

□

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«ПОКРАЩАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ  
ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 10 КВ»**

Виконав: студент VI курсу  
групи Ен – 61 спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Гребьонкін А. В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник: \_\_\_\_\_ Левонюк В. Р.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент: \_\_\_\_\_ Бабич М. І.  
(прізвище та ініціали)

**ДУБЛЯНИ 2024**

□

□

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**  
**ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_

(підпис)

д.т.н., професор Калахан О. С.

(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Гребьонкін Андрій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Покращання пропускної здатності ліній електропередач 10 кВ»

(назва теми)

керівник роботи д.т.н., професор Калахан О. С.

(наук. ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП № 133 / к - с від 28.04.2023 р.

2. Строк подання студентом роботи 18.01.2024 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

1. Аналіз методів та засобів покращання пропускної здатності повітряних ЛЕП

2. Розробка моделі досліджуваного фрагмента електричної мережі

3. Покращання пропускної здатності ЛЕП

4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5. Техніко-економічна оцінка

Висновки

Перелік джерел посилання

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

Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	<i>Городецький І. М., к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання 28.04.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Проведення аналізу методів та засобів покращання пропускнуої здатності ЛЕП</i>	<i>28.04.2023 – 19.05.2023</i>	
2	<i>Розробка моделі досліджуваного фрагмента електричної мережі</i>	<i>22.05.2023 – 8.09.2023</i>	
3	<i>Покращання пропускнуої здатності ЛЕП</i>	<i>11.09.2023 – 24.11.2023</i>	
4	<i>Розробка логіко імітаційної моделі процесу виникнення травми при обслуговуванні вольтододатних трансформаторів</i>	<i>27.11.2023 – 8.12.2023</i>	
5	<i>Здійснення техніко-економічної оцінки прийнятих рішень</i>	<i>11.12.2023 – 22.12.2023</i>	
6	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	<i>25.12.2023 – 5.01.2024</i>	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	<i>8.01.2023 – 18.01.2023</i>	

Студент

Гребьонкін А. В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Калахан О. С.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

**УДК 621.111:6**

Гребьонкін А. В. «Покращання пропускної здатності ліній електропередач 10 кВ». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 56 с. текстової частини, 34 рисунки, 33 джерел.

У кваліфікаційній роботі представлено ключові результати проведеної роботи з покращання пропускної здатності ліній електропередач 10 кВ. Здійснено аналіз заходів, які стосуються покращання пропускної здатності повітряних ліній електропередач 10 кВ. Проведено обчислення збільшених показників витрат на реалізацію запропонованих заходів. Виконано техніко-економічне порівняння запропонованих варіантів та обрано найдешевший із них. Для розв'язання поставлених завдань було використано програмне забезпечення *Microsoft Excel* , *MathCad* , *RastrWin* . Для покращання пропускної спроможності ПЛ 10 кВ та забезпечення нормального рівня напруги у всіх вузлах розглянутої ділянки було запропоновано відповідні заходи. Розглянуто питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях. Здійснено техніко-економічне порівняння запропонованих заходів та детерміновано найоптимальніший з технічної та економічної точки зору варіант, який дасть змогу підвищити пропускну здатність ПЛ та забезпечити нормальну якість напруги на всій досліджуваній ділянці мережі.

**ПОКРАЩАННЯ, АНАЛІЗ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ТРАНСФОРМАТОР, ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.**



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПОКРАЩАННЯ ПРОПУСКНИЙ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛЕП .....	9
1.1 Поняття пропускної здатності ЛЕП.....	9
1.2 Способи покращання пропускної здатності ЛЕП.....	12
1.2.1 Застосування батарей статичних конденсаторів.....	13
1.2.2 Застосування установок поперечної та поздовжньої компенсації.....	15
1.2.3 Збільшення перерізу проводів ЛЕП.....	16
1.2.4 Збільшення класу номінальної напруги.....	16
1.2.5 Застосування лінійних вольтододатних трансформаторів.....	17
1.2.6 Застосування FACTS-технологій.....	18
2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ФРАГМЕНТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ .....	20
2.1 Опис досліджуваного фрагмента мережі .....	21
2.2 Розробка структурно-математичної моделі .....	21
3 ПОКРАЩАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЛЕП.....	27
3.1 Покращання пропускної здатності за допомогою вольтододатного трансформатора зі збільшенням перерізу проводів та додаванням контуру лінії.....	27
3.2 Покращання пропускної здатності за допомогою двох вольтододатних трансформаторів з додаванням контуру лінії.....	29
3.3 Покращання пропускної здатності за допомогою одного вольтододатного трансформатора з додаванням додаткових контурів лінії.....	32

3.4	Покращання пропускної здатності за допомогою двох вольтододатних трансформаторів зі збільшенням перерізів проводів.....	35
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	37
4.1	Основні фактори, які впливають на наслідок ураження електричним струмом.....	37
4.2	Розробка моделі процесу виникнення та формування виробничих небезпек при обслуговуванні вольтододатних трансформаторів.....	41
4.3	Розробка заходів із питань безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	45
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА .....	47
5.1	Обчислення капіталовкладень за збільшеними показниками витрат на реалізацію запропонованих заходів .....	47
5.1.1	Розрахунок вартості ПЛ 10 кВ.....	47
5.1.2	Розрахунок вартості пункту автоматичного регулювання напруги (ПАРН).....	49
5.1.3	Обчислення капіталовкладень на збільшення перетину проводів ліній.....	50
5.2	Техніко-економічне порівняння розглянутих варіантів.....	51
	ВИСНОВКИ.....	53
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	54

## ВСТУП

В сучасному світі електроенергетика відіграє важливу роль у задоволенні ростучих потреб суспільства. Забезпечення ефективної передачі електроенергії від джерел виробництва до кінцевих споживачів вимагає не лише розвитку нових джерел енергії, але і оптимізації існуючих електроенергетичних систем [1].

Одним із ключових аспектів оптимізації є підвищення пропускної спроможності ліній передачі електроенергії. Зменшення енергетичних втрат та підвищення надійності електромережі стають актуальними завданнями у зв'язку зі зростанням виробництва та споживання електроенергії [2].

У цьому контексті ця кваліфікаційна робота присвячена вивченню та реалізації заходів щодо покращення пропускної спроможності ліній передачі електроенергії. Дослідження включатиме аналіз існуючих технологій, експериментальні вимірювання та розробку інноваційних підходів до оптимізації передачі електроенергії.

У кваліфікаційній роботі розглядається комплексна задача покращання пропускної властивості ділянки електричної мережі 10 кВ, ключовим елементом якої є лінія електропередачі 10 кВ, сумарна протяжність якої становить понад 60 км. У цілях енергетичної безпеки України у цей нелегкий для вітчизняної енергетики час, зумовлений енергетично-ракетним терором зі стоони агресора ми не можемо повною мірою висвітлити схеми електричних мереж з реальним назвами підстанцій та інших елементів. Тому, згадані деталі у кваліфікаційній роботі будуть приховані [3].

На розглядуваній у кваліфікаційній роботі лінії електропередачі спостерігаються падіння напруги до 40 %. Відтак, для забезпечення необхідного рівня напруги потрібно підвищити пропускну здатність лінії електропередачі. При виборі заходів, потрібно враховувати не лише ефект від впровадження, але і затрати на його впровадження. Вибір найбільш ефективного заходу з

мінімальними затратами є актуальною задачею, яка має високе практичне значення.

**Метою** роботи є розробка конкретних рекомендацій та рішень, які сприятимуть покращанню режимів роботи та ефективному використанню існуючих електричних мереж 10 кВ.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі **завдання**:

- ✚ здійснити аналіз ряду заходів, спрямованих на покращання пропускної спроможності повітряної лінії електропередач 10 кВ;

- ✚ здійснити моделювання ділянки електричної мережі для різних режимів роботи, для наочного відтворення результатів покращання пропускних властивостей;

- ✚ здійснити обчислення укрупнених показників затрат на реалізацію запропонованих заходів;

- ✚ виконати техніко-економічне порівняння запропонованих варіантів.

**Об'єктом** кваліфікаційної роботи є ділянка електричної мережі 10 кВ, яким ключовим елементом якої є повітряна лінія електропередачі.

**Предметом** кваліфікаційної роботи є заходи покращання пропускної спроможності повітряних ліній електропередач.

**Методи дослідження**: методи аналізу даних, методи графічного моделювання та методи економічних розрахунків.



# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПОКРАЩАННЯ ПРОПУСКНИЙ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛЕП

## 1.1 Поняття пропускної здатності ЛЕП

Пропускна здатність ЛЕП – це значення активної потужності  $P$ , яку може передати лінія при виконанні умов, які визначають її нормальну роботу [4].

Розглянемо ПЛ без втрат, яка представлена лише індуктивним опором (рис. 1.1 *a, б*). Таке представлення не є припущенням, оскільки ємнісні струми по кінцях схеми (рис. 1.1) входять у струми  $I_1$  та  $I_2$  схеми на рис. 1.1 *б*. Звідки маємо  $I_1 = I_2 = I$ .

На рисунку 1.1 представлено схеми заміщення ПЛ без втрат (*a* – з ємнісними провідностями; *б* – зарядні струми враховано у струмах по кінцях лінії).

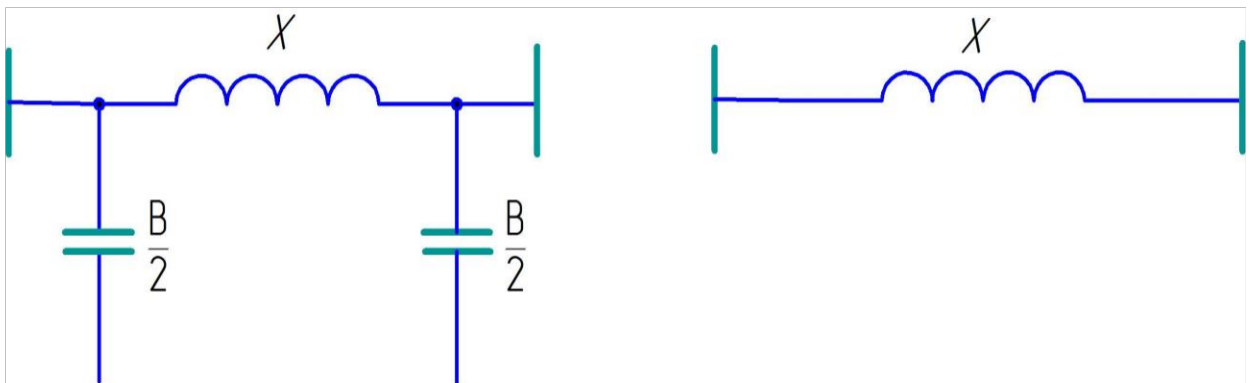


Рисунок 1.1 – Схеми заміщення ліній без урахування втрат [5]

На рисунку 1.2 представлено векторну діаграму ПЛ без втрат. Вектор падіння напруги на діаграмі визначається як [6]:

$$\Delta U = j\sqrt{3}XI_2. \quad (1.1)$$

Спроекувавши на уявну вісь вектори  $U_1$  та  $\Delta U$ , отримаємо співвідношення:

$$U_1 \sin \delta = \sqrt{3}XI_2 \cos \varphi. \quad (1.2)$$

Перемноживши обидві частини виразу (1.2) на  $U_2$  будемо мати [7]:

$$U_1 U_2 \sin \delta = \sqrt{3}XI_2 U_2 \cos \varphi. \quad (1.3)$$

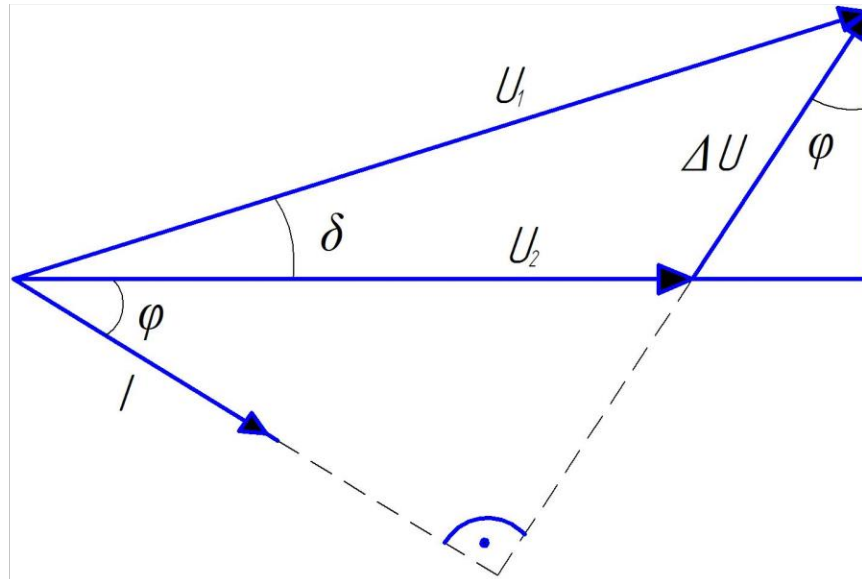


Рисунок 1.2 – Векторна діаграма лінії без втрат [8]

У формулі (1.3) є величина активної потужності  $\sqrt{3}I_2U_2 \cos \varphi$ , яка після перетворення буде мати вигляд:

$$P_1 = \frac{U_1U_2}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta, \quad (1.4)$$

або для ліній без втрат  $P = P_{\max} \sin \delta$ . Ця залежність представляється у вигляді синусоїди (рис. 1.3).

На рисунку 1.3 представлено характеристику потужності ЛЕП.

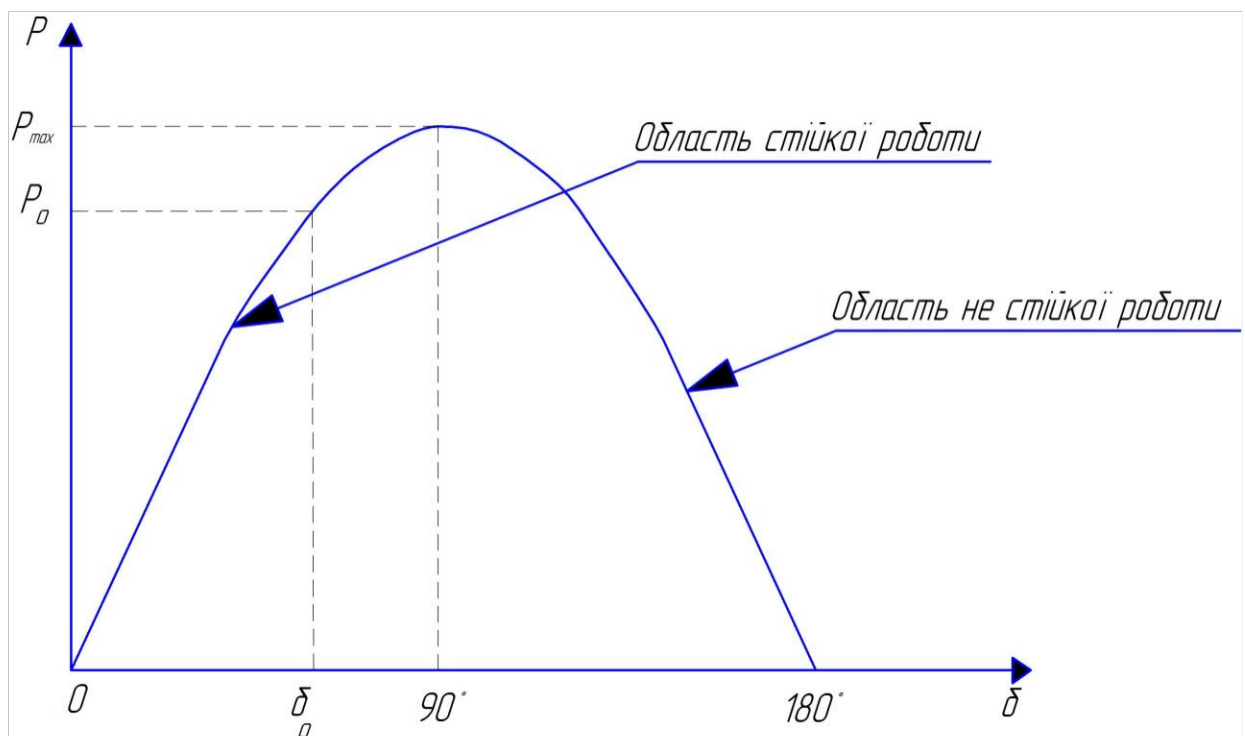


Рисунок 1.3 – Характеристика потужності ЛЕП

Максимальною величиною потужності ЛЕП  $P_{max}$  називається межа потужності, яка передається при куті  $\delta = 90^\circ$ . Стійка робота генераторів можлива лише при  $\delta < 90^\circ$  та на висхідній гілці синусоїди. Точка  $\delta = 90^\circ$  є граничною між областями стійкої та нестійкої роботи генераторів. Щоб запобігти виходу генераторів у нестійку область, роблять деякий запас стійкості, що дорівнює приблизно  $15\% P_{max}$ .

Через ЛЕП протікає струм  $I$ , який не може перевищувати гранично допустиме значення  $I < I_{доп}$ , який детермінується тепловими умовами роботи проводів. Для прикладу, оголені проводи не можна нагрівати до температури понад  $70^\circ$ . Значення  $I_{доп}$  зазначаються у довідковій літературі для кожної марки проводів.

Напруги по кінцях лінії  $U_1$  та  $U_2$  мають технічні та режимні обмеження як за мінімальними, так і за максимальними значенням. За умовами роботи електричної ізоляції ЛЕП допускається перевищення напруги щодо номінального значення не більше ніж: на  $20\%$  при  $U_{НОМ} < 20$  кВ;  $15\%$  при  $U_{НОМ} = 35 - 220$  кВ;  $10\%$  при  $U_{НОМ} = 330$  кВ;  $5\%$  при  $U_{НОМ} = 500$  кВ та вище.

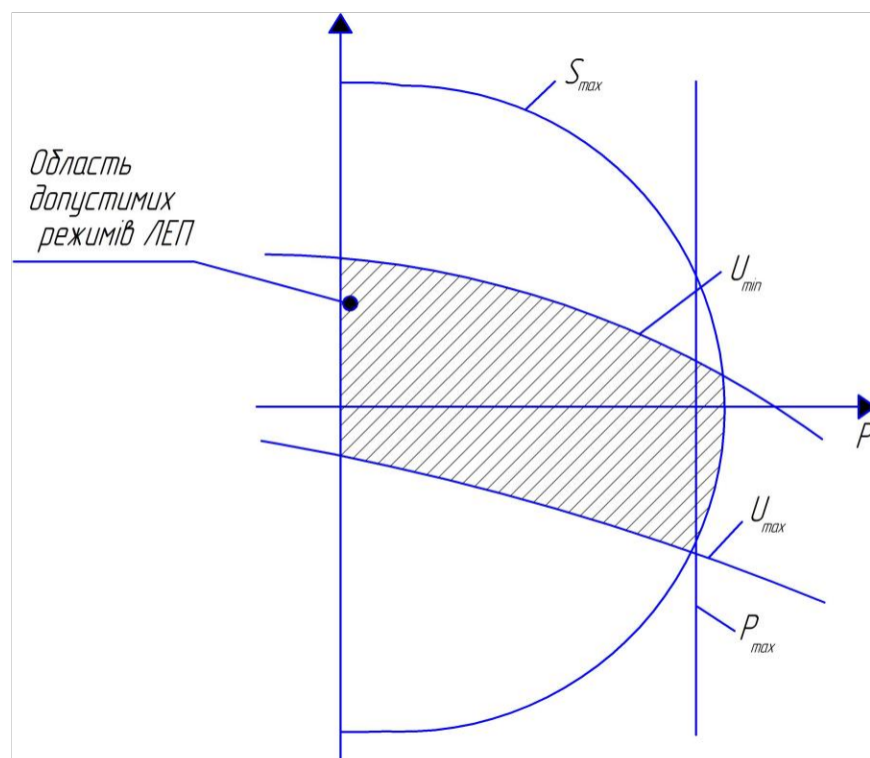


Рисунок 1.4 – Діаграма потужностей ЛЕП [9]

У силових трансформаторів можливе перевищення напруги щодо напруги робочого регульовального відгалуження не більше ніж на 5 %, що зумовлено неприпустимістю переходу трансформатора у режим роботи з нелінійною частиною характеристики намагнічування сердечника. Граничні максимальні та мінімальні значення напруг ЛЕП зумовлені вимогами регулювання напруги та стійкістю роботи генераторів. З урахуванням сказаного вище, обмеження на параметри режиму ЛЕП можна узагальнити на діаграмі потужностей ( $P, Q$ ) (рис. 1.4). На цій діаграмі потужностей у якості позитивно-прийнятого напрямку потужності від початку до кінця ЛЕП  $P$  та  $Q$  – перший квадрант.

На рисунку 1.4 представлено діаграму потужностей ЛЕП. Діаграму можна побудувати для початку та кінця лінії. З діаграми на рис. 1.4 бачимо, що пропускна здатність ЛЕП залежить від таких параметрів [10]:

- величини реактивної потужності, яка передається;
- гранично допустимого струму через проводи лінії;
- границі потужності, яка передається та запасу по стійкості;
- граничних значень напруг по кінцях ЛЕП.

## 1.2 Способи покращання пропускної здатності ЛЕП

Для забезпечення нормального рівня напруги за всією довжиною ЛЕП існують способи забезпечення нормального рівня напруги [11]:

- застосування батарей статичних конденсаторів;
- застосування установок поперечної та поздовжньої компенсації реактивної потужності;
- додавання контурів ЛЕП, збільшення перерізу проводів ЛЕП;
- встановлення вольтододаткових трансформаторів;
- підвищення номінальної напруги;
- застосування FACTS технологій.

**1.2.1 Застосування батарей статичних конденсаторів.** Конденсаторні установки – це набір батарей статичних конденсаторів, які можуть бути з'єднані між собою паралельно чи послідовно. Виготовляються вони як в однофазному, так і в трифазному виконанні на різні характеристики (напруга, потужність). Найбільш ефективне з'єднання фаз – у трикутник, оскільки потужність такої установки буде у 3 рази більша, ніж при з'єднанні фаз у зірку. Широко застосовуються на підприємствах як засіб компенсації реактивної потужності. Вони випускаються у широкому діапазоні потужностей та напруг, мають можливість ступінчастого регулювання на різні діапазони потужності [12].

Розглянемо основні переваги компенсації за допомогою конденсаторних установок. До основних переваг конденсаторних установок для компенсації реактивної потужності можна віднести:

- ✚ простоту конструкції;
- ✚ невелику вартість;
- ✚ малі габарити установок;
- ✚ простота в керуванні;
- ✚ зменшення навантаження;
- ✚ економія електроенергії;
- ✚ покращання якості електроенергії;
- ✚ зменшення витрат.

Існують такі види компенсації реактивної потужності [13]:

- ✚ індивідуальна компенсація – у цьому випадку конденсаторні батареї ставляться до кожного електричного споживача. Наприклад, до кожного електродвигуна, в такому випадку виходить, що режим компенсації є найоптимальніший. Оскільки потрібна реактивна потужність генерується безпосередньо на затискачах двигуна, а конденсатор не навантажує мережу реактивною потужністю. Недоліком цього виду компенсації є низький економічний ефект, оскільки термін окупності встановлення таких батарей є

надто великим. Такий спосіб дає змогу компенсувати реактивну потужність на найбільш потужних електродвигунах (індивідуально);

✚ групова компенсація – це групова установка, яка під'єднується на цілий ряд електричних споживачів до розподільчих шин до 1 кВ, або до шиннапругою вище 1 кВ, але в такому випадку якість компенсації реактивної потужності задовільняється частково. Групову установку можна поставити безпосередньо на електричному ввіді до підприємства (сторона високої напруги), але для підприємства ніякого суттєвого ефекту не створить, оскільки суттєвого ефекту це не спричинить, оскільки мереже всерівно буде навантажена реактивними струмами;

✚ централізована компенсація – у цьому випадку може встановлюватися як на стороні вищої напруги (підключення до шин 10 кВ), так і на стороні нижчої напруги (підключення до шин 0,4 кВ) [14].

На рис. 1.5 представлено види компенсації реактивної потужності за способом підключення компенсаційних пристроїв.

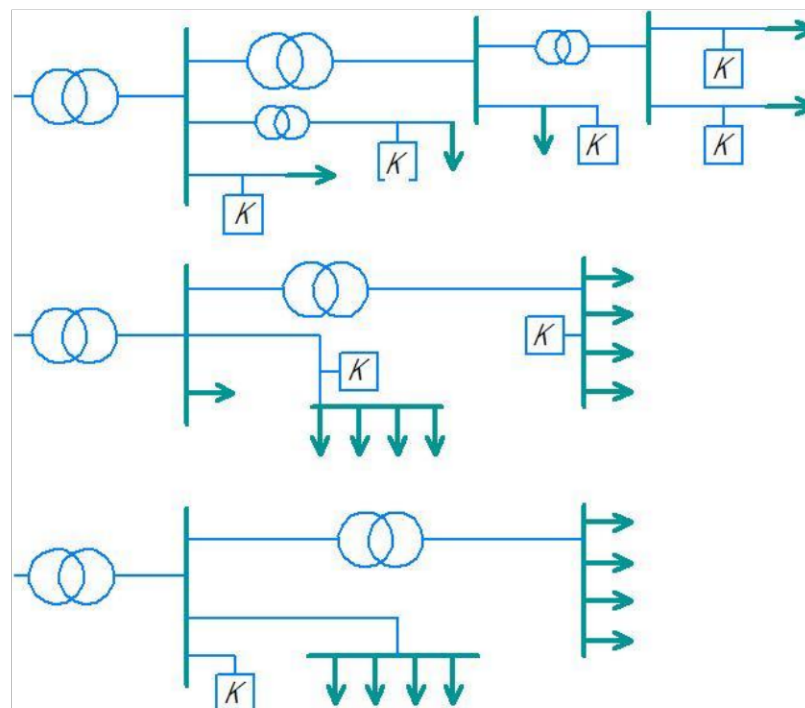


Рисунок 1.5 – Види компенсації реактивної потужності

Кількість конденсаторів, які підключаються, визначає кількість ступенів регулювання. Кожен ступінь характеризується потужністю у кВАр,

яку вона компенсує, тобто це реактивна потужність, яка протікає через конденсаторні батарею.

**1.2.2 Застосування установок поперечної та поздовжньої компенсації.** Установки поздовжньої та поперечної компенсації використовуються для компенсації реактивної потужності на підприємстві. Такі установки доцільно застосовувати на підприємствах, де йде роздільний облік електричної енергії, тобто окремо облікується активна та реактивна електрична енергія. Застосування конденсаторних установок дає змогу заощаджувати реактивну електричну енергію до 70 % (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд установки поперечної компенсації [15]

Принцип роботи такої компенсаційної установки є надзвичайно простим. Мікропроцесорний регулятор, який підключається до трансформатора струму на ввідному фідері підприємства, зчитує інформацію про роботу мережі, яка визначає значення реактивної потужності у

відповідний момент часу, аналізує її значення та включає за допомогою магнітних пускачів потрібну конденсаторну батарею, тобто регулятор постійно аналізує мережу і дає команди на магнітні пускачі для увімкнення або вимкнення. Кожен ступінь компенсації реактивної потужності захищений блок-рубильником з патронними запобіжниками, на ввіді установки стоїть автоматичний вимикач, також на ввіді може ставитися рубильник із запобіжниками, рубильник використовується для забезпечення видимого розриву, щоб можна було безпечно обслуговувати цю конденсаторну установку.

За місцем встановлення в електричній мережі підприємства та зоні дії установки компенсації реактивної потужності поділяються на [16]:

- ✚ установки поперечної компенсації – компенсаційні установки, які встановлюються у розподільчих пристроях, де конденсатори підключаються паралельно до вводів шин;

- ✚ установки поздовжньої компенсації – у цих установках конденсатори включаються послідовно з лінією та використовуються в основному на протяжних лініях електропередач, для досягнення максимально техніко-економічного ефекту.

Одним із недоліків поздовжньої компенсації є можливе виникнення резонансу.

**1.2.3 Збільшення перерізу проводів ЛЕП.** Перетин проводів ліній електропередач має визначатися з урахуванням як технічних, так і економічних вимог. Перші з них визначають необхідність обчислення проводів як за умовами нагріву, так і втратою напруги, оскільки при передачі високих навантажень визначальним є нагрівання, а при відносно великих навантаженнях – відстань, з якою безпосередньо пов'язані втрати напруги [17].



**1.2.4 Збільшення класу номінальної напруги.** Цей захід є витратним, оскільки на живильній підстанції буде потрібно повна заміна трансформаторів, а також трансформаторів, які знаходяться на підстанціях споживачів [18].

**1.2.5 Застосування лінійних вольтододатних трансформаторів.** Нині одним із аспектів розвитку електроенергетики є, питання модернізації та впровадження сучасних технологій генерації та передавання електричної енергії. Одним із можливих вирішень цих питань, є використання вольтододатних трансформаторів у розподільчих мережах. Застосування вольтододатних трансформаторів є однією зі складових проекту «розумні мережі», здатних підвищувати якість електропостачання шляхом застосування мереж сучасних пристроїв.

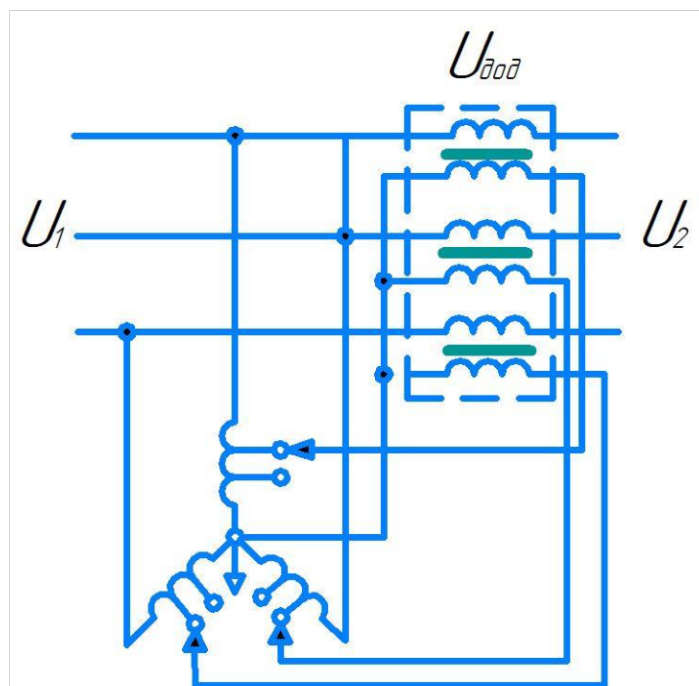


Рисунок 1.7 – Принципова схема увімкнення вольтододатного трансформатора

Вольтододатний трансформатор (ВТ) це електричний трансформатор зі змінним коефіцієнтом трансформації, який включається своєю вторинною обмоткою послідовно у вторинний контур обмотки іншого (основного) трансформатора для регулювання або стабілізації напруги у контурі навантаження. Первинна обмотка ВТ живиться через регульований автотрансформатор від обмотки нижчої напруги основного трансформатора.

Одним із різновидів ВТ є лінійні трансформатори для поперечного регулювання, які дають змогу зсувати по фазі напругу мережі, не змінюючи його значення. У цьому випадку первинна обмотка регульованого автотрансформатор кожної фази включається на лінійну напругу двох ін фаз. Внаслідок покращання коефіцієнта потужності досягається зниження втрат напруги (енергії) в електричній мережі. За допомогою ВТ можна забезпечити регулювання напруги в межах 15 % [19].

Вольтоподатні трансформатори призначені для підвищення та стабілізації рівня напруги у мережі, а також збільшення її пропускної спроможності. Використання ВТ є актуальним у випадках великої протяжності ліній електропередач, коли встановлення додаткової трансформаторної підстанції не виправдовується через невелику кількість споживачів, розташування у важкодоступній місцевості, або у випадках, коли необхідна тимчасова установка бустера до проведення реконструкції ПЛ. Витрати на встановлення бустерів є значно нижчими від витрат на реконструкцію ЛЕП. Окрім цього, ці пристрої сприяють більш надійній та безпечній експлуатації ЛЕП.

**1.2.6 Застосування FACTS-технологій.** Нині все ширшого і ширшого використання набувають FACTS-технології. FACTS – це це гнучкі системи пересилання змінного струму. Ці технології знайшли свої використання у збільшення пропускної здатності ліній. Завдяки розвитку силової електроніки, інженери озробили пристрої, які можуть впливати відразу на декілька параметрів ЛЕП:

- ✚ напругу на початку та в кінці ЛЕП
- ✚ індуктивний опір ЛЕП;
- ✚ кут навантаження ЛЕП (кут зсуву фаз між векторами початкової та кінцевої напруги лінії).

Один із таких пристроїв є перетворювач напруги. Схема одномостового перетворювача напруги представлена на рисунку 1.8.

Перетворювач напруги можна представити у вигляді статичного аналога синхронної машини, у якій регульована напруга  $U_d$  джерела постійного струму – це еквівалент напруги (струму) ротора, напівпровідниковий комутатор – еквівалент статора, а кут керування – регулятор енергоносія (вода, пара, газ) турбіни або навантаження помпи. При цьому статична синхронна машина охоплює всі чотири квадранти режимів роботи: генератор, двигун з генерацією та споживанням реактивної потужності, що відповідає режимам перетворювача: інвертор, випрямляч з генерацією та споживанням реактивної потужності.

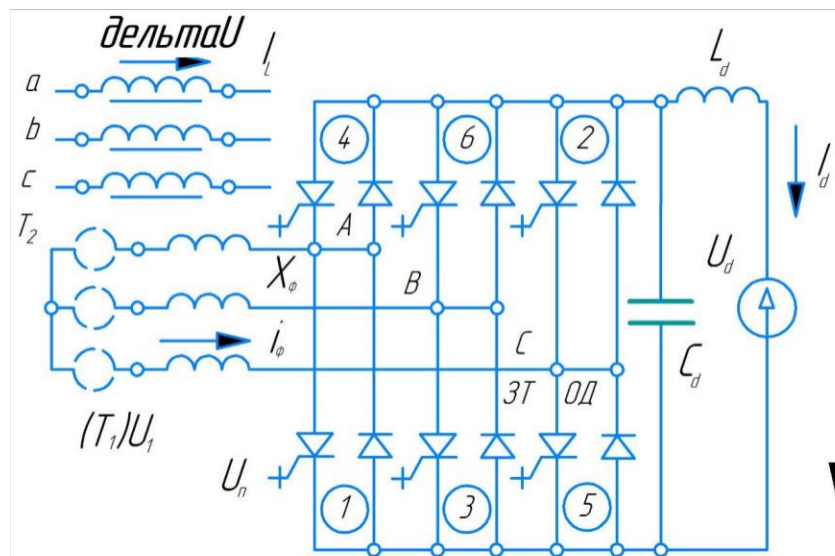


Рисунок 1.8 – Схема одномостового перетворювача напруги

Нині вже вирішилося питання питання про реалізацію міжнародних проектів з об'єднання енергосистеми України з Європейською енергетичною системою, і з 1 січня 2024 року вони мають почати працювати спільно, що дасть змогу найбільш економічно реалізувати надлишки електроенергії кожного учасника об'єднання, а також здійснювати взаємну допомогу при позаштатних ситуаціях, наприклад, післяаварійних режимах роботи окремих енергосистем.

Об'єднання енергетичних систем, таке як вступ до Європейського об'єднання національних операційних систем передачі електроенергії (ENTSO-E), має ряд важливих переваг для України. По-перше, це сприяє підвищенню стабільності та надійності електроенергетичної системи, оскільки об'єднані системи можуть спільно реагувати на непередбачувані

ситуації та вирівнювати коливання виробництва та споживання електроенергії [20].

Подальшою перевагою є сприяння ефективнішому використанню ресурсів і розвитку ринку електроенергії. Об'єднання енергетичних систем дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів та забезпечити ефективну торгівлю електроенергією між країнами. Це може призвести до зменшення залежності від одного джерела енергії, підвищити конкурентоспроможність ринку та сприяти сталому розвитку енергетичного сектору.

## 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ФРАГМЕНТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Використання математичного моделювання в електроенергетиці є ключовим елементом для оптимізації та ефективного управління енергетичними системами. Позитивні сторони цього підходу включають [21]:

- ✚ прогнозування та оптимізацію: математичні моделі дозволяють електроенергетичним компаніям розробляти точні прогнози щодо виробництва та споживання електроенергії. Це важливо для планування енергетичних потреб та оптимізації роботи генеруючих установок, що сприяє ефективному використанню ресурсів;

- ✚ управління енергосистемою: математичне моделювання дозволяє прогнозувати та керувати роботою енергосистеми в режимі реального часу. Це включає в себе балансування навантаження, регулювання напруги та забезпечення стійкості системи при змінних умовах;

- ✚ ефективність виробництва: моделі дозволяють аналізувати ефективність різних технологій виробництва електроенергії, враховуючи різні фактори, такі як вартість палива, технічні характеристики устаткування та викиди.

- ✚ розробка нових проектів та планування розвитку: математичне моделювання використовується для прогнозування результатів нових енергетичних проектів та розробки стратегій розвитку. Це допомагає приймати інформовані рішення щодо інвестицій та вдосконалення інфраструктури;

- ✚ зменшення втрат та ефективніше використання ресурсів: математичне моделювання дозволяє визначити оптимальні шляхи передачі електроенергії, що допомагає зменшити енергетичні втрати та забезпечити ефективніше використання електромережі.

Загалом, математичне моделювання є потужним інструментом для покращення функціонування та розвитку електроенергетичних систем,

сприяючи створенню стабільних, ефективних та сталих енергетичних інфраструктур.

## 2.1 Опис досліджуваного фрагмента мережі

Ділянка електричної мережі бере початок від ПС 35/10 кВ, заживлюючи при цьому багато споживачів. На рисунку 2.1 представлено принципову схему досліджуваної лінії електропередачі 10 кВ.

Сумарна довжина головної ділянки становить 61 км, яка виконана проводами А-95 довжиною 16 км, А-70 довжиною 18 км, А-50 довжиною 12 км, АС-50 довжиною 1,3 км, А- 35 довжиною 7 км та АС-35 довжиною 4 км.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 2.1 – Схема досліджуваної повітряної лінії електропередачі

## 2.2 Розробка структурно-математичної моделі

Усі дослідження при виконанні кваліфікаційної роботи здійснювалися у програмному комплексі *RastrWin* . Програмний комплекс *RastrWin* призначений для вирішення завдань з розрахунку, аналізу та оптимізації режимів електричних мереж та систем [22].

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

## Рисунок 2.2 – Задання параметрів вузлів у програмному комплексі *RastrWin*

Створення моделі потребує задання вузлів та ліній електричної мережі, а також типів та параметрів вузлів та ліній. Параметрами вузлів є їх номінальні напруги та приєднані потужності. Лінії моделі – це ділянки мережі між двома вузлами, які можуть бути вимикачами, ЛЕП і трансформаторами. До параметрів ліній відносяться опори, провідності початку та кінця лінії, а також коефіцієнт трансформації, якщо лінія моделі є трансформатором. Параметри трансформаторів повинні бути приведені до напруги первинної обмотки трансформатора з урахуванням положення пристроїв РПН та ПБЗ [23].

Тому першим етапом моделювання електричної мережі є визначення параметрів її елементів та обчислення параметрів схеми заміщення цих елементів за відомими з курсу «Основи електропостачання» виразами.

При створенні моделі в програмному комплексі *RastrWin* визначальними є параметри гілок (трансформатори, ЛЕП) та параметри вузлів (навантаження). Розрахунок параметрів було виконано на підставі даних, наданих ПрАТ «Львівобленерго».

Модель створюється шляхом внесення до таблиць програми вузлів та гілок. Також задаються параметри трансформаторів та анцапф для створення зручного керування ПБЗ та РПН.

Задання параметрів вузлів у програмному комплексі *RastrWin* представлено на рисунку 2.2, а на рисунку 2.3 представлено задання параметрів гілок у програмному комплексі *RastrWin*.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 2.3 – Вікно задання параметрів гілок у програмному комплексі *RastrWin*

На рисунку 2.4 представлено вікно задання параметрів трансформатора, а на рисунку 2.5 параметри анцапф.



Рисунок 2.4 – Вікно задання параметрів трансформатора

	N_bd	Назва	ЕИ	+/-	Тип	Место	K...	V_нр	V_per	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг
1	1	РПН	%	+	РПН	ВН	1	10,5	37,0	8	1,500	8	1,500				
2	2	ПБВ	%	+	РПН	НН	1	37,0	10,5	2	2,500	2	2,500				

Рисунок 2.5 – Вікно задання параметрів анцапф трансформатора

На рисунку 2.6 представлено вікно задання параметрів струмового навантаження.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 2.6 – Вікно задання параметрів струмового навантаження



На рисунку 2.7 та 2.8 представлено вікна введення параметрів статичних характеристик навантаження та параметри втрат в мережі, відповідно.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 2.7 – Вікно задання параметрів статичних характеристик навантаження

	U_ном	dP	dP_ЛЭП	dP_Тр-р	Корона	XX_тр	dP_Ш-нт	dQ	dQ_ЛЭП	dQ_Тр-р	Q_Ген_ЛЭП	Q_XX_тр
1	10	0,31	0,31					0,20	0,20			
2	35	0,05				0,05		0,19		0,01		0,18

Рисунок 2.8 – Вікно задання параметрів втрат в мережі

З рисунку 2.7 бачимо, що струм на початку головної ділянки становить 80 А, відтак, можна дійти невтішного висновку про достовірність результатів моделювання схеми мережі.

У кваліфікаційній роботі під час моделювання схеми фрагмента мережі було застосовано так звані статичні характеристики електричних навантажень. Статичні характеристики навантаження – це залежність споживаної активної потужності вузлом навантаження від напруги та частоти у вузлі  $P = f(u, f)$ . Аналогічні характеристики було задіяно і для реактивної потужності  $Q = f(u, f)$  [24].

У кваліфікаційній роботі у якості статичних характеристик навантаження було використано статичні характеристики навантаження №3 для сільськогосподарських районів. Також, варто відзначити, що в усіх подальших моделюваннях теж будуть використовуватися ці характеристики.

Після введення усіх вищезазначених даних було створено графічну модель фрагмента мережі, яка представлена на рисунку 2.9.

Для зручного використання моделі, у ній було здійснено налаштування градієнту, який відображає зеленим кольором, якщо напруга в мережі знаходиться на належному рівні, і червоним – якщо є відхилення напруги. З рисунку 2.9 бачимо, що досліджуваний фрагмент мережі має суттєві

проблеми з рівнем напруги. При великих навантаженнях, через малі перерізи проводів відбувається велика втрата напруги і потужності.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 2.9 – Модель фрагмента електричної мережі у програмному комплексі

## **3 ПОКРАЩАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЛЕП**

### **3.1 Покращання пропускної здатності за допомогою вольтододатного трансформатора зі збільшенням перерізу проводів та додаванням контуру лінії**

Першим заходом, який було проведено, це в мережу встановлено вольтододатний трансформатор. Разом із цим було збільшено перерізи проводів деяких ділянок мережі та додано додаткові контури лінії електропередачі. На основі описаних дій було проведено моделювання на розробленій моделі [25].

На рис. 3.1 представлено вікно введення параметрів вузлів, а на рис. 3.2 – вікно введення параметрів гілок мережі для цього досліду.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.1 – Вікно введення параметрів вузлів для першого експерименту

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.2 – Вікно введення параметрів гілок для першого експерименту

На рисунках 3.3 та 3.4 представлено введення параметрів трансформаторів та параметрів анцапф для регулювання напруги.

Рисунок 3.3 – Введення параметрів трансформаторів мережі

	N_bd	Названия	ЕМ	+/-	Тип	Место	К...	V_нр	V_рег	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг
1	1	РПН	%	+	РПН	ВН	1	10,5	37,0	8	1,500	8	1,500
2	2	ПБВ	%	+	РПН	НН	1	37,0	10,5	2	2,500	2	2,500
3	3	ВДТ	%	+	РПН	НН	1	10,0	10,0	16	0,938	16	0,938

Рисунок 3.4 – Введення параметрів анцапф трансформаторів

Після введення усіх необхідних даних, було здійснено симуляцію роботи досліджуваного фрагмента мережі. Отриману модель мережі для першого експерименту представлено на рисунку 3.5.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.5 – Модель фрагмента мережі після першого експерименту

У першому експерименті було додано другий контур ділянки лінії електропередачі, яка проходить від опори 1 до опори 201, довжина цієї ділянки становить 16 км, а лінія виконана проводом марки А-95. Вольтододатний трансформатор було встановлено між опорами 202 та 375. Виконані дії суттєво покращили ситуацію у плані напруги на головній ділянці мережі. З рисунку 3.5 бачимо, що на жодній ділянці лінії немає відхилення напруги більше, ніж на 10 % [26]. Також, було здійснено збільшення перерізу ділянок, які мали переріз проводів А-35, А-50, А-70 на провід марки А-95. За

допомогою цього заходу вдалося знизити втрати в ЛЕП, які становили 0,31 МВт до 0,26 МВт після проведення симуляції. Струм на початку головної ділянки становив 96 А.

### **3.2 Покращання пропускної здатності за допомогою двох вольтододатних трансформаторів з додаванням контуру лінії**

Цей експеримент дещо схожий на той, який було представлено у попередньому пункті 3.1, але вже без зміни перерізів проводів. Також у цьому експерименті використано два вольтододатних трансформатори замість одного.

На рисунках 3.6 та 3.7 представлено вікна введення параметри вузлів та параметрів гідок програмному комплексу *RastrWin*.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.6 – Вікно введення параметрів вузлів для другого експерименту

Параметри трансформаторів та анцапф залишилися без змін і були представлені у попередньому експерименті.

У цьому експерименті було додано другий контур для лінії, яка проходить від оп. 1 до оп. 201, довжина цієї ділянки становить 16 км, лінія виконана проводом марки А-95. Один вольтододатний трансформатор був поміщений між опорами 202 та 375, а інший – між опорами 405 та 526. Ці заходи суттєво покращили ситуацію у плані напруги на головній ділянці. З рисунку 3.8 бачимо, що тепер на жодній лінії немає відхилення напруги більше ніж на 10 %. Перерізи проводів інших ділянок мережі залишилися безх

змін і відповідають вихідним даним для досліджень. В результаті цього, втрати потужності у лінії електропередачі збільшилися з 0,31 МВт у вихідному стані до 0,43 МВт у цьому експерименті. Струм на початку головної ділянки становив 107 А.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.7– Вікно введення параметрів гілок для другого експерименту

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.8 – Модель фрагмента мережі після другого експерименту

### **3.3 Покращання пропускної здатності за допомогою одного вольтодобавочного трансформатора з додаванням додаткових контурів лінії**

У цьому досліді було здійснено моделювання за умови використання одного вольтодобавочного трансформатора з додатковим додавання контурів деяких ділянок ліній.

На рисунках 3.9 та 3.10 представлено вікна введення параметрів вузлів та гілок, відповідно.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.9 – Вікно введення параметрів вузлів для третього дослідю

У цьому досліді ми не наводимо введення параметрів трансформатора та параметрів анцапф, оскільки вони залишаються незмінними.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України



Рисунок 3.10 – Вікно введення параметрів гілок для третього досліді

На рисунку 3.11 представлена модель фрагмента електричної мережі після проведення третього досліді.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.11 – Модель фрагмента мережі після третього досліді

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.12 – Вікно введення параметрів вузлів для четвертого досліді

У третьому досліді було додано другий контур для лінії, яка проходить від опори 1 до опори 201, довжина цієї ділянки становить 16 км, лінія виконана проводом марки А-95; від опори 202 до опори 375, довжина цієї ділянки становить 14 км, лінія виконана проводом марки А-70; від опори 375 до опори 381, довжина ділянки становить 0,48 км, лінія виконана проводом

марки А-70; від опори 385 до 391, довжина ділянки становить 0,48 км, лінія виконана проводом марки А-70; від опори 639 до опори 648, довжина ділянки становить 0,43 км, лінія виконана проводом марки А-70. Вольтододатний трансформатор було розміщено між опорами 405 та 526. Ці заходи значно покращили ситуацію у плані напруги на головній ділянці [27]. З рисунку 3.11 бачимо, що на жодній ділянці лінії немає відхилення напруги більше ніж на 10 %. Перерізи проводів залишилися без зміни та відповідають початковому виду ділянки. Застосування цих заходів дало змогу зменшити втрати потужності у лініях електропередач з 0,31 МВт до 0,27 МВт. Струм на початку головної ділянки становив 46 А.

#### **3.4 Покращання пропускної здатності за допомогою двох вольтододатних трансформаторів зі збільшенням перерізів проводів**

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.13 – Вікно введення параметрів гілок для четвертого дослідю

Цей дослід схожий на той, який було описано у пункті 3.1. Різниця полягає в тому, що задіяно два вольтододатних трансформатори, а не один, без додавання додаткових контурів ЛЕП.

На рисунку 3.12 представлено вікно введення параметрів вузлів для четвертого дослідження, а на рисунку 3.13 вікно введення параметрів гілок.

Аналогічно до попереднього дослідження, параметри трансформаторів та налаштування анцапф залишилися незмінними.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.14 – Модель фрагмента мережі після четвертого дослідження

У четвертому дослідженні перший вольтодобутий трансформатор було встановлено між опорами 202 та 375, другий – між опорами 405 та 526. Бачимо, що ці заходи значно покращили ситуацію щодо напруги на головній ділянці. З рисунку 3.14 бачимо, що частина ділянок мережі працює в нормальній режимі (зеленого кольору), а інша має відхилення за напругою понад 10 % (червоного кольору) [28]. Також, було збільшено перерізи проводів ділянок, які були виконані проводами марок А-35, А-50 та А-70 на А-95. Варто відзначити, що внаслідок проведених заходів збільшилися втрати потужності в мережі з 0,31 МВт до 0,41 МВт. Струм на початку головної ділянки становив 107 А.



## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Основні фактори, які впливають на наслідок ураження електричним струмом

При ураженні людини електричним струмом, основним вражаючим фактором є величина струму, яка проходить через її тіло. При цьому ступінь негативного впливу струму на організм людини збільшується із зростанням струму. Разом з тим результат ураження визначається тривалістю проходження струму, його частотою, а також деякими іншими факторами.

Розглянемо докладніше, як змінюється небезпека впливу на людину струму залежно від його величини. При цьому будемо вважати, що струм через людину проходить найбільш типовими шляхами, а саме від руки до руки або від руки до ніг [29].

**Відчутний струм.** Людина починає відчувати вплив струму, за його величини в середньому близько 1,1 мА при змінному струмі частотою 50 Гц і близько 6 мА при постійному струмі. Цей вплив обмежується при змінному струмі слабким свербіжем й легким пощипуванням (поколюванням), а при постійному струмі – відчуттям нагрівання шкіри на ділянці, що торкається струмовідної частини.

Електричний струм, який викликає при проходженні через організм відчутні подразнення, називається відчутним струмом, а найменше значення цього струму називається граничним відчутним струмом. Значення граничних відчутних струмів у різних людей різні. Граничний відчутний струм не може викликати ураження людини, і в цьому розумінні він не є небезпечним. Однак тривале (протягом декількох хвилин) проходження цього струму через людину може негативно позначитися на стані її здоров'я й тому неприпустиме. Крім того, відчутний струм може стати непрямою причиною нещасного випадку, оскільки людина, відчувши вплив струму, втрачає впевненість у своїй безпеці й може вчинити неправильні дії.

Особливо небезпечний несподіваний вплив відчутного струму, що викликає мимовільні помилкові дії людини, які збільшують небезпеку для неї при роботах поблизу струмовідних частин, на висоті й в інших аналогічних умовах.

Безпечний струм, який довгостроково (протягом декількох годин) може проходити через людину, не завдаючи їй шкоди й не викликаючи жодних відчуттів, очевидно, у багато разів менший граничного відчутного струму. З метою практичності найбільші значення безпечного струму приймають рівними 50 мкА при 50 Гц і 100 мкА при постійному струмі.

**Невідпускаючий струм.** Збільшення струму понад граничного відчутного викликає в людини судоми м'язів та болісні відчуття, які із зростанням струму посилюються й поширюються на все більші ділянки тіла. При струмі у середньому близько 15 мА (50 Гц) біль стає ледь стерпним, а судоми м'язів рук виявляються настільки значними, що людина не в змозі їх перебороти. У результаті вона не може розтиснути руку, у якій затиснута струмовідна частина, і опиняється ніби прикутою до неї [29].

Електричний струм, який викликає при проходженні через людину непереборні судорожні скорочення м'язів руки, у якій затиснуто провідник, називається невідпускаючим струмом, а найменше його значення – граничним невідпускаючим струмом.

Для змінного струму частотою 50 Гц величина невідпускаючого струму становить 10 – 15 мА, для постійного струму – 50 – 80 мА. Струм, що перевищує граничний невідпускаючий, посилює судорожні скорочення м'язів і болісні відчуття, які поширюються на більш велику ділянку тіла людини, ніж при граничному невідпускаючому струмі. У результаті дихальні рухи грудної клітки сильно утруднюються. У випадку тривалого впливу цього струму дихання може виявитися неможливим, після чого за кілька хвилин настане смерть від асфіксії. Цей струм одночасно викликає звуження кровоносних судин, що призводить до підвищення артеріального тиску крові й утруднення роботи серця. Тривалий вплив цього струму викликає

ослаблення діяльності серця і як наслідок цього – втрату свідомості, а іноді й зупинку серця.

**Фібриляційний струм.** Струм 50 мА й більше при 50 Гц, проходячи через тіло людини, викликає звичайно через 1 – 3 с фібриляцію серця. При цьому припиняється кровообіг і, отже, в організмі виникає нестача кисню; це у свою чергу швидко призводить до припинення дихання, тобто настає смерть.

Електричний струм, який викликає при проходженні через організм фібриляцію серця, називається *фібриляційним струмом*, а найменше його значення – *граничним фібриляційним струмом*. При частоті 50 Гц фібриляційними є струми в межах від 50 мА до 5 А, а середнє значення граничного фібриляційного струму складає приблизно 100 мА. При постійному струмі середнім значенням граничного фібриляційного струму можна вважати 300 мА, а верхньою границею – 5 А [29].

**Струм більше 5 А**, як змінний при 50 Гц, так і постійний, викликає негайну зупинку серця, минаючи стан фібриляції. Якщо дія струму була короткочасною (1 – 2 с) і не спричинила ушкодження серця (у результаті нагрівання, опіку тощо), після вимикання струму воно, як правило, самостійно відновлює нормальну діяльність. При великих струмах, навіть у випадку їх короткочасного впливу, поряд із зупинкою серця відбувається й параліч дихання. Після вимикання струму дихання, як правило, самостійно не відновлюється, і потрібна негайна допомога потерпілому у вигляді штучного дихання. Тривала (кілька секунд) дія великого струму супроводжується не тільки зупинкою серця й припиненням дихання, але й великими й глибокими опіками тіла, руйнуванням внутрішньої структури тканин організму й іншими важкими ушкодженнями окремих органів, у тому числі серця, які, як правило, призводять до загибелі організму.

Аналіз нещасних випадків ураження електричним струмом показує, що тривалість проходження струму через організм істотно впливає на результат ураження: чим триваліша дія струму, тим більша ймовірність важкого або смертельного результату. Така залежність пояснюється тим, що зі

збільшенням часу дії струму на живу тканину зростає його величина, накопичуються наслідки дії струму на організм і, нарешті, підвищується ймовірність збігу моменту проходження струму через серце з фазою Т серцевого циклу (кардіоциклу).

Зростання струму зі збільшенням часу його дії пояснюється зменшенням опору тіла людини, що докладно розглянуто вище. Наслідки дії струму на організм виявляються в порушенні функцій центральної нервової системи, зміні складу крові, місцевому руйнуванню тканин організму під впливом теплоти, що виділяється, порушенні роботи серця й легенів тощо. Очевидно, що зі збільшенням часу дії струму ці негативні фактори накопичуються, а згубний вплив їх на стан організму посилюється.

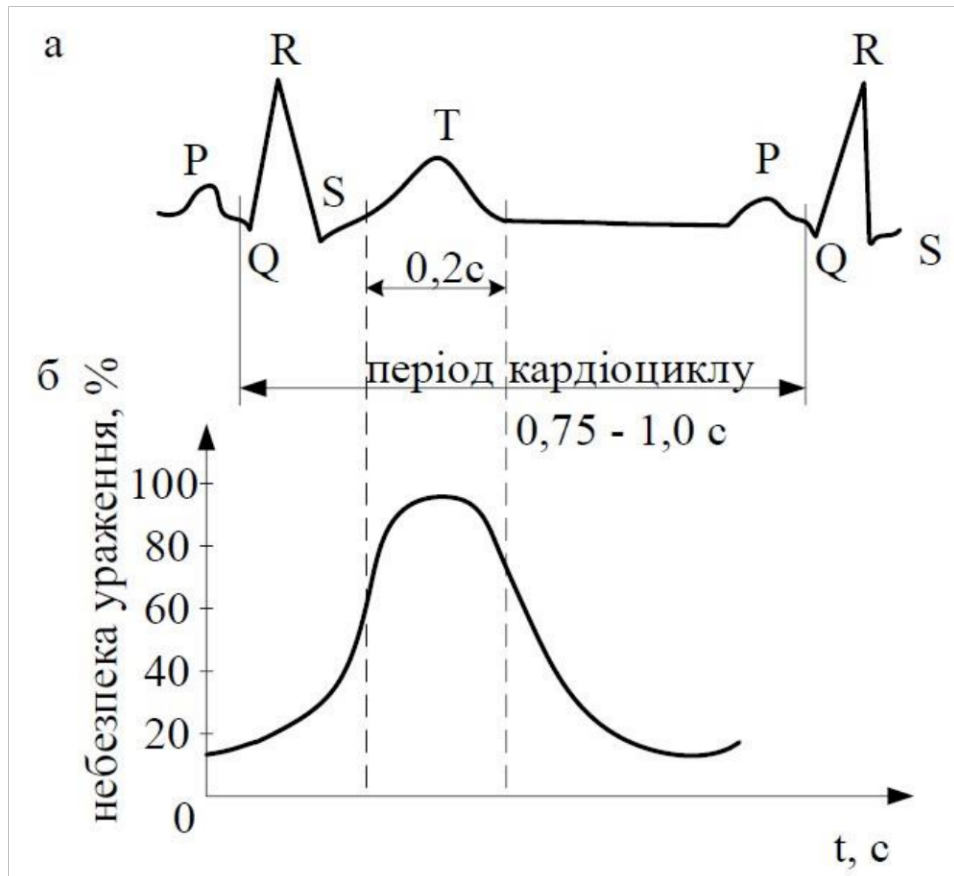


Рисунок 4.1 – Залежність небезпеки ураження від збігу часу протікання струму через серце з фазою Т кардіоциклу: а – електрокардіограма здорової людини (у схематизованому вигляді); б – залежність небезпеки ураження від моменту протікання струму через серце [29]

Небезпека збігу моменту проходження струму через серце з фазою Т кардіоциклу полягає в тому, що чутливість серця до електричного струму

неоднакова в різні фази його діяльності. Найбільш уразливим серце виявляється у фазі Т, коли закінчується скорочення шлуночків, і вони переходять у розслаблений стан.

Тривалість цієї фази близько 0,2 с. Тому, якщо під час фази Т через серце проходить струм, то при деякому його значенні виникає фібриляція серця; якщо ж час проходження цього струму не збігається з фазою Т, то ймовірність виникнення фібриляції різко зменшується (рис. 4.1).

#### **4.2 Розробка моделі процесу виникнення та формування виробничих небезпек при обслуговуванні вольтодатних трансформаторів**

Використання методу, який розроблений Д. Хенлі та Х. Кумамото, дає можливість шляхом побудови «дерева» відмов та помилок операторів різних систем вести математичну обробку моделі з метою одержання ймовірності виникнення таких випадкових подій, як аварія, травма, катастрофа [30].

Наведемо основні принципи побудови логічно-імітаційної моделі. Окреслюється досліджувана технологічна операція, під час виконання якої вже були раніше або можуть статися аварії, виробничі травми чи катастрофи. У графічній інтерпретації, модель за своєю формою нагадує крону дерева, тому вона і одержала назву “дерево відмов та помилок”. Своєю чергою кінцеві події називають базовими.

Для окреслення та характеризувannya тієї чи іншої події при побудові логіко-імітаційних моделей застосовують різні символи. Як правило, побудова моделі починається з головної події, а наступні розміщують зверху вниз, аж до базових подій.

Кожен блок рисунку, позначений відповідним номером, означає подію або окремий етап побудови моделі: 1 – відмова (аварія, травма) системи – головна подія; 2 – послідовність подій, що приводять до відмови системи; 3 – послідовність подій зображується за допомогою логічних операторів; 4 – усі вхідні і вихідні події, що входять до моделі, зображуються у вигляді



прямокутників з відповідними написами всередині; 5 – послідовний підхід до базових подій, частоти виникнення яких відомі; 6 – базові події зображують у вигляді кружечків з написами всередині, вони є межею аналізу побудованої моделі.

Шляхом проведення аналізу, кожний із логічних процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, можна виокремити та знайти подію з якої починається небезпечний процес, ще до виникнення небезпечних наслідків.

Методикою оцінки рівня безпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію рівня безпеки для конкретного об'єкту [30]. Таким показником вибрано ймовірність виникнення аварії, травми залежно від явища, яке досліджується.

Представимо методику побудови логіко-імітаційної моделі.

За даними виробництва визначаємо ймовірність базових подій. Наприклад, базова подія «стан контролю з охорони праці». Для визначення ймовірності ми маємо встановити, наскільки (у відсотках) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об'єкті. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 50 % або 30 %, то ймовірність відповідно дорівнює 0,5 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність «не здійснення контролю» становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідно ймовірність дорівнює 0.

Після обчислення ймовірності всіх подій, розміщених у ромбах, і базових подій, починаючи з лівої нижньої гілки «дерева», позначаємо номерами всі випадкові події, які увійшли до моделі.

На цьому можна вважати, що певна модель підготовлена до математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі.

Отже, для побудови логіко-імітаційної моделі процесу, формування та виникнення аварії та травми в процесі вирощування культури складемо

перелік базових подій. Вони лежатимуть в основі даної моделі. Кожній події (пункту) присвоїмо певне значення ймовірності його виникнення:

Стан контролю з охорони праці .....  $P_1 = 0,25$ ;

Несерйозне відношення до роботи.....  $P_2 = 0,05$ ;

Неправильне облаштування робочого місця.....  $P_3 = 0,1$ ;

Неправильна робота електроживлення .....  $P_4 = 0,03$ ;

Застаріла техніка .....  $P_6 = 0,3$ ;

Перебіг напруги.....  $P_7 = 0,2$ ;

Досвід роботи.....  $P_{12} = 0,5$ .

Професійний рівень користувача .....  $P_{13} = 0,5$ ;

Психофізіологічний стан користувача .....  $P_{14} = 0,3$ ;

На основі наведених подій будуємо матрицю логічних взаємозв'язків між окремими пунктами, графічна інтерпретація якої представлена на рис. 4.2.

Розрахуємо ймовірності виникнення подій, що формують логіко-імітаційну модель технологічного процесу розробки інформаційної системи Розглянемо травмонебезпечну ситуацію, що виникає за умови роботи за несправним персональним компютером. Ймовірність виникнення події  $P_5$  визначаємо наступним чином:

$$P_{13} = 0,25 + 0,05 + 0,03 + 0,1 - 0,25 \cdot 0,05 - 0,25 \cdot 0,03 - 0,25 \cdot 1 - 0,05 \cdot 0,03 - 0,05 \cdot 0,1 - 0,03 \cdot 0,1 + 0,25 \cdot 0,05 \cdot 0,03 \cdot 0,1 = 0,37$$

Аналогічним чином визначаємо імовірність виникнення події  $P_{10}$ :

$$P_{10} = 0,25 + 0,05 - 0,25 \cdot 0,05 = 0,2875.$$

Імовірність виникнення події  $P_{11}$ :

$$P_{11} = 0,2 \cdot 0,37 \cdot 0,3 \cdot 0,3 = 0,0064.$$

Імовірність виникнення події  $P_{15}$ :

$$P_{15} = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,3 = 0,075.$$

Імовірність виникнення події  $P_{18}$ :

$$P_{18} = 0,5 + 0,3 - 0,5 \cdot 0,3 = 0,65.$$

Імовірність виникнення події  $P_{19}$ :

$$P_{19} = 0,075 \cdot 0,65 = 0,0488.$$

Імовірність виникнення події  $P_{20}$ :

$$P_{20} = 0,0064 + 0,048 = 0,0544.$$

Відтак, бачимо, що імовірність ураження електричним струмом працівника є досить малою і становить  $P_{20} = 0,0544$ .

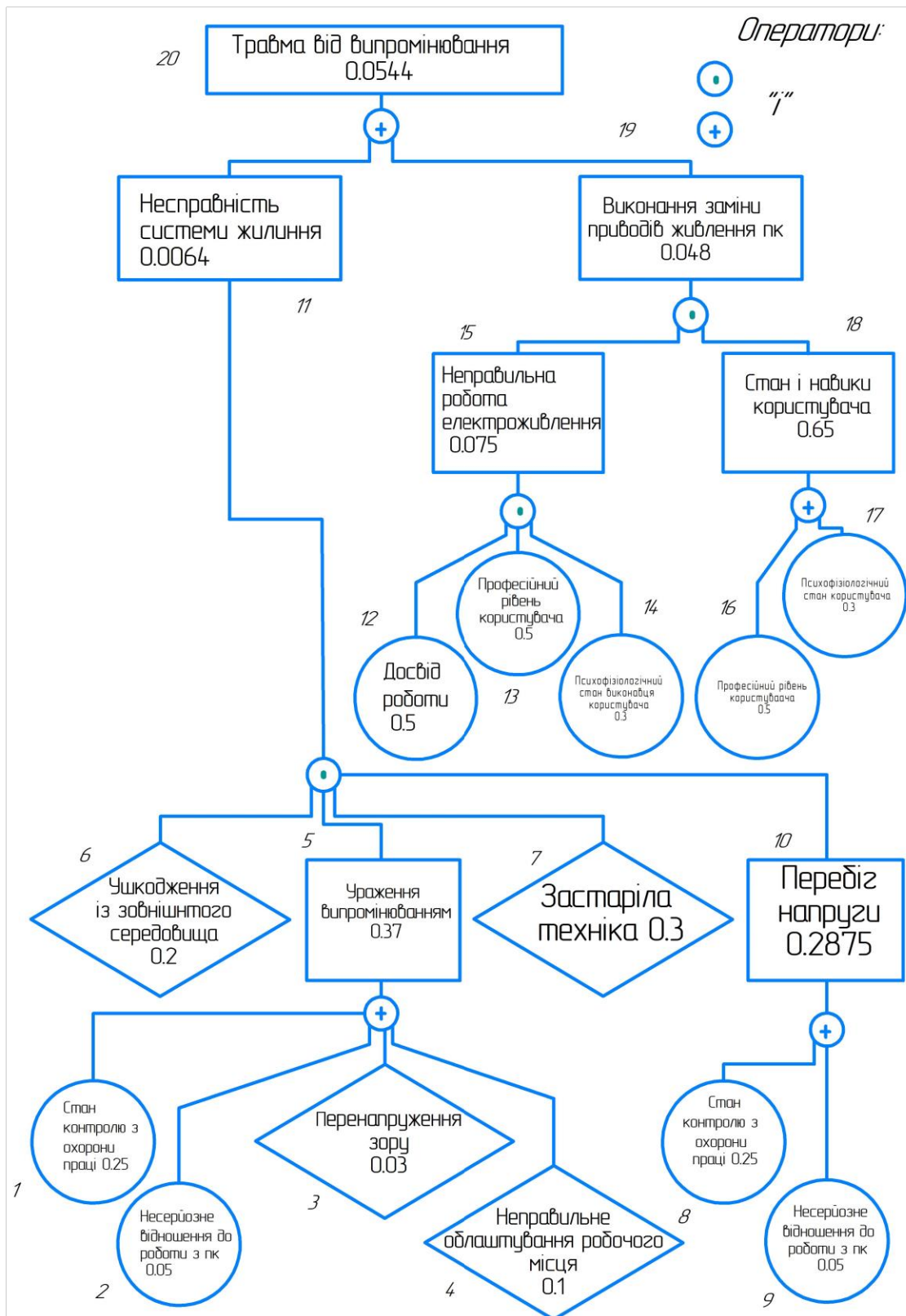


Рисунок 4.2 – Матриця логічних взаємозв'язків між окремими подіями травмонебезпечної ситуації

Використання логіко-імітаційних моделей для дослідження аварій і травм та обґрунтування заходів охорони праці, дають можливість знизити ймовірність виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій.

### 4.3 Розробка заходів із питань безпеки в надзвичайних ситуаціях

Відомо понад 30 видів природних особливонебезпечних явищ, які об'єднуються у три групи [31]:

- ✚ літосферні – землетруси, виверження вулканів, гірські обвали, зсуви, викиди гірських порід, тощо;

- ✚ гідросферні – цунамі, повені, сільові потоки, снігові лавини, льодові затори, ожеледиця, обмерзання суден, тощо.

- ✚ атмосферні – бурі, смерчі (вихори), буревії, грози, зливи та снігопади, град, ожеледь, посухи, пожежі, заморозки, тощо.

До розряду надзвичайних відносяться тільки ті катастрофи, які мають хоча б одну з наведених нижче ознак-критеріїв оцінки катастроф як надзвичайних ситуацій природного характеру:

- ✚ геологічні небезпечні явища (землетруси, виверження вулканів, обвали, зсуви, просідання земної поверхні) – землетруси у 4 і більше балів; кількість потерпілих 15 осіб і більше; кількість загиблих 4 особи і більше; прямі матеріальні збитки 500 тис. грн. і більше; вплив на функціонування інших галузей господарства;

- ✚ гідрометеорологічні і геліогеофізичні небезпечні явища – кількість потерпілих 10 осіб і більше; кількість загиблих 2 особи і більше; прямі матеріальні збитки 500 тис. грн. і більше, зокрема:

- сильний вітер (у т.ч. смерчі, шквали) – швидкість вітру при поривах 25-30 м/с і більше;

- сильний дощ (зливи) – більше 120 мм, а в селенебезпечних гірських районах понад 30-50 мм за 12 годин;

- крупний град – розміром більше 20 мм;

- сильний снігопад – 30 мм і більше за 12 годин;

- сильна хуртовина (снігові заноси) – вітер 20 м/с і більше протягом доби із снігопадом;

- сильна ожеледь – діаметр налипання на лініях електропередач 20 мм і більше;
- сильний мороз або спека;
- високі хвилі, вітрові нагони, дощові паводки (повені);
- заморозки – зниження температури повітря нижче 0 °С в екстремально
- пізні строки (весна – початок літа) і в екстремально ранні (літо – початок осені) в період активної вегетації сільгоспкультур, що може призвести до їх загибелі;
- засуха – поєднання високих температур повітря, дефіциту опадів, низької вологості повітря, малих запасів вологи в ґрунті, що призводить до загибелі врожаю польових культур;
- високі рівні води при дощових повенях, заторах, вітрових нагонах, що перевищують небезпечні рівні води для конкретних об'єктів;
- низькі рівні води – нижче проектних значень водозабірних споруд та навігаційних рівнів на судноплавних річках протягом місяця і більше;
- селі, лавини – загроза населеним пунктам, господарським об'єктам, туристичним базам тощо;
- погіршення радіаційної обстановки в наземному космічному просторі у випадку, коли щільність потоку протонів з енергією більше 25 МеВ становить понад  $5 \cdot 10^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ );
- зменшення загального вмісту озону в атмосфері понад 25% протягом 2-3 місяців у період вегетації рослин.
- ✚ природні пожежі (лісові, польові, торф'яні) – кількість потерпілих понад 15 осіб, кількість загиблих 4 особи і більше; прямі матеріальні збитки понад 100 тис. грн.; великі неконтрольовані пожежі на площі понад 25 га.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

### 5.1 Обчислення капіталовкладень за збільшеними показниками витрат на реалізацію запропонованих заходів

**5.1.1 Розрахунок вартості ПЛ 10 кВ.** У цьому розділі виконано розрахунок збільшених показників капіталовкладень, виходячи з яких виконано техніко-економічне порівняння варіантів.

Для оцінки капітальних вкладень на будівництво повітряної лінії 10 кВ на уніфікованих залізобетонних опорах зі сталевалюмінієвим проводом марки А-95 було обрано метод збільшених показників вартості.





За допомогою цього методу можна оперативно оцінити вартість усіх потрібних будівельно-монтажних робіт з урахуванням ускладнюючих коефіцієнтів.

Збільшені показники вартості будівництва лінії електропередачі напругою 10 кВ розроблені з метою забезпечення відповідності збільшених вартісних показників електричних мереж новим проєктним рішенням та технологіям будівельного виробництва, сучасному рівню базових цін у будівництві, також УПС призначені для оцінки підлоги об'єкта інвестицій у спорудження ліній електропередачі (ПЛ) як при здійсненні нового будівництва, так і при реконструкції та розширенні діючих ПЛ [32].

Вартісні показники елементів електричних мереж енергосистем, прийняті на базисному рівні цін (станом на 1 січня 2023 року) без урахування ПДВ.

Витрати для будівництва повітряної лінії 10 кВ складаються з [32]:

а) витрат на будівельно-монтажні роботи:

-  витрати на заливання фундаментів під опори;
-  витрати на протягування проводів;
-  витрати на підвішування грозозахисних тросів;
-  витрати на пристрої заземлення.

б) Витрати на вирубку та підготовку просіки.

Для отримання загальної вартості ПЛ додають витрати на благоустрій, тимчасові будівлі та споруди, проектно-вишукувальні роботи та авторський нагляд, інші роботи та витрати. Середні значення зазначених витрат від базової вартості ПЛ становлять [33]:

✚ 1,5 % – на благоустрій;

✚ 2,5 – 3,3 % – тимчасові будівлі та споруди (при реконструкції та розширенні застосовується коефіцієнт 0,8);

✚ 7,5 – 9,0 % – проектно-вишукувальні роботи та авторський нагляд;

✚ 2,6 – 3,18 % – зміст служби замовника-забудовника, будівельний контроль;

✚ 5,0 – 8,0 % – інші роботи та витрати (виробництво робіт у зимовий час, кошти на покриття витрат будівельних організацій з добровільного страхування працівників та майна, витрати на перевезення робітників, витрати, пов'язані з відрядженням робітників для будівництва, кошти на проведення підрядних торгів);

✚ 3 % – непередбачені витрати (за узгодженням із замовником до 10 %).

Загальний відсоток супутніх будівництву ПЛ 10 кВ витрат становить 22,1 %.

З [32] вибираємо коефіцієнт обліку ускладнюючих умов будівництва ПЛ 10 кВ на залізобетонній опорі – 1,003.

Вартість ПЛ 10 кВ за базовими показниками:

$$16 \text{ км} \cdot 465,4 \frac{\text{тис.грн}}{\text{км}} \cdot 1,003 = 7469 \text{ тис. грн.}$$

Вирубання та підготовка просіки під лінію:

$$16 \text{ км} \cdot 68 \frac{\text{тис.грн}}{\text{км}} = 1088 \text{ тис. грн.}$$

Разом:

$$7469 + 1088 = 8557 \text{ тис. грн.}$$



Вартість будівництва ПЛ (із врахуванням супутніх будівництву витрат 22,1 %) становить:

$$8557 \cdot 1,221 = 10450 \text{ тис. грн.}$$

5.1.2 Обчислення витрат на будівництво ПЛ 10 кВ за збільшеними показниками вартості. За цінами на 1 квартал 2023 р. вартість будівництва ПЛ 10 кВ складе:

✚ основні роботи

$$10450 \cdot 0,8 \cdot 5,63 = 47070 \text{ тис. грн.,}$$

де 5,63 – індекс зміни кошторисної вартості будівельно-монтажних робіт за видами будівництва;

✚ інші роботи

$$10450 \cdot 0,2 \cdot 8,35 = 17450 \text{ тис. грн.}$$

де 8,35 – індекс вартості інших витрат.

Витрати на комірку одного комплекту вимикача становлять 190 тис. грн.

Усього витрати на будівництво ПЛ 10 кВ будуть становити:

$$47070 + 17450 + 190 = 64710 \text{ тис. грн.}$$

**5.1.2 Розрахунок вартості пункту автоматичного регулювання напруги (ПАРН).** ПАРН – пункт автоматичного регулювання напруги. Використовується при модернізації ЛЕП [33].

За допомогою ПАРН можна збільшити пропускну здатність ЛЕП для підвищення навантаження за рахунок додавання нових споживачів, передавати електроенергію на великі відстані, забезпечувати споживачів потрібним рівнем напруги.

ПАРН включає функції підвищення або зниження напруги на ЛЕП у тих місцях, де помітні істотні її провали.

Конструкція ПАРН включає в себе:

✚ вольтдодатні трансформатори;

✚ шафи керування та контролю;

✚ роз'єднувачі;

✚ монтажні комплекти для встановлення комплектуючих пункту автоматичного регулювання напруги.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 5.1 – Залежності вартості реконструкції ЛЕП від їх довжини та вартості встановлення ПАРН

З рисунку 5.1 випливає, що орієнтовна вартість встановлення ПАРН з реконструкцією ЛЕП становить 650 тис. грн.

**5.1.3 Обчислення капіталовкладень на збільшення перетину проводів ліній.** Обчислюємо демонтаж опор:

$$534 \text{ шт} \cdot 0,39 \text{ тис. грн} = 208,26 \text{ тис. грн.},$$

де 0,39 – складові витрат на демонтаж опор; 534 – кількість опор.

Обчислюємо демонтаж проводів:

$$40 \text{ км} \cdot 4,29 \text{ тис. грн} = 171,6 \text{ тис. грн},$$

де 4,29 – складові витрат на демонтаж проводів, тис. грн. [8]; 40 – протяжність ділянки.

Обчислюємо затрати на будівництво ЛЕП:

$$40 \text{ км} \cdot 465,4 \text{ тис. грн} = 18620 \text{ тис. грн},$$

де 40 – довжина ділянки, км; 465,4 – збільшений показник вартості ПЛ 10 кВ.

Разом за базовими показниками:

$$208,26 + 171,6 + 18620 = 19000 \text{ тис. грн.}$$

Обчислюємо витрати на будівельно-монтажні роботи (з урахуванням коефіцієнта переведення цін):

$$19000 \text{ тис.грн} \cdot 0,8 \cdot 5,63 \cdot 1,09 \cdot 1,05 = 97940 \text{ тис. грн.},$$

де 1,09 – районний коефіцієнт; 1,05 – коефіцієнт зональності; 0,8 – складові вартості будівництва ПЛ 10 кВ (будівельно-монтажні роботи) [32]; 5,63 – індекс зміни кошторисної вартості будівельно-монтажних робіт за видами будівництва [33].

Інші затрати (з урахуванням коефіцієнта переведення цін):

$$19000 \text{ тис.грн} \cdot 0,2 \cdot 8,35 \cdot 1,09 \cdot 1,05 = 36310 \text{ тис. грн.},$$

де 1,09 – районний коефіцієнт; 1,05 – коефіцієнт зональності; 0,2 – складові вартості будівництва ПЛ 10 кВ (інші витрати); 8,35 – індекс зміни кошторисної вартості інших робіт.

Обчислюємо сумарні капіталовкладення для збільшення перетину проводів ліній:

$$97940 + 36310 = 134250 \text{ тис. грн.}$$

## 5.2 Техніко-економічне порівняння розглянутих варіантів

Обчислення загальної вартості для першого варіанта, який був представлений у пункті 3.1.

У цьому варіанті було використано один вольтдодатний трансформатор, використано додатковий контур ЛЕП, а також задіяно збільшення перерізу деяких ділянок мережі.

Обчислимо сумарні витрати для першого варіанту запропонованих заходів:

$$134250 + 47070 + 1400 = 182\,700 \text{ тис.грн.}$$

Обчислення загальної вартості для другого варіанту, який було представлено у пункті 3.2.

У цьому варіанті були використані два вольтдодатні трансформатори, а також використано додатковий контур ЛЕП.

Обчислимо сумарні витрати для другого варіанту запропонованих заходів:

$$47070 + 2800 = 49870 \text{ тис. грн.}$$

Обчислення загальної вартості для третього варіанту, який було представлено у пункті 3.3.

У цьому варіанті було використано один вольтододатний трансформатор та використано додатковий контур ЛЕП.

Обчислимо сумарні витрати для третього варіанту запропонованих заходів:

$$47070 + 1400 = 48470 \text{ тис. грн.}$$

Обчислення загальної вартості для четвертого варіанта, який було представлено у пункті 3.4.

У цьому варіанті було використано два вольтододатні трансформатори, а також збільшено перерізи проводів деяких ділянок мережі.

Обчислимо сумарні витрати для четвертого варіанту запропонованих заходів:

$$134250 + 2800 = 137\,100 \text{ тис. грн.}$$

З обчислень бачимо, що найдешевший захід буде з використанням одного вольтододатного трансформатора з використанням додаткового контура лінії електропередачі.

Відповідно до поставленої мети, у кваліфікаційній роботі виконано аналіз ділянки електричної мережі 10 кВ.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання випускної кваліфікаційної роботи, було досягнуто таких результатів:

- ✚ здійснено аналіз низки заходів, які стосуються покращання пропускної здатності повітряних ліній електропередач 10 кВ;

- ✚ здійснено обчислення збільшених показників витрат на реалізацію запропонованих заходів;

- ✚ виконано техніко-економічне порівняння запропонованих варіантів та обрано найдешевший із них.

Для вирішення поставленої задачі було використано програмне забезпечення *Microsoft Excel*, *MathCad*, *RastrWin*.

Для покращання пропускної спроможності ПЛ 10 кВ та забезпечення нормального рівня напруги у всіх вузлах розглянутої ділянки було запропоновано чотири заходи:

- ✚ застосування одного вольтододатного трансформатора зі збільшенням перерізу деяких ділянок та застосуванням додаткового контура ЛЕП;

- ✚ застосування двох вольтододатних трансформаторів з додатковим контуром ЛЕП;

- ✚ застосування одного вольтододатного трансформатора та додаткового контура ЛЕП без зміни початкових перерізів проводів ділянки мережі;

- ✚ застосування двох вольтододатних трансформаторів зі збільшенням перерізу деяких ділянок мереж.

У техніко-економічному порівнянні запропонованих заходів детерміновано найоптимальніший з технічної та економічної точки зору варіант, який дасть змогу підвищити пропускну здатність ПЛ та забезпечити нормальну якість напруги на всій досліджуваній ділянці мережі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Черкашина В. В. Структурування повітряних ліній електропередачі в умовах неповноти інформації. Харків: Факт, 2016. 160 с.
2. Кузьмичов А. І. Оптимізаційні методи і моделі: практикум в Excel. Київ: ВПЦ АМУ, 2013. 438 с.
3. Волович О. О. Енергетична безпека України: зб. ст. та аналіт. матеріалів. Одеса: Фенікс, 2009. 354 с.
4. Журахівський А. В., Кінаш Б. М., Пастух О. Р. Надійність електричних систем і мереж: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 280 с.
5. Бурбело М. Й., Бірюков О. О., Мельничук Л. М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 204 с.
6. Півняк Г. Г. Енергетична ефективність систем електропостачання: монографія. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 148 с.
7. Хоменко І. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Стасюк І. В. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації: монографія. Харків: НТУ «ХП», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 132 с.
8. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова книга, 2004. 656 с.
9. Притака І. П., Козирський В. В. Електропостачання сільського господарства. Київ: Урожай, 1995. 343 с.
10. Лук'яненко Ю. В., Остапчук Ж. І., Кулик В. В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні. Вінниця: ВДТУ, 2002. 116 с.
11. Гаряжа В. М., Карюк А. О. Електрична частина станцій та підстанцій: конспект лекцій. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 149 с.
12. Mahdi Fathi, University of North Texas, Marzieh Khakifirooz, Tecnológico de Monterrey. Panos Pardalos. Optimization in Large Scale Problems. 2019. 245 p.

13. Бурбело М. Й., Гадай А. В. Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2010. 104 с.
14. Кириленко О. В. Блінов І. В. Впровадження базових міжнародних стандартів Smart Grid в Україні: сучасний стан справ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 4. С. 44 – 54.
15. [https://ptukr.com/images/produkt/PLATINUM%20electric/aukrm\\_1.jpg](https://ptukr.com/images/produkt/PLATINUM%20electric/aukrm_1.jpg)
16. Жежеленко І. В., Півняк Г. Г., Трофімов Г. Г., Папаїка Ю. А. Реактивна потужність в електричних мережах: монографія. Дніпро: НТУ«ДП», 2020. 72 с.
17. Казанський С. В. Надійність електроенергетичних систем. Київ: КПІ, 2020. 67 с.
18. Бардик Є. І., Лукаш М. П. Електрична частина станцій та підстанцій. Синхронні генератори: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 100 с.
19. Добровольська Л. Н., Лесько В. О., Черкашина В. В. Автоматизація розподільних електричних мереж в умовах балансуєчого ринку електроенергії. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2014. 208 с.
20. <https://www.entsoe.eu/>
21. Остапчук Ж. І., Кулик В. В., Тептя В. В. Моделювання в задачах розвитку електричних систем. Вінниця: ВНТУ, 2008. 128 с.
22. <https://www.rastrwin.ua/>
23. Зорін Є. В., Олефір Д. О. Забезпечення надійної роботи ОЕС України – нагальна потреба сучасності. *Електропанорама*, № 4. 2007. С. 7 – 8.
24. Тісленко В. В. Системи електропостачання загального призначення. Чернігів: ЧНТУ, 2005. 341 с.
25. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab: електронний навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 421 с.
26. Бардик Є. І. Експлуатація та режими роботи електростанцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 73 с.
27. Kowalski Z. Jakosc energii elektrycznej. Lodz, 2007. 620 s.

28. Чаленко А. А., Демов А. О., Демов О. Д., Хінді Айман Тахер. Метод впровадження конденсаторних установок в районні електричні мережі. *Енергетика та електрифікація*, 2003. № 2. С. 35 – 39.
29. Панченко С. В., Акімов О. І., Бабаєв М. М. Електробезпека: підручник. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 295 с.
30. Лехман С. Д. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві: навч. посібник. Київ: Урожай, 1993. 272 с.
31. Касьянов М. А., Ревенко Ю. П., Тищенко Ю. А. Захист населення в умовах надзвичайних. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля., 2003. 183 с.
32. Мірошник О. О., Черкашина В. В., Мороз О. М., Черемісін М. М. Економічні розрахунки в інженерній діяльності на прикладах задач електроенергетики. Харків: ФЛП Панов А. Н., 2018. 214 с.
33. ГКД 340.000.001-95. Визначення економічної ефективності капіталовкладень в енергетику. Методика. (Загальні методичні положення). Київ: Міненерго України, 1995. 34 с.