

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Білеуш Олександр Ігорович**

УДК 621.359.4

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналітичне дослідження режимів роботи протяжних (довгих) ліній  
електропередач з використанням пристроїв подовжньої ємнісної компенсації  
(тема роботи)

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

Білеуш О. І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Островерхов Микола Якович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.т.н., професор кафедри електрифікації,  
автоматизації виробництва та інженерної екології  
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

## АНОТАЦІЯ

Білеуш О. І. Аналітичне дослідження режимів роботи протяжних (довгих) ліній електропередач з використанням пристроїв подовжньої ємнісної компенсації. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Основною метою кваліфікаційної роботи є аналітичне дослідження режимів роботи протяжних (довгих) ліній електропередач з використанням пристроїв подовжньої ємнісної компенсації.

Ціллю роботи є вибір та обґрунтування використання пристроїв подовжньої компенсації реактивної енергії для підвищення пропускної здатності, покращення стійкості та зниження втрат потужності в енергосистемах.

**Ключові слова:** реактивна потужність, електрична мережа, інтелектуальна енергосистема, якість електроенергії.

## ABSTRACT

Bileush O. I. Analytical study of the operating modes of long (extended) power transmission lines using longitudinal capacitive compensation devices. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The main purpose of the qualification work is an analytical study of the operating modes of long (extended) power transmission lines using longitudinal capacitive compensation devices.

The purpose of the work is to select and justify the use of longitudinal reactive energy compensation devices to increase throughput, improve stability and reduce power losses in power systems.

**Keywords:** reactive power, electric network, intelligent power system, electricity quality.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ СПОРУДЖЕННЯ НА ЛІНІЯХ ВИСОКИХ НАПРУГ ПРИСТРОЇВ ПОЗДОВЖНЬОЇ ЄМНІСНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ	7
1.1 Призначення пристроїв поздовжньої ємнісної компенсації	7
1.2 Особливості спорудження на лініях високих напруг пристроїв поздовжньої ємнісної компенсації	9
Висновки по розділу 1	20
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ УСТАНОВОК ПОДОВЖНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	20
2.1 Аналітичне дослідження впливу установок подовжньої компенсації на пропускну здатність ліній електропередачі	22
2.2 Відношення реактивної потужності УПК до активної потужності, що передається лінією	29
2.3 Визначення критичної довжини хвилі лінії, що відповідає нульовому значенню ступеня компенсації.	33
2.4 Оцінка ефективності застосування КРШ на повітряній лінії 500 кВ з ПКУ	34
Висновки по розділу 2	37
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ТА СТІЙКОСТІ МІЖСИСТЕМНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ГНУЧКОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ З КЕРОВАНОЮ ПОЗДОВЖНЬОЮ І ПОПЕРЕЧНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ	38
3.1 Оптимізація усталених режимів і підвищення граничних передаваних потужностей гнучкої електропередачі з пристроями поздовжньої та поперечної компенсації	39
3.2 Дослідження статичної стійкості гнучкої електропередачі та визначення оптимальних параметрів налаштування пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації	47
Висновки по розділу 3	50
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

## ВСТУП

Для вирішення цілої низки важливих завдань і досягнення значних переваг в електроенергетиці необхідне підвищення пропускної здатності ліній електропередачі (ЛЕП).

Зі зростанням населення, розвитком промисловості та збільшенням використання електроприладів, потреба в електроенергії постійно зростає. ЛЕП з недостатньою пропускною здатністю можуть стати "вузьким місцем", обмежуючи постачання електроенергії споживачам і стримуючи економічний розвиток.

Крім того, необхідно враховувати інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергосистему країни. ВДЕ, такі як сонячні та вітрові електростанції, часто розташовані у віддалених районах, далеко від основних центрів споживання. Для передачі електроенергії від цих станцій до споживачів потрібні ЛЕП з високою пропускною здатністю. Крім того, ВДЕ характеризуються змінною генерацією, що вимагає більшої гнучкості в електроенергетичній системі, для чого також необхідні ЛЕП з достатньою пропускною здатністю.

Збільшення пропускної здатності ЛЕП створює більше можливостей для перерозподілу електроенергії у разі аварій або перевантажень на окремих ділянках мережі. Це підвищує стійкість енергосистеми до збоїв і знижує ризик відключень електроенергії.

При передачі електроенергії по ЛЕП відбуваються втрати енергії, пов'язані з опором проводів. Збільшення пропускної здатності часто досягається шляхом використання проводів більшого перерізу або застосування більш ефективних технологій передачі, що призводить до зниження втрат і підвищення ефективності енергосистеми.

ЛЕП з високою пропускною здатністю дозволяють електроенергії вільно переміщатися між різними регіонами, створюючи конкуренцію між виробниками електроенергії та знижуючи ціни для споживачів. Підвищення пропускної здатності ЛЕП дозволяє доставляти електроенергію у віддалені та

важкодоступні райони, де відсутнє власне виробництво електроенергії. Це сприяє соціально-економічному розвитку цих регіонів.

ЛЕП з високою пропускнуою здатністю дозволяють підтримувати стабільну напругу і частоту в мережі, що забезпечує більш якісне електропостачання споживачів.

В цілому, підвищення пропускнуої здатності ліній електропередачі є **актуальним фактором** для забезпечення надійного, ефективного та стійкого електропостачання в умовах зростаючого попиту на електроенергію, розвитку відновлюваної енергетики та інтеграції нових технологій.

Наразі велика увага приділяється підвищенню пропускнуої спроможності ліній електропередачі, що пояснюється зростанням навантаження, відповідним зростанням перетоків активної потужності по лініях та проблемами, пов'язаними з будівництвом нових ліній. Як один із засобів вирішення цієї задачі для протяжних ліній використовуються пристрої подовжньої ємнісної компенсації (УПК).

Відповідно до вище зазначеного **метою кваліфікаційної роботи** є аналітичне дослідження режимів роботи протяжних (довгих) ліній електропередач з використанням пристроїв подовжньої ємнісної компенсації.

**Ціллю роботи** є вибір та обґрунтування використання пристроїв подовжньої компенсації реактивної енергії для підвищення пропускнуої здатності, покращення стійкості та зниження втрат потужності в енергосистемах.

#### **Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

Білеуш О. І. ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИСТРОЇВ ПОЗДОВЖНЬОЇ ЄМНІСНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ.

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 195-198.

Білеуш О. І., Островерхов М. Я. ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВІДСТАНІ МІЖ УСТАНОВКАМИ ПОЗДОВЖНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 201-204.

Білеуш О. І., Островерхов М. Я. ВПЛИВ УСТАНОВОК ПОДОВЖНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 208-210.

## РОЗДІЛ 1

### ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ СПОРУДЖЕННЯ НА ЛІНІЯХ ВИСОКИХ НАПРУГ ПРИСТРОЇВ ПОЗДОВЖНЬОЇ ЄМНІСНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ

Спорудження пристроїв поздовжньої компенсації (ППК) на лініях надвисокої напруги (ЛНН) є ефективним і широко застосовуваним рішенням для підвищення пропускної здатності, покращення стійкості та зниження втрат потужності в енергосистемах.

#### 1.1 Призначення пристроїв поздовжньої ємнісної компенсації

ППК є ефективним засобом підвищення пропускної здатності ліній електропередачі, покращення стійкості енергосистеми та зменшення втрат потужності.

Установки поздовжньої компенсації (УПК) представляють собою послідовно включені в лінію електропередачі конденсаторні батареї. Вони створюють ємнісне реактивне опір, яке компенсує частину індуктивного реактивного опору лінії. Це призводить до:

- Зменшення повного імпедансу лінії: Зниження імпедансу призводить до збільшення переданої потужності за тієї ж різниці напруг на кінцях лінії.
- Покращення стійкості енергосистеми: Зменшення кута між напругами на кінцях лінії підвищує статичну та динамічну стійкість енергосистеми.
- Зниження втрат потужності: Зменшення струму в лінії знижує втрати потужності в провідниках.
- Покращення розподілу напруги: УПК сприяють більш рівномірному розподілу напруги вздовж лінії.

Переваги використання УПК на лініях НВН:

- Збільшення пропускної здатності: Дозволяє передавати більше електроенергії по існуючих лініях без будівництва нових. Це економічно вигідно, особливо за високої вартості земельних відводів і екологічних обмежень.

- Підвищення стійкості енергосистеми: Покращує стійкість енергосистеми до коливань та аварійних режимів.

- Зниження втрат потужності: Скорочує втрати електроенергії при передачі, підвищуючи ефективність роботи енергосистеми.

- Покращення регулювання напруги: Забезпечує більш стабільну напругу у споживачів.

- Оптимізація використання існуючих ліній: Дозволяє більш ефективно використовувати наявну інфраструктуру ліній електропередачі.

Технічні аспекти спорудження УПК на лініях НВН:

- Вибір місця встановлення: Місце встановлення УПК визначається виходячи з топології мережі, режимів роботи та вимог до стійкості.

- Розрахунок ступеня компенсації: Ступінь компенсації (відсоток компенсації індуктивного опору) обирається залежно від цілей та обмежень. Зазвичай вона становить від 20% до 80%.

- Конструкція конденсаторних батарей: Конденсаторні батареї повинні бути розраховані на високу напругу та струм, а також забезпечувати надійну роботу в різних кліматичних умовах.

- Система захисту та керування: УПК повинні бути оснащені надійною системою захисту від перенапруг, перевантажень та інших аварійних режимів. Система керування має забезпечувати автоматичне регулювання ступеня компенсації залежно від режимів роботи енергосистеми.

- Захист від резонансу: Необхідно враховувати можливість виникнення резонансних явищ в енергосистемі за наявності УПК і вживати заходів для їх запобігання.

Основними типами УПК є:

- Фіксовані УПК (Fixed Series Compensation - FSC): Ступінь компенсації постійна.

- Керовані УПК (Thyristor Controlled Series Compensation - TCSC): Ступінь компенсації може регулюватися за допомогою тиристорів. TCSC дозволяють

швидко та ефективно змінювати імпеданс лінії, покращуючи стійкість і оптимізуючи режими роботи енергосистеми.

## **1.2 Особливості спорудження на лініях високих напруг пристроїв поздовжньої ємнісної компенсації**

Дані пристрої давно відомі. Вони не отримали великого застосування в нашій країні, але достатньо широко застосовуються у світовій практиці (США, Швеція, Китай, Індія, Австралія). По-скільки зараз розроблені засоби управління ступенем компенсації (TCSC або ТУПК), то такі компенсуючі пристрої можуть бути використані не тільки для підвищення пропускної спроможності окремих ліній, але і для рішення ряду системних завдань, таких як підвищення динамічної стійкості систем, що зв'язуються, оптимізації розподілу потоків потужності в складній неоднорідній мережі і деякі інші.

Відомі два шляхи виконання поздовжньої ємнісної компенсації - зосереджена компенсація та розподілена. У першому випадку УПК споруджуються тільки в одній точці будь-якої лінії (проміжна підстанція або перемикаючий пункт). У другому випадку УПК споруджуються в двох або більше точках однієї і тієї ж лінії. Ємнісний опір кожного з УПК вибирається так, щоб їх сума дорівнювала значенню, який визначає заданий рівень компенсації цієї лінії.

Одним з недоліків, властивих зосередженій компенсації, є підвищення напруги на виводах конденсаторної батареї (КБ) у режимах холостого ходу (х.х.) і малих навантажень, що змушує застосовувати шунтуючі реактори (ШР), які включаються на виводах КБ. Це призводить до ускладнення схеми УПК та збільшення вартості всього пристрою.

При розподіленій компенсації ємнісний опір кожної з УПК складає лише частку загального опору, що визначається заданим ступенем компенсації. Тому напруга на його виводах має бути менше, ніж на УПК, зосередженому в одному місці.

На рис. 1.1 наведено залежності напруг на виводах КБ від довжини лінії режиму х.х. останньої. Ці залежності побудовані для двох випадків

розташування УПК. У першому з них одна УПК розташована в середині лінії, у другому два УПК розташовані по кінцях цієї ж лінії. Ступені компенсації в обох випадках рівні.

Ці залежності мають різний характер. У в першому випадку напруга на висновках КБ зі збільшенням довжини лінії зростає і при деякій довжині стає більше допустимого значення і продовжує зростати.

У другому випадку напруга знижується, залишаючись завжди суттєво нижче допустимого значення. Однак це справедливо лише режиму х.х. Як буде показано далі, і в цьому випадку в режимі великих навантажень напруги на виводах УПК також може перевершувати допустиме значення.

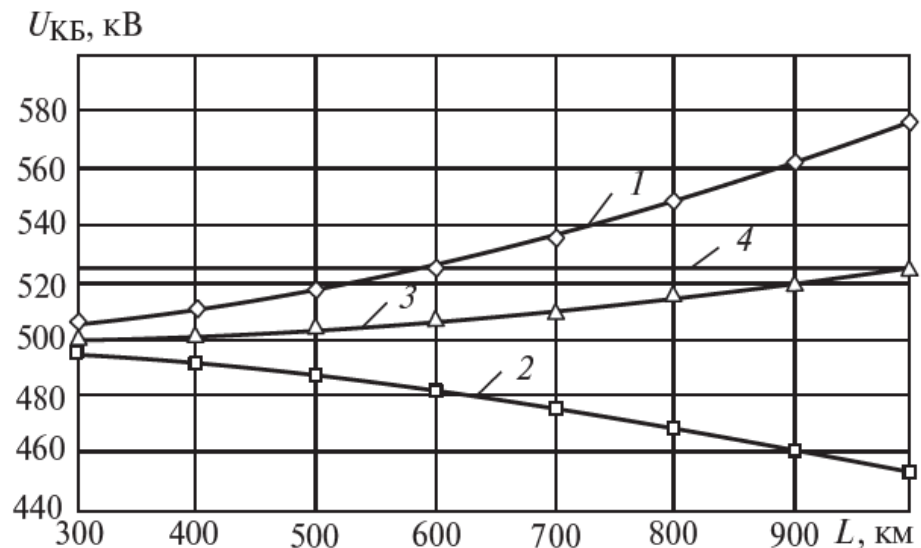


Рисунок 1.1. Напруги на виводах КБ та в середній точці лінії для ліній різної довжини в режимі х.х. ( $P_1 = 0$ ) при  $k_c = 0,4$ : 1 – обидва УПК розташовані в центрі лінії; 2 – УПК розташовані по кінцях лінії; 3 — напруга в середині лінії для другого випадку; 4 – допустима напруга  $U = 525$  кВ

Звідси виникає завдання знаходження умов, при яких напруга на виводах УПК буде нижче допустимо у всіх режимах. Тут слід підкреслити, що мова йде лише про технічні можливості здійснення таких режимів.

Нажаль, в вітчизняній літературі, присвяченій поздовжній ємнісній компенсації, як правило, розглядалася тільки зосереджена компенсація [1-3], тому ряд питань залишається незрозумілим. До них відносяться:

оптимальна відстань між УПК як з точки зору її пропускної спроможності,

так і напруги на виводах УПК;

розподіл реактивною потужності і напруги по лінії в різних нормальних режимах роботи;

гранично допустима ступінь компенсації і інші можливі режимні обмеження;

характеристики режиму одностороннього включення лінії.

Аналіз проводився для одноланцюгових ліній 500 кВ з проводами 3 'АС - 400/51 завдовжки від 300 до 1000 км без проміжних відборів потужності. Розглядалися лінії з двома УПК, одне з котрих кероване, інше – некероване з незмінним ступенем компенсації (Рис. 2.2, а ).

У якості інструменту дослідження використовувався метод еквівалентного чотириполюсника [4]. Цей метод дає можливість, використовуючи достатньо простий математичний апарат, визначити параметри режиму у вузлових точках електропередачі і побудувати їх залежності від відстані між двома УПК.

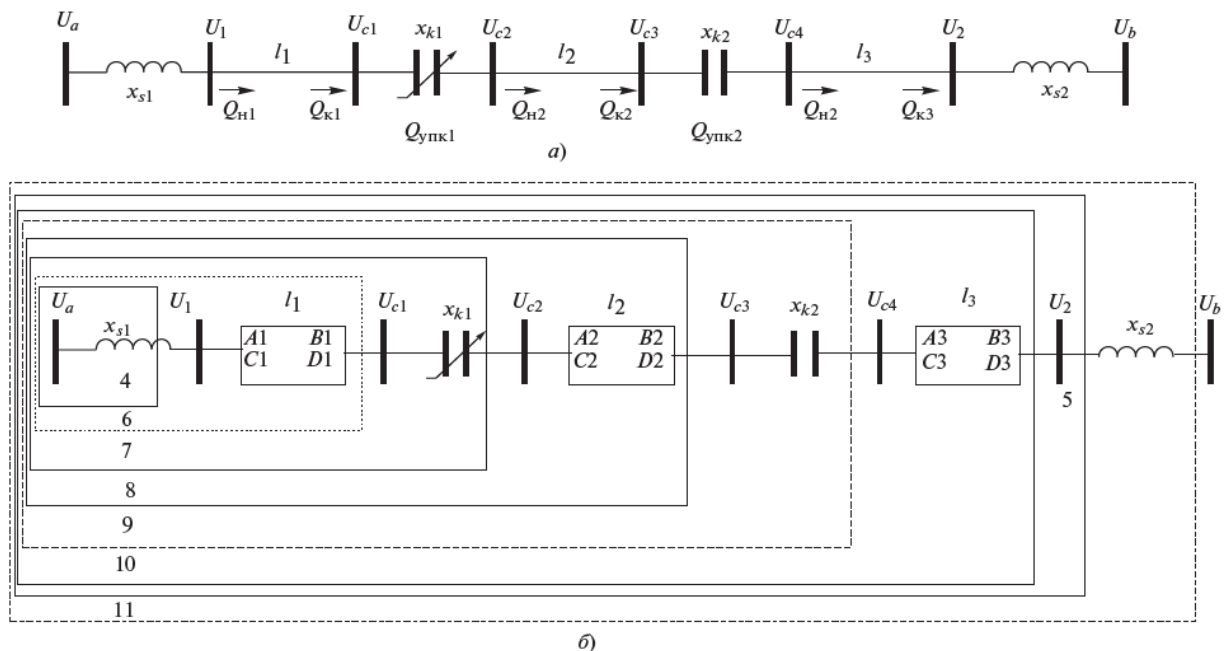


Рисунок 2.2. Схема лінії електропередачі (а) і її подання в вигляді еквівалентних чотириполюсників (б)

Параметри чотириполюсників, які визначають окремі ділянки лінії, визначалися по відомим методикам з використанням гіперболічних

функцій комплексних змінних. Результати розрахунків перевірялися по іншій методиці, де ділянки лінії були представлені П-схемами заміщення. Розрахунки виконувалися в програмному середовищі Mathcad.

Оскільки основним завданням було визначення оптимальної відстані між двома УПК, в розрахунках розглядалося їх переміщення з центру лінії до її кінця.

При аналізі були прийняті наступні допущення:

два КПК переміщаються симетрично відносно центру лінії;

втрати активної потужності на корону не враховуються;

найбільша допустима напруга на виводах КБ дорівнює найбільшій робочій напрузі (для прийнятого класу напруги  $U_{\text{доп}} = 525$  кВ).

На підставі припущень при симетричному переміщенні УПК при  $l_1 = l_2$  можна записати

$$l_1 = (L - l_2) / 2. \quad (1.1)$$

Це дає можливість представити всі параметри режиму як функцію відстані між двома УПК.

Сумарний ємнісний опір усіх УПК, встановлених на лінії, визначається як

$$\sum_{i=1}^n x_{ki} = k_c \cdot x_{\text{л}}, \quad (1.2)$$

де  $k_c$  - заданий ступінь компенсації, який визначається з розрахунку пропускної здібності лінії (у розрахунках ступінь компенсації змінювалася від 20 до 60%);  $x_{\text{л}} = jZ_{\text{л}} \sin l$  - реактивний опір некомпенсованої лінії;  $Z_{\text{л}}$  - хвильове опір лінії;  $l$  - її хвильова довжина.

У аналізованому випадку загальний опір УПК дорівнює:

$$\sum_{i=1}^n x_{ki} = x_{k1} + x_{k2}, \quad (1.3)$$

де  $x_{k1}$  - змінний опір керованого УПК 1;  $x_{k2}$  - постійний опір некерованого УПК 2.

Якщо прийняти  $x_{k2} = 0,2 x_{\text{л}}$ , то необхідний опір керованого УПК

визначається як:

$$x_{k1} = (k_c - 0,2)Z_n \cdot \sin l. \quad (1.4)$$

Тут варто зазначити, що (1.4) не враховує місця встановлення УПК. Тому в математичній моделі лінії значення коефіцієнта  $B_e$  – коефіцієнт еквівалентного чотиріполюсника, що визначає пропускну здатність лінії, буде змінюватися при переміщенні двох УПК по лінії. Це призводитиме до зміни фактичного ступеня компенсації.

У роботі розглядаються реальні лінії. Активний опір проводів має помітний вплив на параметри режиму (напруги у вузлових точках електропередачі, реактивні потужності ділянок лінії), і цей вплив зростає при збільшенні ступеня компенсації.

Для ліній з двома УПК слід ввести два поняття оптимальної відстані між ними: перше – за умовою найбільшої пропускну спроможності, друге – за умовою напружень на виводах КБ.

Розглянемо *першу умову*. Пропускна спроможність компенсованої лінії визначається, в основному, мінімальним значенням коефіцієнта  $B_e$  еквівалентного чотиріполюсника, що замінює лінію. Характер зміни цього коефіцієнта в залежності від відстані між УПК — довжини хвилі другої ділянки лінії  $l_2$  (при  $x_{s1} = x_{s2} = 0$ ) наведено на рис. 1.3. Аналіз цих залежностей дозволяє зробити наступні висновки.

Для ліній довжиною 300–500 км значення коефіцієнта  $B_e$  мало залежить від відстані між двома УПК. Діапазон зміни цього коефіцієнта для лінії довжиною 300 км становить 1–2%, для ліній довжиною 500 км – 2–5%. Явно виражений мінімум тут відсутній. Це говорить про те, що для таких ліній відстань між УПК з точки зору підвищення пропускну спроможності лінії не відіграє суттєвої ролі: УПК можуть бути споруджені як в центрі лінії, так і по її кінцях.

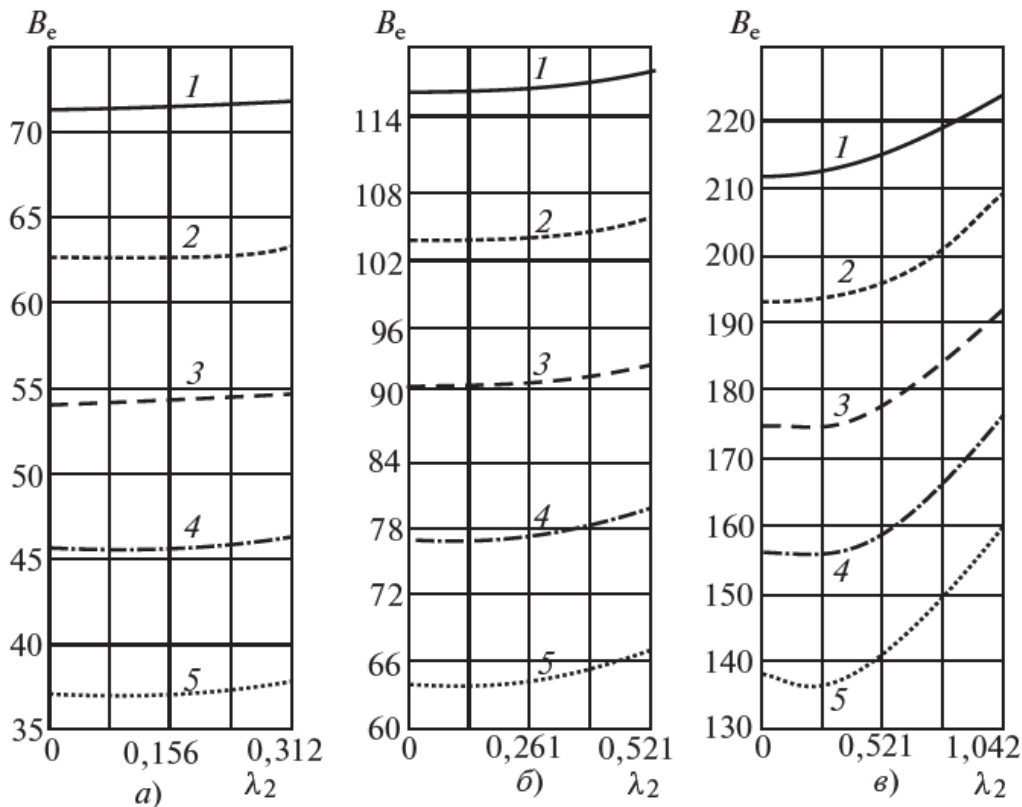


Рисунок 1.3. Залежність коефіцієнта  $B_e$  від відстані  $l_2$  між двома КПК для реальною лінії: а - довжиною 300 км; б - 500 км; в - 1000 км; 1 -  $k = 0,2$ ; 2 - 0,3; 3 - 0,4; 4 - 0,5; 5 - 0,6

Для ліній довжиною 300–500 км значення коефіцієнта  $B_e$  мало залежить від відстані між двома УПК (пристроями поздовжньої компенсації). Діапазон зміни цього коефіцієнта для лінії довжиною 300 км становить 1–2%, для ліній довжиною 500 км – 2–5%. Явно виражений мінімум тут відсутній. Це свідчить про те, що для таких ліній відстань між УПК з точки зору підвищення пропускної здатності лінії не відіграє суттєвої ролі: УПК можуть бути споруджені як у центрі лінії, так і на її кінцях.

Для ліній довжиною від 600 до 1000 км при зміні відстані між УПК такий мінімум проявляється. Аналіз показує, що оптимальна відстань між УПК для цих ліній за першою умовою становить орієнтовно від 100 до 200 км в залежності від ступеня компенсації. Оскільки при таких відстанях УПК опиняються розташованими недалеко від центру лінії, можна очікувати, що напруги на виводах КБ (компенсуючої батареї) будуть перевищувати

допустиме значення, що підтверджено подальшими розрахунками. Тому основну роль у вирішенні поставленої задачі відіграватиме *друга умова*.

Режимні характеристики ліній різної довжини були проаналізовані при зміні відстані між двома УПК ( $l_2$ ) від нуля, чому відповідає розміщення двох УПК в центрі лінії, до  $L$ , що означає встановлення цих УПК по кінцях лінії. Розрахунки проводились для різних значень передаваної потужності від нуля до найбільшої можливої при різних ступенях компенсації. Нижче наводяться результати цього аналізу.

*Лінія довжиною 300 км.* Пропускна здатність некомпенсованої лінії такої довжини, визначена за умовами статичної аперіодичної стійкості, перевищує допустиму потужність за умовою нагріву проводів. Тому лінія такої довжини не потребує застосування поздовжньої ємнісної компенсації для збільшення пропускної здатності. Однак при роботі такої лінії в складі складної неоднорідної мережі керована поздовжня компенсація може бути використана як засіб оптимізації розподілу потоків потужності в цій мережі. Якщо розглядати цю можливість, то, як показують розрахунки, її застосування не викличе будь-яких труднощів. Напруги на виводах КБ не будуть перевищувати допустимих значень у всіх режимах і при встановленні УПК в будь-якій точці лінії, і при будь-яких значеннях  $l_2$ . Для ліній такої довжини шунтуючі реактори на виводах КБ не потрібні.

*Лінія довжиною 500 км.* Залежності напруг на виводах КБ від відстані між УПК (довжини другої ділянки лінії  $l_2$ ) у різних режимах наведено на рис. 4. В режимі х.х. і відносно невеликих навантажень (до натуральної потужності 860 МВт) ці залежності мають спадний характер (рис. 4,а). При подальшому зростанні передаваної по лінії потужності приблизно до 1000 МВт характер цих залежностей змінюється, і напруги на виводах КБ при збільшенні відстані  $l_2$  спочатку знижуються, потім починають зростати. При потужності 1400 МВт одна з напруг ( $U_{c3}$ ) стає рівною гранично допустимому значенню при  $l_2 = 500$  км (рис. 4,б), тобто при розташуванні двох УПК на кінцевих підстанціях даної лінії.

Це підвищення напруги пояснюється тим, що при збільшенні передаваної потужності зростає струм в лінії і, як наслідок, збільшується генерація реактивної потужності конденсаторами УПК. Збільшення довжини другої ділянки призводить до збільшення її індуктивного опору, в результаті чого зростає напруга  $U_{c3}$ . Наведені результати свідчать про те, що при найбільшій передаваній потужності до 1400 МВт (ця величина визначається роллю даної лінії в системі) УПК можуть бути споруджені на будь-якій відстані між ними, в тому числі і на кінцевих підстанціях, без застосування ШР на виводах КБ.

Якщо ж передавана потужність повинна бути збільшена аж до допустимої за нагрівом проводів (2000 МВт), що може знадобитися в післяаварійних режимах, то відстань між УПК повинна становити від нуля до 350 км при ступені компенсації  $k_c = 0,4$ . На кінцевих підстанціях їх споруджувати не можна через значне підвищення напруги на деяких виводах КБ (рис. 4,в).

При збільшенні ступеня компенсації до 0,6, що може знадобитися з міркувань динамічної стійкості зв'язуваних лінією систем, у випадку розташування обох УПК поблизу центра лінії (малі значення  $l_2$ ) відбувається різке зростання напруги  $U_{c1}$  (рис. 4,г). Потім вона знижується. В результаті утворюється зона відстаней між УПК, в якій напруги на виводах КБ будуть нижчими за допустимі значення. Оптимальною видається відстань у 300 км. У табл. 1.1 і 1.2 наведено режимні характеристики лінії довжиною 500 км при  $l_2 = 300$  км.

Таблиця 1.1

Потужність яка передається $P_1$ , МВт	Напруга на виводах КБ, кВ				
	$U_{c1}$	$U_{c2}$	$U_{c3}$	$U_{c4}$	$U_{cp}$
$k_c = 0,2$					
0	509	509	503	513	513
860	502	502	507	504	505
$k_c = 0,4$					
0	511	503	503	511	509
860	508	499	506	503	503
2000	483	492	509	471	470

Таблиця 1.2

Потужність, яка передається $P_1$ , МВт	Реактивна потужність ділянок лінії, Мвар ( $k_c = 0,4$ )								Втрати $\Delta P$ , МВт	Кут $\delta$
	$Q_{н1}$	$Q_{к1}$	$\Delta Q_{УПК1}$	$Q_{н2}$	$Q_{к2}$	$\Delta Q_{УПК2}$	$Q_{н3}$	$Q_{к3}$		
0	-229	-141	2,0	-139	139	2,0	141	229	0,647	» 0
860	-201	-292	87	-115	-103	80	-23	-15,2	35,6	18,5°
2000	319	-98	482	384	-875	466	-409	-807	204	45°

У розглянутому випадку напруги на виводах КБ для ліній довжиною 500 км залишаються нижчими за допустимі значення у всьому діапазоні можливих навантажень, що дозволяє говорити про можливість спорудження УПК без реакторів на виводах КБ.

В той же час компенсувальні пристрої потрібні для компенсації значних потоків реактивної потужності на кінцях лінії. Їх потужність і тип повинні визначатися за умовами необхідного балансу реактивних потужностей у вузлах підключення даної лінії до шин передавальної та приймальної систем відповідно.

*Лінія довжиною 600 км.* Подальше збільшення довжини лінії до 600 км призводить до того, що напруги на виводах КБ в режимі холостого ходу лінії починають дещо перевищувати допустиме значення у випадку, якщо обидва УПК розташовані в центрі лінії. При симетричному переміщенні цих УПК відносно її центра напруги на виводах КБ знижуються і стають меншими за допустиме значення. При цьому границя переходу залежить від ступеня компенсації. Так, при  $k_c = 0,4$   $l_2 \gg 108$  км, при  $k_c = 0,5$   $l_2 \gg 190$  км (рис. 1.5,а). При збільшенні передаваної потужності до натуральної (860 МВт) напруги на виводах КБ також мають падаючий характер і залишаються нижчими за допустимі значення. Починаючи з потужності 1100 МВт, зростає напруга  $U_{с3}$ , тобто тут відбуваються процеси, ідентичні процесам в лінії довжиною 500 км.

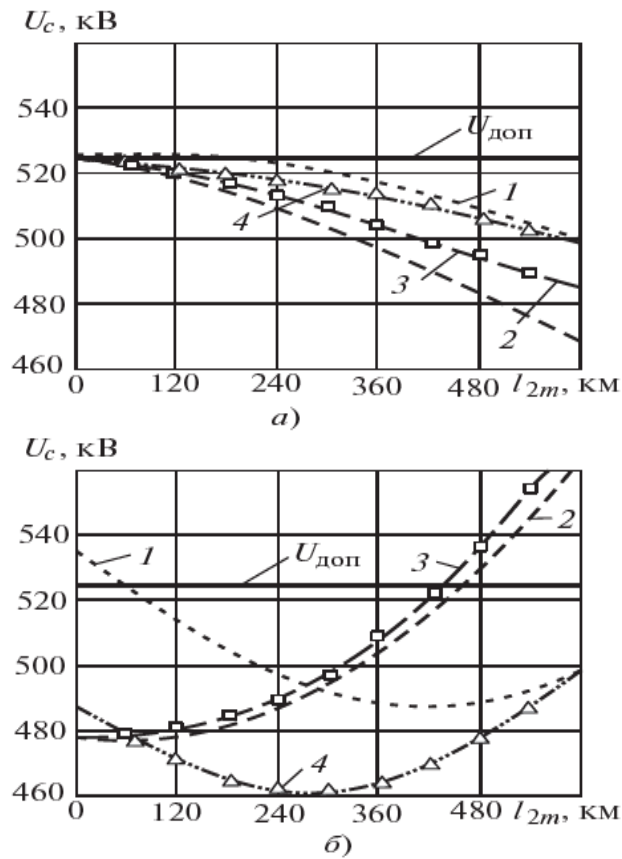


Рисунок 1.5. Залежність напруги на виводах КБ від довжини другого участка  $l_2$  для лінії 600 км,  $k_c = 0,5$ : а –  $P_1 = 0$ ; б –  $P_1 = 2000$  МВт, 1–4 див. рис. 1.4)

При збільшенні передаваної потужності до натуральної (860 МВт) напруги на виводах КБ також мають спадний характер і залишаються нижчими за допустимі значення. Починаючи з потужності 1100 МВт, зростає напруга  $U_{c3}$ , тобто тут відбуваються процеси, ідентичні процесам у лінії довжиною 500 км. При збільшенні передаваної потужності до 2000 МВт ( $k_c = 0,5$ ), що на 60% перевищує найбільшу передавану потужність по некомпенсованій лінії розглянутої довжини, напруги на деяких виводах КБ стають більшими за допустиме значення. Це відбувається при відстані між УПК 425 км (рис. 5,б). Тут також утворюється зона відстаней між УПК, в якій напруги на виводах КБ будуть меншими за допустимі у всіх режимах роботи.

Отримані результати говорять про те, що при зазначеній потужності спорудження УПК як в центрі лінії, так і на кінцевих підстанціях можливе тільки із застосуванням ШР. Якщо потрібно обійтись без застосування цих

реакторів, то відстань між УПК повинна бути в діапазоні від 110 до 420 км. Найбільш прийнятна відстань – близько 350 км. В табл. 1.3 і 1.4 наведені напруги на виводах КБ та режимні характеристики лінії для цього випадку ( $l_2 = 350$  км,  $k_c = 0,5$ ). Якщо ж найбільша передавана потужність менша за 1250 МВт, що передбачає і застосування меншого ступеня компенсації ( $k_c = 0,3, 0,4$ ), то спорудження УПК можливе на кінцевих підстанціях без ШР.

Таблиця 1.3

Потужність, яка передається $P_1$ , МВт	Напруга на виводах КБ, кВ				
	$U_{c1}$	$U_{c2}$	$U_{c3}$	$U_{c4}$	$U_{cp}$
0	519	499	505	515	511
860	517	495	509	503	502
1200	512	496	509	495	495
2000	489	504	508	464	464

Таблиця 1.4

Потужність, яка передається $P_1$ , МВт	Реактивна потужність ділянок лінії, Мвар							Втрати $\Delta P$ , МВт	Кут $\delta$	
	$Q_{н1}$	$Q_{к1}$	$\Delta Q_{УПК1}$	$Q_{н2}$	$Q_{к2}$	$\Delta Q_{УПК2}$	$Q_{н3}$			$Q_{к3}$
0	-304	-195	7,0	-188	134	3,0	137	248	1,24	0
860	-286	-290	156	-134	-121	92,5	-28,5	-17,2	42,9	19°
1200	-198	-305	293	-12	-293	182	-111	-199	82,7	27°
2000	236	-277	835	558	-897	542	-355	-846	242	47°

На рис. 1.6 показано розподіл напруги вздовж лінії довжиною 600 км в режимі холостого ходу. Завдяки стрибкам напруги на конденсаторах УПК1 та УПК2 напруга на другій ділянці виявляється зниженою в порівнянні з некомпенсованою лінією. Тому напруга в середній точці лінії виявляється меншою за допустиме значення. Глибина стрибка напруги на КБ залежить від ступеня компенсації та збільшується зі зростанням останнього.

Відзначимо, що для некомпенсованої лінії такої довжини напруга в середній точці дорівнює допустимому значенню і буде перевищувати його по мірі збільшення довжини лінії, що неприпустимо. Однак для компенсованих ліній, що розглядаються, довжиною понад 600 км спостерігатиметься подібна картина, і напруга в середній точці не перевищуватиме допустимого значення. За необхідності можна збільшити ступінь компенсації до необхідної. Таким чином, більший ступінь компенсації може використовуватися не тільки в

режимах великих навантажень, але і в режимах холостого ходу та малих навантажень. Водночас, при подальшому збільшенні довжини лінії понад 600 км збільшується довжина другої ділянки ( $l_2$ ), при якій напруги на виводах КБ в режимах х.х. і малих навантажень залишаються вищими за допустимі значення. Їх перехід через межу допустимого здійснюється при все більших значеннях  $l_2$ .

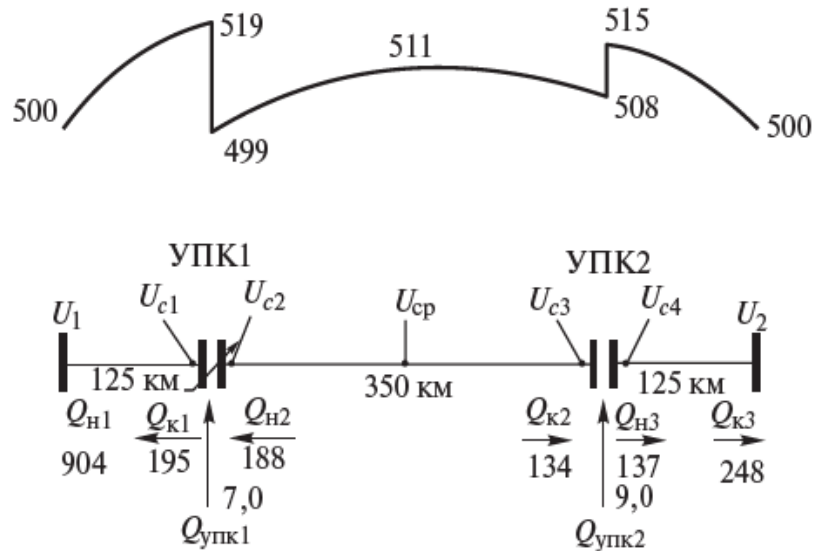


Рисунок 1.6. Розподіл напруги та реактивної потужності вздовж лінії довжиною 600 км в режимі х.х. ( $P = 0$ )

### Висновок по першому розділу

Розподілена по довжині ємнісна компенсація дозволяє знизити напруги на виводах ПЛ порівняно із зосередженою компенсацією. Для ліній довжиною 300–500 км відстань між УПК з точки зору підвищення пропускної здатності лінії не відіграє суттєвої ролі: УПК можуть бути споруджені як у центрі лінії, так і на її кінцях.

Існують оптимальні відстані між УПК, за яких напруги на виводах ПЛ у всіх режимах виявляються меншими за допустимі значення, що виключає необхідність встановлення ШР на ці виводи.

## РОЗДІЛ 2

### ВПЛИВ УСТАНОВОК ПОДОВЖНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Найбільш ефективним способом підвищення пропускної здатності ліній електропередачі є підвищення номінальної напруги, однак на сьогодні, як видається, досягнуто межі (1000/1150/1200 кВ). Натуральна потужність ліній зазначених класів напруги становить 4000—5400 МВт, і аварійне відключення такої лінії навіть для дуже потужної енергосистеми — надмірне збурення.

Конкуруючі способи підвищення пропускної здатності ліній електропередачі надвисоких і ультрависоких напруг — компенсація параметрів і глибоке розщеплення проводів. Поздовжньо-ємнісна компенсація, теоретично обґрунтована ще в 30-х роках минулого століття [1], на практиці застосована в 40—50-х роках для компенсації частини індуктивного опору ліній 220—400 кВ і відповідного збільшення передаваних потужностей [2].

Установка поздовжньої компенсації (УПК) здатна суттєво (на 30—50 %) збільшити пропускну здатність лінії електропередачі, помітно скорочує взаємний кут між напругами на шинах відправної та приймальної частин системи, підвищуючи рівень стійкості [3]. Вартість конденсаторної групи УПК становить зазвичай невелику частину від вартості нової ЛЕП, при цьому час спорудження УПК набагато менший, ніж ЛЕП. Як показує практика, термін окупності капіталовкладень для УПК зазвичай становить лише кілька років, на відміну від терміну спорудження нових ліній.

Однак спрощене пояснення ефективності УПК лише зменшенням поздовжнього індуктивного опору лінії електропередачі є недостатнім. Велика зосереджена ємність УПК, що генерує реактивну потужність пропорційно квадрату струму, призводить до значної зміни рівнів напруги у вузлах, що зумовлює необхідність застосування поперечно включених шунтуючих пристроїв [4]. До теперішнього часу для цієї мети використовувалися некеровані шунтуючі реактори (ШР). Різноманіття режимів роботи

електропередачі поставило питання про доцільність застосування в якості компенсуючих пристроїв керованих шунтуючих реакторів (КШР).

Мета нашої роботи полягала в аналізі режимів електропередачі з УПК, визначенні ефективності використання КШР та встановленні закону керування уставками напруги КШР, доцільного з точки зору оптимізації режимних параметрів за умови забезпечення нормативних величин напруг у вузлах.

При цьому потрібно вирішувати наступні задачі:

1) аналітично дослідити вплив пристрою поздовжньої компенсації на пропускну здатність ліній електропередачі;

2) чисельно дослідити усталені режими роботи ПЛ 500 кВ довжиною 687 км з метою обґрунтування ефективності встановлення УПК та законів регулювання КШР.

## **2.1 Аналітичне дослідження впливу установок подовжньої компенсації на пропускну здатність ліній електропередачі**

Основна ідея поздовжньої ємнісної компенсації полягає у зменшенні повного поздовжнього індуктивного опору електропередачі. Математично цьому відповідає зменшення величини індуктивного опору лінії  $X$  у виразі  $p = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin \delta$ , що характеризує потужність, яка передається по окремій лінії [5]. Розглянемо найпростішу модель лінії з поздовжньою ємнісною компенсацією.

*Ефективний* опір лінії  $X_{ef}$  визначається виразом

$$X_{ef} = X - X_c, \quad (2.1)$$

або

$$X_{ef} = (1 - \eta_c) X, \quad (2.2)$$

де  $\eta_c$  називається ступенем поздовжньої компенсації:

$$\eta_c = X_c / X, \quad 0 \leq \eta_c \leq 1. \quad (2.3)$$

При допущенні про рівність напруг  $U_1 = U_2 = U$ , активна та реактивна потужності компенсованої лінії можуть бути розраховані за наступними формулами[4]:

$$P = \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} \sin \delta; \quad (2.4)$$

$$Q = \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} - \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} \cos \delta. \quad (2.5)$$

Тоді квадрат струму компенсованої лінії може бути виражений наступним чином:

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = \\ &= \left( \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cdot \sin^2 \delta + \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} - 2 \cdot \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cdot \cos \delta + \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cdot \cos^2 \delta \right) / U^2 = (2.6) \\ &= \left( \frac{2U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} - 2 \cdot \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cdot \cos \delta \right) / U^2 = 2 \cdot \frac{U^2}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cdot (1 - \cos \delta). \end{aligned}$$

Тоді вираз, що визначає реактивну потужність, генеровану поздовжньо включеною ємністю, можна записати так:

$$Q_c = I^2 X_c = \frac{2U^2}{X} \cdot \frac{\eta_c}{(1 - \eta_c)^2} \cdot (1 - \cos \delta). \quad (2.7)$$

Взаємозв'язок між активною потужністю  $P$ , реактивною потужністю поздовжнього конденсатора  $Q_c$  та кутом  $\delta$  показано на рис. 2.1 для різних значень ступеня поздовжньої компенсації  $\eta_c$ . Як і очікувалося, зі збільшенням ступеня поздовжньої компенсації  $\eta_c$  передавана по лінії потужність швидко збільшується і, аналогічно, також різко збільшується генерована поздовжнім конденсатором реактивна потужність, яка змінюється з кутом  $\delta$  таким же чином, як і реактивна потужність лінії.

Отримані прості співвідношення, що характеризують поздовжньо-ємнісну компенсацію, демонструють недостатність наведених фізичних пояснень ефективності УПК тим, що опір поздовжнього компенсуючого конденсатора погашає частину фактичного реактивного опору лінії і, таким чином, ефективний опір передачі у виразі (2.1) зменшується, як у випадку фізичного

зменшення довжини лінії. Слід врахувати, що суттєвим фактором є значна реактивна потужність, генерована конденсаторною батареєю і що помітно впливає на величини напруг на її виводах.

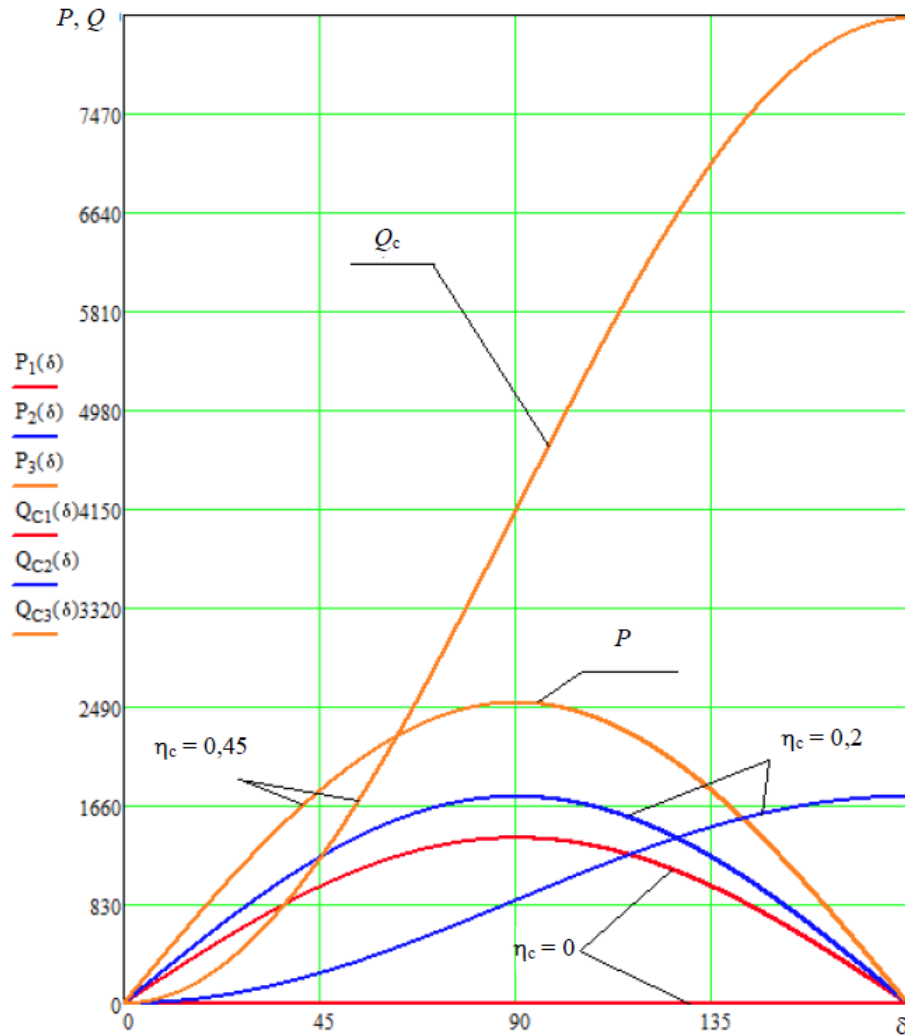


Рисунок 2. 1. Характеристики потужності компенсованої лінії та реактивна потужність поздовжнього конденсатора як функція кута  $\delta$

На рис. 2.2 представлена для аналізу векторна діаграма струмів і напруг у всіх точках лінії електропередачі 500 кВ довжиною 687 км при передачі потужності  $1,3P_n$  при підключенні некерованих реакторів у вузлах 2 і 4 з провідністю  $-0,2$  у.о.

Напруги у вузлах і провідності реакторів наступні:  $U_1 = 1,008$  у.о.;  $U_2 = 1,082$  у.о.;  $U_3 = 0,933$  у.о.;  $U_4 = 0,811$  у.о.;  $U_5 = 1,0$  у.о.;  $B_{r1} = -0,2$  у.о.;  $B_{r2} = -0,2$  у.о.

Рис. 2.3, а показано, як змінюються напруги на затискачах ємності при зміні передаваної потужності у разі використання некерованих реакторів, що компенсують зарядну потужність лінії. Різниця між зеленою і фіолетовою кривими відповідає падінню напруги на конденсаторній батареї.

Для зниження напруги на виводах УПК до допустимих значень необхідно компенсувати надлишкову зарядну потужність лінії і реактивну потужність, що генерується батареєю (рис. 2.3, б, в). Для цього на протяжних лініях встановлюються додаткові нерегульовані реактори на виводах УПК [4, 7]. Однією з цілей даної роботи було з'ясувати, наскільки ефективним виявиться застосування керованої поперечної компенсації для забезпечення допустимих значень напруги на УПК.

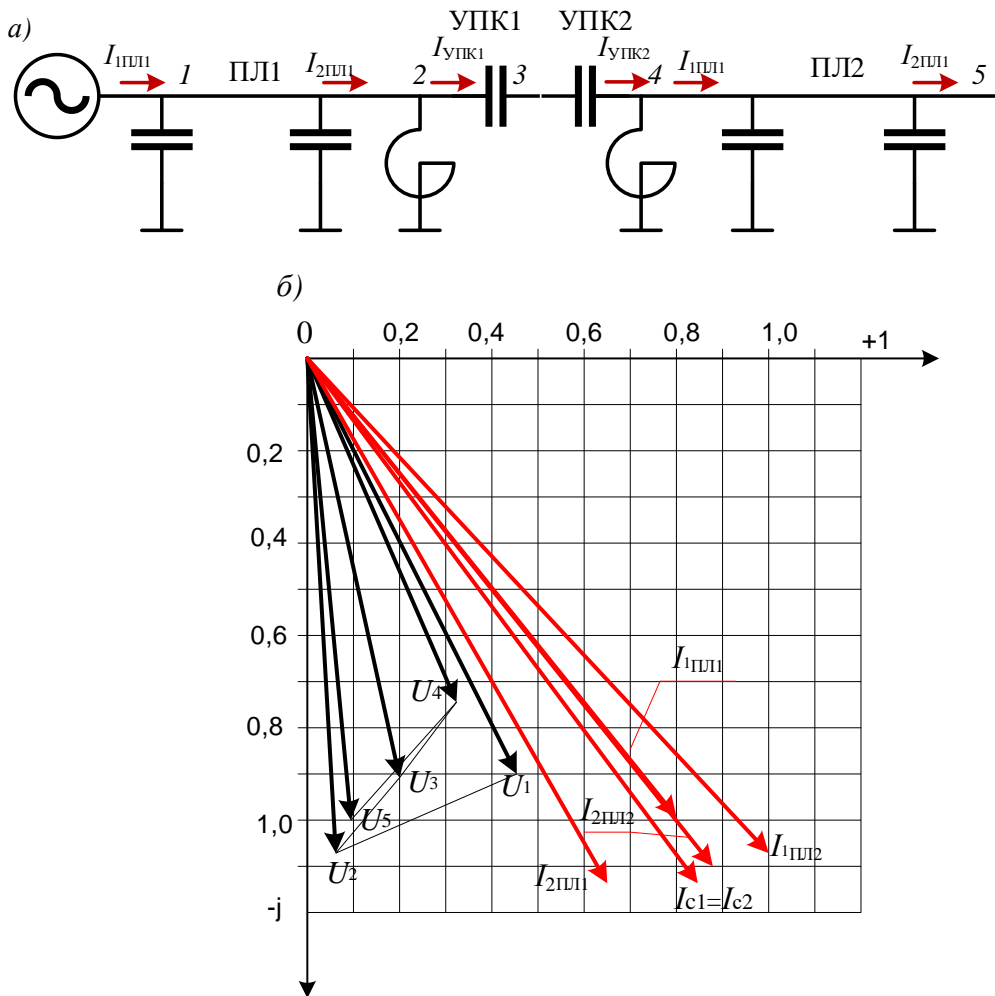


Рисунок 2.2. Схема електропередачі з ШР (а) та векторна діаграма (б) струмів і напруг при передачі потужності  $1,3P_H$

При використанні припущення про рівномірний розподіл УПК вздовж лінії аналіз умов її роботи може бути виконаний за допомогою хвильових рівнянь з наступними параметрами:

$$\left. \begin{aligned} \eta_c &= \frac{X_C}{X_L} = \frac{1}{\omega C_{УПК} \omega L_0 l}; \\ L_{0e} &= L_0 \cdot (1 - \eta_c); \\ z_e &= \sqrt{L_{0e} / C_0} = \frac{\sqrt{L_0 (1 - \eta_c)}}{\sqrt{C_0}} = z \cdot \sqrt{1 - \eta_c}; \\ v_e &= \frac{1}{\sqrt{L_{0e} \cdot C_0}} = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0 \cdot (1 - \eta_c)}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \eta_c}}; \\ \lambda_e &= \frac{\omega l}{v_e} = \omega L \cdot \sqrt{L_0 C_0 \cdot (1 - \eta_c)} = \lambda \cdot \sqrt{1 - \eta_c}; \\ P_{не} &= \frac{3U_{\phi ном}^2}{z \sqrt{1 - \eta_c}} = \frac{P_n}{\sqrt{1 - \eta_c}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Еквівалентний хвильовий опір  $z_e$  та еквівалентна довжина хвилі  $\lambda_e$  лінії з розподіленими УПК зменшуються, а натуральна потужність лінії  $P_{не}$  відповідно збільшується.

Сумарна потужність УПК на лінії при ступені компенсації  $\eta_c$  дорівнює

$$\begin{aligned} Q_{УПК} &= 3I^2 \eta_c X = 3I_n^2 \left( \frac{P_{2УПК}}{P_n} \right)^2 \cdot \eta_c z \sin \lambda = 3 \cdot U_{\phi ном} \cdot I_n \left( \frac{P_{2УПК}}{P_n} \right)^2 \cdot \eta_c z \sin \lambda = \\ &= P_n \left( \frac{P_{2УПК}}{P_n} \right)^2 \cdot \eta_c z \sin \lambda. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Усі розрахунки проводилися у відносних одиницях (за базисні величини прийнято номінальну напругу та хвильовий опір ПЛ 500 кВ).

На рис. 2.4 наведено сумарну потужність, генеровану УПК в залежності від завантаження лінії та зміни від 0 до 80 % ступеня ємнісної компенсації індуктивного опору лінії, розраховані за формулою (2.9).

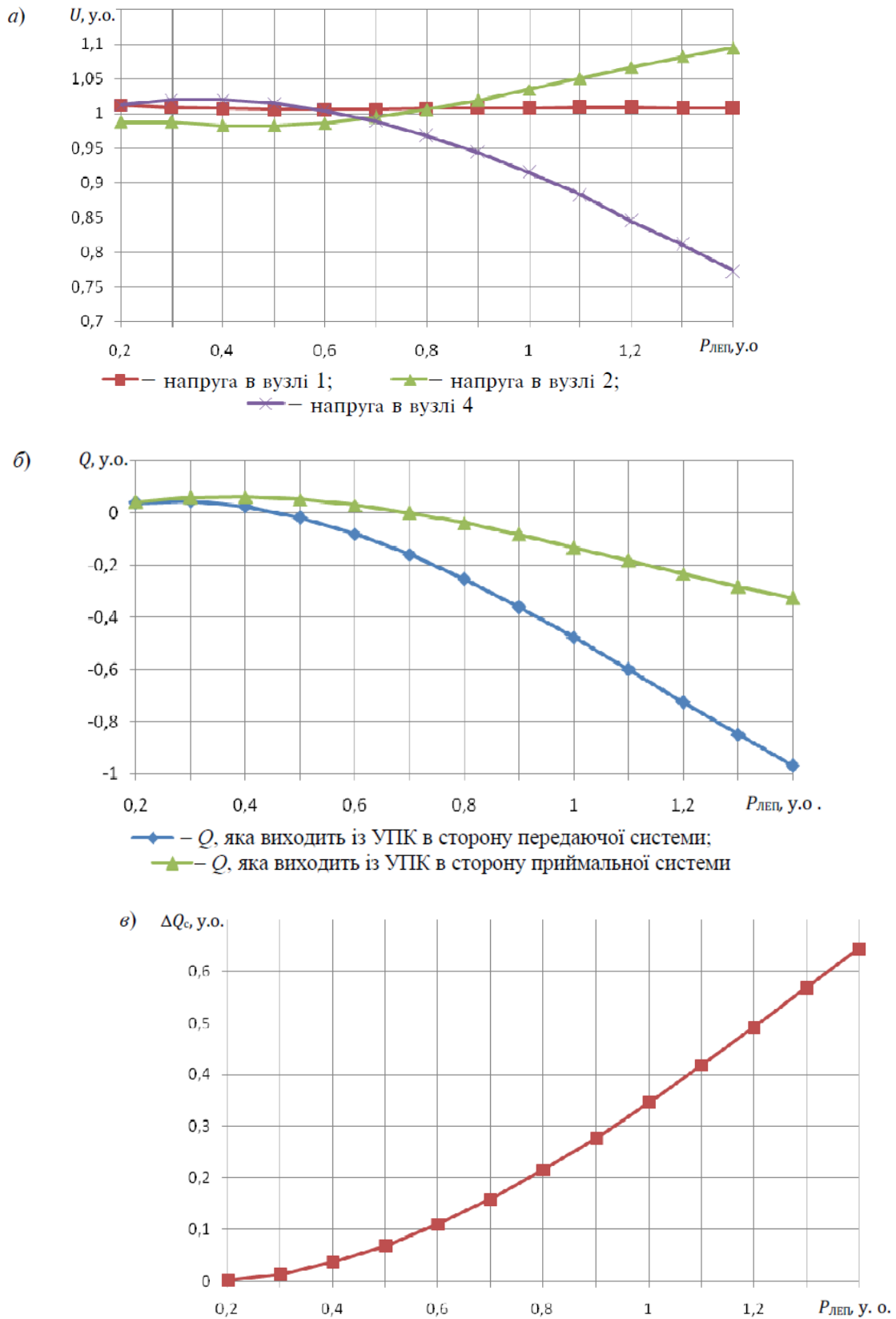


Рисунок 2.3. Напруги в проміжних вузлах (а), потік реактивної потужності з різних боків УПК (б) і реактивна потужність, що генерується УПК (в)

Результати розрахунків за формулою (9) для лінії 687 км при ступені компенсації  $\eta_c = 0,45$  наступні:

$Q$	$I$
0,19	0,8
0,297	1,0
0,427	1,2
0,581	1,4
0,759	1,6
0,961	1,8
1,186	2,0
1,435	2,2

Згідно з [8] відношення сумарної потужності УПК до приросту допустимої передаваної по лінії потужності при рівності напруг на кінцях лінії та при зневажанні активним опором лінії дорівнює

$$\frac{Q_{\text{УПК}}}{P_{2\text{УПК}} - P_2} = \frac{Q_{\text{УПК}}}{P_{2\text{УПК}} - P_n} = \eta_c \sin \lambda \frac{P_{2\text{УПК}}^2}{P_n (P_{2\text{УПК}} = P_n)} = \eta_c \sin \lambda \cdot \frac{P_{2\text{УПК}}}{P_n} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{P_n}{P_{2\text{УПК}}}\right)} =$$

$$= \eta_c \sin \lambda \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \eta_c}} \cdot \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \eta_c}}. \quad (2.10)$$

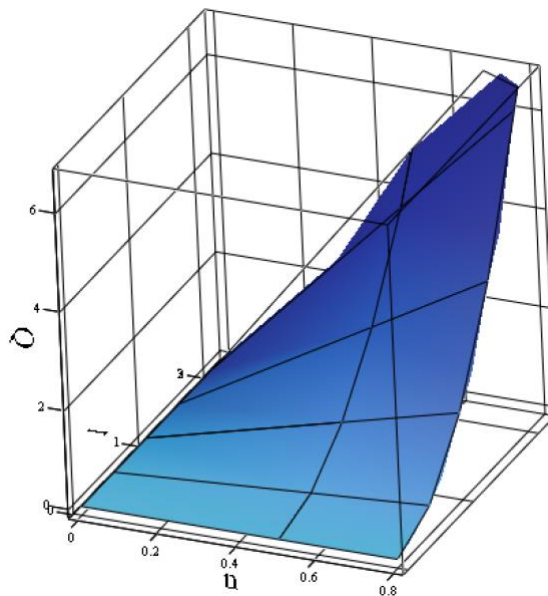


Рисунок 2.4. Залежність сумарної потужності УПК від ступеня компенсації та завантаження

$\eta_c$	$Q_{\text{УПК}} / (P_{2\text{УПК}} - P_2)$	
	спрошене	точне
0,1	2,151	1,779
0,2	2,218	1,834
0,3	2,299	1,901
0,4	2,399	1,984
0,5	2,528	2,091
0,6	2,703	2,235
0,7	2,959	2,447

Однак у [8] зроблено припущення, що  $\sin(\lambda) \cong \lambda$ . Це досить грубе для довгих ліній припущення дає помітну помилку в розрахунках. Так, наприклад, для лінії 1000 км при такому припущенні отримуються дані, представлені у другому стовпці таблиці, а при правильному розрахунку результати значно відрізняються від них (третій стовпець таблиці). Таким чином, припущення  $\sin(\lambda) \cong \lambda$  вносить помилку в розрахунки від 0,372 до 0,512 о.о. (17—20 %).

## 2.2 Відношення реактивної потужності УПК до активної потужності, що передається лінією

У роботі [8] проведено аналіз падіння напруги на зосередженому ємнісному опорі, оскільки при збільшенні ступеня компенсації збільшується падіння напруги на конденсаторній батареї, що призводить до підвищення напруги на затискачах УПК понад допустиме. Падіння напруги на батареї УПК дорівнює

$$\Delta U_c = IX_c = I_n \frac{P_2}{P_n} \cdot \eta_c \cdot X = I_n \frac{P_2}{P_n} \cdot \eta_c \cdot z \cdot \sin \lambda = U_2 \cdot \frac{P_2}{P_n} \cdot \eta_c \cdot \sin \lambda \quad (2.11)$$

де  $U_2$  — напруга з одного боку УПК (з боку приймальної системи). Для лінії 687 км на рис. 2.5 наведено тривимірний графік залежності падіння напруги на УПК від завантаження лінії та ступеня компенсації, побудований за формулою (2.11).

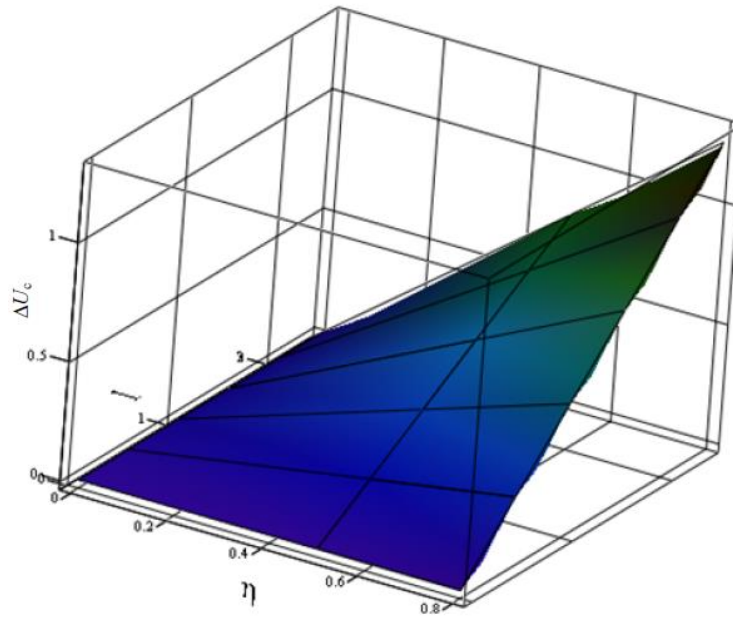


Рисунок 2.5. Залежність падіння напруги на УПК від ступеня компенсації та завантаження лінії

Напруга на іншому боці УПК виражена формулою

$$U_x = U_2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{P_2}{P_n}\right)^2 \cdot \eta_c^2 \cdot \sin^2 \lambda}. \quad (2.12)$$

Допустиме відношення переданої потужності до натуральної за заданого перепаду напруг на ЛЕП дорівнює [8]

$$\left(\frac{P_2}{P_n}\right)_{\text{дон}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_x}{U_2}\right)^2 - 1}}{\eta_c \cdot \sin \lambda}. \quad (2.13)$$

Приймаючи допустимий перепад напруги на батареї УПК рівним 1,05 у.о., отримуємо залежність (див. рис. 2.6) допустимого відношення переданої потужності до натуральної від ступеня компенсації індуктивного опору лінії довжиною 687 км.

З рис. 2.6 випливає, що при  $\eta_c = 0,45$  допустима передавана потужність не може перевищити величину  $P = 1,1P_n$ . Отримана крива також явно суперечить кривим в роботі [8], згідно з якими максимальний ступінь компенсації для ПЛ довжиною 687 км не може перевищити 34 %.

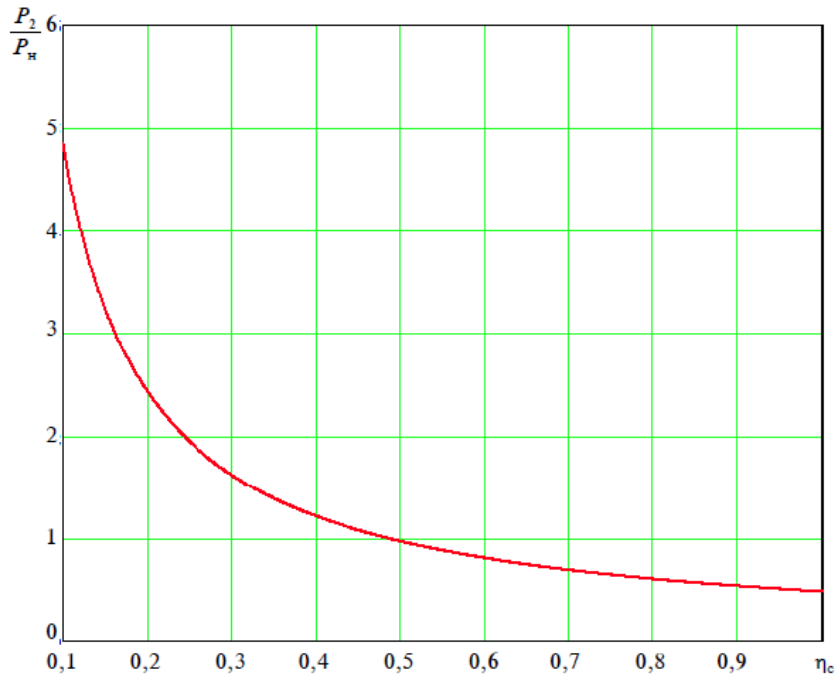


Рисунок 2. 6. Залежність допустимого відношення передаваної потужності до натуральної від ступеня поздовжньої ємнісної компенсації для лінії 687 км

При рівності напруг на кінцях лінії відношення допустимої передаваної потужності при наявності УПК та за відсутності УПК визначається співвідношенням

$$\frac{P_{2\text{донУПК}}}{P_{2\text{дон}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\eta_c}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho l}{U_2 \cdot \sin^2 \lambda \cdot \sqrt{1-\eta_c}} \cdot \left(1 + \frac{\sin 2\lambda \cdot \sqrt{1-\eta_c}}{2\lambda \cdot \sqrt{1-\eta_c}}\right)}{1 - \frac{\rho l}{U_2 \cdot \sin^2 \lambda} \cdot \left(1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda}\right)}} = \frac{1}{\sqrt{1-\eta_c}}. \quad (2.14)$$

Відповідно до цього співвідношення отримано залежність (рис. 2.7) від ступеня поздовжньої ємнісної компенсації відношення допустимої потужності, що передається лінією, до натуральної за наявності та відсутності УПК.

Як видно, збільшення ступеня поздовжньої компенсації призводить до значного зростання допустимої потужності, що передається лінією. Так, наприклад, для лінії 687 км при компенсації 45 % індуктивного опору лінії можна отримати збільшення передаваної потужності на 40 % вище натуральної.

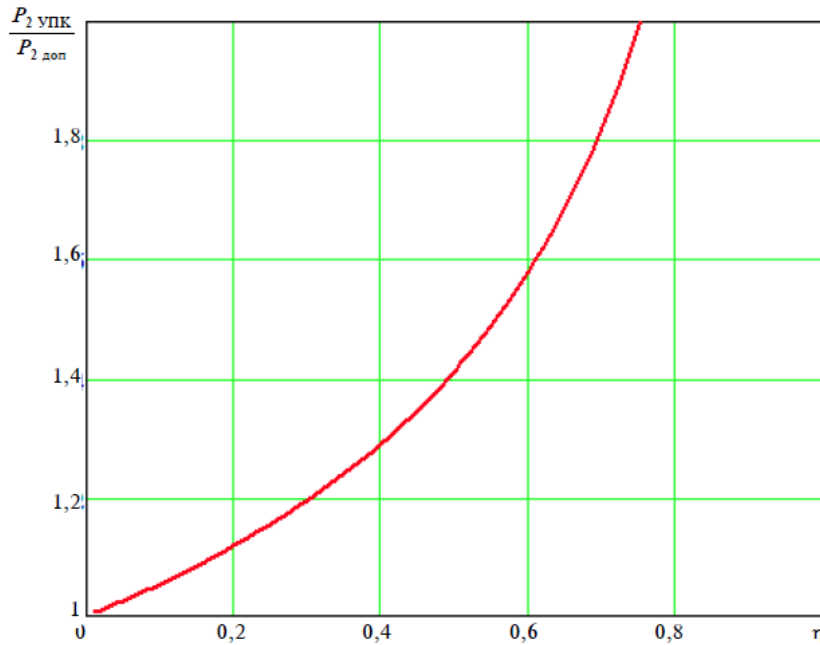


Рисунок 2.7. Залежність відношення допустимих передаваних по лінії потужностей за наявності та відсутності УПК від ступеня поздовжньої ємнісної компенсації для лінії 687 км

Допустимий ступінь поздовжньої ємнісної компенсації визначається виразом

$$\eta_c = \left\{ \sqrt{\left[ \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[ \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left[ \sin^2 \lambda - \frac{\rho l}{U_2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) \right]} + 1 - \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \right\} \times \left[ \sin^2 \lambda - \frac{\rho l}{U_2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) \right]^{-1}. \quad (2.15)$$

Таким чином, в [8] наявне явне протиріччя з залежностями (2.13), (2.14) та (2.15) нашої роботи. Наприклад, для лінії довжиною 687 км за допустимого перепаду напруг на батареї УПК 1,05 у.о. та ступеня компенсації 45 % отримуємо допустиме відношення передаваної потужності до натуральної:

$$\left( \frac{P_2}{P_n} \right)_{доп} = 1,0792.$$

А відношення допустимої передаваної потужності за наявності та відсутності УПК для тієї ж лінії при рівності напруг по кінцях лінії дорівнюватиме

$$\left( \frac{P_{2УПК}}{P_n} \right)_{дон} = 1,347.$$

Однак, згідно з (2.15) нашої роботи, для даної лінії максимальний ступінь подовжньої ємнісної компенсації становить 34 %; при вказаному ступені компенсації може бути досягнуто перевищення допустимої передаваної потужності над натуральною на 56 %. Зазначені протиріччя змусили виконати детальний аналіз режимів роботи протяжних ПЛ з УПК та виявити вплив різних способів поперечної компенсації на режими напруг лінії та можливе збільшення допустимих передаваних потужностей.

### 2.3 Визначення критичної довжини хвилі лінії, що відповідає нульовому значенню ступеня компенсації.

При 100 % компенсації зарядної потужності лінії необхідний ступінь компенсації  $\eta_c$  залежно від відношення  $P_2/P_n$  визначається виразом

$$\eta_c = 1 - \frac{P_n}{P_2} \sqrt{1 - \frac{\left[ 2 \left( \frac{U_{екс}}{U_2} \right)^2 - 1 - \frac{2\rho l J}{U_2} \right]^2}{\lambda}}, \quad (2.16)$$

де  $U_{екс}$  – екстремальне значення зниження напруги в середині лінії.

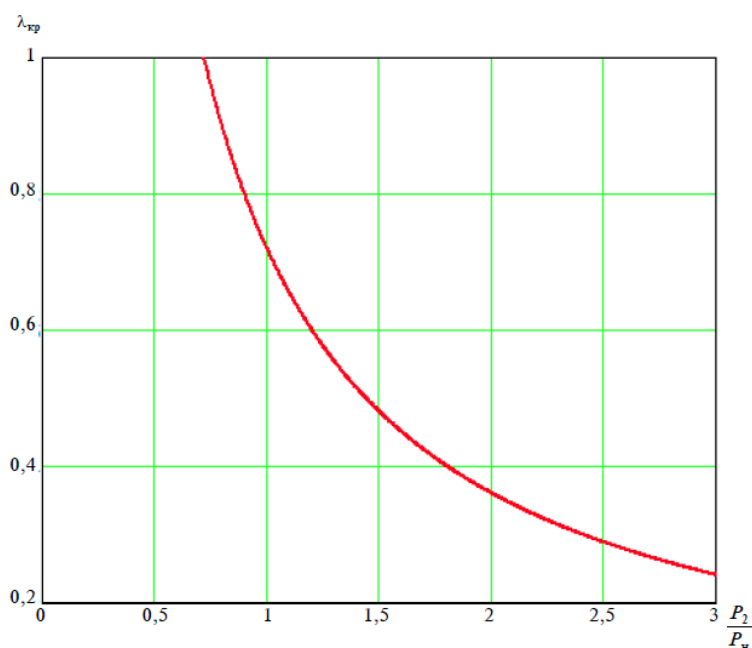


Рисунок 2.8. Залежність критичної довжини хвилі лінії від відношення передаваної потужності до натуральної

З цієї формули при малих довжинах ліній впливає від'ємне значення  $\eta_c$ , тобто поздовжня компенсація не потрібна. Тоді критична хвильова довжина лінії, що відповідає нульовому значенню  $\eta_c$ , визначається виразом

$$\lambda_{кр} = \frac{P_n}{P_2} \sqrt{1 - \left[ 2 \left( \frac{U_{екс}}{U_2} \right)^2 - 1 - \frac{2\rho l J}{U_2} \right]^2}. \quad (2.17)$$

Таким чином, при збільшенні відношення  $P_2/P_n$  критична хвильова довжина лінії зменшується (див. рис. 2.8). При передачі натуральної потужності критична хвильова довжина лінії дорівнює 0,722 рад.

Твердження, що при хвильовій довжині лінії 0,722 рад і менше встановлення поздовжньої компенсації не потрібне, викликає сумніви і суперечить відомій інженерній практиці. Дане положення потребує перевірки. Далі наведено приклади розрахунків режимів електропередачі 500 кВ довжиною 687 км (0,72 рад) із встановленням поздовжньої компенсації.

#### **2.4 Оцінка ефективності застосування КРШ на повітряній лінії 500 кВ з ПКУ**

Можливість зміни споживаної реактивної потужності — важлива властивість керованих реакторів, оскільки нерегульована поперечна індуктивна компенсація завжди зменшує еквівалентну натуральну потужність лінії. До того ж, регульовані реактори вирішують дуже важливі задачі дальніх електропередач — підтримання статичної та підвищення рівня динамічної стійкості режимів, близьких до режиму передачі натуральної потужності.

Результати розрахунків лінії 500 кВ довжиною 687 км із встановленням КРШ по кінцях ПКУ схожі з розрахунками, представленими раніше для некерованих ШР. Однак при встановленні КРШ генерація реактивної потужності ПКУ виявляється нижчою. Ще одна з переваг використання КРШ - плавне регулювання потужності, в той час як звичайні ШР необхідно

комутувати при зміні передаваної потужності, що призводить до стрибків напруги.

Додатковою ілюстрацією особливостей передачі потужності по лінії з ПКУ є векторна діаграма струмів і напруг (рис. 2.9) в різних точках електропередачі 500 кВ довжиною 687 км при передачі потужності  $1,3P_H$  при підключенні керованих реакторів у вузлах 2 і 3. Напруги у вузлах і провідності реакторів наступні:  $U_1 = 1,044$  у.о.;  $U_2 = 1,046$  у.о.;  $U_3 = 0,943$  у.о.;  $U_4 = 0,89$  у.о.;  $U_5 = 1,0$  у.о.;  $B_{r1} = -0,42$  у.о.;  $B_{r2} = -0,08$  у.о.

Характерною особливістю режиму такої лінії електропередачі є різниця рівнів напруг на ділянках, що примикають до передавальної та приймальної енергосистем. Через зниження напруги за ПКУ величина кута на правому участку ПЛ перевищує аналогічну величину на лівому участку ( $28,82^\circ$  проти  $22,95^\circ$ ); відповідно розрізняються і величини струмів (1,46 проти 1,28 о.о.).

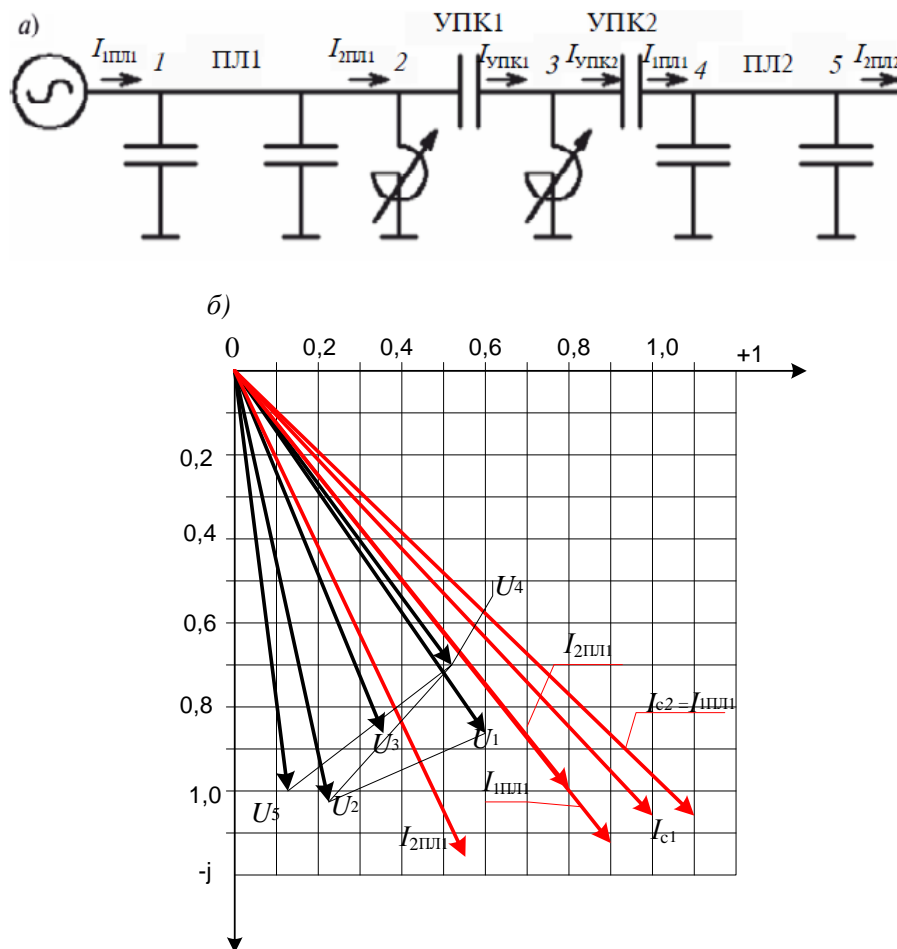


Рисунок 2.9. Схема електропередачі з ПШР (а) та векторна діаграма (б) струмів і напруг при передачі потужності  $1,3P_H$

Підсумовуючи отримані результати, можна зробити наступні висновки: для розглянутої лінії можна відмовитися від реактора в точці за ПКУ, оскільки його функції бере на себе реактор в середній точці. До того ж, при відмові установки реактора у вузлі 4 загальна потужність реакторів стає меншою; встановлення ПКУ підвищує пропускну здатність лінії на 30 - 40 % і більше.

Таким чином, розрахунки спростовують твердження роботи [8] про те, що для лінії 500 кВ довжиною 687 км встановлення ПКУ не має сенсу. Реалізація режимів передачі великих потужностей обмежується зниженням напруги за ємністю. Як було зазначено раніше, у [8] стверджується, що при встановленні на лінії УШР і ПКУ в режимі передачі натуральної потужності провідність реакторів стає рівною нулю. Отримані результати розрахунків режимів роботи електропередачі, зображеної на рис. 2.2 і 2.9, доводять зворотнє: в режимі передачі натуральної потужності пристрої поздовжньої компенсації генерують значну кількість реактивної потужності. Потік реактивної потужності в даній моделі виявляється направленим в сторону передавальної системи (електростанції), через що у вузлі перед ПКУ спостерігається значне збільшення напруги; для його зниження реактори повинні споживати надлишок реактивної потужності. Так, наприклад, для підтримки напруги у вузлі 2 необхідно спожити 290 Мвар.

Слід також зазначити, що встановлення реактора в середній точці між ємностями дозволяє передати по лінії більшу потужність ( $1,55P_n$ ). Це досягається тим, що за допомогою реактора в середній точці можна домогтися деякого зниження напруги, що робить можливим забезпечення допустимого значення напруги на ПКУ з боку передавальної системи. В цілому необхідно визнати, що використання УШР замість нерегульованих ШР не призводить до суттєвого збільшення передаваних потужностей, але його безперечною перевагою є плавне регулювання напруг у вузлових точках електропередачі.

### **Висновки по другому розділу**

Отримані результати вказують на недоліки застосування ПКУ з великим ємнісним опором, оскільки можливості підвищення пропускну́ї здатності електропередачі з такою ПКУ обмежуються перепадом напруги на ємності.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ТА СТІЙКОСТІ МІЖСИСТЕМНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ГНУЧКОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ З КЕРОВАНОЮ ПОЗДОВЖНЬОЮ І ПОПЕРЕЧНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ

Зі зростанням генеруючих потужностей, потоків потужностей лініями електропередачі та ускладненням електроенергетичних систем, до пристроїв, що забезпечують збільшення меж передаваної потужності, демпфування коливань, перерозподіл потоків потужності та підтримання оптимальних рівнів напруг у мережі, висуваються все більш жорсткі вимоги [9]. Це зумовлено наступними причинами:

висока вартість ліній електропередачі призводить до необхідності збільшення їх пропускної здатності, оскільки в ряді випадків будівництво нових ліній менш вигідне або неможливе;

в електричних мережах з паралельним включенням ліній різних класів напруги, а також в ході формування кільцевих структур пропускна здатність мережі нерідко виявляється зниженою, а лінії нижчих класів напруг часто перевантажуються, як наслідок, зростають втрати електроенергії [10].

Наприкінці 90-х років минулого століття Хінгорані запропонував концепцію розвитку гнучких (керованих) передавальних систем змінного струму (FACTS). Основною ідеєю даної концепції є підвищення керованості мереж за рахунок використання пристроїв на основі силової електроніки [3]. Такі пристрої дозволяють забезпечити демпфування коливань низької частоти, стабілізацію рівня напруг, підвищення як статичної, так і динамічної стійкості і, як наслідок всього вищепереліченого, збільшення пропускної здатності мережі та зниження втрат потужності. В ролі пристроїв, що дозволяють забезпечити підвищення гнучкості систем змінного струму, були запропоновані:

тиристорно-керований компенсатор реактивної потужності (ТКК);

установки поздовжньої ємнісної компенсації (УПК), керовані тиристорними пристроями (TCSC);

тиристорно-керований фазоповоротний пристрій (ФПП);

тиристорно-керовані накопичувачі електроенергії; паралельні, послідовні та комбіновані пристрої компенсації реактивної потужності на повністю керованих вентилях [11].

В даному розділі розглянемо питання покращення характеристик усталених режимів та підвищення рівня статичної та динамічної стійкості ліній електропередачі змінного струму великої протяжності на прикладі транзиту 500 кВ довжиною 1030 км «Imperatriz — Serra da Mesa» в Бразилії за рахунок спільного застосування керованих пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності[11].

Для цього необхідно виконати наступне:

- аналіз усталених режимів протяжної лінії електропередачі;
- визначення граничних передаваних потужностей при різних ступенях поздовжньої компенсації (аж до 100 %);
- вибір місць установки та мінімально необхідних обсягів пристроїв керованої поперечної компенсації;
- дослідження статичної стійкості протяжної лінії електропередачі в широкому діапазоні режимів роботи – від холостого ходу до передачі натуральної потужності і більше;
- визначення оптимального складу та настроювальних параметрів керованих пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації.

### **3.1 Оптимізація усталених режимів і підвищення граничних передаваних потужностей гнучкої електропередачі з пристроями поздовжньої та поперечної компенсації**

До початку 2000-х років у Бразилії існували дві основні енергосистеми, які не були пов'язані між собою: Південь — Південний Схід і Північ — Північний Схід. У 1999 році відбулося об'єднання цих двох енергосистем за допомогою електропередачі 500 кВ «Північ — Південь» зі встановленими на ній

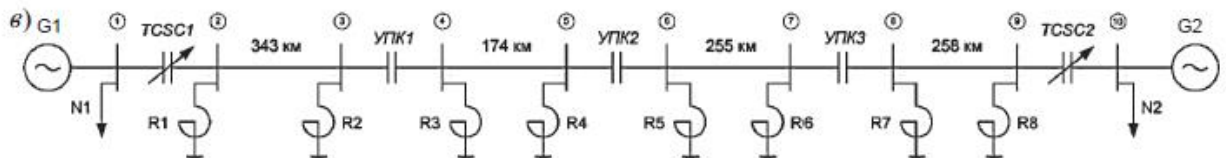
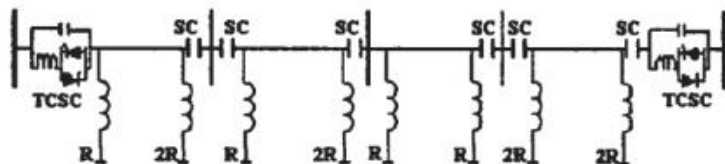
пристроями поздовжньої компенсації та регульованими поздовжніми елементами (TCSC). Загальна протяжність електропередачі становить 1030 км (рис. 1). Енергосистема Півночі генерує 16,5 ГВт, Півдня — 45 ГВт [12].

a)



b)

S. da Mesa Gurupi Miracema Colinas Imperatriz



г)

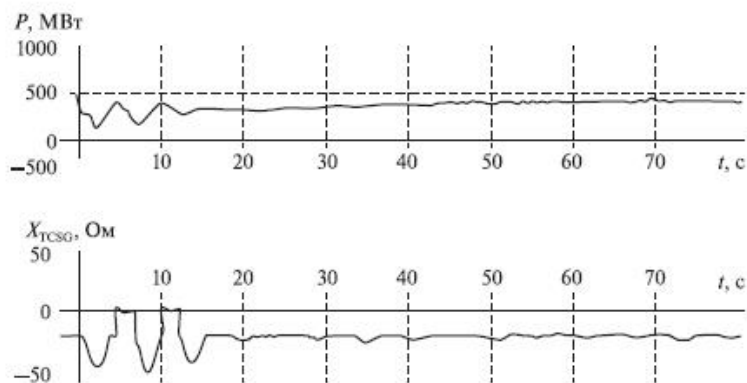


Рис. 1. Географічне положення (а), схема (б), еквівалентна модель (в) бразильської лінії «Imperatriz — Serra da Mesa» та міжсистемні коливання в ній при передачі 300 МВт з TCSC (г)

Електропередача обладнана некерованими пристроями поздовжньої компенсації, які являють собою шість груп конденсаторних батарей, що компенсують 54 % індуктивного опору передачі (по 161 МВАр кожна). Крім того, на кінцях лінії встановлено два пристрої керованої поздовжньої компенсації (TCSC), кожен з яких відповідає 6 % індуктивного опору передачі в усталеному режимі. Їхньою основною функцією є демпфування міжсистемних коливань низької частоти (0,2 Гц). Вони розташовані на підстанціях Imperatriz (Північ) і Serra da Mesa (Південь). Поперечна компенсація становить 95 % і складається з некерованих реакторів.

Однак, незважаючи на застосування TCSC на кінцях лінії, при передачі потужності 300 МВт виникають міжсистемні коливання (рис. 1, в), час загасання яких перевищує 20 с [12].

В прийнятому виконанні електропередача має ряд суттєвих недоліків:

- незважаючи на те, що лінія призначалася для передачі потужності до 1300 МВт, реальна гранична передавана потужність значно менша;
- на розглянутій електропередачі застосовуються некеровані пристрої поперечної компенсації, що значною мірою знижує рівень статичної стійкості і можливості регулювання напруги на проміжних підстанціях [12];
- замість автоматичних регуляторів збудження сильної дії синхронних генераторів застосовуються складні керовані пристрої поздовжньої компенсації для демпфування міжсистемних коливань низької частоти.

Разом з тим лінії з подібного роду характеристиками широко поширені у великих енергооб'єднаннях різних країн. Серед найбільш характерних прикладів: ЛЕП 500 кВ Mead-Phoenix в США, передача 400 кВ Roukela-Rairpur в Індії, транзити 500 кВ Са-яно-Шушенська ГЕС – Новокузнецька в Росії, Екібастузька ДРЕС — Алмати в Казахстані і т. п. Таким чином, докладний аналіз одного з таких прикладів дозволить в подальшому розповсюдити отриманий досвід на досить широке коло об'єктів по всьому світу.

Базовий варіант передачі «Imperatriz — Serra da Mesa» передбачає встановлення наступних пристроїв компенсації (рис. 3.1, в):

у вузлах 2–8 встановлено некеровані шунтуючі реактори по 132 МВАр (0,109 о. о. при  $U_{\text{баз}} = 500$  кВ,  $S_{\text{баз}} = 5002/206,7 = 1210$  МВА і сумарному індуктивному опорі лінії  $0,418 + 0,217 + 0,315 + 0,319 = 1,269$  у. о.) кожен;

на ділянках 1–2, 5–6, 9–10 розташовано пристрої поздовжньої компенсації, потужністю по 161 МВАр кожен, а на ділянках 3–4, 7–8 - по 323 МВАр кожен.

Передавана потужність змінювалась в межах від 0 до 1,5 у. о., охоплюючи, таким чином, всі режими роботи лінії - від холостого ходу до натуральної потужності (1 у. о.) і далі до граничної.

Рівень напруг у вузлах електропередачі не фіксований спеціально для того, щоби оцінити їх залежність від передаваної по лінії активної потужності, а також від конкретного набору пристроїв поздовжньої і поперечної компенсації.

В ході моделювання було встановлено, що при передачі по розглянутій лінії активної потужності РЛЕП менше 0,8 у. о. відхилення рівнів напруги у вузлах залишаються в діапазоні  $\pm 5\%$  від  $U_{\text{ном}}$ , що є прийнятним з точки зору зносу ізоляції ЛЕП (рис.3.2). Подальше збільшення передаваної потужності до 0,8 у. о. призводить до підвищення напруги до 1,051 у. о. (525,5 кВ) в кінці ділянки 8–9, протяжністю 258 км. Збільшення передаваної по лінії потужності вище значення 0,8 у. о. призводить до збільшення перенапружень в кінці даної ділянки, в кінці ділянки лінії 6–7, протяжністю 255 км, а також до зниження напруги в кінці ділянки лінії 4–5, протяжністю 174 км. При передачі активної потужності рівній 1,5 у. о. перенапруги в кінці електропередачі досягають порядку 10 % від  $U_{\text{ном}}$ .

Внесемо зміни до конфігурації існуючої лінії електропередачі: замінимо всі некеровані шунтуючі реактори на керовані [13]. Визначимо, як зміна потужності пристроїв поперечної компенсації вплине на величину граничної передаваної потужності та на рівень напруг у вузлах. З міркувань збереження діелектричної міцності та запобігання перенапругам рівень відхилення напруг у всіх режимах роботи розглядуваної лінії електропередачі не повинен виходити за межі  $\pm 5\%$  від  $U_{\text{ном}}$ , за винятком режимів, близьких до граничних.

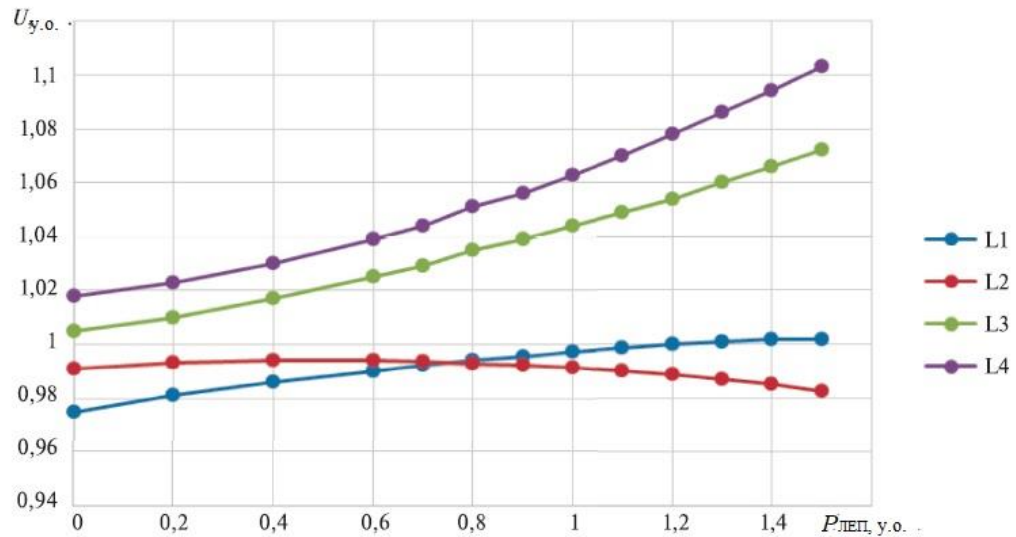


Рисунок 3.2. Залежності рівнів напруги в кінці кожної з чотирьох (L1–L4) ділянок електропередачі від передаваної потужності

При передачі лінією активної потужності, що дорівнює 0,71 у. о., реактори R4 та R8 практично повністю виводяться з роботи (рис. 3.3). При збільшенні передаваної потужності до 0,9 у. о. додатково виводиться реактор R2. Подальше збільшення передаваної активної потужності при фіксованій реактивній потужності навантаження вимагає або використання керованих пристроїв поперечної компенсації, здатних генерувати реактивну потужність, або виведення ПЗР з роботи.

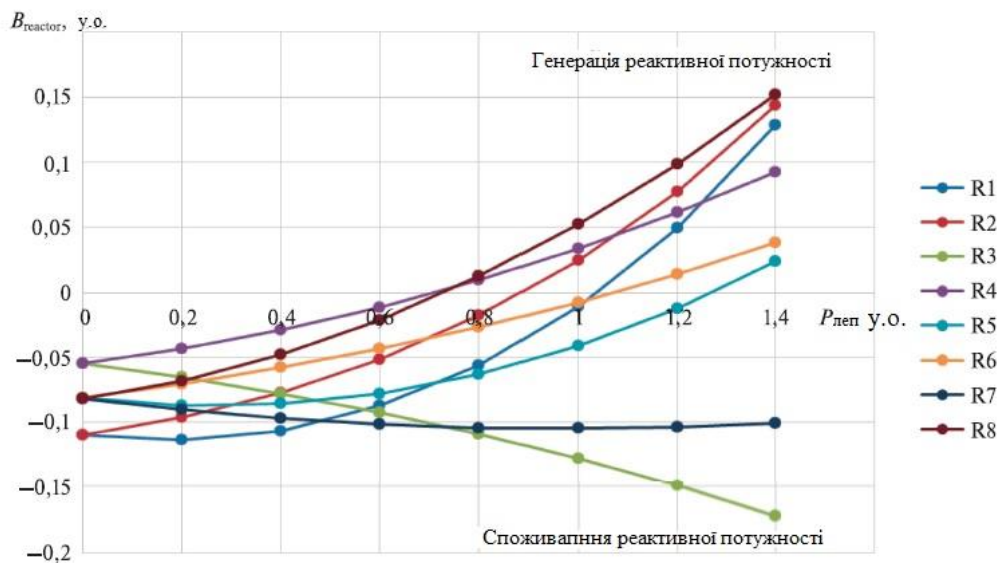


Рисунок 3.3. Залежність провідностей керованих пристроїв поперечної компенсації від величини потужності, що передається лінією

Генерація реактивної потужності в проміжних вузлах електропередачі (за рахунок СТК [8] або СТАТКОМ) дозволить збільшити граничну передавану потужність до значень вище натуральної потужності, зберігши при цьому оптимальний рівень напруг. Величина передаваної потужності в такому випадку залежить від потужності пристроїв поперечної компенсації.

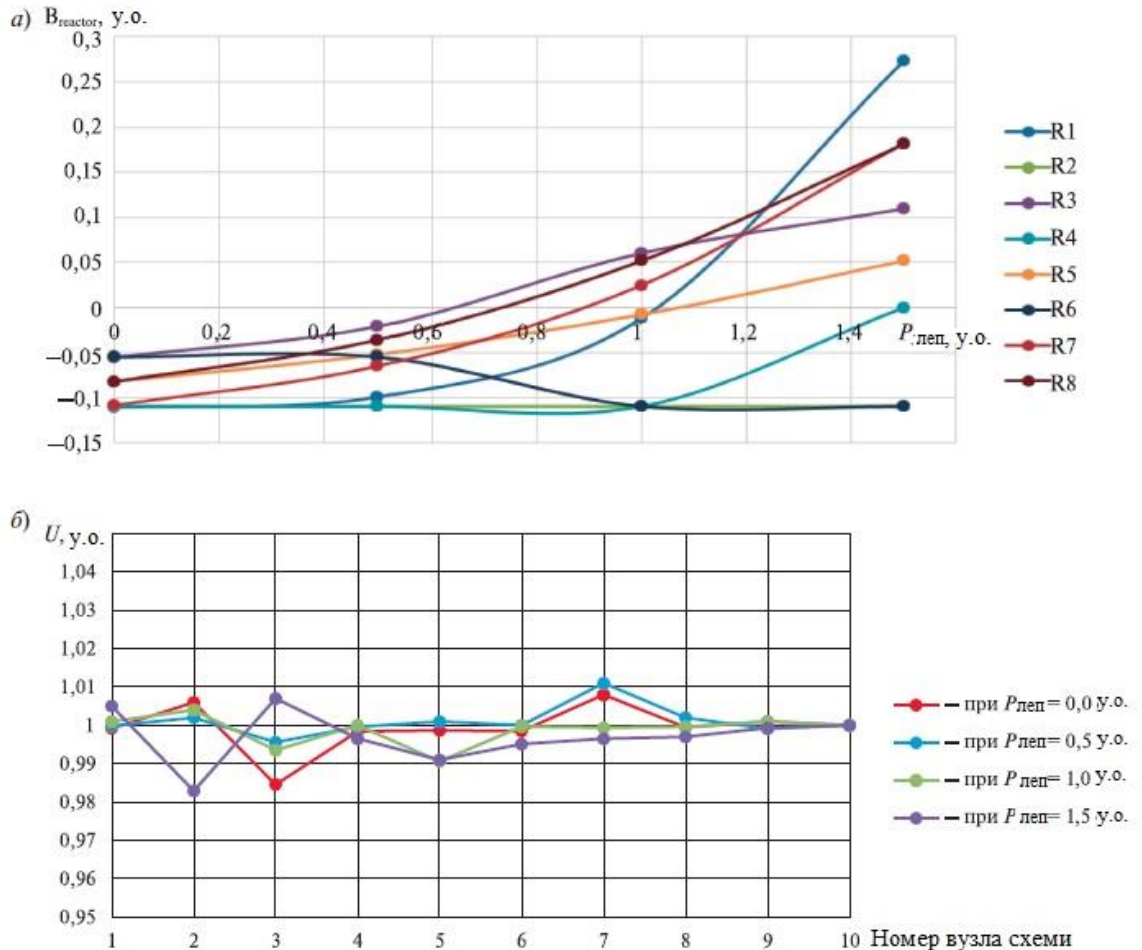


Рисунок 3.4. Залежності провідностей реакторів від величини передаваної потужності (а) при керуванні пристроями R2, R4 та R8 і епюра розподілу напруг уздовж лінії (б)

Крім того, рис. 3.3 показує, що застосування керованих пристроїв у всіх вузлах передачі - це надмірно. Тому наступне завдання - вибір необхідного складу керованих пристроїв поперечної компенсації при дотриманні оптимального розподілу напруг уздовж усіх ділянок електропередачі.

У випадку, коли керованими є згадані раніше пристрої поперечної компенсації R2, R4 та R8, епюра розподілу напруг виглядає практично однорідною

(рис. 3.4). Розміщення пристроїв поперечної компенсації з можливістю генерації реактивної потужності по кінцях і в середині лінії дозволяє значною мірою покращити розподіл напружень уздовж лінії електропередачі та збільшити активну потужність, що передається, за умови підтримання оптимального рівня напруги у вузлах лінії.

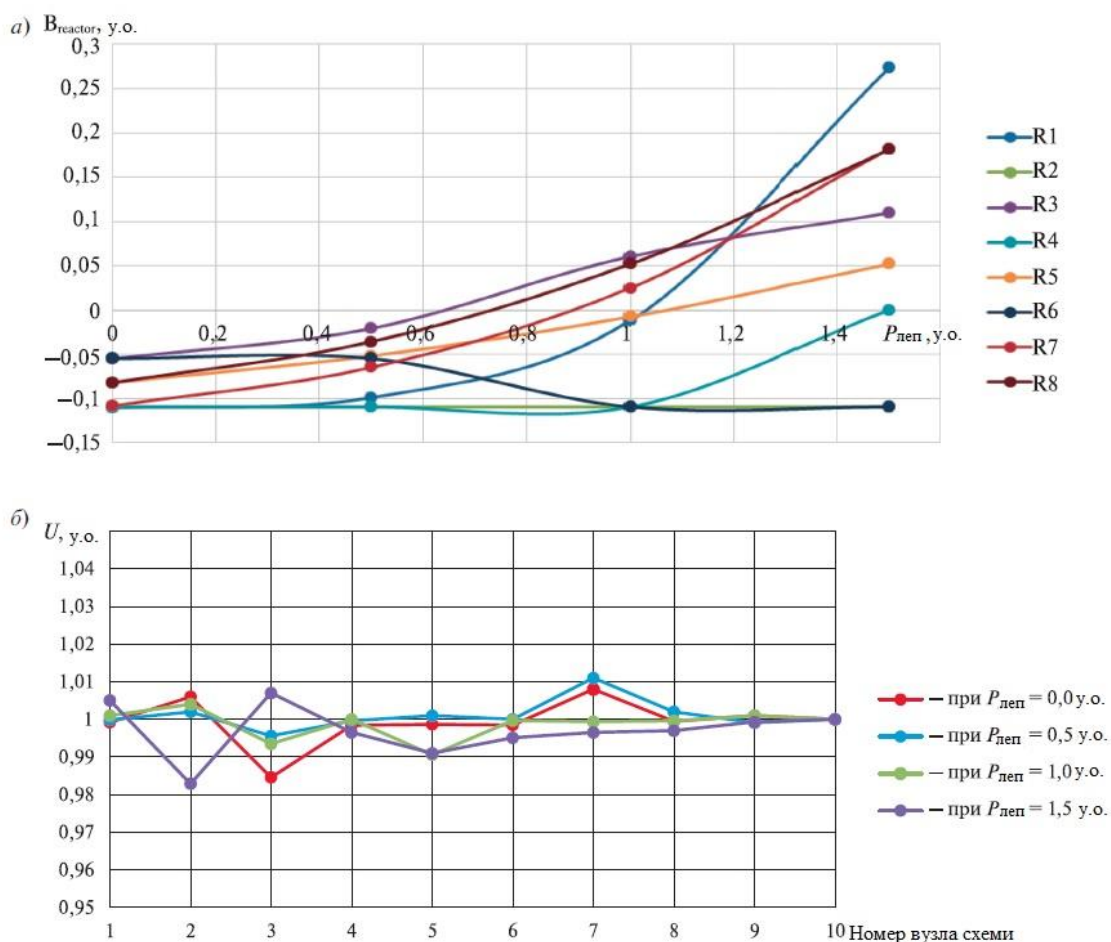


Рисунок 3.5. Залежності провідностей реакторів від величини переданої потужності (а) при керуванні пристроями R1, R2, R4, R6 та R8 і еюра розподілу напруг уздовж лінії (б)

Подальше збільшення передаваної потужності (до 1,5 у. о.) призведе до того, що перенапруги або зниження напруги у вузлах схеми будуть проявлятися значною мірою, а можливість утримання напруги в заданих межах залежатиме від потужності пристроїв, що генерують реактивну потужність. У цьому випадку виникає необхідність у застосуванні додаткових керованих пристроїв у вузлах 1 та 6 (рис. 3.5).

Таким чином, для забезпечення роботи лінії електропередачі в широкому діапазоні режимів за умови підтримання рівня напруг у вузлах в діапазоні ( $1 \pm 0,05$  у. о.)  $U_{\text{ном}}$  необхідно розміщувати керовані пристрої поперечної компенсації в середині (R4, R6) та по кінцях (R1, R2, R8) лінії. При цьому вони повинні мати технічну можливість генерувати реактивну потужність або, принаймні, бути виведеними з роботи. Така конфігурація електропередачі дозволить з урахуванням 20 % запасу по потужності передавати по лінії ЛЕП  $= 1,2$  у. о., що на  $0,56$  у. о. (677 МВт) більше, ніж у вихідному варіанті.

Розглянемо випадок збільшення ступеня компенсації реактивного опору лінії електропередачі «Imperatriz — Serra da Mesa» аж до 100 %. Потужність пристроїв поздовжньої компенсації прийнято рівною  $218/S_{\text{баз}}$  [МВт]. За індуктивного опору лінії  $1,269$  у. о. ємнісний опір ППК становить у даному досліді  $0,18 + 0,36 + 0,18 + + 0,36 + 0,18 = 1,261$  у. о., тобто, досягнуто практично повну компенсацію індуктивного опору лінії [12]. Варто зазначити, що поздовжні ємності розподілені по підстанціях рівномірно. Даний розподіл не повністю відповідає розподілу індуктивного опору лінії по довжині.

При роботі лінії, обладнаної шунтуючими реакторами, як на холостому ходу, так і при передачі натуральної потужності з'являється коливальна нестійкість [9]. Для того, щоб визначити граничну ступінь компенсації, при якій можлива стійка робота лінії, ємність ППК зменшувалась до тих пір, поки дійсна частина коренів характеристичного рівняння в математичній моделі електропередачі не перейшла в від'ємну область.

З розрахунків власних значень системи рівнянь, що описують електропередачу, (тут не наводиться) випливає, що при використанні ППК стійка робота лінії можлива при ступені компенсації не більше 98 %. Крім того, при збільшенні передаваної потужності на лінії все більш явно виражається падіння напруги до кінців ділянок ЛЕП і підвищення напруги на ділянках ППК. На окремих ділянках електропередачі перенапруги становлять  $1,227$  у. о., що свідчить про неможливість роботи лінії при даній конфігурації пристроїв поздовжньої і поперечної компенсації.

При заміні всіх некерованих пристроїв на керовані у випадку передачі 1,0 у. о. активної потужності перенапруги на ППК досягають 12 %, а падіння напруги 16 %. При ступені компенсації 99 % і установці керованих пристроїв поперечної компенсації можлива передача активної потужності 0,6 у. о. в умовах підтримання рівнів напруг у вузлах в діапазоні  $(1 \pm 0,05 \text{ у. о.})$  від номінального значення. Подальше збільшення передаваної потужності призведе до недопустимих перенапруг.

### **3.2 Дослідження статичної стійкості гнучкої електропередачі та визначення оптимальних параметрів налаштування пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації**

Розглянемо початковий варіант електропередачі «Imperatriz - Serra da Mesa» з такими пристроями поздовжньої та поперечної компенсації:

у вузлах 2–8 встановлено некеровані шунтуючі реактори по 132 МВАр кожен;

на ділянках 1–2, 5–6, 9–10 розташовано пристрої поздовжньої компенсації, потужністю по 161 МВАр кожен, а на ділянках 3- 4, 7-8 - по 323 МВАр кожен [11, 12].

В якості пристроїв, здатних здійснювати регулювання при малих та кінцевих збуреннях, в даному випадку виступають лише автоматичні регулятори збудження пропорційного впливу (АРЗ-ПВ), встановлені на генераторах об'єднаних енергосистем Півночі та Півдня.

Керування системами АРЗ-ПВ еквівалентних генераторів (наприклад, за напругою з мінімальним коефіцієнтом регулювання  $K_{ou} = -5$ ) дозволяє зберегти аперіодичну стійкість при малих збуреннях (табл. 3.1), про що можна судити за коренями характеристичного рівняння: при цьому від'ємний речовинний корінь залишається практично незмінним, а частота коливань варіюється в діапазоні 0,502 - 0,554 Гц (або 3,152 - 3,478 рад/с).

Таблиця 3.1. Корені характеристичного рівняння при управлінні АРЗ-ПД генераторів для різних значень передаваної по лінії потужності

Передавана по ЛЕП потужність $P_{\text{ЛЕП}}$ , у. о.	Корні характеристичного рівняння
0	-0,897 ± j0,326 -0,812 ± j0,894 <b>-0,070 ± j3,478</b> -0,054 -0,037
0,5	-0,850 ± j0,441 -0,817 ± j0,893 <b>-0,104 ± j3,349</b> -0,052 -0,039
1,0	-0,824 ± j0,893 -0,790 ± j0,551 <b>-0,148 ± j3,152</b> -0,049 -0,042

При мінімальному збереженні аперіодичної стійкості на перший план виходить проблема забезпечення стійкості коливальної. Основну складову коливань в даному випадку характеризує пара коренів  $-0,070 \pm j3,478$  (для режиму холостого ходу). У розглянутій ситуації ця пара коренів є стійкою, однак ступінь згасання залишається дуже низькою, і при збільшенні коефіцієнта регулювання за відхиленням напруги  $K_{0u}$  в АРЗ-ПВ можливе порушення коливальної статичної стійкості. У разі заміни некерованих шунтуючих реакторів на керовані регулювання в системі відбувається за рахунок пристроїв поперечної компенсації, а також за допомогою автоматичних регуляторів збудження пропорційного впливу прилеглих станцій. Керування шунтуючими реакторами може здійснюватися з використанням як каналу за відхиленням напруги, так і додаткових каналів за відхиленням частоти та її похідної (рис. 3.6). У разі використання відхилення напруги як основного каналу керовані реактори здатні утримувати оптимальний рівень напруги практично в усіх режимах роботи електропередачі — від режиму холостого ходу до передавання потужностей,

близьких до натуральної потужності лінії та більших за неї [11]. Додавання зворотних зв'язків за відхиленням частоти та її похідної дозволяє також демпфувати коливання при малих збуреннях (табл. 3.2). Так, ступінь згасання при використанні КРН з зворотним зв'язком за частотою становить  $-1,809$  1/с, що на порядок вище за ступінь згасання при використанні некерованих реакторів ( $-0,148$  1/с).

Таблиця 3.2. Корені характеристичного рівняння для різних варіантів поперечної компенсації під час передавання по лінії натуральної потужності

Варіант поперечної компенсації	Корні характеристичного рівняння
ШР	$-1$ $-0,824 \pm j0,893$ $-0,790 \pm j0,551$ $-0,148 \pm j3,152$ $-0,050$ $-0,042$
УШР з $K_{0u}$	$-1$ $-0,880 \pm j0,560$ $-0,2448$ $-0,448 \pm j2,483$ $-0,045$ $-0,042$
УШР з $K_{0u}, K_{0w}, K_{1w}$	$-0,995$ $-0,872$ $-0,357$ $-1,809 \pm j2,043$ $-0,056$ $-0,033$

Варто зазначити, що використання замість реакторів R2, R4, R6, R8 пристроїв поперечної компенсації з можливістю не тільки споживати, а й генерувати реактивну потужність (СТК), дозволить значно покращити ефект, отриманий при застосуванні КРН з каналами управління за відхиленням напруги, відхиленням частоти та похідною відхилення частоти.

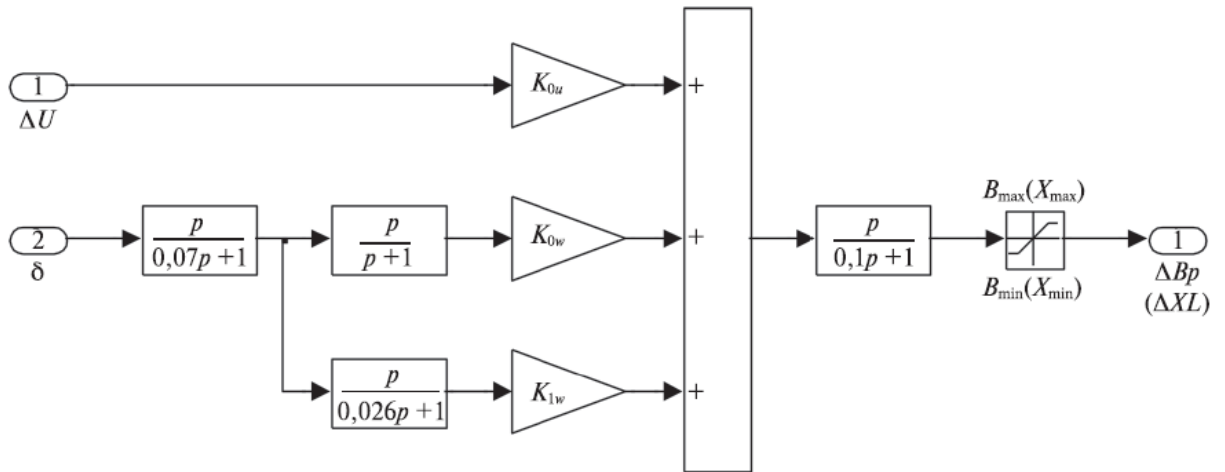


Рисунок 3.6. Схема керування пристроями поздовжньої та поперечної компенсації з каналами регулювання за напругою, частотою та її похідною

### Висновки по третьому розділу

Проведено дослідження режимів та стійкості гнучкої лінії електропередачі змінного струму з керованою поздовжньою та поперечною компенсацією

Показано, що встановлення керованих пристроїв поперечної компенсації на додаток до існуючої поздовжньої дозволяє підвищити межу передаваної потужності практично вдвічі (з 0,8 до 1,55 у. о.) при підтриманні рівнів напруг у допустимих межах.

## ВИСНОВКИ

Проведено аналітичне дослідження режимів роботи ліній електропередачі змінного струму з пристроями поздовжньої ємнісної компенсації. Показано, що застосування пристроїв поздовжньої компенсації має обмеження, які визначаються відхиленнями напруги у вузлах їх приєднання. Значна реактивна потужність, що генерується ємністю УПК при протіканні робочих струмів, вимагає застосування пристроїв поперечної компенсації. УПК, що знаходяться в експлуатації, використовують для цієї мети лише некеровані шунтуючі реактори.

Отримані результати вказують на недоліки застосування УПК з великим ємнісним опором ( $X_c > 0,4X_l$ ), оскільки можливості підвищення пропускної здатності електропередачі з таким УПК обмежуються перепадом напруги на ємності. У разі необхідності компенсації індуктивного опору протяжних ПЛ доцільним є перехід до використання декількох УПК зі зменшеним ємнісним опором кожної з них.

Виконано аналіз режимів роботи однієї з відомих компенсованих електропередач з декількома УПК. Показано, що регулювання реактивної потужності при зміні завантаження лінії та управління уставками УШР за напругою може сприяти суттєвому збільшенню їх пропускної здатності.

При існуючій структурі ціноутворення на лінійне та підстанційне обладнання підвищення пропускної здатності лінії за рахунок спорудження УПК є вигіднішим, ніж за рахунок застосування глибокого розщеплення проводів ПЛ.

Визначено мінімально можливий оптимальний склад пристроїв керованої поперечної компенсації. Показано, що немає необхідності в заміні всіх шунтуючих реакторів на керовані пристрої з можливістю генерації реактивної потужності. Для оптимальної роботи електропередачі в широкому діапазоні режимів достатньо встановити дані пристрої по кінцях та в середині лінії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методи організації гнучких електричних систем [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні системи і мережі»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.В. Кирик. – Електронні текстові данні (1 файл: 0,927 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 47 с.
2. Д. Л. Сушко, С. С. Хатнянський АНАЛІЗ СХЕМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ -Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту-Харків: Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 2018, вип. 180.
3. Акімов, О. І. Електричні мережі електрифікованих залізниць [Текст] : навч. посібник / О. І. Акімов, Д. Л. Сушко. – Харків : УкрДАЗТ, 2012. – 229 с.
4. Електричні процеси в електричних колах з ключовими елементами/ Жуйков В.Я., Денисюк С.П. – К.: ТЕКСТ, 2010. – 264 с.
5. Кирик В. В. Електричні мережі та системи : підручник / В. В. Кирик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с.
6. С.П.Денисюк, Д.Г.Дерев'янку. Особливості застосування систем гнучкої передачі змінного струму (FACTS) в сучасних електроенергетичних мережах/ С.П.Денисюк, Д.Г.Дерев'янку// Енергетика: економіка, технології, екологія - 2011. - №1 – с.29-37
7. Електричні системи та мережі: навч. посібник / уклад. Е-502 О. А. Парфенюк. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013 – 184 с.
8. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної on-line конференції “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві”. – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. – 212 с.
9. Спеціальні розділи теорії електричних кіл: конспект лекцій для студентів напряму підготовки 6.050803 «Акустотехніка» / Уклад.: М. Ю. Артеменко, К. С. Дрозденко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 98 с.

10. Малогулко, Ю. В. Електричні системи і мережі. Частина 4 : навчальний посібник [Електронний ресурс] / Малогулко Ю. В., Кацадзе Т. Л., Нетребський В. В.; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 159 с.)

11. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE press. 2000. 432 p.

12. Gama C. Brazilian North-South Interconnection control-application and operating experience with a TCSC // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. 18–22 July 1999. Vol. 2. P. 1103–1108.

13. Gama C., Tenorio R. Improvements for power systems performance: modeling, analysis and benefits of TCSCs // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2000. Vol. 2. P. 1462–1467.