння вузлових напруг дозволяє у разі застосування комп'ютерної техніки легко передбачати вплив зміни номінальної напруги мережі чи її електричних навантажень на відхилення напруги у точках приєднання споживачів, здійснювати відповідне прогнозування у разі розгляду варіантів зміни перерізу кабельних ліній у мережі, пошуку раціональних рішень щодо доцільного обсягу компенсації реактивної потужності у мережі та місць встановлення компенсуючи пристроїв, здійснювати моделювання роботи мережі у комплексі з інтегрованими до її складу відновлюваними джерелами енергії, тощо. Варто також відзначити, що запропонований підхід у моделюванні має доволі універсальний характер а отже цілком може бути використаний у розрахунках і інших електричних мереж складнозамкненої структури, у тому числі і тих, які не входять до складу енергетичного господарства українських залізниць.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Електронний ресурс]: Схвалено : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 серпня 2017 р. № 605 р / Міністерство енергетики України. К., 20 17 . 66 с. Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358

2. Замулко А.І., Запорожець В.В., Копчиков О.М. Реконструкція та модернізація розподільних електричних мереж для забезпечення нормативного рівня надійності електропостачання [Текст] / А.І. Замулко, В.В. Запорожець, О.М. Копчиков // VII Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'21»: зб. тез доп. Міжнародної науково-техн. конф. Київ, 9-11 бер. 2021 р.-Київ: КПІ, 2021. – С. 46.

3. Бекян Г.О., Бекян Д.Г. Реконструкція електричних мереж в Україні [Текст] / Г.О. Бекян, Д.Г. Бекян, керівник Є. Д. Дьяков // Сталий розвиток міст 2020. Ч2 - Транспорт і освітлення: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. - Харків: ХНУМГ імені О.М. Бекетова, 2020. – С. 79-81.

4. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2015 р.: [Текст]. – Київ: Укрзалізниця, 2016. – 148 с.

5. Загальноукраїнська інформація та статистична інформація європейських інституцій у сфері електричної енергії //веб-сайт Нацком. енергетики, ком. послуг. – Режим доступу: URL: https://www.nerc.gov.ua/?id=39939.

6. Статистична інформація [Електронний ресурс] // веб-сайт міністерства енерг. та вугіл. пром. – Режим доступу: URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=35081.

7. Бондар О.І. Оцінка впливу компенсації реактивної потужності на втрати електроенергії в електромережі залізничного вузла [Текст] / О. І. Бондар, І.Л. Бондар // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – 2020. – С. 51-55.

8. Mukha A. M. Reactive Power Compensation for Non-Traction Railway Consumers [Text] / Andrii M. Mukha, Oleh I. Bondar // Problemy kolejnictwa – 2009. – Issue 188. – P. 129-135.

9. Бондар, І. Л. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту : Навч. посібник для вузів [Текст] / І. Л. Бондар, О. І. Бондар , В. Г. Сиченко. – Д.: Маковецкий, 2009. – 184 с.

10. Бондар, І. Л. Електропостачання промислових підприємств залізничного транспорту : Навч. посібник для вузів [Текст] / І. Л. Бондар, О. І. Бондар , В. Г. Сиченко, О. В. Остапчук. – Д.: Маковецкий, 2012. – 286 с.

11. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України ЦЕ- 0009 [Текст]: затв. Наказом Укрзалізниці від 24.12.2004 р. № 1010-ЦЗ. – Київ : Укрзалізниця, 2005. – 80 с.

12. Правила технічної експлуатації залізниць України [Текст]: затв. Наказом Мінтрансу від 19.03.2002 р. № 179. – Київ : Міністерство транспорту України, 2002. – 75 с.

13. Методичні рекомендації дипломного проектування [Текст] : уклад.: А.М.Муха, О.О. Карзова; Дніпровський . нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2020. - 22 с.

14. Охорона праці. Методичні рекомендації до розробки розділу дипломних проектів бакалаврам. [Текст] : уклад.: В.Г.Лоза; Дніпровський . нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2020. - 28 с.

15. Правила улаштування електроустановок [Текст]: Затв.: Наказ Міненерговугілля України 21.07.2017. № 476/ НПЦР ОЕС України. – К., 2017. – 617 с.

16. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів НПАОП 40.1-1.21-98 [Текст]: Затв.: Наказ Держнаглядохоронпраці 10.02.1998. № 4/ Державний комітет України з нагляду за охороною праці. – К., 1998. – 114 с.

17. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці НПАОП 0.00-4.12-05 [Текст]: Затв.: Наказ

Держнаглядохоронпраці 26.01.2005. № 15/ Державний комітет України з нагляду за охороною праці. – К., 2017. – 20 с.

18. Порядок проведення технічного огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки НПАОП 0.00-6.18-04 [Текст]: Затв.: Наказ Кабміну 26.05.2004. № 687 / Кабінет Міністрів України. – К., 2004. – 18 с.

19. Норми безоплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту працівникам підприємств електроенергетичної галузі НПАОП 0.00-3.23-18 [Текст]: Затв.: Наказ Держнаглядохоронпраці 27.08.2018. № 1224/ Державний комітет України з нагляду за охороною праці. – К., 2018. – 12 с.

20. Інструкція з охорони праці під час виконання монтажних робіт інструментами і пристроями НПАОП 0.00-5.24-01 [Текст]: Затв.: Наказ Мінсоцпраці 05.06.2001. № 254 / Міністерство праці та соціальної політики України. – К., 2001. – 6 с.

21. Закон України «Про охорону праці» [Текст] / Відомості Верховної Ради України. – К., 1992. – № 49. – 16 с.

22. Закон України «Про дорожній рух» [Текст] / Відомості Верховної Ради України. – К., 1993. – № 31. – 29 с.

СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

1) Структурна схема електропостачання залізничного вузла;
2) Однолінійна схема ЦРП;
3) Граф і матриця інциденцій для схеми живлення;
4) ; Порівняння втрат електроенергії в лінії напругою 6 та 10 кВ.

ДОДАТОК А

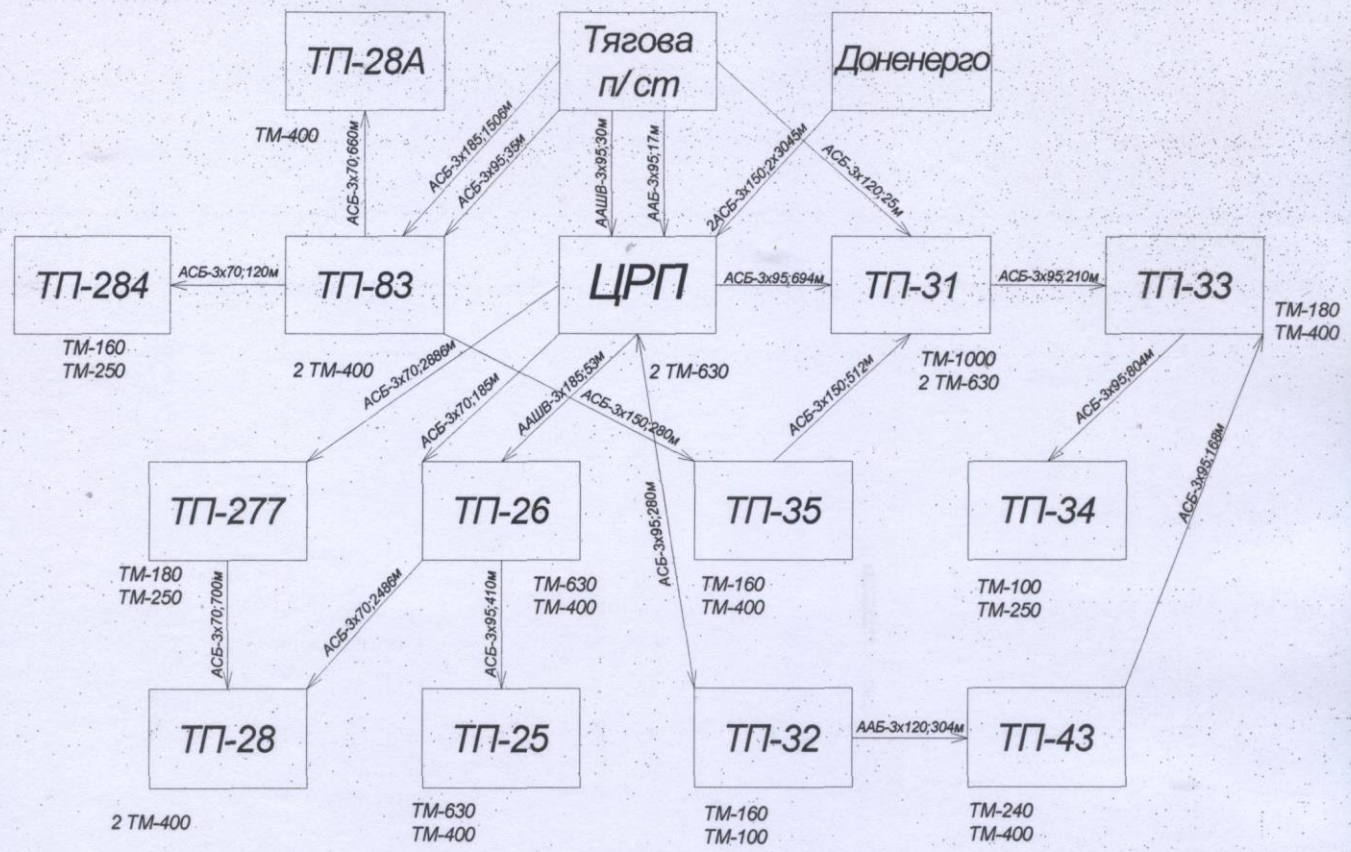

Рисунок А.1 - Структурна схема електропостачання залізничного вузла.

					Структурна схема електропостачання залізничного вузла	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зменшення втрат електричної енергії у системі живлення нетягових споживачів шляхом підвищення номінальної напруги мережі під час її реконструкції	Літ. / Маса / Масштаб: 1 : 1
Розроб.		Бирсан О.О.		10.01.25		
Перевір.		Бондар О.І.		10.01.25		Арк. 59 / Аркушів 62
Т. Контр.						
Реценз.					Додаток А 7.141.236204.01	МОН України. УДУНТ Кафедра ЕТЕМ, група ЕЕ2326
Н. Контр.		Карзова О.О.		10.01.25		
Затверд.		Муха А.М.		10.01.25		

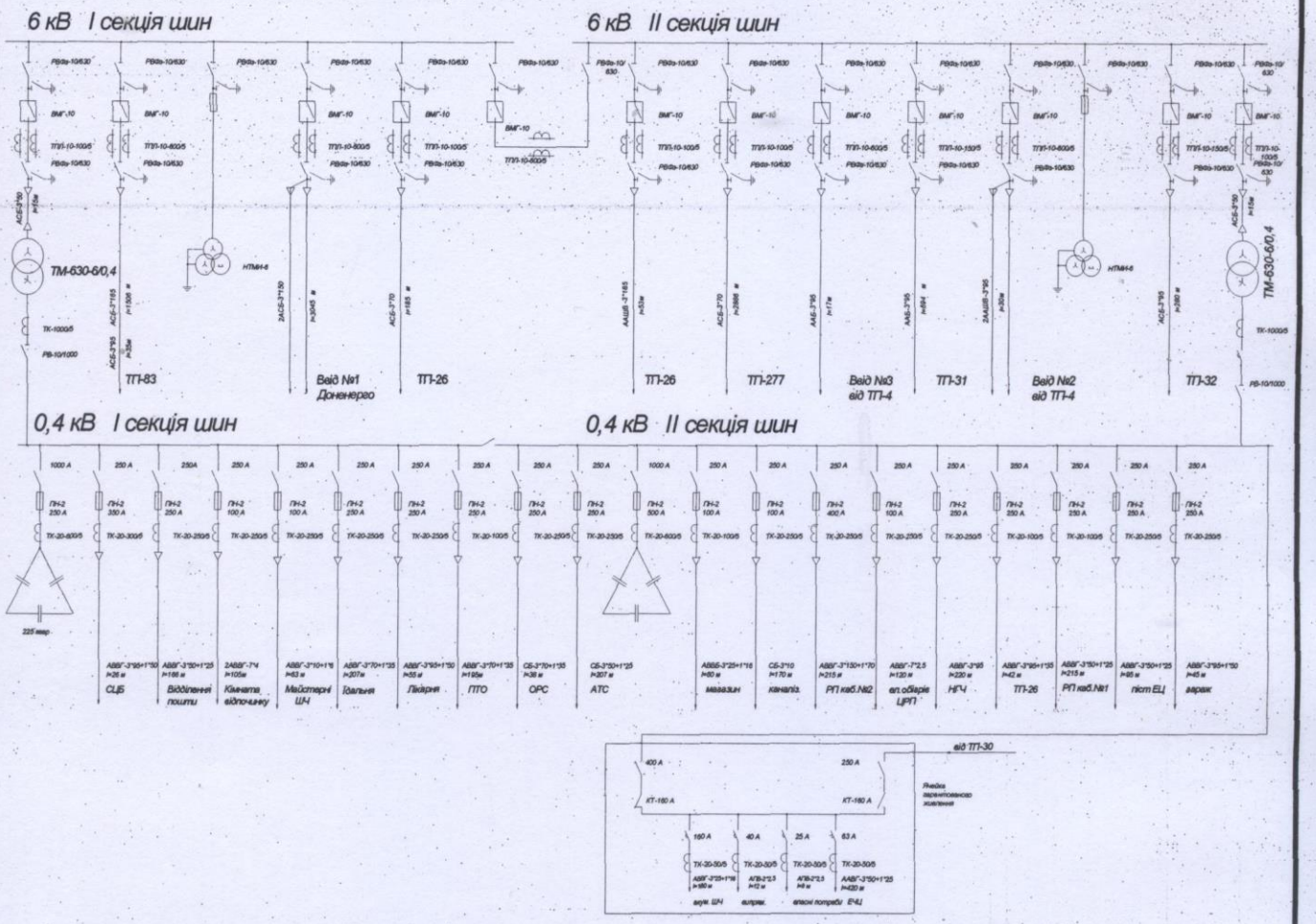

Рисунок А.2 - Однолінійна схема ЦРП

					Однолінійна схема ЦРП			
					Зменшення втрат електричної енергії у системі живлення нетягових споживачів шляхом підвищення номінальної напруги мережі під час її реконструкції	Літ.	Маса	Масштаб
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				1 : 1
Розроб.		Бирсан О.О.		10.01.25		Арк. 60	Аркушів 62	
Перевір.		Бондар О.І.		10.01.25				
Т. Контр.					Додаток А 7.141.236204.02	МОН України. УДУНТ Кафедра ЕТЕМ, група ЕЕ2326		
Реценз.								
Н. Контр.		Карзова О.О.		10.01.25				
Затверд.		Муха А.М.		10.01.25				

M =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
2	0	-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1

Рисунок А.3 - Матриця інциденцій для схеми живлення

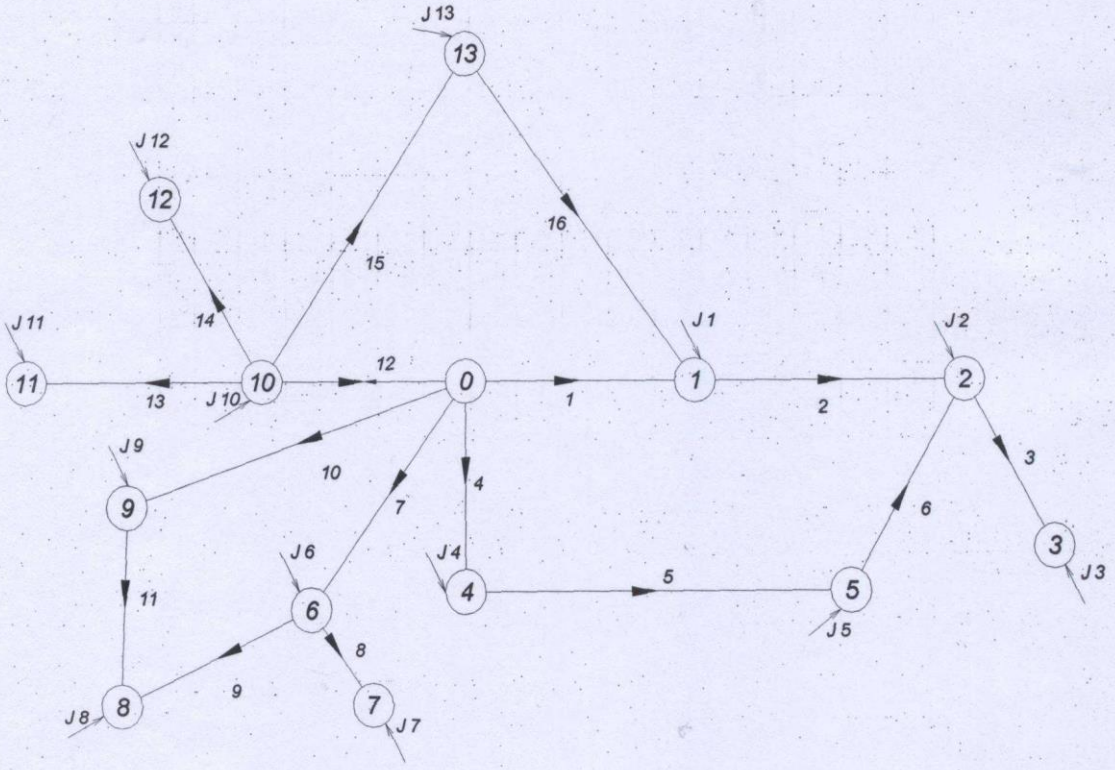

Рисунок А.4 – Граф досліджуваної схеми кола

					Граф і матриця інциденцій для схеми живлення	
					Зменшення втрат електричної енергії у системі живлення нетягових споживачів шляхом підвищення номінальної напруги мережі під час її реконструкції	Літ. / Маса / Масштаб: 1 : 1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Арк. 61 / Аркушів 62
Розроб.		Бирсан О.О.		10.01.25	Додаток А 7.141.236204.03	МОН України. УДУНТ Кафедра ЕТЕМ, група ЕЕ2326
Перевір.		Бондар О.І.		10.01.25		
Т. Контр.						
Реценз.						
Н. Контр.		Карзова О.О.		10.01.25		
Затверд.		Муха А.М.		10.01.25		

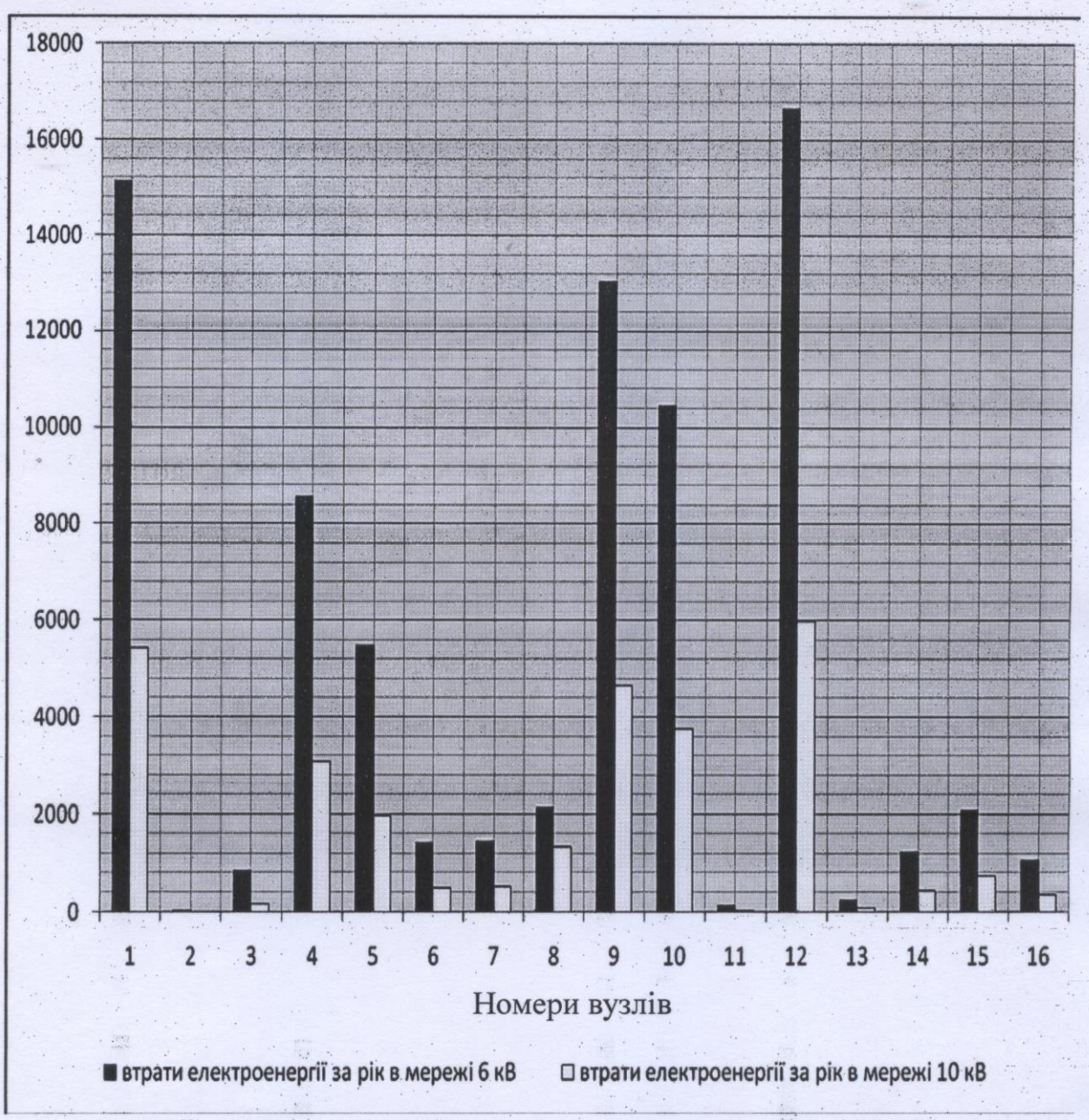

Рисунок А.5 – Діаграма порівняння втрат електроенергії в лінії напругою 6 та 10 кВ.

					Порівняння втрат електроенергії в лінії напругою 6 та 10 кВ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зменшення втрат електричної енергії у системі живлення нетягових споживачів шляхом підвищення номінальної напруги мережі під час її реконструкції	Літ.	Маса / Масштаб
Розроб.		Бирсан О.О.		10.01.25			1 : 1
Перевір.		Бондар О.І.		10.01.25		Арк. 62	Аркушів 62
Т. Контр.							
Реценз.					Додаток А 7.141.236204.04	МОН України. УДУНТ Кафедра ЕТЕМ, група ЕЕ2326	
Н. Контр.		Карзова О.О.		10.01.25			
Затверд.		Муха А.М.		13.01.25			