

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації
виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Климчука Максима Олеговича

УДК 620.9

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Оптимізація усталених режимів мереж з підключенням
нової підстанції 110/10 кВ

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Пінкін Анатолій Анатолійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

к.т.н., доц _____

(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Климчук М. О. Оптимізація усталених режимів мереж з підключенням нової підстанції 110/10 кВ. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Розглянуто питання оптимізації розподілу електроенергії по мережах 110 кВ з метою зменшення технологічних і технічних втрат потужності в системах електропостачання. Проведено дослідження алгоритму роботи запропонованого пристрою раціонального регулювання втрат електричної енергії та його імітаційне моделювання в ПК Matlab Simulink.

Ключові слова: втрати електроенергії, автоматизація, розподіл, технологічні втрати.

SUMMARY

Klimchuk M. O. “Optimization of steady-state network modes with connection of a new 110/10 kV substation.” – Manuscript.

Masters work for “Master specialty 141” “Electrical power, electrical engineering and electro-mechanics.” Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

The issue of optimization of electricity distribution on 110 kV networks in order to reduce technological and technical power consumption in power supply systems is considered. The research of the algorithm of work of the offered device of rational regulation of electric energy losses and its simulation modeling in Matlab Simulink PC is carried out.

Keywords: losses, automation, distribution, technological.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ І МЕРЕЖАХ ЖИВЛЕННЯ.....	6
1.1. Актуальність забезпечення зниження втрат в електричних мережах.....	6
1.2. Основні заходи щодо зниження технологічних втрат електроенергії в мережах.....	8
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОГО ПРИСТРОЮ РЕГУЛЮВАННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	12
2.1. Загальні вимоги до алгоритму автоматичного пристрою оптимізації втрат електричної енергії.....	12
2.2. Опис алгоритму роботи автоматичного пристрою регулювання втрат електричної енергії.....	12
2.3. Моделювання алгоритму роботи автоматичного пристрою оптимізації втрат електричної енергії.....	14
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО ПРИСТРОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПК Matlab Simulink.....	24
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

ВСТУП

Актуальність досліджень: Через зростання навантажень, що обумовлені в першу чергу збільшенням кількості промислових підприємств і підключенням інших споживачів електроенергії, виникає необхідність відповідного розвитку електричних мереж 110 кВ.

Зношування значної частини обладнання енергетичного господарства, його невідповідність сучасним режимам роботи, негативний вплив людського фактора – все це веде до порушення нормального робочого процесу енергосистем, погіршення якості електроенергії, надійності, безпеки електропостачання і, як наслідок, до нових збитків. Все це передбачає застосування нових технологій і інженерних рішень при будівництві і експлуатації систем електропостачання.

Вагома доля електроенергії втрачається на шляху до споживача. Якщо розглядати втрати за класами напруг, то найбільші приходяться на 110-150 кВ та 6-10 кВ [2, 4]. Актуальною задачею на сьогодні є забезпечення усталеного режиму роботи систем електропостачання та оптимізація втрат електроенергії в них [7, 8].

Одним з досить ефективних заходів щодо оптимізації втрат електроенергії є схемно-режимні заходи. Однак дані заходи наразі доволі часто реалізуються діями оперативного персоналу, які не завжди коректні щодо виконання технологічних вимог.

Метою роботи є розробка та моделювання автоматичного пристрою оптимізації режимів роботи мережі на ПС 110/10 кВ з мінімізацією втрат, який дозволить вирішити дві ключові проблеми: скорочення втрат електроенергії та заміну дій оперативного персоналу, тим самим виключаючи людський фактор.

Об'єкт дослідження: електрична підстанція електропостачання 110/10 кВ.

Предмет дослідження: розрахунок і аналіз режимів мережі.

Методи дослідження: методика проведення виконаних досліджень заснована на теорії електричних кіл, математичному та імітаційному моделюванні із застосуванням експериментальних досліджень.

Завдання:

1. Проаналізувати варіанти розвитку енергосистеми. Зробити порівняльний аналіз заходів, способів і засобів оптимізації втрат електричної енергії в розподільних мережах.
2. Сформулювати вимоги до автоматичного пристрою регулювання втрат електричної енергії (АПРВЕЕ).
3. Розробити алгоритм роботи АПРВЕЕ.
4. Розробити структурно-функціональну схему АПРВЕЕ.
5. Оцінити ефективність застосування АПРВЕЕ шляхом моделювання схеми логіки АПРВЕЕ в програмному комплексі Matlab Simulink.

Практичне значення одержаних результатів: Розробка автоматичного пристрою оптимізації втрат, що здійснює схемно-режимні заходи в автоматичному режимі, по заздальгідь визначеному алгоритму, дозволить більш ефективно вирішувати завдання по оптимізації втрат електричної енергії в електричних мережах 110/10 кВ.

Публікація матеріалів досліджень:

1. Климчук М. О. Меленівський В. В. Аспекти захисту від внутрішніх перенапруг в мережах електропостачання. *Сучасні проблеми землеробської механіки*: зб. матеріалів доп. учасн. XXI Міжнар. наук. конф. ім. П. М. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2020. – С. 349-350.
2. Климчук М. О. Актуальність забезпечення зниження втрат в електричних мережах. *Priority directions of science and technology development*: зб. матеріалів доп. учасн. III Міжнар. наук.-практ. Конф. – Київ, Україна, 2020. – С. 928-932.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ І МЕРЕЖАХ ЖИВЛЕННЯ

1.1. Актуальність забезпечення зниження втрат в електричних мережах

Втрати електроенергії обумовлені фізичними процесами, що відбуваються при передачі електроенергії відповідно до технічних характеристик і режимів роботи ліній і обладнання, з урахуванням витрат електроенергії на власні потреби підстанцій. Існує певне співвідношення між вартістю мережі і втратами енергії в ній, відповідно до економічного к.к.д. мережі. Збільшення вартості мережі призводить до зниження втрат і, навпаки, в разі прийняття менш капіталомістких технічних рішень втрати енергії зростають. Зазвичай проектування електричної мережі ведеться таким чином, щоб забезпечити оптимальне співвідношення між двома цими показниками [2, 7, 8, 10, 11, 12, 29]. Однак з часом у зв'язку з ростом навантажень втрати енергії збільшуються і це співвідношення погіршується. Звідси випливає важливість контролю рівня втрат енергії як одного з показників, що характеризують економічність роботи мережі.

Втрати електроенергії обумовлені наступними факторами:

1. Високий показник зношування енергетичного обладнання;
2. Неефективне використання палива;
3. Низький рівень автоматизації;
4. Відставання в технологічних розробках.

Оптимізація втрат електроенергії реалізовується за чотирма ключовими напрямками [2, 7, 8, 10, 12]:

- 1) зниження споживання електроенергії на власні потреби підстанцій;
- 2) будівництво, реконструкція, а також розвиток електроенергетичних мереж;
- 3) введення в роботу нового енергозберігаючого обладнання, виключення неефективного обладнання;

4) оптимізація схемних і режимних параметрів в умовах експлуатації і оперативного управління електричних мереж.

Автоматизовані системи керування системами електропостачання дозволять більш точно обчислювати величину втрат електроенергії, їх структуру, дозволять скоротити їх число. Крім цього, цифрова трансформація дозволить підвищити надійність електроенергетичної системи, збільшити якість контролю за системою і т.д.

Технологічні втрати (рис. 1.1) електричної енергії складаються з технічних втрат електроенергії в лініях електропередач і електрообладнанні, з витрат електроенергії на власні потреби підстанцій, а також враховується похибка системи обліку електроенергії. В таблиці 1.1 представлені значення втрат електроенергії в залежності від класів напруги [3, 30].

Таблиця 1.1 – Значення втрат електроенергії в мережах різних напруг

Напруга, кВ	0,4	6-10	20-35	110-150	220-330	500-750
Втрати електроенергії, %	0,5-1,5	2,5 - 3,5	0,5-1,0	3,5-4,5	2,5-3,5	0,5-1,0

У таблиці 1.2 представлена структура втрат електроенергії по елементам електричної мережі [3, 30].

Таблиця 1.2 – Структура втрат електроенергії в ЕЕС

Елементи мережі	Втрати електроенергії		
	Змінні втрати ЕЕ, %	Умовно-постійні втрати ЕЕ, %	Всього, %
ЛЕП	60	5	65
ПС, в тому числі:	15	20	35
Трансформатори	15	15	30
Витрата електроенергії на СН	-	3	3
інші елементи	-	2	2
Разом	75	25	100

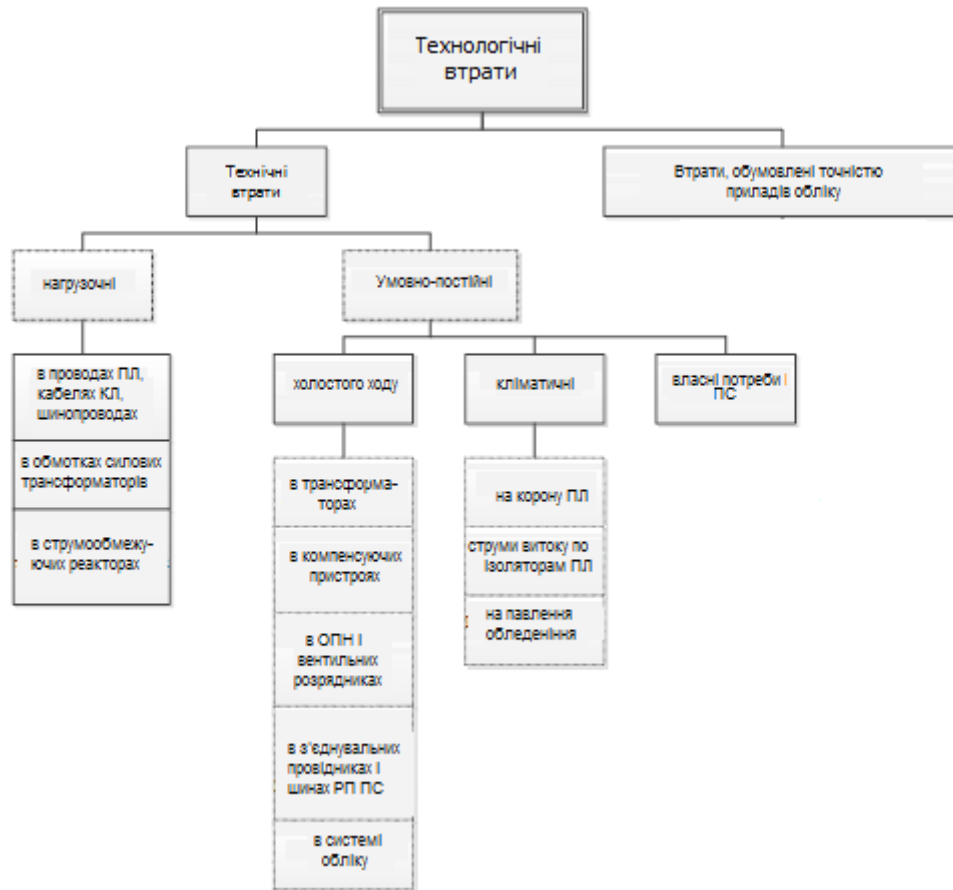


Рисунок 1.1 – Структура технологічних втрат електроенергії

Проаналізувавши таблиці 1.1 і 1.2, можна зробити висновок, що найбільша величина втрат електроенергії припадає на лінії електропередач напругою 110-150 кВ.

1.2. Основні заходи щодо зниження технологічних втрат електроенергії в мережах

Зниження втрат електроенергії можна домогтися різними методами. В залежності від обраного методу буде отримано різний ефект. Заходи щодо зниження технологічних втрат електроенергії можна розділити на три основні групи [7, 8, 10]:

1. Організаційні – які не потребують витрат, тому що оптимізація втрат здійснюється безпосередньо при експлуатації.

2. Технічні заходи – вимагають значних капіталовкладень, оскільки їх проводять при новому будівництві, реконструкції, модернізації.

3. Заходи щодо вдосконалення систем обліку електроенергії.

До організаційних заходів належать [7, 8, 10]:

1. Оптимізація рівня робочої напруги, тобто забезпечення максимально допустимого рівня напруги для режиму максимальних навантажень і забезпечення номінального рівня напруги в режимі мінімальних навантажень.

2. Оптимізація режимів роботи електричної мережі. Під такими заходами розуміють економічний розподіл потужності між агрегатами електростанцій і між електростанціями в електроенергетичній системі; оптимізація режимів роботи компенсуючих пристроїв, трансформаторів та іншого електрообладнання.

3. Управління потоками потужності в неоднорідних мережах (замкнуті мережі, що містять 2 і більше номінальних напруг). До цієї групи заходів відносяться розмикання розподільних мереж в оптимальних місцях; підбір груп з'єднання обмоток трансформаторів на трансформаторах зв'язку.

4. Заходи щодо вирівнювання навантаження фаз електричної мережі.

5. Скорочення тривалості ремонтних робіт, проведення ремонтних робіт згідно плана-графіка.

До технічних заходів по оптимізації втрат електроенергії належать такі заходи [7, 8, 10]:

1. Підвищення номінальної напруги електричної мережі – спорудження глибоких введів високої напруги. Крім цього при новому будівництві іноді вибирають обладнання в габаритах напруги вище, ніж при експлуатації.
2. Оптимізація електромережевого устаткування – заміна проводів і кабелів ЛЕП; заміна трансформаторів з ПБЗ на трансформатори з РПН; установка додаткових пристроїв (конденсаторних батарей, шунтуючих реакторів і т.д.); економічне завантаження трансформаторів; установка сучасних систем автоматики і релейного захисту; установка накопичувачів енергії.

3. Оптимізація електричної мережі. Сюди входить оптимальний розвиток системоутворюючих мереж і розподільних мереж.
4. Заходи щодо вдосконалення систем обліку електроенергії: створення і впровадження приладів обліку нового покоління; використання систем векторних вимірювань; підвищення кваліфікації персоналу; створення системи аналізу технологічних втрат, їх склад і виявлення обладнання, яке дає найбільші втрати.

Загальна класифікація заходів по оптимізації технологічних втрат електроенергії представлена на рис 1.2 [7, 8, 10].

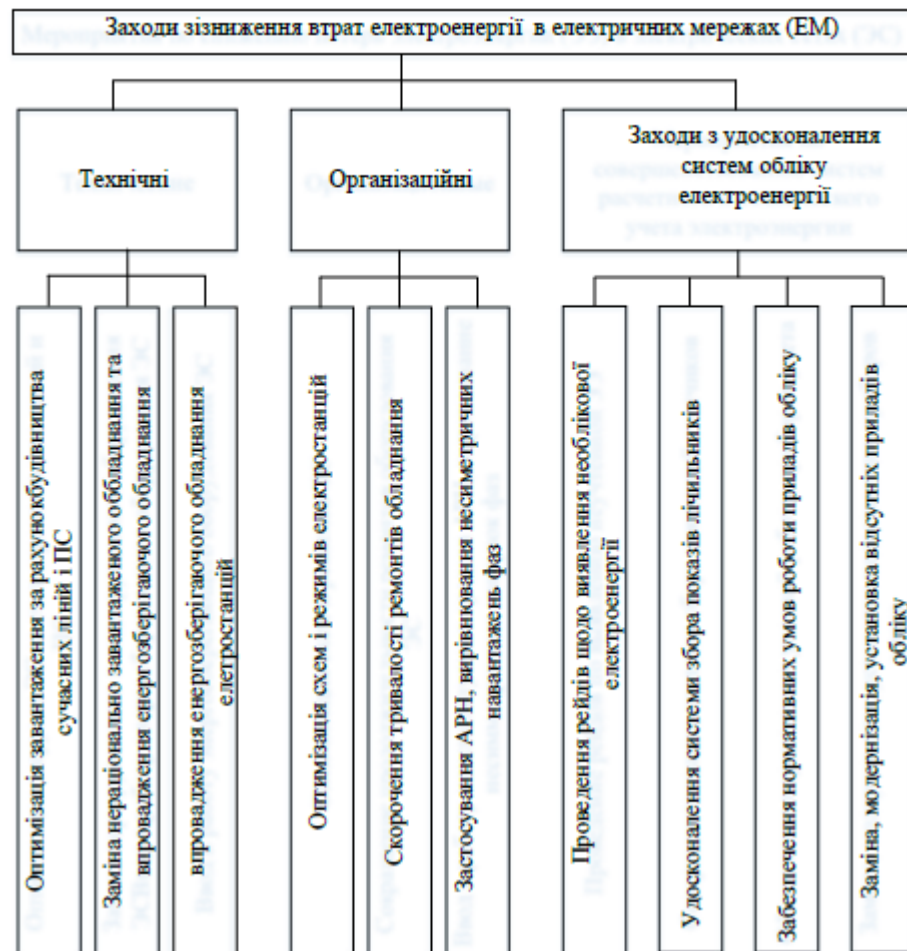


Рисунок 1.2 – Заходи щодо зниження технологічних втрат електроенергії

Найефективнішими заходами є: зниження витрат електроенергії на власні потреби; оптимізація усталених режимів за реактивною потужністю та рівнями

напруги; відключення в режимі малих навантажень електромережевого устаткування.

Нині існує безліч способів і засобів щодо оптимізації технологічних втрат електроенергії (рис. 1.2). Всі пристрої в основному спрямовані на підтримку оптимального рівня напруги мережі і значень реактивної потужності в ній, оптимізація втрат в даному випадку є супутнім фактором. Сучасні розробки спрямовані в основному на заміну старого обладнання на нове, а також на оптимізацію процесів управління електроенергетичними мережами. Також варто відзначити, що всі заходи щодо скорочення втрат електроенергії в більшості випадків виконуються диспетчерським персоналом, що в свою чергу є негативним фактором, оскільки людина може виконувати помилкові дії. Людський фактор негативно позначається на веденні електроенергетичними режимами, оскільки для виконання тієї чи іншої команди потрібно чимало часу. Розробка автоматичного пристрою оптимізації втрат, що дозволяє здійснювати схемно-режимні заходи в автоматичному режимі, по заздалегідь визначеним алгоритмом, дозволить більш ефективно вирішувати ті ж завдання, що і оперативний персонал.

Висновки по розділу:

На сьогоднішній день одним із пріоритетних завдань, які потребують сучасні енергосистеми є оптимізація втрат електроенергії з впровадженням нових інтелектуальних технологій. Найбільші втрати електроенергії спостерігаються на класах напруги 110-150 кВ і 6-10 кВ.

Найефективнішими заходами по оптимізації втрат електроенергії є: зниження витрат електроенергії на власні потреби; оптимізація усталених режимів за реактивною потужністю та рівнями напруги; відключення в режимі малих навантажень електромережевого устаткування. Це все можливо реалізувати при ефективній системі автоматизованого управління режимами роботи системи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОГО ПРИСТРОЮ РЕГУЛЮВАННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1. Загальні вимоги до алгоритму автоматичного пристрою оптимізації втрат електричної енергії

Загальні вимоги до алгоритму АПРВЕЕ наступні [15, 16, 19, 30]:

1. Алгоритм повинен мати певні вхідні дані. Для пристрою АПРВЕЕ такими є дані про величину струму на ПЛ напругою 110–220 кВ. Крім вхідних даних алгоритм має проміжні дані, до них відноситься наявність струму через вимикач. На закінченні алгоритму повинні бути вихідні дані – відключення або включення ПЛ 110–220 кВ.

2. Алгоритм повинен складатися з послідовних кроків, причому число кроків повинно бути мінімальним і кінцевим.

3. Також алгоритм повинен бути детермінований, тобто після кожного етапу алгоритму повинен бути зазначений наступний його етап, або алгоритм повинен бути закінчений.

4. Алгоритм повинен бути зрозумілим, щоб його міг виконати будь-який виконавець.

5. Алгоритм повинен володіти результативністю, тобто виконання всіх кроків алгоритму повинно приводити до певного результату.

6. Правильність. В результаті виконання алгоритму повинні бути отримані правильні результати вирішення завдань, для яких він складений.

2.2. Опис алгоритму роботи автоматичного пристрою регулювання втрат електричної енергії

Розроблений алгоритм (рис. 2.1) виробляє автоматичне одностороннє вимкнення повітряної лінії електропередачі в режимі малих навантажень.

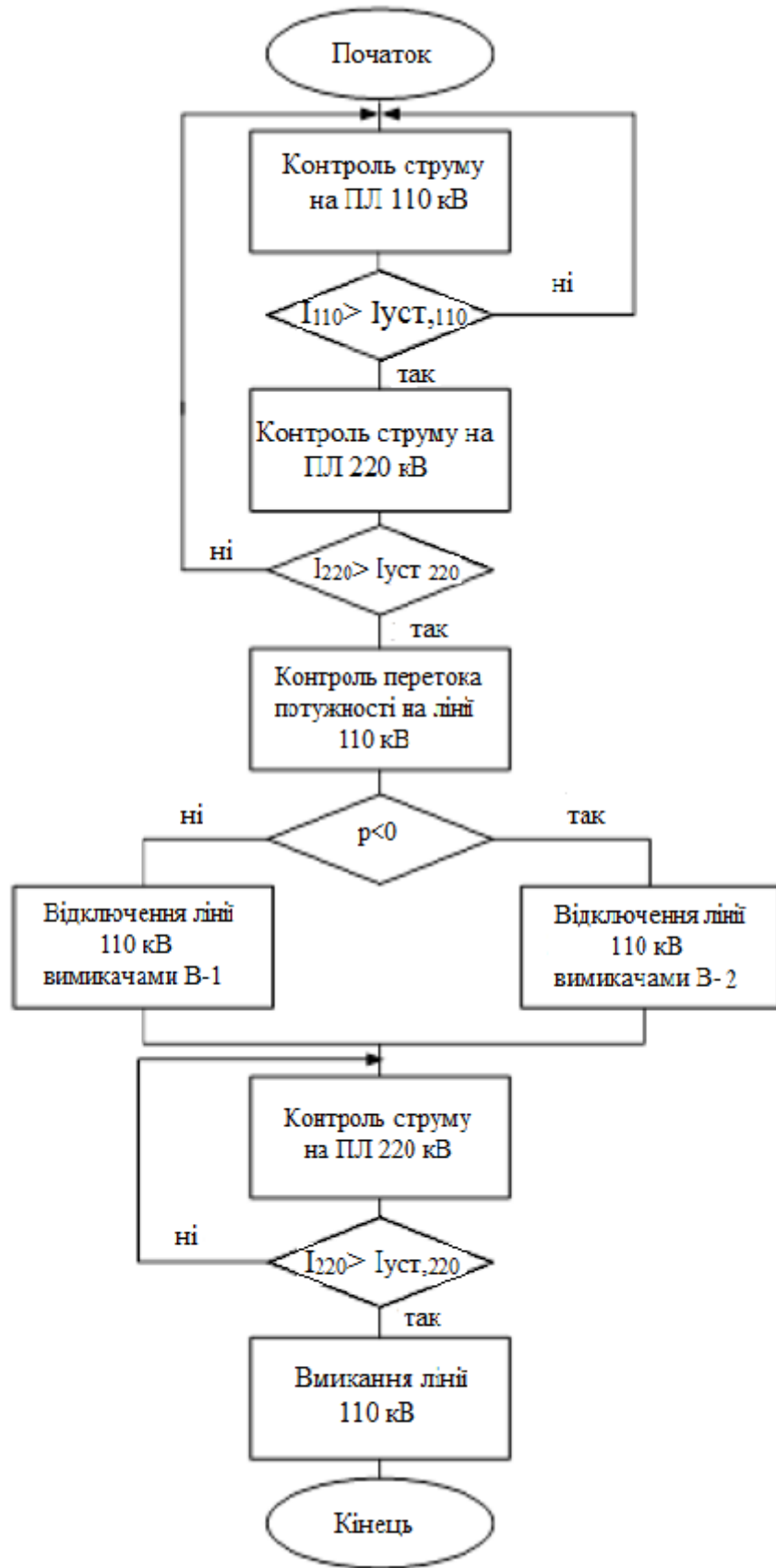


Рисунок 2.1 – Алгоритм роботи АПОВЕЕ

Реєструючи факт зниження струму в лінії 110 кВ до значення, меншого ніж струм уставки $I_{110} < I_{уст.110}$, контролюючий орган в автоматичному режимі проводить одностороннє вимкнення ПЛ 110 кВ. Сторона, з якої проводиться вимкнення, визначається, виходячи з напрямку протікання струму, який відстежується за допомогою реле потужності. У контрольованому перерізі перетік активної потужності починає передаватися по лініях вищого класу напруги 220–500 кВ (що входять в перетин), тим самим оптимізуючи процес передачі електричної енергії. У разі збільшення переданої потужності по ПЛ 220–500 кВ, збільшиться значення струму в ПЛ, тобто за умови $I_{220} > I_{уст,220}$ контролюючий орган дає сигнал на зворотнє ввімкнення лінії 110 кВ. Алгоритм роботи АПРВЕЕ представлений на рис. 3.1.

Якщо контрольовані параметри на ПЛ 110 кВ знаходяться в тривало-допустимих значеннях не менше I_{min} , то пристрій знаходиться в режимі моніторингу.

2.2. Моделювання алгоритму роботи автоматичного пристрою оптимізації втрат електричної енергії

Моделювання алгоритму роботи автоматичного пристрою оптимізації втрат електроенергії було виконано в програмному комплексі RastrWin3 [16]. Моделювання проводилося для трьох варіантів принципів електричних схем контрольованих перетинів, представлених на рис. 2.2–2.4. На рис. 2.2 представлено контрольований перетин, в який входять ЛЕП ступеня напруги 110–500 кВ. Під контрольованим перетином прийнято сукупність ліній електропередачі та інших елементів електричної мережі, які визначаються диспетчерськими центрами системного оператора [23]. На рис. 2.3 в контрольований перетин включені лінії класів напруги 220–500 кВ. У контрольований перетин, представлений на рис. 2.4, входять лінії напругою 110–220 кВ. Для всіх розглянутих схем протікання потужності спрямовані від

підстанції 1 до підстанції 2. Для схеми № 1 (рис. 2.2) також було розглянуто варіант з проміжним відбором потужності на ПЛ 110 кВ.

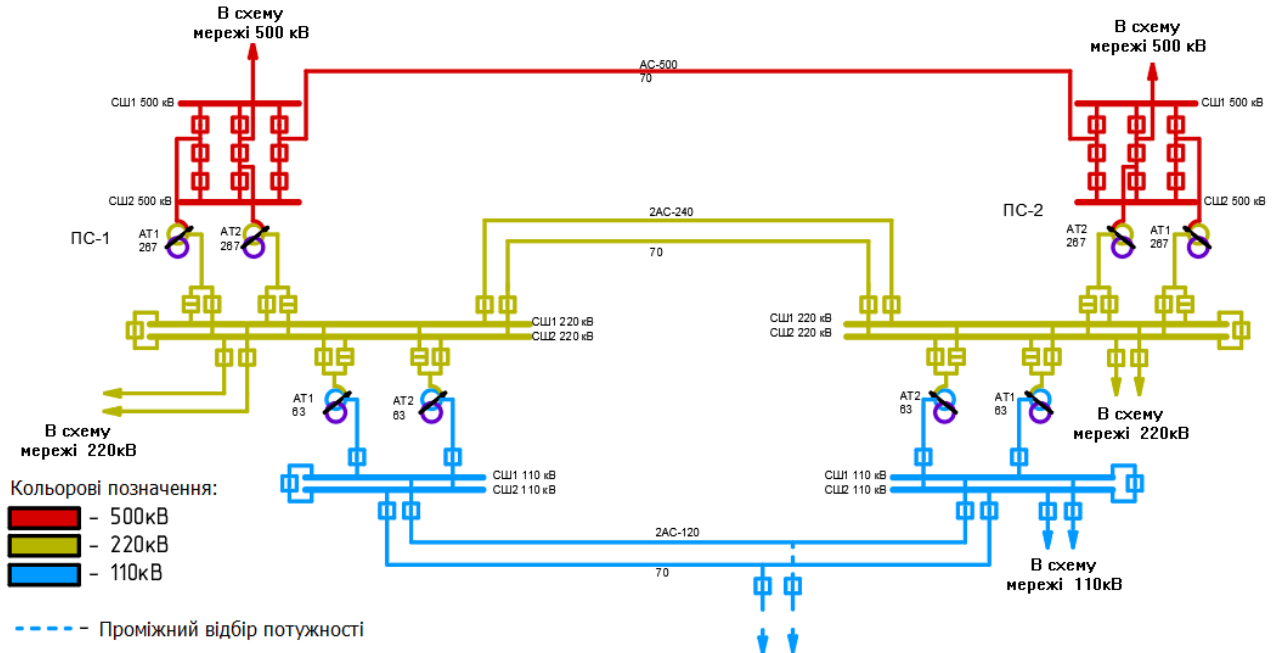


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова № 1

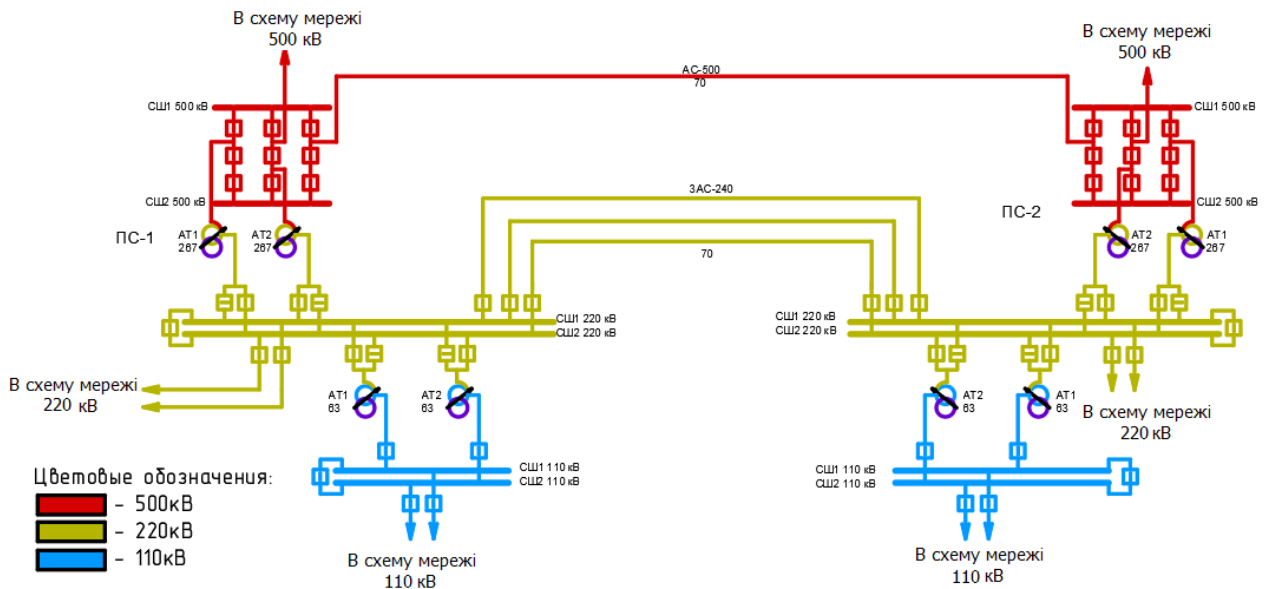


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова № 2

За базовий вузол був прийнятий вузол №1 (на ПС 220 кВ). Навантаження становить 400 МВт, 300 МВт на напрузі 220 кВ ПС-2 і 100 МВт на напрузі 110 кВ ПС-2. Протяжність ліній електропередачі становить 70 км. Спочатку був проведений розрахунок нормального усталеного режиму, представленого на рис. 2.5. У таблиці 2.1 наведена структура втрат активної потужності для електричної схеми №1 в нормальному режимі. Згідно таблиці 2.1 найбільші втрати активної потужності спостерігаються в ЛЕП 110 кВ.

Таблиця 2.1 – Структура втрат активної потужності схеми №1

Номинальна напруга $U_{\text{НОМ}}$, кВ	Втрати активної потужності в мережі, dP , МВт	Втрати активної потужності в лініях електропередач $dP_{\text{ЛЕП}}$, МВт	Втрати активної потужності в трансформаторах $dP_{\text{Тр-р}}$, МВт	Втрати на корону $dP_{\text{кор}}$, МВт	Втрати на холостий хід в тр-рах $dP_{\text{Тр-р ХХ}}$, МВт
500	2,34	1,19	0,12	0,4	0,63
220	1,3	1,01	0,12	0,13	0,04
110	1,35	1,33	-	0,01	-
РАЗОМ	4,99	3,53	0,24	0,54	0,67

Для визначення ефективності схемно-режимних заходів для даної схеми було проведено ряд розрахунків електричних режимів:

1. Нормальний режим;
2. Одностороннє відключення однієї ПЛ 110 кВ;
3. Одностороннє відключення двох ПЛ 110 кВ;
4. Одностороннє відключення двох ПЛ 110 кВ і однієї ПЛ 220 кВ;
5. Одностороннє відключення двох ПЛ 110 кВ і двох ПЛ 220 кВ;
6. Одностороннє відключення ПЛ 500 кВ;
7. Одностороннє відключення однієї ПЛ 110 кВ і однієї ПЛ 220 кВ.

Результати розрахунків представлені на графіках (рис. 2.6, 2.7).



Рисунок 2.6 – Графік залежності втрат активної потужності в мережі від режимних ситуацій



Рисунок 2.7 – Графік залежності втрат активної потужності в ЛЕП від режимних ситуацій

У нормальному режимі втрати активної потужності в мережі складають 4,99 МВт, з них втрати активної потужності в ЛЕП – 3,53 МВт. При односторонньому відключенні однієї з ПЛ 110 кВ відбувається наброс потужності на другу ПЛ 110 кВ, внаслідок чого збільшуються втрати активної потужності, тому що загальний опір зв'язку збільшується, активний опір лінії визначається за формулою:

$$R = \frac{r_0 \cdot l}{n} \quad (2.1)$$

де l – довжина ліній, км; r_0 – погонний активний опір, Ом/км; n – кількість ланцюгів.

Таким чином, згідно з (2.1) при зменшенні кількості ланцюгів, відбувається збільшення активного опору лінії.

Як видно з графіків, найбільш ефективним є захід під номером 3 – відключення двох ПЛ 110 кВ, це пояснюється тим, що при відключенні ПЛ 110 кВ перетікання потужності розподіляється по лініях 220 і 500 кВ, а при збільшенні напруги, втрати активної потужності зменшуються, згідно з (2.2):

$$\Delta P_{\text{л}} = I^2 R = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R. \quad (2.2)$$

де $\Delta P_{\text{л}}$ – втрати активної потужності в ЛЕП, МВт; I – струм, що протікає в ПЛ, кА; R – активний опір ПЛ, Ом; S – повна потужність, МВА; U – напруга ПЛ, кВ; P і Q – активна і реактивна потужності, МВт і Мвар відповідно.

При відключенні двох ПЛ 110 кВ і однієї ПЛ 220 кВ також зменшуються втрати активної потужності в мережі, але менш ефективно ніж у варіанті №3, оскільки при відключенні однієї ПЛ 220 кВ опір зв'язку збільшується.

Відключення двох ПЛ 110 кВ і двох ПЛ 220 кВ як і в попередньому випадку не є найефективнішим заходом, оскільки опір зв'язку збільшується.

При відключенні ПЛ 500 кВ перетоки потужності перерозподіляються за класами напруги 110 і 220 кВ не дивлячись на те, що втрати активної потужності зменшуються в автотрансформаторах, втрати в ЛЕП збільшуються

в 4 рази, тому що клас напруги по якому передається електроенергія зменшується.

Відключення однієї ПЛ 110 кВ і однієї ПЛ 220 кВ є одним з гірших варіантів, при якому втрати в мережі збільшуються, оскільки такий схемно-режимний захід призводить до неоптимального розподілу перетоків потужності.

Результати проведення аналогічних досліджень при збільшенні довжини лінії з 70 до 140 км показали, що при збільшенні протяжності ліній, збільшуються втрати активної потужності в мережі. Даний факт пояснюється тим, що при збільшенні протяжності збільшується опір лінії, відповідно втрати збільшуються прямопропорційно опору (2.1).

Ефективність режимних заходів аналогічна попереднім розрахункам. Найефективнішим є третій захід (відключення двох ПЛ 110 кВ), найменш ефективним заходом є захід під номером 6 (відключення двох ПЛ 500 кВ).

Крім протяжності ліній, важливим фактором ефективності схемно-режимних заходів є конфігурація мережі, а саме, наявність відпайок (відгалужень). На рис. 2.2 відгалуження показані пунктирними лініями, що відходять від ПЛ 110 кВ. У програмному комплексі RastrWin3 було виконано моделювання нормального усталеного режиму електричної схеми №1 з відгалуженнями, яке представлено на рис. 2.8.

Для схеми №1 з відгалуженнями на ВЛ 110 кВ були проведені розрахунки наступних режимних ситуацій:

1. Нормальний режим;
2. Одностороннє відключення однієї ПЛ 110;
3. Одностороннє відключення двох ПЛ 110 кВ;
4. Одностороннє відключення двох ПЛ 110 кВ і однієї ПЛ 220 кВ;
5. Одностороннє відключення двох ПЛ 110 кВ і двох ПЛ 220 кВ;
6. Одностороннє відключення ВЛ 500 кВ;
7. Одностороннє відключення однієї ПЛ 110 кВ і однієї ПЛ 220 кВ.



Рисунок 2.9 – Графік залежності втрат активної потужності в мережі від режимних ситуацій

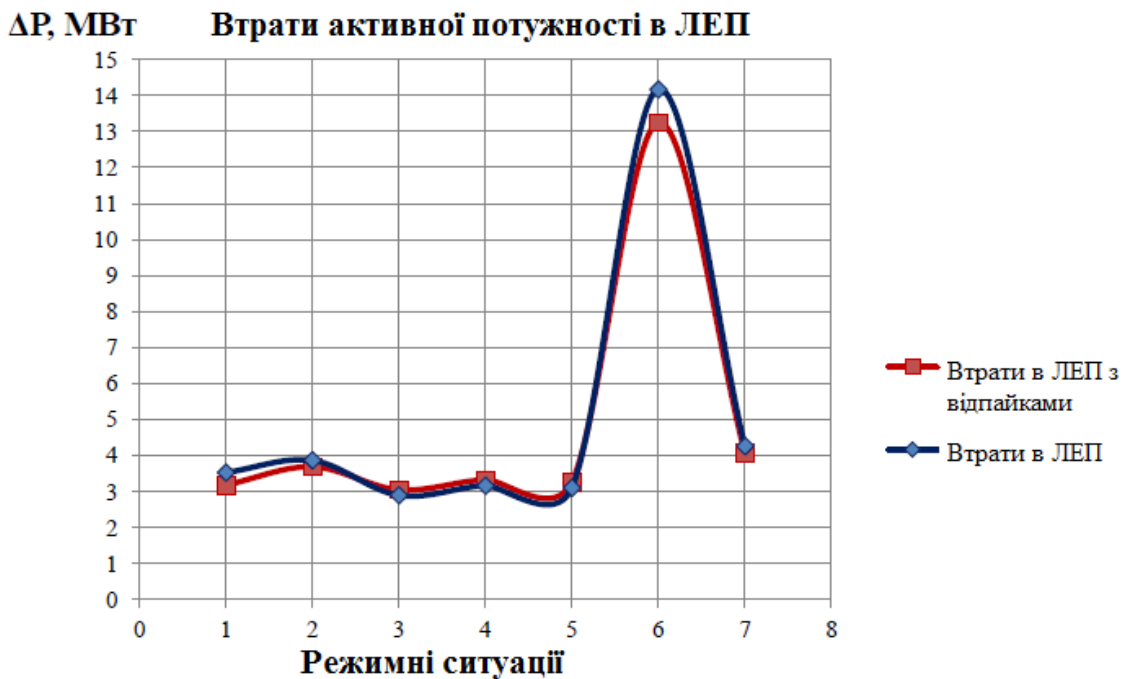


Рисунок 2.10 – Графік залежності втрат активної потужності в ЛЕП від режимних ситуацій

При відключенні однієї з ПЛ напругою 110 кВ відбувається накид потужності на другу ПЛ 110 кВ, внаслідок чого збільшуються втрати активної потужності.

Найбільш ефективним є захід номер 3 – відключення двох ПЛ 110 кВ, це пояснюється тим, що при відключенні ПЛ 110 кВ перетікання потужності розподіляється по лініях 220 і 500 кВ, а при збільшенні напруги втрати активної потужності зменшуються, відповідно до (2.1), (2.2).

Відключення двох ПЛ 110 кВ і однієї ПЛ 220 кВ також зменшує втрати активної потужності в мережі, але менш ефективно ніж в третьому варіанті, тому що збільшується опір зв'язку. Аналогічно для випадку під номером 5. При відключенні ПЛ 500 кВ перетоки потужності перерозподіляються за класами напруги 110 і 220 кВ не дивлячись на те, втрати в ЛЕП збільшуються в 3 рази.

Висновки по розділу:

У цьому розділі був розроблений алгоритм АПОВЕЕ, сформульовані основні вимоги до нього та проведено моделювання алгоритму в ПК RastrWin3. Апробація розробленого алгоритму показала, що застосування пристрою доцільно використовувати для схем №1 і №2, за наявності ПЛ 500 кВ. Для схеми №1 найефективнішим заходом щодо зниження втрат активної потужності є відключення двох ПЛ 110 кВ, для схеми №2 – відключення однієї ПЛ 220 кВ.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО ПРИСТРОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПК Matlab Simulink

Для перевірки правильності функціонування алгоритму управління АПРВЕЕ, розроблена цифрова модель досліджуваного контрольованого перетину електричної мережі енергосистеми і модель логіки АПРВЕЕ в середовищі Matlab Simulink (рис. 3.1, 3.2) [6, 15].

За допомогою розробленої імітаційної моделі виконано:

- моделювання нормального режиму роботи енергосистеми в режимі мінімальних навантажень;
- розрахунок уставок спрацьовування автоматики;
- моделювання схемно-режимних заходів в ЕС (відключення і включення лінії 110 кВ);
- настройка алгоритму АПРВЕЕ.

Модель розглянутої електричної мережі, представлена перетином 110-500 кВ, складається з блоків, представлених у додатку А.

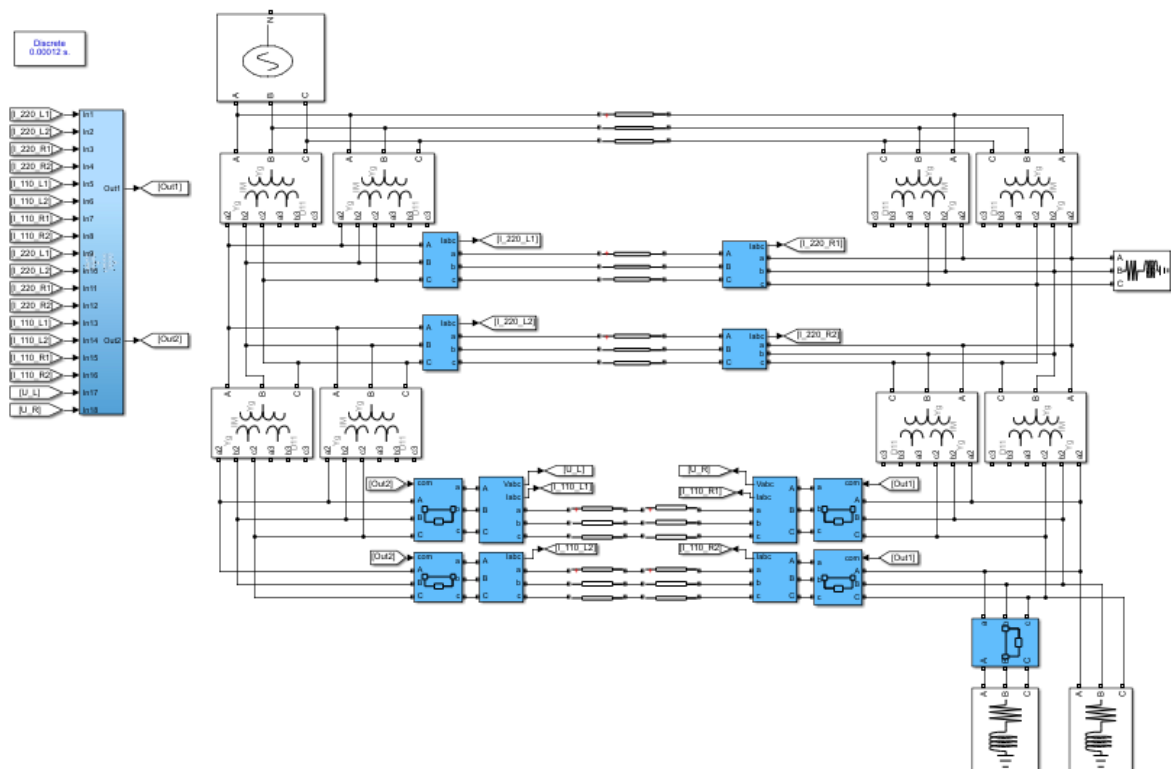


Рисунок 3.1 – Модель контрольованого перетину в ПК Matlab Simulink

Для розрахунку параметрів ліній необхідно заповнити ряд параметрів:

1) Геометричні параметри проводів ЛЕП (рис. 3.2):

- кількість фазних проводів (Number of phase conductors);
- позначення проводів (p_1, p_2, p_3);
- номер фази (1, 2, 3);
- горизонтальне положення провідника (X);
- відстань від точки кріплення проводу до землі (Y_{tower});
- мінімальна відстань від проводу до землі (Y_{min});
- номер типу провідника (Cond. Type);
- кількість заземлених проводів (Number of ground wires).

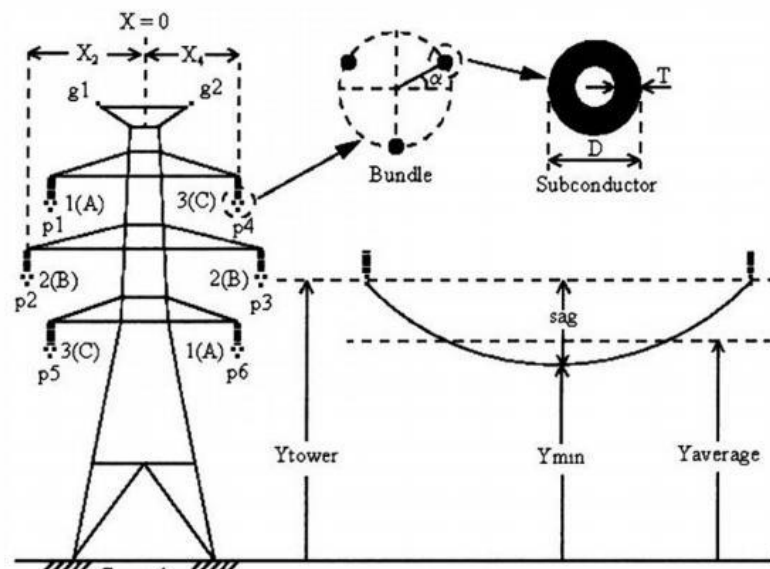


Рисунок 3.2 – Конфігурація і геометричні параметри проводів трифазної дволанцюгової лінії

2) Характеристики проводів:

- кількість типів провідників (Number of conductor types);
- T/D ratio (відношення товщини провідного матеріалу до його зовнішнього діаметра для полого провідника);
- середній геометричний радіус (Geometric Mean Radius (GMR));
- реактивний опір провідника на одиницю довжини (Reactance X_a);
- облік скін-ефекту (Include conductor skin effect);

- тип провідника (Conductor type);
- зовнішній діаметр провідника (Conductor outside diameter);
- питомий активний опір провідника (Conductor relative DC resistance), Ом/км;
- відносна магнітна проникність провідника (Conductor relative permeability);
- кількість проводів в розщепленій фазі (Number of conductors per bundle);
- діаметр розщепленого провідника (Bundle diameter);
- кут провідника №1, він визначає положення першого провідника в розщепленій фазі по відношенню до горизонтальної лінії, паралельної землі (Angle of conductor 1), град. У разі якщо в фазі один провідник, то значення параметра дорівнює нулю.

Як приклад на рис. 3.3, 3.4 представлені параметри дволанцюгової ПЛ 500 кВ, виконаної з розщепленням фази на три дроти марки АС 300/66 з розташуванням проводів по вершинах рівностороннього трикутника з відстанню між проводами 40 см.

General

Units:

Frequency (Hz):

Ground resistivity (ohm.m):

Comments:

Дволанцюгова ПЛ 500 кВ, з розщепленням фази на три дроти марки АС 300/66 з відстанню між проводами 40 см. Портальні металеві опори з відстанню між центрами розщеплених фаз по горизонталі 12 м. Опір лінії постійного струму при 20 ° С дорівнює 0,1 Ом/км, діаметр дроту – 2,45 см, діаметр сталевого сердечника 1,05 см.

Line Geometry

Number of phase conductors (bundles):

Conduct...	Phase	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Cond. type
p1	1	-12	23	15	1
p2	2	0	23	15	1
p3	3	12	23	15	1

Number of ground wires (bundles):

Bundle	Phase	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Conductor

Conductor and Bundle Characteristics

Number of conductor types

Conductor internal inductance evaluated from Include conductor skin effect

Conductor (bundle) type	Conductor outside diameter (cm)	Conductor T/D ratio	Conductor GMR (cm)	Conductor DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability	Number of conductors per bundle	Bundle diameter (cm)	Angle of conductor 1 (degrees)
1	2.4500	0.2857	1.0231	0.1000	1	3	46.1880	30

Рисунок 3.3 – Задані параметри ПЛ

Лінія змонтована на порталних металевих опорах з відстанню між центрами розщеплених фаз по горизонталі 12 м [16]. Відстань від точки кріплення проводу до землі 23 м. Стріла провисання проводу приймається рівною 8 м. Згідно з [17], опір лінії постійного струму при 20 °С дорівнює 0,1 Ом/км, діаметр дроту – 2,45 см, діаметр сталевого сердечника 1,05 см. Параметр D/T визначено як відношення товщини алюмінієвої частини до зовнішнього діаметра провідника.

Parameters

Number of phases [N]: 3

Frequency used for rlc specification (Hz): 50

Resistance per unit length (Ohms/km) [NxN matrix] or [r1 r0 r0m]: [0.033612 0.17475]

Inductance per unit length (H/km) [NxN matrix] or [l1 l0 l0m]: [0.00097478 0.0033642]

Capacitance per unit length (F/km) [NxN matrix] or [c1 c0 c0m]: [1.1939e-08 7.3942e-09]

Line length (km): 70

Measurements: None

Рисунок 3.4 – Результати розрахунку параметрів повітряної лінії

Зібрана електрична модель досліджуваного перерізу верифікована з моделлю, створеною в програмному комплексі RastrWin3. Різниця в значеннях напруги склала десяті частки відсотка, а значення струму відрізняються менш ніж на 5%. Можна зробити висновок, що модель, зібрана в ПК Matlab Simulink, відповідає вихідним даним і може використовуватися для перевірки функціонування АПРВЕЕ.

Схема складається з трьох основних частин: вхідні дані, логіко-обчислювальна частина і вихідні дані. Вхідна частина являє собою діючі значення струму і потужність, вимірювані на повітряних лініях в режимі реального часу. Логіко-обчислювальна частина складається з заданих уставок і логічних елементів: «І», «АБО». Результат роботи алгоритму знаходиться в

вихідній частини. Інформація, отримана з вихідної частини алгоритму, передається далі на зовнішні пристрої. Розроблена модель схеми логіки представлена на рис. 3.5 і складається із блоків, розшифровка яких представлена в додатку Б.

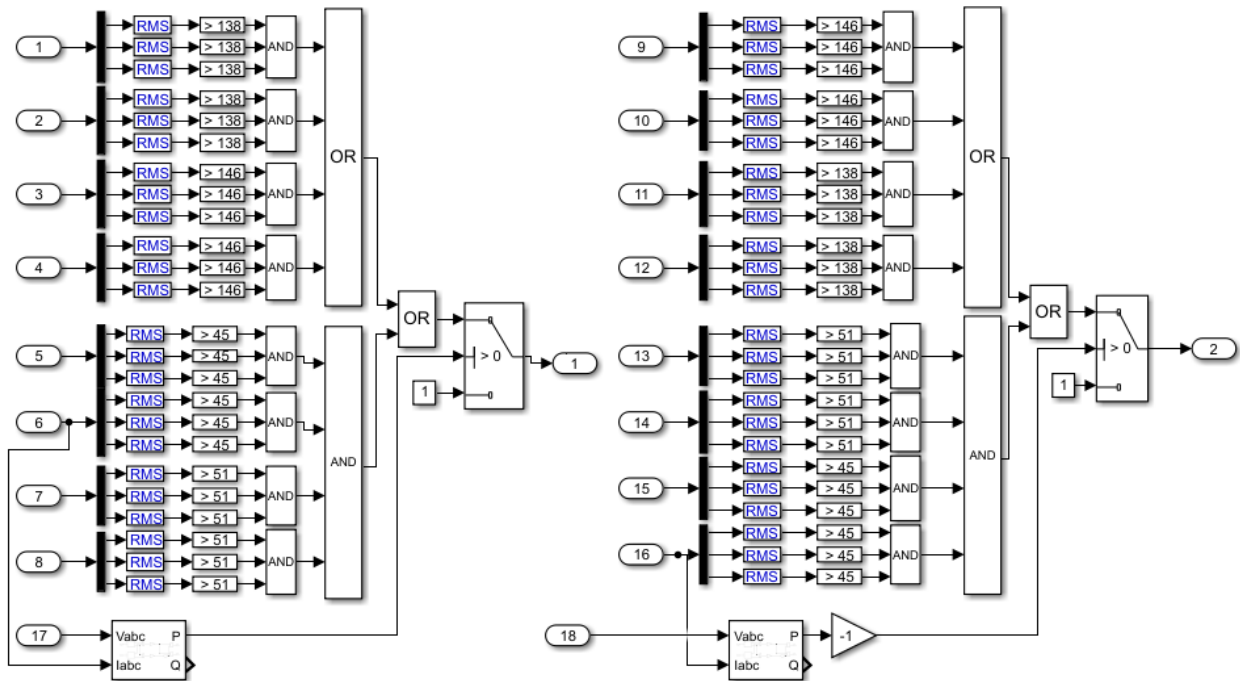


Рисунок 3.5 – Модель схеми логіки, зібрана в програмному комплексі Matlab Simulink

В процесі моделювання блок Three-Phase V-I Measurement проводить вимірювання миттєвих значень струмів на початках і кінцях ліній 110 і 220 кВ. Блок RMS приймає сигнал від Three-Phase V-I Measurement і перетворює дані величини в діючі значення. Блок Compare to constant порівнює отримане значення з величиною уставки і передає відповідний сигнал (0 або 1) на приєднаний до нього логічний елемент.

У нормальному режимі струм на початку і кінці ліній 110 кВ більше обраної уставки, отже, на логічний елемент приходять сигнали «1». На лініях 220 кВ струм не перевищує уставки – передається сигнал «0». У цьому випадку результатом логічної схеми буде «1». Сигнал «1» передається на блоки Three-

Phase Breaker, розташовані на лініях 110 кВ, тим самим залишаючи вимикачі в закритому положенні.

В момент часу 5 с Three-Phase Breaker, розташований на навантаженні, відключає частину навантаження, імітуючи режим мінімальних навантажень. Струм на лінії 110 кВ зменшується нижче величини уставки, встановленої в блоці Compare to constant, отже, блок подає на вихід сигнал «0». Струми в ланцюгах 220 кВ як і раніше не перевищують уставок. В цьому випадку логічна схема закінчується сигналом «0». Даний сигнал, що надійшов на Three-Phase Breaker переводить його у відкрите положення, виробляючи одностороннє відключення лінії 110 кВ.

Відкрите положення вимикачів триває до моменту часу 10 с. В цей час включається відключене раніше навантаження, струм на лініях 220 кВ починає перевищувати уставку, схема логіки подає сигнал «1» на зворотнє включення ліній 110 кВ.

Вибір вимикачів, які виробляють відключення ліній 110 кВ проводиться виходячи з напрямку протікання перетікання активної потужності. Блок Power обчислює діюче значення протікаючої потужності. Якщо значення позитивне працює ліва частина підсистеми, лінія відключається з боку навантаження, якщо потік активної потужності змінює свій напрямок (стає негативним) працює права частина підсистеми, виробляючи відключення ПЛ з боку генерації. Дану порівняльну функцію виробляє блок Switch. Блок зберігає положення «1» якщо підсистема не активна, тобто не дає лини відключитися з двох сторін. Різниця в підсистемах полягає в наявності в правій підсистемі блоку Grain. Даний блок виробляє множення діючого значення потужності на мінус одиницю. Це зроблено через те, що блок Switch має лише функцію «>», множачи на мінус одиницю імітується знак «<>».

В ході проведення імітаційних експериментів з моделювання зниження навантаження і спрацьовування АПРВЕЕ. на отриманих осцилограмах виділяються три часові відрізки: 1) від 0 с до 5 с – нормальний режим мережі; 2) від 5 с до 10 с – режим мінімальних навантажень, 3) від 10 с до 15 с –

нормальний відновлений режим. На рис. 3.6 представлена осцилограма струму лінії 110 кВ. У момент часу 5 с відбулося зменшення навантаження, яке привело в дію процес відключення. Відключення лінії відбувається практично миттєво і триває до моменту включення раніше відключеного навантаження.

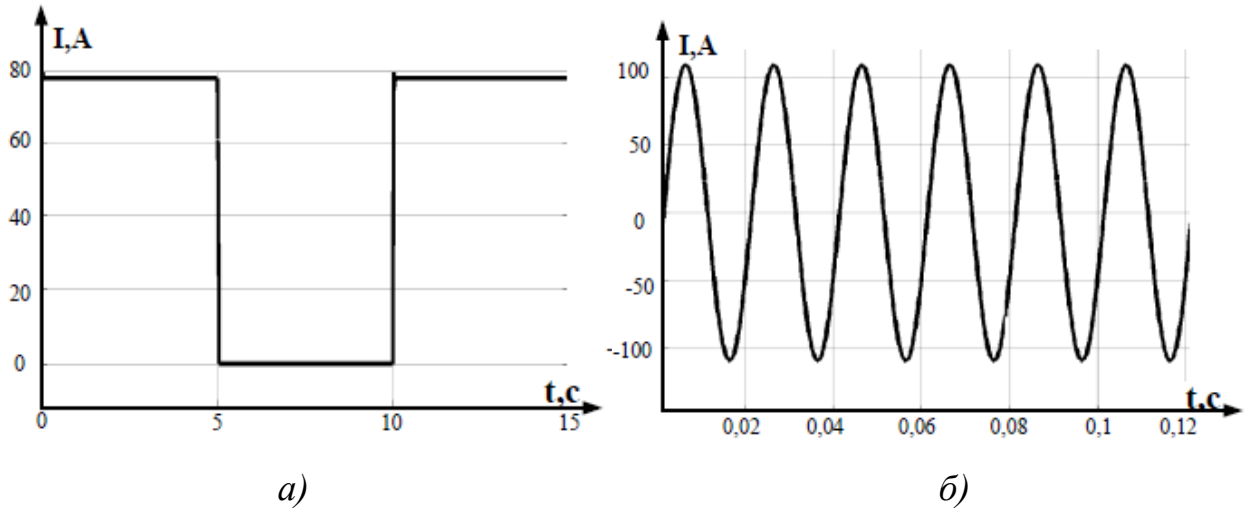


Рисунок 3.6 – Осцилограма струму на лінії 110 кВ а) діюче значення, б) миттєве значення

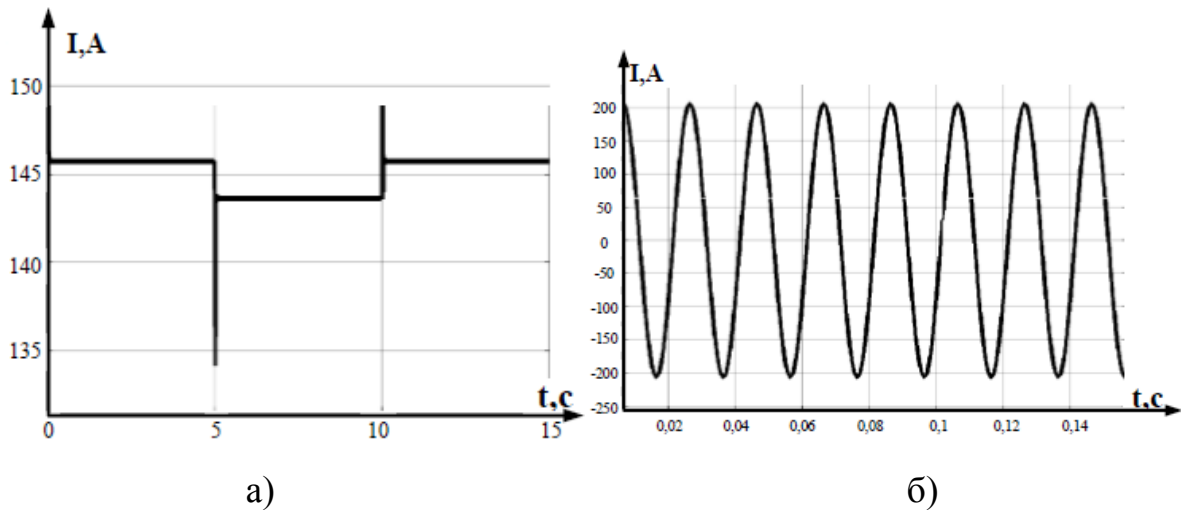


Рисунок 3.7 – Осцилограма струму на лінії 220 кВ а) діюче значення, б) миттєве значення

На рис. 3.7 приведена осцилограма струму, знята з лінії 220 кВ. Падіння струму в момент часу 5 с відповідає режиму мінімальних навантажень без

вимкнення ПЛ 110 кВ. Ділянка від 5 с до 10 с – режим мінімальних навантажень при відключеній лінії 110 кВ, як видно значення струму не перевищує гранично допустимих значень. Стрибок струму в момент часу 10 с обумовлений включенням повного навантаження, і наступним автоматичним включенням лінії 110 кВ.

Висновок по розділу:

Згідно з результатами моделювання, можна зробити висновок, що розроблений алгоритм працює відповідно до поставленого завдання, виробляє практично миттєве включення і відключення ПЛ 110 кВ.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день одним із пріоритетних завдань, які потребують сучасні енергосистеми є оптимізація втрат електроенергії з впровадженням нових інтелектуальних технологій. Найбільші втрати електроенергії спостерігаються на класах напруги 110-150 кВ і 6-10 кВ.

Найефективнішими заходами по оптимізації втрат електроенергії є: зниження витрат електроенергії на власні потреби; оптимізація усталених режимів за реактивною потужністю та рівнями напруги; відключення в режимі малих навантажень устаткування електромережі. Це все можливо реалізувати при ефективній системі автоматизованого управління режимами роботи системи.

В ході досліджень було розроблено алгоритм роботи автоматичного пристрою регулювання та оптимізації втрат електроенергії, сформульовані основні вимоги до нього та проведено моделювання алгоритму в ПК RastrWin3. Апробація розробленого алгоритму показала переваги і недоліки досліджених схем роботи системи.

Згідно з результатами моделювання в програмному комплексі Matlab Simulink, можна зробити висновок, що розроблений алгоритм працює відповідно до поставленого завдання, виробляє практично миттєве включення і відключення ПЛ 110 кВ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бронштейн И. Н., Семендяева К. А. Справочник по математике для инженеров учащихся вузов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 544 с.
2. Василега П. О. Электропостачання: Навчальний посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.
3. Веников В. А. и др. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах/ В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
4. Высоковольтные линии постоянного и переменного тока. Генерация напряжения в электротехнике. Часть 1 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.380v.ru/reference/tech-articles/327-direct-current-lines-01?tmpl=component&print=1&pagee=>
5. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжение общего назначения.
6. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК_Пресс, 2008. – 784 с.
7. Электропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
8. Электропостачання: навчальний посібник. / Ф. П. Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
9. Жежеленко И. В., Рабинович М. Л., Божко В. М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях.– К.: Техника, 1981. – 160 с.
10. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

11. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
12. Карташев И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с.
13. Конюхова Е.А. Исследование влияния статических характеристик нагрузки на потери мощности и напряжения в системе электроснабжения промпредприятия// Промышленная энергетика, 1995, №9
14. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А., Сапунов М.В. Вопросы измерения параметров электрических режимов и гармонических спектров в сетях с резкопеременной и нелинейной нагрузками. Промышленная энергетика, 2005, №3.
15. Математичне моделювання та оптимізація систем електроспоживання у сільському господарстві: Навч. посібник / Г.Б. Іноземцев, В.В. Козирський; За ред. Г.Б. Іноземцева. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2010 – 140 с.
16. Неуймин В. Г. Пособие по Rastr. Версия 3.4 / В. Г. Неуймин. – Екатеринбург, 1999. – 93 с.
17. Особенности современного выбора основных конструктивных элементов ВЛ постоянного тока. // №2. – 2017. – №77. – С. 154–170.
18. Приборы для контроля и анализа качества электроэнергии И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов / Мир измерение №4 / 2002.
19. Расчеты на ЭВМ нормальных и предельных по мощности установившихся режимов сложных энергосистем. Шелухина Т.И./ Под ред. А.А. Гремякова-М.:Моск.энерг. ин-т, 1989. – 50 с.
20. Серия 3.407.1-164. Унифицированные железобетонные опоры ВЛ 35 кВ на центрифугированных стойках. Выпуск 1. Промежуточные, угловые, концевые и промежуточно-угловые опоры. Рабочие чертежи [Электронный ресурс]: // интернет сайт. URL: <http://www.iolitm.ru/library/50-opory-vl/839-seriya-3-407-1-164-v-1/> (дата звернення 1.09.2020).

21. Серия 3.407-68/73 (3078тм-т1) Унифицированные стальные нормальные опоры ВЛ 35,110 и 150 кВ. Рабочие чертежи. Том 1. Пояснительная записка. Энергосетьпроект [Электронный ресурс]: // интернет-сайт. URL: 105

22. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2-х томах. Том 1. Электроснабжение / Под общ. ред. А. А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.

23. Справочник по проектированию электрических сетей [Электронный ресурс] // интернет-сайт. URL: http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/a/ANDREEVMV/academic/avtomatica_ees/Tab1/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf/ (дата звернення 01.10.2020).

24. Технические данные трехфазных трехобмоточных трансформаторов [Электронный каталог] // интернет-сайт. URL: <http://leg.co.ua/info/transformatory/technicheskie-dannye-trehfaznyh-trechobmotochnyhtransformatorov.html/> (дата звернення 30.09.2020).

25. Тиходеев Н. Н., «Некоторые вопросы оптимизации воздушных линий электропередачи переменного и постоянного тока / Н. Н. Тиходеев, А. А. Зевин, Л. И. Качановская. // Семинар "Прогресс в проектировании, строительстве и эксплуатации электрических сетей – ЛЭП 2003". – 2003.

26. Управления качеством Электрической энергии: учебное пособие для вузов / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 354 с.

27. Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Карапетян И.Г. Справочник по проектированию электрических сетей/ Под редакцией Д.Л.Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

28. Черных И. В. SIMULINK. Среда создания инженерных приложений. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. – 194 с.

29. Электрические системы и сети [Электронный ресурс] // интернет-сайт. URL: <http://www.c-o-k.ru/library/document/12770/> (дата звернення 2.10.2020).

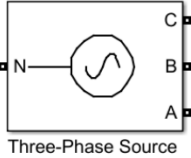
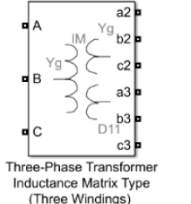
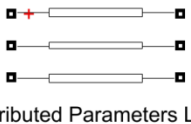

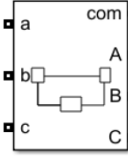
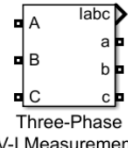
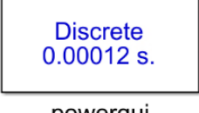
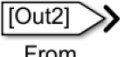
30. Ягуп В.Г., Ягуп К.В. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання / Навчальний посібник. – Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. (ХНУМГ ім. О.М. Бекетова), 2019. – 183 с.

31. <http://www.380v.ru/reference/tech-articles/327-direct-current-lines-01..>

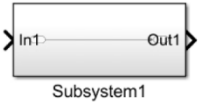
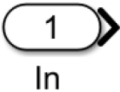



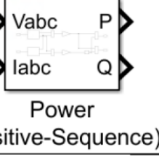
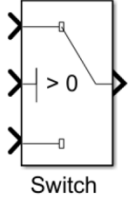

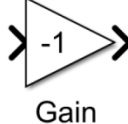
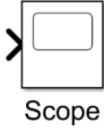
32. <http://www.zavodsz.ru/Tipovyie-proektyi-opor-Lep/seriya-3407-6873-3078tmt1.htm> / (дата звернення 1.10.2020).

ДОДАТКИ

**Таблиця блоків, що використовуються при моделюванні перетину
досліджуваної системи**

Блок	Оригінальна назва блока	Українська назва блока	Принци дії
Блоки, які використовуються в моделі енергомережі			
 <p>Three-Phase Source</p>	Three-Phase Source	Джерело живлення з ізольованою нейтраллю, відповідає реальному джерелу живлення	Виробляє трифазну систему напруг
 <p>Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)</p>	Three-Phase Transformer (Three Windings)	Триобмотковий Трифазний Трансформатор	Виконує функції трифазного триобмоткового трансформатора
 <p>Distributed Parameters Line</p>	Distributed Parameters Line	Лінія електропередачі з розподіленими параметрами	Моделює багатозфазну лінію електропередачі з розподіленими параметрами
 <p>Three-Phase Series RLC Load</p>	Series RLC Load	Послідовна	Виконує функції RLC навантаження
 <p>Three-Phase Breaker</p>	Three-Phase Breaker	Високовольтний комутаційний пристрій	Виробляє відключення трифазних ланцюгів
 <p>Three-Phase V-I Measurement</p>	Three-Phase V-I Measurement	Трифазний вимірювач	Виконує вимірювання струмів і напруг в трифазних ланцюгах
 <p>powergui</p>	Powergui	Графічний інтерфейс користувача	Використовується для розрахунків параметрів лінії
 <p>From</p>	From/Goto	Передавач сигналу	Передає сигнал від одного блока до іншого

Таблиця блоків, що використовуються при моделюванні перетину

Блок	Оригінальна назва блока	Українська назва блока	Принцип дії
	Subsystem	Неподільна підсистема	Моделює логіку АПРВЕЕ
	In/out	Порт вводу/вивода	Експорт сигналу з електричної схеми
	RMS (Root Mean Square)	Среднеквадратичное (действующее) значение сигнала	Визначає діюче значення струму
	Compare to constant	Уставки спрацьовування	Порівнює величину поступаючого сигналу з уставкою спрацьовування
	Logical Operator	Логічний елемент	Виконує логічне множення
	Power (Positive-Sequence)	Блок потужності	Блок розрахунку активної та реактивної потужностей
	Switch	Ключ	Здійснює перемикання в разі зміни напрямку перетікання потужності
	Constant	Джерело постійного сигналу	Виробляє постійний сигнал рівний одиниці
	Gain	Підсилювальний блок	Виробляє множення сигналу на постійну величину
	Scope	Осцилограф	Візуально відтворює електричний сигнал