Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

В.Л. Коваленко

ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт

для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» всіх форм навчання ЗДІА

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

Затверджено до друку
рішенням науково-методичної
ради ЗДІА, протокол
№ від . .2015

ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт

для студентів напряму підготовки
6.050701 «Електротехніка та електротехнології»
всіх форм навчання ЗДІА

Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри ЕЕМ,
протокол №21 від 12.05.2015р.

Запоріжжя
ЗДІА
2015

В.Л.Коваленко, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск: зав. кафедри ЕЕМ
проф. Качан Ю.Г.

Коваленко В.Л. Електричні системи та мережі: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» всіх форм навчання ЗДІА / В.Л. Коваленко. – Запоріжжя, ЗДІА, 2015 – 46 с.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт призначені для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» всіх форм навчання. Методичні вказівки містять контрольні питання та перелік рекомендованої літератури для підготовки до захисту лабораторних робіт.

Методичне видання

Віктор Леонідович Коваленко
к.т.н., доцент

ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт

для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» всіх форм навчання ЗДІА

Підписано до друку . .200 р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. . Наклад прим.
Замовлення № .

Запорізька державна інженерна академія
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
ЗДІА,
тел. 2238-240

ЗМІСТ

1 Лабораторна робота 1. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ 6

2 Лабораторна робота 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА КОМП'ЮТЕРНІЙ МОДЕЛІ 16

3 Лабораторна робота 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ РОЗІМКНУТОЇ МЕРЕЖІ 24

4 Лабораторна робота 4. РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ І БАЛАНСУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ 31

Додаток А 41

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

1.1 Мета роботи

Мета роботи - ознайомитись з моделюванням елементів електроенергетичної системи та освоїти методику набору і розв'язування електроенергетичних задач на комп’ютерній моделі.

1.2 Загальні відомості

Елементи електричної мережі (повітряні та кабельні лінії електропередачі, трансформатори та автотрансформатори) при розрахунках параметрів її режимів (напруг, струмів, активних та реактивних потужностей) зображуються відповідними схемами заміщення чи розрахунковими схемами.

Розрахункова схема електричної мережі утворюється в результаті об'єднання розрахункових схем окремих елементів мережі з урахуванням послідовності їх з'єднань у мережі.

Повітряні лінії електропередачі

На рис. 1.1 зображено схеми заміщення повітряних ліній залежно від класу напруги: а - до *35 кВ*; б-*110 кВ*; в - *220 кВ* і вище.

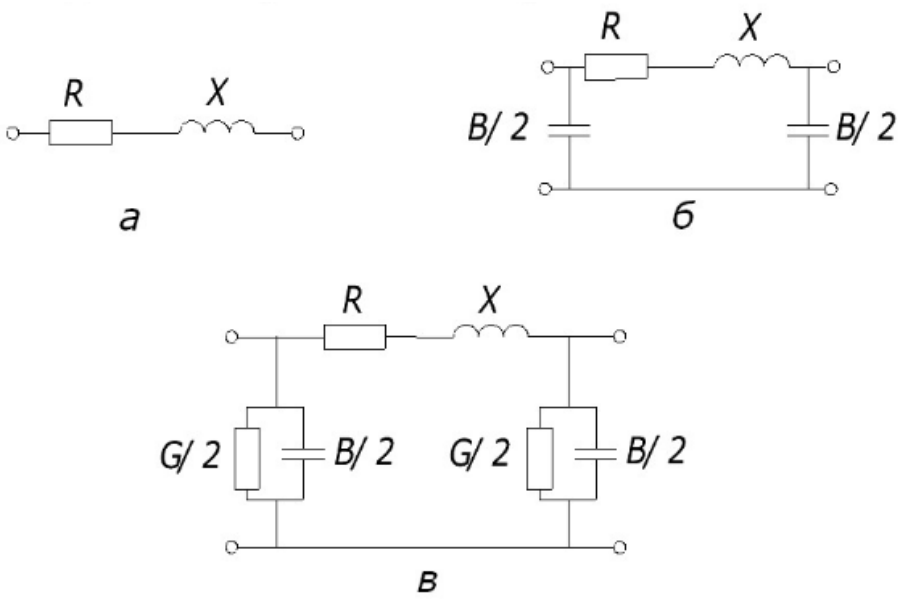

Рисунок 1.1 — Схеми заміщення повітряних ЛЕП

Розрахунок параметрів схеми заміщення лінії електропередачі можна здійснити за формулами, та використовуючи відповідні таблиці (табл.1.4).

Погонні активні опори проводів (Ом/км), які виготовлені із немагнітних матеріалів (мідь, алюміній), можна розрахувати за формулою:

$$R = \frac{\rho}{F} \tag{1.1}$$

де ρ— розрахунковий питомий опір провідника;

F — площа перерізу провідників, мм.

При іншому значенні температури навколишнього середовища активний опір проводів визначається за формулою:

$$R_t = R_{20}\left[1 + 0{,}004 \cdot (t - 20)\right] \tag{1.2}$$

При розрахунках усталених режимів використовують середнє значення питомого індуктивного опору фази повітряної лінії:

$$X_0 = 0{,}144 \cdot \lg\left(\frac{D_{ср}}{R_n}\right) + 0{,}0157 \tag{1.3}$$

При розрахунках симетричних робочих режимів лінії, у якій виконано повний цикл транспозиції проводів, звичайно використовують середнє значення питомої ємнісної провідності лінії:

$$B_0 = C_0 = \frac{7{,}58}{\lg\left(D_{ср} / R_n\right)} \cdot 10^{-6} \tag{1.4}$$

де C_0 — середня питома ємність (*Ф/км*) лінії електропередачі з одним проводом у фазі, яка визначається згідно з виразом:

$$C_0 = \frac{0{,}024}{\lg\left(D_{ср} / R_n\right)} \cdot 10^{-6} \tag{1.5}$$

У повітряних лініях *220 кВ* і вище при непогоді втрати на корону різко зростають і їх треба враховувати. Якщо відомі втрати на корону $P_{кор.ср.зв.}$, то можна визначити питому активну провідність повітряної лінії (*См/км*):

$$G_0 = \frac{P_{кор.ср.зв.}}{U^2} \tag{1.6}$$

Двообмоткові трансформатори при розрахунках електричних мереж звичайно зображуються Г-подібною схемою заміщення (рис. 1.2), де $K_т = K_1 + K_2$ - сума активного опору первинної обмотки та зведеного до напруги первинної обмотки активного опору вторинної обмотки трансформатора; $X_т$ - сума індуктивного опору розсіювання первинної обмотки та зведеного до напруги первинної обмотки індуктивного опору розсіювання вторинної обмотки.

$$X_T = X_1 + X'_2 = \frac{U_K[\%] \cdot U^2_{ном}[кВт] \cdot 10}{S_{ном}[кВА]} \qquad (1.7)$$

Активна провідність $G_т$, зумовлена втратами активної потужності в магнітопроводі трансформатора на перемагнічування та вихрові струми, та реактивна провідність Вт, зумовлена потужністю намагнічування сталі, приєднані з одного боку схеми заміщення.

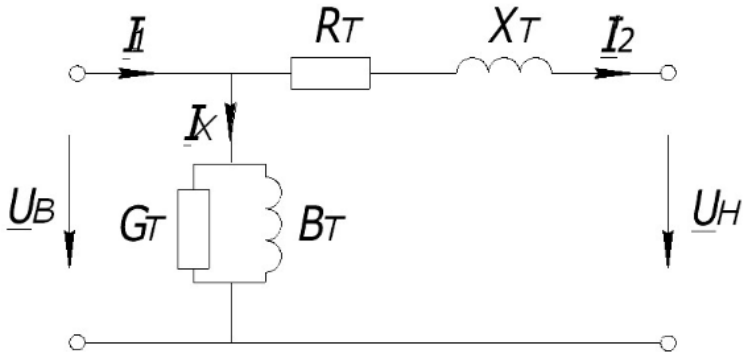

Рисунок 1.2 - Схема заміщення двообмоткового трансформатора

Кожен трансформатор характеризується відповідними параметрами, які подаються в його паспорті.

Розрахунок параметрів схеми заміщення здійснюється згідно з відповідними формулами [1.2] або використовуючи таблиці [1.3].

Триобмоткові трансформатори та автотрансформатори подаються схемою трипроменевої зірки (рис. 1.3).

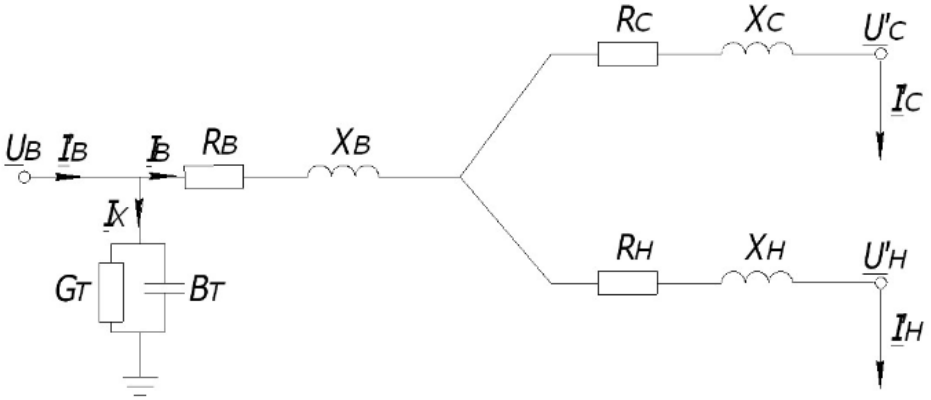

Рисунок 1.3 - Схема заміщення триобмоткового трансформатора

Параметри вітки намагнічування триобмоткових трансформаторів визначаються аналогічно параметрам двообмоткових трансформаторів.

При визначенні $R_т$ та $X_т$ триобмоткових трансформаторів необхідно приймати до уваги виконання трансформаторів.

Для триобмоткових трансформаторів та автотрансформаторів, як і для двообмоткових, справедливі спрощення, коли вітка намагнічування подається втратами холостого ходу $\Delta S_x = \Delta P_x + j\Delta Qx$.

Навантаження при розрахунках мереж, для яких характерні значні зміни напруги у вузлах приєднання, зручно подавати паралельно чи послідовно з'єднаними незмінними активними та реактивними опорами (рис. 1.4).

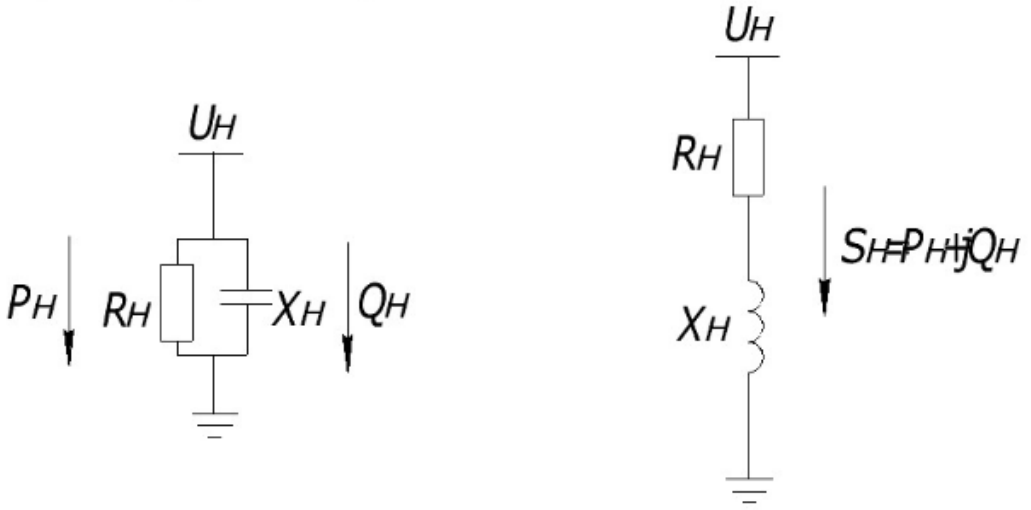

Рисунок 1.4 — Схеми заміщення навантаження

Значення цих опорів вибираються таким чином, щоб потужність, що визначається при напрузі робочого режиму, дорівнювала заданій потужності навантаження.

Тоді при паралельному сполученні опорів:

$$R_H = \frac{U^2}{P_H}; \qquad X_H = \frac{U^2}{Q_H} \tag{1.8}$$

при послідовному сполученні:

$$R_H = \frac{U^2}{S_H} \cdot \cos P_H; \qquad X_H = \frac{U^2}{S_H} \cdot \sin Q_H \tag{1.9}$$

Розглянемо принципи моделювання на комп’ютерній моделі.

Для виконання розрахунків на моделі необхідно визначити параметри схеми заміщення та параметри елементів моделі. Якщо з'єднати елементи моделі у схему і подати напругу на генераторні елементи, то можна встановити бажаний режим і провести його дослідження.

Таким чином, для дослідження режимів електроенергетичної системи на моделі необхідно виконати підготовчі розрахунки, провести безпосереднє дослідження заданого режиму на моделі та здійснити відповідні виміри електричних величин у заданих точках схеми.

1.3 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Ознайомитись з методичними вказівками до роботи.

2. Для принципової схеми, зображеної на рис. 1.5, та розрахункових умов згідно із заданим варіантом скласти розрахункову схему та визначити параметри її елементів.

3. Скласти схему набору на комп'ютерній моделі.

Розглянемо виконання підготовчих розрахунків на прикладі.

Лінія електропередач (рис.1.5) має такі параметри:

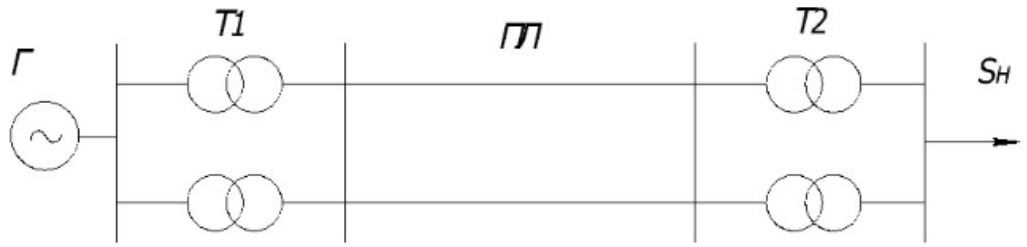

Рисунок 1.5 — Схема лінії електропередачі

$U_г$= *10,5 кВ;*

Т1, Т2 - трансформатори типу *ТДЦ-80000/220*;

ПЛ - повітряна лінія напругою *220 кВ* довжиною *120 км* виконана проводом *АС-240/39*, розміщення проводів на опорі горизонтальне, відстань між проводами сусідніх фаз *D = 6,3 м*; середньорічна температура + 2 °С;

$S_н$ = *100+j50 МВА.*

Таблиця 1.1 - Каталожні дані трансформаторів [1.3]

Тип	$S_н$	$U_н$ обмоток, кВ		$U_к$	$\Delta P_к$	$\Delta P_х$	$I_х$
	МВА	ВН	НН	%	кВт	кВт	%
ТДЦ-80000/220	80	242	10,5	11	320	105	0,6

Розрахуємо параметри схеми заміщення лінії електропередачі (рис. 1.6):

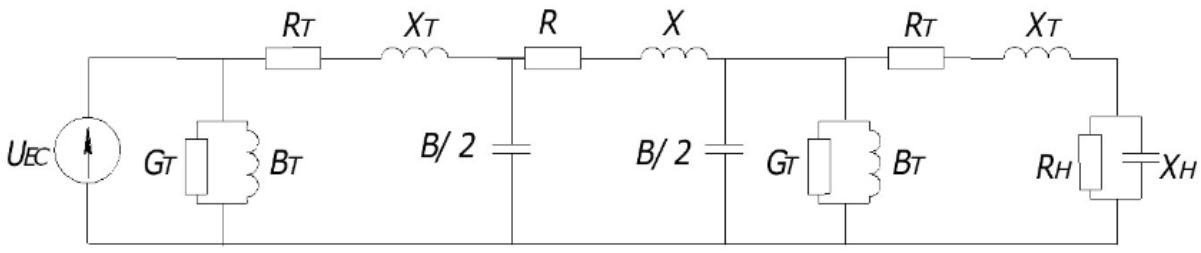

Рисунок 1.6 — Схема заміщення лінії електропередачі

Електрична станція на схемі зображена *Uг*. У схемі заміщення зв'язки тільки електричні, тому повинен існувати лише один рівень напруги. За основний рівень зручно прийняти напругу лінії, тоді

$$U_{EC} = U_г / K_т = 10,5 / 10,5 \cdot 220 = 220 \text{ кВ}.$$

З усіх параметрів трансформаторів визначимо тільки індуктивний опір розсіювання $X_т$, бо решта параметрів схеми заміщення на модельному елементі трансформатора не набирається. Значення цього опору з урахуванням установки двох трансформаторів відносно напруги *220 кВ*:

$$X_T = \frac{11 \cdot 220^2 \cdot 10}{2 \cdot 80000} = 33,28 \text{ Ом}$$

Лінія електропередачі: питомий активний опір проводів лінії з урахуванням даних табл.1.4 згідно з формулою (1.2):

$$R_t = 0,12\left[1 + 0,004 \cdot (2 - 20)\right] = 0,11 \text{ Ом/км}$$

Питомий індуктивний опір лінії визначається за (1.3); для *Rn=21,6/2=10,8* мм (табл.1.4) та *Dср=l,26 D=l,26-6,3=8 Ом* (для горизонтального розміщення проводів):

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg\frac{8000}{10,8} + 0,016 = 0,429 \text{ Ом/км}$$

Питома ємність за (1.5):

$$C_0 = \frac{0,024}{\lg\frac{8000}{10,8}} \cdot 10^{-6} = 8,36 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$$

Параметри П-подібної схеми заміщення повітряної лінії з урахуванням двох ланок ПЛ (рис. 1.6):

RЛ = 0,5 · 0,11 · 120 = 6,6 Ом;
Хл = 0,5 · 0,429 120 = 25,74 Ом;
Сл/2 = 2 · 0,5 · 8,36 · 10-9 · 120 = 10,03 · 10-7 = 1 мкФ.

Навантаження наведене у вигляді паралельно з'єднаних незмінних опорів, величини яких можуть бути знайдені за (1.8):

$$R_H = \frac{220^2}{100} = 484\,\text{Ом}; \qquad X_H = \frac{220^2}{50} = 968\ \text{Ом}.$$

Параметри схеми заміщення моделі

$$R_{TM} = R_T = 1{,}21\ \text{Ом};$$

$$X_{TM} = X_T = 33{,}28\ \text{Ом};$$

$$R_{ЛМ} = R_Л = 6{,}6\ \text{Ом};$$

$$X_{ЛМ} = X_Л = 25{,}74\ \text{Ом};$$

$$\frac{C_{CM}}{2} = \frac{C_Л}{2} = \frac{1}{2} = 0{,}5\,\text{мкФ};$$

$$R_{НМ} = R_H = 484\ \text{Ом};$$

$$X_{НМ} = X_H = 968\ \text{Ом}.$$

Схема набору моделі зображена на рис. 1.7.

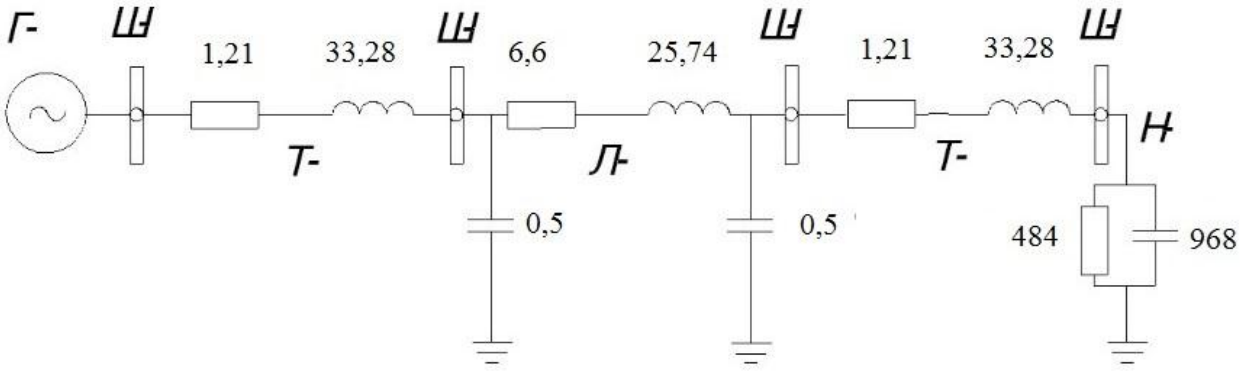

Рисунок 1.7 - Схема набору моделі

1.4 Порядок проведення лабораторної роботи

1. Набрати схему на розрахунковій моделі.

2. Виконати необхідні вимірювання (струмів, потужностей, напруг, втрат потужностей і напруг для нормального режиму, а також при аварійному вимиканні однієї ланки ПЛ).

3. Оформити звіт з лабораторної роботи.

1.5 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Умови завдання. Принципова схема. Вихідні дані.
3. Розрахункова схема та параметри її елементів.
4. Схема набору коп'ютерної моделі.
5. Результати вимірювань, зведені в табл.1.3.
6. Висновки.

1.6 Контрольні запитання

1. Схема заміщення, розрахункова схема та розрахунок параметрів ліній електропередач 35, 110, 220 кВ і вище.
2. Схема заміщення, розрахункова схема та розрахунок параметрів двообмоткових трансформаторів.
3. Схема заміщення, розрахункова схема та розрахунок параметрів триобмоткових трансформаторів.
4. Як моделюється навантаження та здійснюється його розрахунок?

Література

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
2. Сидоров В.С. Розрахунок параметрів усталених режимів електричних мереж. – Львів: ЛПІ, 1991. – 76 с.
3. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна, И.И.Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 285 с.

Таблиця 1.2 — Дані до лабораторної роботи

Варіант	Тип трансформатора	Повітряна лінія						Навантаження	
		$U_н$, кВ	L, км	Марка проводу	D, мм	Розташування проводів	t, °C	$P_н$, МВт	$Q_н$, МВАр
1	ТДН-16000/35	35	20	АС-70/11	3500	Трикутник	0	20	9
2	ТДН-25000/35	35	30	АС-95/16	3500	Трикутник	1	25	11
3	ТДН-16000/35	35	25	АС-50/8	3500	Трикутник	3	18	8
4	ТДН-25000/35	35	40	АС-120/19	3500	Трикутник	-1	30	14
5	ТДН-16000/110	110	70	АС-70/11	4500	Трикутник	2	16	16
6	ТД-40000/110	110	65	АС-120/19	4500	Трикутник	5	45	20
7	ТДН-16000/110	110	50	АС-95/16	4500	Трикутник	-1	22	7
8	ТД-40000/110	110	80	АС-185/29	4500	Трикутник	0	50	25
9	ТДН-80000/220	220	120	АС-300/39	6500	Горизонтальне	8	100	50
10	ТДН-125000/220	220	100	АС-400/51	6500	Горизонтальне	-3	160	70
11	ТДН-80000/220	220	90	АС-240/39	6500	Горизонтальне	1	90	40
12	ТДН-125000/220	220	150	АС-300/39	6500	Горизонтальне	0	130	60

Таблиця 1.3 — Експериментальні дані

Режим		1				2				3				2-3			1-4		
		U_1	I_1	P_1	Q_1	U_2	I_2	P_2	Q_2	U_3	I_3	P_3	Q_3	$\Delta U_л$	$\Delta P_л$	$\Delta Q_л$	$\Delta U_м$	$\Delta P_м$	$\Delta Q_м$
		В	А	Вт	ВАр	В	А	Вт	ВАр	В	А	Вт	ВАр	В	Вт	ВАр	В	Вт	ВАр
НР	М																		
	О																		
ПАР	М																		
	О																		

Таблиця 1.4 — Погонні активні опори проводів різних перерізів ліній при температурі +20° С

Переріз проводу, мм^2	Діаметр проводу, мм	R_0 при 20ºС, Ом/км
35	8,4	0,773
50	9,6	0,592
70	13,5	0,420
95	15,4	0,314
120	15,5	0,249
150	17,1	0,195
185	18,9	0,156
240	21,6	0,120
300	27,7	0,098
400	29,2	0,073
500	30,6	0,059
600	33,2	0,050

Таблиця 1.5 — Втрати на корону в лініях напругою 220...500кВ

Переріз проводу, мм^2	Кількість проводів у фазі	Напруженість поля, кВ/см	Середньорічні втрати потужності на корону, $\Delta P_{кор..ср.зв}$, кВт/км	
220 кВ ($a_{ср}$=40 см; $D_{ср}$=7 м)				
240	1	25,2	2,7	1,2
300	1	23,5	2,0	0,8
400	1	20,7	1,0	0,4
500	1	19,0	0,7	0,3
330 кВ ($a_{ср}$=40 см; $D_{ср}$=11 м)				
240	2	25,7	6,3	2,7
300	2	23,9	4,6	1,9
400	2	21,2	2,5	1,0
500	2	19,3	1,6	0,5
500 кВ ($a_{ср}$=40 см; $D_{ср}$=14 м)				
330	3	25,4	11,5	4,9
400	3	24,0	12,2	5,2
500	3	21,8	7,5	3,0

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА КОМП'ЮТЕРНІЙ МОДЕЛІ

2.1 Мета роботи

Мета роботи - закріпити теоретичні відомості з розрахунку параметрів лінії та моделювання основних елементів електричних мереж і систем, навчитися визначати напругу в окремих вузлах електричної мережі, спад і втрати напруги, відхилення напруги, виявити взаємозв'язок між напругою на початку та в кінці ланки кола, набути навичок в побудові векторних діаграм струмів і фазних напруг.

2.2 Загальні відомості

При однакових навантаженнях фаз у симетричній трифазній лінії струми в проводах лінії рівні за величиною і мають однаковий зсув за фазою відносно відповідних фазних напруг. Тому при розрахунках симетричних усталених режимів трифазних мереж можна розглядати тільки одну фазу і будувати векторні діаграми струмів і фазних напруг, а потім переходити до міжфазних напруг.

Елементи електричної мережі, а також електроспоживачі працюють з найкращими економічними показниками при номінальній напрузі. Тому режим напруги мережі є однією з важливих характеристик її поточної роботи. Розрахунок режиму напруги мережі є однією з основних задач при проектуванні і експлуатації електричної мережі.

Різниця між фактичним значенням напруги у будь-якому вузлі мережі і номінальним значенням напруги називається відхиленням напруги.

$$V = U - U_{НОМ} \tag{2.1}$$

Звичайно ця величина визначається у процентах від номінальної напруги.

$$V\% = \frac{U - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100\% \tag{2.2}$$

Якщо U_1 – комплексне значення напруги у вузлі 1, а U_2 – комплексне значення напруги у вузлі 2, то їх різниця називається спадом напруги між вузлами 1 і 2:

$$U_1 - U_2 = U\Delta \tag{2.3}$$

а різниця модулей називається втратою напруги між вузлами 1 і 2:

$$|U_1| - |U_2| = \Delta U \tag{2.4}$$

Таким чином, спад напруги є комплексна величина, а втрата напруги – дійсна величина.

Розглянемо спочатку повітряну лінію трифазного струму з напругою *35 кВ*, розрахункові схеми якої зображені на рис.2.1.

Рисунок 2.1 - Розрахункові схеми ПЛ - 35 кВ

На рис.2.1,а зроблені такі позначення: $U_{1ф}$ – фазна напруга на початку лінії, $U_{2ф}$ – фазна напруга у кінці лінії. У фазному провіднику тече струм I, який має зсув за фазою на кут α (активно-індуктивне навантаження) від фазної напруги $U_{2ф}$. Векторна діаграма фазних напруг і струмів для схеми рис.2.1 зображена на рис.2.2.

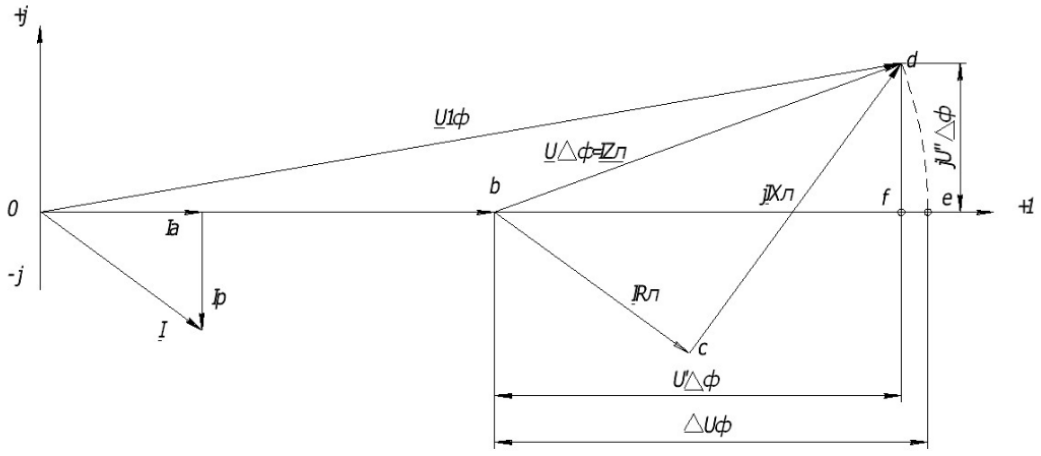

Рисунок 2.2 - Векторна діаграма ПЛ 35 кВ

bd – вектор спаду напруги на лінії ($U\phi = I \cdot Zл$);
bc – вектор активної складової спаду напруги ($IRЛ$);
cd – вектор реактивної складової спаду напруги ($jIXЛ$);
be – поздовжня складова спаду напруги ($U'\Delta\phi$);
de – поперечна складова спаду напруги ($U''\Delta\phi$);
bf – втрати напруги ($\Delta U\phi$).

З трикутника oed знаходимо:

$$U_{1\Phi} = U_{2\Phi} + U'\Delta_{\Phi} + jU''\Delta_{\Phi} = U_{2\Phi} + U\Delta_{\Phi};$$

$$U_1 = U_2 + U'\Delta + jU''\Delta;$$

де U_1 – міжфазна напруга на початку лінії;
U_2 – міжфазна напруга у кінці лінії.

Характер навантаження впливає на співвідношення напруг на початку і в кінці лінії. На рис.2.3 зображені векторні діаграми фазних напруг і струмів *ПЛ - 35 кВ* (рис.2.1,а) для активного (рис.2.3,а), індуктивного (рис.2.3,б) і ємнісного (рис.2.3,в) навантажень І.

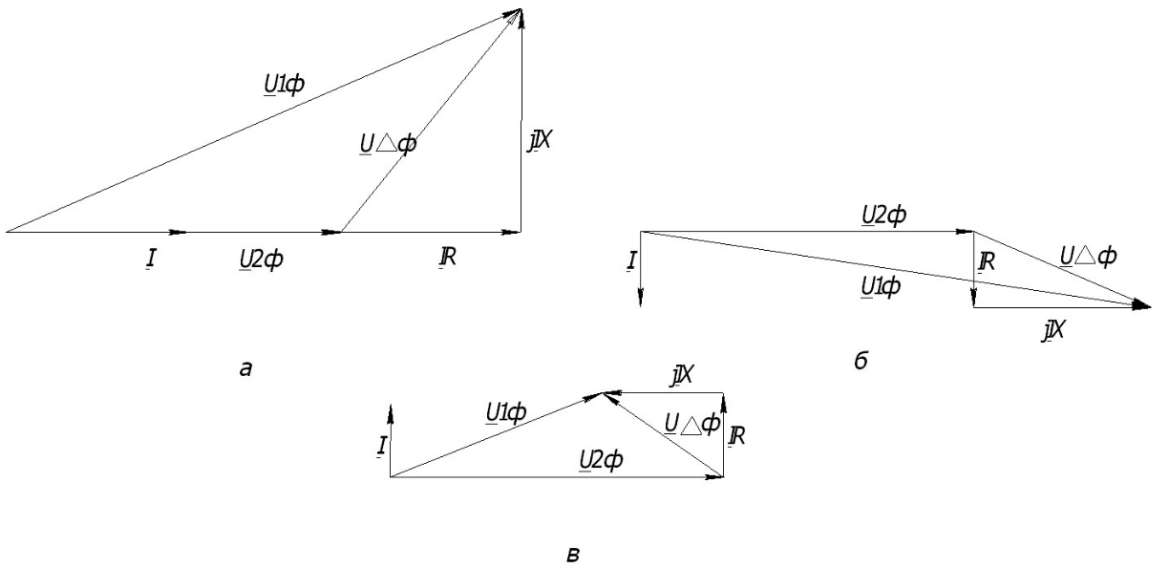

Рисунок 2.3 - Векторні діаграми *ПЛ 35 кВ*
при різному за характером навантаженні

При побудові векторної діаграми фазних напруг і струмів *ПЛ* напругою *110 кВ* (рис.2.4) слід враховувати ємнісну провідність лінії *B/2*.

Схема заміщення ПЛ напругою *110 кВ* зображена на рис.2.4, а векторна діаграма фазних напруг і струмів при активно-індуктивному навантаженні I_2 –

на рис.2.5. Вектор струму навантаження в кінці лінії I_2 відстає від вектора фазної напруги $U_{2ф}$ на кут α_2. Струм I^K_{C12}, який обумовлений половиною ємнісної провідності лінії в кінці схеми її заміщення, випереджає напругу $U_{2ф}$ на $90°$ і визначається за формулою:

$$I^K_{C12} = 0{,}5 \cdot U_{2Ф}\, jB_{12} \qquad (2.5)$$

Струм I_{12} дорівнює сумі струмів I_2 *і* I^K_{C12}.

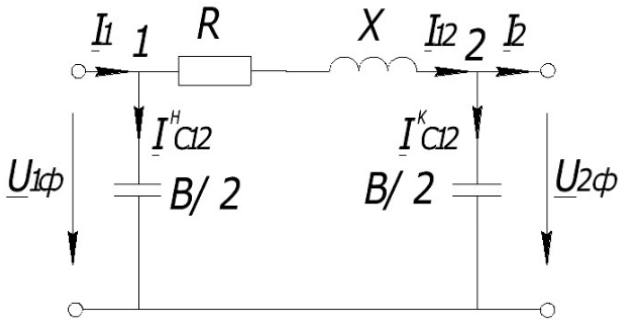

Рисунок 2.4 – Схема заміщення ПЛ – 110 кВ

Трикутники спаду напруги в лінії від струмів I_2 *і* I^K_{C12} побудуємо окремо.

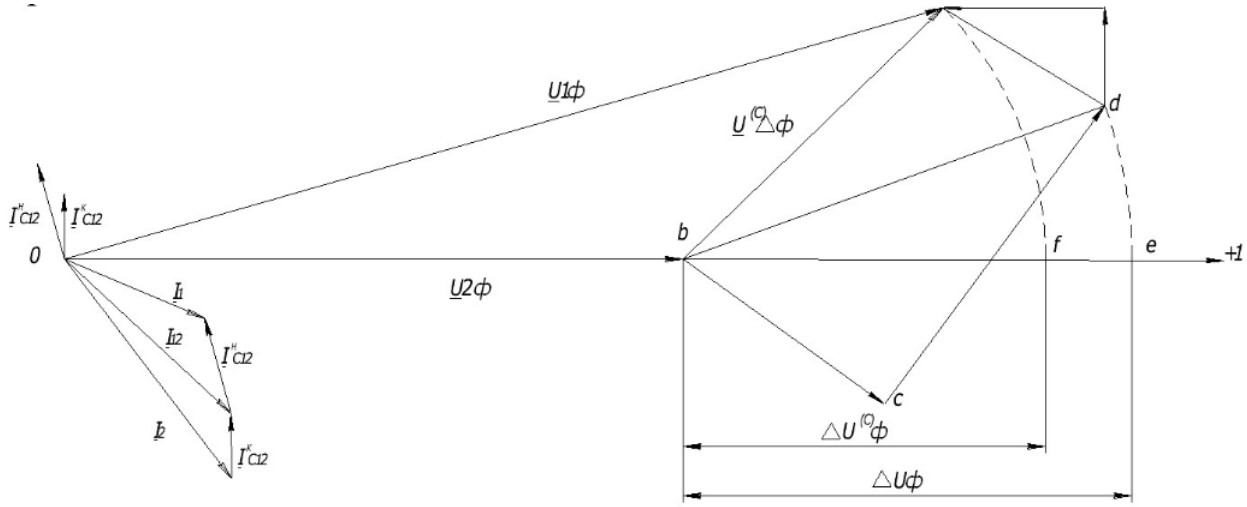

Рисунок 2.5 – Векторна діаграма *ПЛ 110 кВ*

Як видно з діаграми, ємнісний струм лінії сприяє зменшенню величини поздовжньої складової спаду напруги та збільшенню величини поперечної складової спаду напруги. Оскільки поперечна складова спаду напруги для *ПЛ - 110 кВ* несуттєво впливає на режим напруги, то можна зробити висновок, що

ємність лінії сприятливо впливає на режим напруги в нормальному режимі роботи, так як зменшуються втрати напруги $U^{(c)}\Delta\phi$ і спад напруги $U^{(c)}\Delta\phi$.

У режимі холостого ходу лінії $(I_2 = 0)$ векторна діаграма має вигляд, як на рис.2.6. Із рис.2.6 видно, що у режимі холостого ходу $U_{2\phi}$ більше $U_{1\phi}$. Помітне підвищення напруги у режимі холостого ходу має місце на *ПЛ – 220 кВ* і вище.

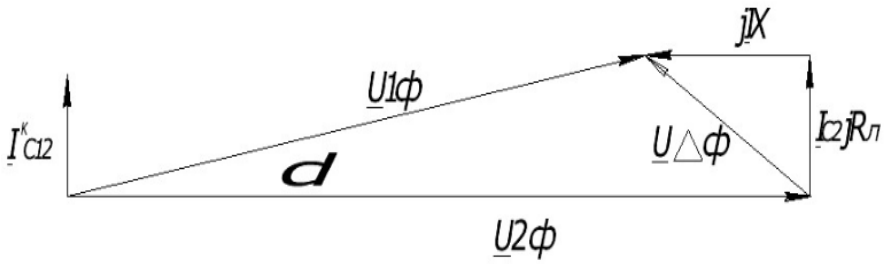

Рисунок 2.6 - Векторна діаграма холостого ходу лінії

2.3 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Ознайомитись з методичними вказівками до роботи.
2. Розрахувати параметри схеми заміщення для заданої ПЛ (табл.2.1).
3. Визначити параметри комп'ютерної моделі.
4. Скласти схему набору на моделі.

Розглянемо виконання підготовчих розрахунків на прикладі.

Необхідно провести дослідження режиму роботи повітряної лінії напругою *110 кВ*, довжиною *120 км* виконаної проводом *АС – 120/19;* середньогеометрична відстань між фазами $Dcp=5$ *м;* $S_н=(40+j30)$ *МВА*.

Розрахуємо параметри П-подібної схеми заміщення лінії:

Питомі параметри лінії [1,2,3,4]:

$R_0=0{,}24$ *Ом/км;* $X_0=0{,}427$ *Ом/км;* $B_0=2{,}6\cdot10$*-6 См/км*.

Параметри лінії:

$$R_Л = 0{,}24 \cdot 120 = 28{,}8\,\text{Ом};$$

$$X_Л = 0{,}427 \cdot 120 = 51{,}24\ \text{Ом};$$

$$B_Л = 2{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 312 \cdot 10^{-6}\ \text{См};$$

$$\frac{C_Л}{2} = \frac{B_Л}{2} = 0{,}5 \cdot 10^{-6} Ф = 0{,}5\ \text{мкФ}.$$

Навантаження представляємо у вигляді паралельно з’єднаних незмінних опорів:

$$R_H = \frac{110^2}{40} = 302{,}5 \text{ Ом}; \qquad X_H = \frac{110^2}{30} = 403{,}3 \text{ Ом}.$$

Одержані величини наносимо на схему заміщення ПЛ (рис2.7).

Розрахуємо модельні параметри схеми:

$$R_{ЛМ} = R_Л = 28{,}8 \text{ Ом};$$

$$X_{ЛМ} = X_Л = 51{,}24 \text{ Ом};$$

$$C_{ЛМ} = 0{,}5 \cdot C_Л = 0{,}5 \text{ мкФ};$$

$$R_{НМ} = R_H = 302{,}5 \text{ Ом};$$

$$X_{НМ} = X_H = 403{,}3 \text{ Ом}.$$

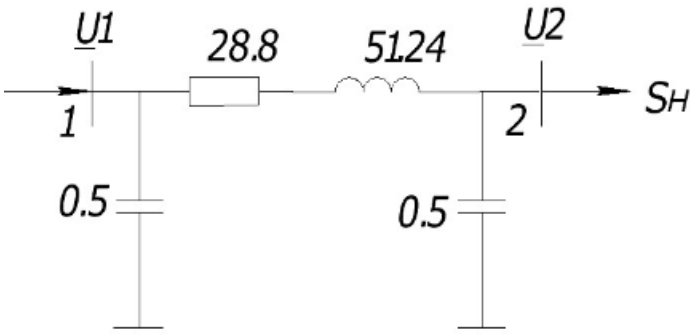

Рисунок 2.7. – Схема заміщення ПЛ

2.4 Порядок проведення лабораторної роботи

1. Скласти схему набору на моделі та задати параметри моделі і її елементів.
2. Виконати необхідні вимірювання (струмів, потужностей, напруг, втрат потужностей і напруг) для таких режимів роботи:
   а) Режим активно-індуктивного навантаження *($S_н=P_н+jQ_н$; $S_н=P_н+j0{,}5Q_н$);*
   б) Режим активного навантаження *($P_н=|S_н|$);*
   в) Режим холостого ходу лінії.

Дані вимірів занести в табл.2.2. Напруга джерела живлення *121 кВ*. Номінальна напруга лінії *110 кВ*.

4. Опрацювати одержані результати, визначити значення параметрів режиму.
5. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг для розглянутих режимів.
6. Оформити звіт.

2.5 Зміст звіту

1. Мета роботи
2. Умови завдання. Принципова схема. Вихідні дані.
3. Розрахункова схема та параметри її елементів.
4. Схема набору на моделі з нанесеними величинами параметрів і номерами елементів, які використовуються в схемі.
5. Таблиця результатів вимірів.
6. Векторні діаграми для кожного режиму.
7. Висновки.

2.6 Контрольні запитання

1. Якими параметрами слід вводити в розрахункову схему заміщення лінії електропередачі *35, 110, 220 кВ* і вище і як здійснюється їх розрахунок? Намалюйте розрахункову схему для *ПЛ 35, 110, 220 кВ* та наведіть формули для визначення параметрів цих схем.

2. Побудуйте векторні діаграми фазних напруг і струмів *ПЛ 35 кВ* для активного, індуктивного і ємнісного навантажень.

3. Побудуйте векторні діаграми фазних напруг і струмів *ПЛ 110 кВ* для активного і ємнісного навантажень I_2.

4. Що розуміють під спадом, втратами, відхиленням напруги і як вони визначаються?

5. Чим обумовлена ємнісна потужність лінії? Як і на що вона впливає?

6. Як впливає характер навантаження на параметри режиму?

Література

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592с.
2. Буслова Н.В., Винославский В.Н., Денисенко Г.И., Перхач В.С. Электрические системы и сети. – К.: Выща шк., 1985. – 395 с.
3. Блок В.М. Электрические сети и системы. – М.: Высш. шк., 1986. – 430с.
4. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ Под ред. С.С. Рокотяна, И.И. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 285 с.
5. Методичні вказівки по універсальній розрахунковій моделі електроенергетичної системи типу УРМЕС-2 і практичній роботі на моделі / Укл. В.І. Корнілова. – Запоріжжя: ЗДТУ, 1998.

Таблиця 2.1 - Дані до лабораторної роботи

Варіант	Лінія				Навантаження $S_н=P_н+jQ_н$, МВА
	Кількість кіл, n	Марка проводу	L, км	$D_{ср}$, м	
1	2	АС-185	150	5	27+j18
2	1	АС-150	140	4	35+j16
3	2	АС-120	130	4,5	30+j20
4	1	АС-185	140	5	27+j10
5	2	АС-150	150	4,5	40+j12
6	1	АС-120	130	4	30+j15

Таблиця 2.2 - Результати вимірів

Режим		I_1	U_1	P_1	Q_1	I_2	U_2	P_2	Q_2	ΔP	ΔQ	$U\Delta$	V
		А	кВ	МВт	МВАр	А	кВ	МВт	МВАр	МВт	МВАр	кВ	%
1	М												
	ОР												
2	М												
	ОР												
3	М												
	ОР												
4	М												
	ОР												

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ РОЗІМКНУТОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Мета роботи

Мета роботи — закріпити теоретичні відомості з розрахунку усталених симетричних режимів розімкнутої мережі, провести дослідження зміни потужностей у ланках мережі і напруг у вузлах мережі в нормальному і післяаварійному усталених режимах роботи мережі.

3.2 Загальні відомості

Основною метою розрахунку режиму електричної мережі є визначення параметрів режиму, тобто напруг у вузлах, струмів, потужностей на всіх ділянках мережі. Параметри режиму мережі в процесі експлуатації постійно змінюються, тому що мають місце постійні зміни навантаження. Може змінюватися і сама схема мережі внаслідок експлуатаційного чи аварійного вимкнення окремих елементів.

Вихідними даними для розрахунку служать схема електричних сполучень мережі, розрахункові параметри її елементів, розрахункові потужності навантаження і задані значення напруги в окремих вузлах схеми. При симетричних синусоїдальних режимах роботи трифазних електричних мереж мають місце однакові значення параметрів режиму окремих фаз і синусоїдальна форма кривої струмів і напруг. Значення повної потужності для трифазної мережі в цих умовах визначається комплексним числом, тобто

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I^* \qquad (3.1)$$

Якщо задана потужність навантаження для якогось вузла / мережі, яка повинна бути врахована як одне із багатьох навантажень при розрахунку режиму мережі, то струм цього навантаження може бути розрахований тільки тоді, коли відома напруга U_i на затискачах цього навантаження:

$$I_i = \frac{S_i^*}{\sqrt{3} \cdot U_i^*} \qquad (3.2)$$

Ця обставина не дозволяє безпосередньо використовувати закони Кірхгофа для однозначного розв'язання задачі розрахунку режиму мережі. Тому практичне застосування одержав метод послідовних наближень (ітераційний спосіб розв'язування задачі).

Відомо, що метод послідовних наближень передбачає розв'язування задачі до тих пір, доки результати наступних наближень не будуть з заданою точністю відрізнятися від результатів попередніх. Стосовно до електричних мереж в якості першого наближення доцільно розглянути розв'язок, коли напруга в усіх точках мережі дорівнює номінальній напрузі. Це дозволяє визначити струми навантажень і інші параметри режиму мережі, у тому числі і напруга на затискачах навантаження, які вже будуть другим наближенням до дійсного розв'язку. Аналогічно виконуються і наступні розрахунки. Практика показує, що при розрахунках параметрів усталених режимів електричних мереж у багатьох випадках можна обмежитись результатами, які отримані при другій і першій ітераціях [1,2,3].

Для схеми електричної мережі *110 кВ* (рис.3.1) розрахункова схема зображена на рис.3.2. Задано: U_1, S_H, L_1 паспортні дані трансформаторів, марка і площа перерізу проводів. Необхідно визначити U_2, U_3.

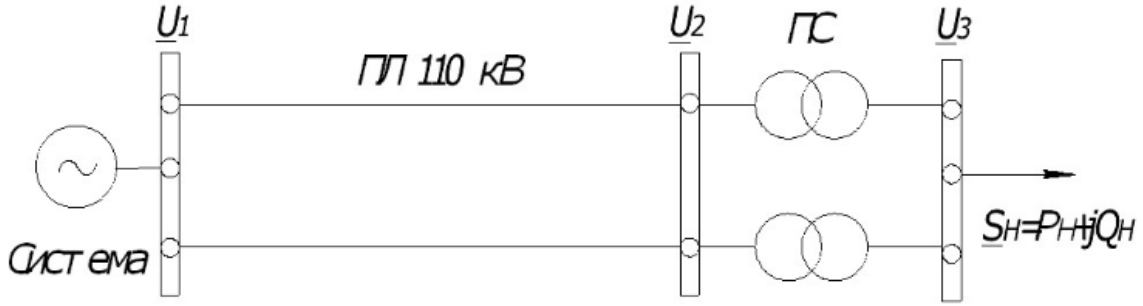

Рисунок 3.1 — Принципова схема мережі

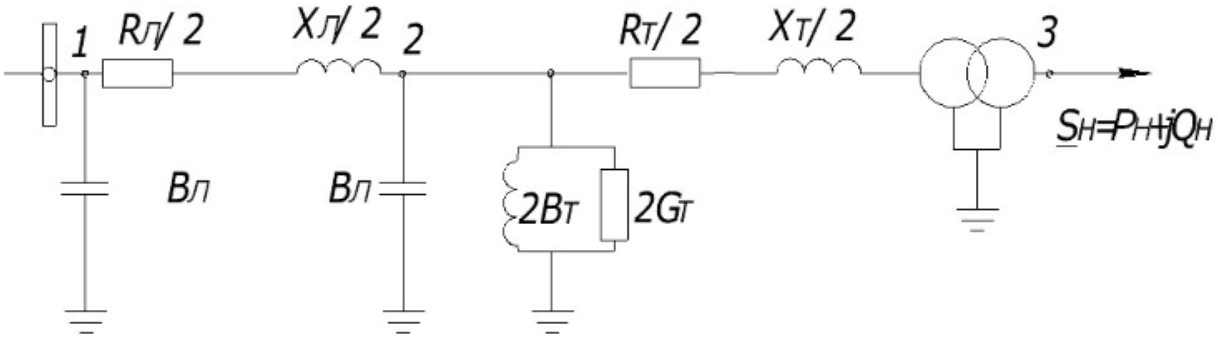

Рисунок 3.2. — Схема заміщення мережі

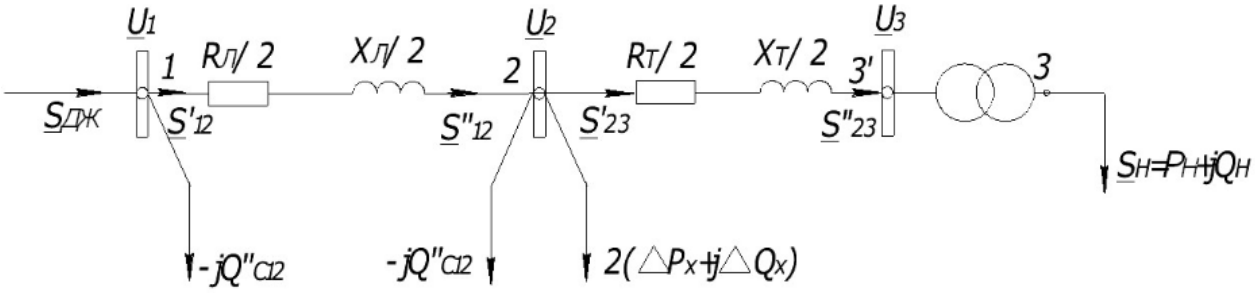

Рисунок 3.3. — Розрахункова схема

Послідовність розрахунку параметрів усталених режимів мережі методом послідовних наближень така:

1. Вибирається тип і потужність трансформаторів. При встановленні двох трансформаторів потужність кожного з них вибирається згідно з виразом:

$$S_T = 0{,}7S_{\max} \tag{3.3}$$

де *Smax* - сумарна максимальна потужність підстанції.

2. Визначаються параметри розрахункових схем *ПЛ 110 кВ* і трансформаторів.

3. Спочатку приймаємо напругу в кінці мережі $U'з^{(0)}=U_{ном}=110$ *кВ*, де *U'з* - напруга на шинах нижчої напруги підстанції, яка зведена до напруги обмотки вищої напруги трансформатора.

4. Визначаємо потужність S'_{23} на початку поздовжнього опору обмоток трансформаторів:

$$S'_{23} = P'_{23} + jQ'_{23} = (P_H + \Delta P_{23}) + j(Q_H + \Delta Q_{23}) \tag{3.4}$$

де ΔP_{23}, ΔQ_{23} — активна та реактивна складові втрат потужності в опорах обмоток трансформаторів:

$$P_{23} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_{НОМ}^2} \cdot \frac{R_T}{2}; \qquad Q_{23} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_{НОМ}^2} \cdot \frac{X_T}{2} \tag{3.5}$$

5. Нульове наближення напруги у вузлі 2 визначається за формулою:

$$U_2^{(0)} = U_3^{'(0)} + \frac{P_H \cdot 0{,}5 \cdot R_T + Q_H \cdot 0{,}5 \cdot X_T}{U_3^{'(0)}} + j\frac{P_H \cdot 0{,}5 \cdot X_T + Q_H \cdot 0{,}5 \cdot R_T}{U_3^{'(0)}} =$$

$$= U_3^{'(0)} + U'_{23} + jU''_{23} \tag{3.6}$$

Модуль напруги у вузлі 2:

$$U_2^{(0)} = \sqrt{\left(U_3^{'(0)} + U'_{23} + \left(U''_{23}\right)^2\right)} \tag{3.7}$$

6. Потужність у кінці поздовжнього опору ПЛ:

$$S''_{12} = P''_{12} + jQ''_{12} = (P'_{23} + 2\Delta P_X) + j(Q_{23} + 2\Delta Q_X - Q''_{C12}) \tag{3.8}$$

де ΔP_x, ΔQ_x — активна та реактивна складові втрат потужності холостого ходу трансформаторів; $Q''_{C12} = 0{,}5\ (\ U_2^{(0)}\ ) \cdot 2$ *Вл* - половина зарядної потужності двох ПЛ.

7. Потужність на початку поздовжнього опору ПЛ:

$$S'_{12} = P'_{12} + jQ'_{12} = (P''_{12} + \Delta P_{12}) + j(Q''_{12} + \Delta Q_{12}) \tag{3.9}$$

де ΔP_{12}, ΔQ_{12} — активна та реактивна складові втрат потужності у опорах проводів ПЛ:

$$P_{12} = \frac{\left(P_{12}^{''}\right)^2 + \left(Q_{12}^{''}\right)^2}{\left(U_2^{(0)}\right)^2} \cdot \frac{R_{Л}}{2}; \qquad Q_{12} = \frac{\left(P_{12}^{''}\right)^2 + \left(Q_{12}^{''}\right)^2}{\left(U_2^{(0)}\right)^2} \cdot \frac{X_{Л}}{2}; \tag{3.10}$$

8. Визначається нульове наближення напруга у вузлі 1 мережі:

$$U_1^{(0)} = U_2^{'(0)} + \frac{P_{12}^{''} \cdot 0{,}5 \cdot R_{Л} + Q_{12}^{''} \cdot 0{,}5 \cdot X_{Л}}{U_2^{'(0)}} + j\frac{P_{12}^{''} \cdot 0{,}5 \cdot X_{Л} + Q_{12}^{''} \cdot 0{,}5 \cdot R_{Л}}{U_2^{'(0)}} =$$

$$= U_2^{'(0)} + U_{12}^{'} + jU_{12}^{''} \tag{3.11}$$

Модуль напруги у вузлі 1:

$$U_1^{(0)} = \sqrt{\left(U_2^{'(0)} + U_{12}^{'} + \left(U_{12}^{''}\right)^2\right)} \tag{3.12}$$

9. Якщо $U_1^{(0)}=U_1$ то розрахунок можна закінчити, якщо $U_1^{(0)} \cdot U_1$, то необхідно розрахунок продовжити з метою уточнення напруг у вузлах 1 і 2.

10. Визначається перше наближення напруги у вузлі 2:

$$U_2^{(1)} = U_1 + \frac{P_{12}^{'} \cdot 0{,}5 \cdot R_{Л} + Q_{12}^{'} \cdot 0{,}5 \cdot X_{Л}}{U_1} + j\frac{P_{12}^{'} \cdot 0{,}5 \cdot X_{Л} + Q_{12}^{'} \cdot 0{,}5 \cdot R_{Л}}{U_1} =$$

$$= U_1 + U_{12}^{'} + jU_{12}^{''} \tag{3.13}$$

Модуль напруги у вузлі 2:

$$U_2^{(1)} = \sqrt{\left(U_1 + U_{12}^{'})^2 + \left(U_{12}^{''}\right)^2\right)} \tag{3.14}$$

11. Визначається перше наближення напруги у вузлі 3:

$$U_3^{'(1)} = U_2^{(1)} + \frac{P_{23}^{'} \cdot 0{,}5 \cdot R_T + Q_{23}^{'} \cdot 0{,}5 \cdot X_T}{U_2^{(1)}} + j\frac{P_{23}^{'} \cdot 0{,}5 \cdot X_T + Q_{23}^{'} \cdot 0{,}5 \cdot R_T}{U_2^{(1)}} \tag{3.15}$$

12. Приймаємо напругу у вузлі 3 рівною $U_3^{'(1)}$ і повторюємо весь розрахунок знову. Розрахунок вважається закінченим, коли напруга в кінці мережі $U'_3{}^{(n)}$ дорівнює напрузі $U'_3{}^{(n-1)}$ у попередньому розрахунку.

13. Якщо відома напруга U'_3, яка зведена до напруги первинної обмотки, то можна визначити дійсну напругу на цих шинах підстанції:

$$U_3 = \frac{U_3^{'}}{K_T} \tag{3.16}$$

де $K_т$ - коефіцієнт трансформації.

14. Визначаємо потужність джерела:

$$S_{ДЖ} = S'_{12} - jQ'_{C12} \qquad (3.17)$$

3.3 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Ознайомитись з методичними вказівками до роботи.

2. Для принципової схеми, зображеної на рис.3.1, та розрахункових умов згідно з заданим варіантом (ЛР 2) скласти розрахункову схему та схему заміщення, визначити параметри елементів.

3. Для заданого режиму навантаження $S_H = P_H + jQ_H$ визначити параметри режиму роботи мережі. Напруга джерела живлення *121 кВ*. Номінальна напруга лінії *110 кВ*. В режимі мінімального навантаження $K_{мн}=0,4;$ напруга джерела живлення *115кВ*.

3.4 Порядок проведення лабораторної роботи

1. Підготувати дані, необхідні для вводу в ЕОМ (табл.3.1).

2. Провести на ЕОМ розрахунок параметрів усталених режимів мережі в наступних режимах:

а) режимі максимального навантаження при зміні навантаження від 0 до 100% через 25%;

б) режимі мінімального навантаження;

в) режимі максимального навантаження для післяаварійного стану мережі.

3. Обробити результати розрахунків та звести їх до табл.3.3.

4. По результатам розрахунків побудувати залежності $U_З$, η,$V=f(P_H)$, та P_H, $P_H=f(U_З)$, та зробити висновки.

3.5 Зміст звіту

1. Назва і мета роботи.

2. Вихідні дані. Принципова схема. Схема заміщення.

3. Розрахункова схема мережі з параметрами її елементів і режим роботи.

4. Розрахунок параметрів режиму мережі для заданого режиму роботи та навантаження.

5. Таблиця результатів вимірів і їх обробка. Аналіз результатів.

6. Висновки.

3.6 Контрольні запитання

1. Якими фізичними процесами можна пояснити наявність активного опору, індуктивності, ємності в схемах заміщення ліній і трансформаторів?

2. Які вихідні дані необхідні для визначення параметрів схеми заміщення трансформаторів?

3. Як виконується розрахунок параметрів режиму мережі 110 кВ, яка складається із одно- чи дволанцюгової лінії 110 кВ і двох трансформаторів підстанції?

4. Чим небажані післяаварійні режими електричної мережі?

5. На що впливає ємнісна потужність лінії?

Література

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592с.
2. Буслова Н.В., Винославский В.Н., Денисенко Г.И., Перхач В.С. Электрические системы и сети. - К.: Высшая шк., 1985. - 395 с.
3. Блок В.М. Электрические сети и системы. - М.: Высш. шк., 1986. - 430с.
4. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна, И.И. Шапиро. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 285 с.

Таблиця 3.1 — Дані, необхідні для вводу в ЕОМ

Активний опір лінії, Ом	$R_л$	
Реактивний опір лінії, Ом	$X_л$	
Ємнісна провідність лінії, См	$B_л$	
Активний опір трансформатора, Ом	$R_т$	
Реактивний опір трансформатора, Ом	$X_т$	
Активні втрати холостого ходу, МВт	$\Delta P_{хх}$	
Реактивні втрати холостого ходу, МВАр	$\Delta Q_{хх}$	
Активна складова навантаження, МВт	$P_н$	
Реактивна складова навантаження, МВАр	$Q_н$	
Напруга джерела живлення, кВ	U_1	
Коефіцієнт трансформації	$K_т$	
Зарядна потужність лінії, МВАр	$Q_с$	

Таблиця 3.2 - Розрахункові та експериментальні дані

Режим		Розрахункові дані									Аналіз результатів розрахунків								
		U_1	U_2	U_3	$S_{дж}$	$S_{п12}$	$S_{к12}$	$S_{п23}$	$S_Н$	$Q_с$	V	η	$\Delta P_м$	$\Delta U_л$	$\Delta P_л$	$\Delta Q_л$	$\Delta U_т$	$\Delta P_т$	$\Delta Q_т$
		кВ	кВ	кВ	МВА	МВА	МВА	МВА	МВА	МВАр	%	%	МВт	кВ	МВт	МВАр	кВ	МВт	МВАР
НР	100%																		
	75%																		
	50%																		
	25%																		
	0%																		
ПАР	100%																		
	75%																		
	50%																		
	25%																		
	0%																		
МІН	40%																		

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ І БАЛАНСУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

4.1 Мета роботи

Мета роботи – регулювання напруги та балансу реактивної потужності в електричних мережах 35-220 кВ за допомогою компенсуючих пристроїв.

4.2 Загальні відомості

В електричних системах здійснюється виробництво, транспортування та споживання як активної, так і реактивної потужності. Виробляють активну та реактивну потужність на теплових, атомних і гідравлічних електростанціях синхронні генератори. Синхронні генератори – це єдині джерела активної потужності в електроенергетичних системах. Тому їх прийнято вважати і основними джерелами реактивної потужності. У балансі реактивної потужності енергосистем синхронні генератори електростанцій дійсно є основними джерелами. Крім синхронних генераторів для отримання реактивної потужності використовують також синхронні компенсатори (СК), батареї статичних конденсаторів (БСК), статичні тиристорні компенсатори (СТК), які називають додатковими джерелами реактивної потужності. З розвитком електричних систем зростає відносне значення потужності цих додаткових джерел у загальному балансі реактивної потужності.

Основними споживачами реактивної потужності в електричних системах є трансформатори, повітряні електричні лінії, асинхронні двигуни, вентильні перетворювачі, індукційні електропечі, зварювальні агрегати та інше навантаження. Сумарні абсолютні і відносні втрати реактивної потужності в елементах мережі дуже великі і досягають 50% потужності, яка поступає в мережу. Приблизно 70-75% усіх втрат реактивної потужності становлять втрати в трансформаторах різних ступенів напруги. На промислових підприємствах основними споживачами реактивної потужності є асинхронні двигуни (приблизно 65-70 % реактивної потужності, що споживається підприємством), 20-25% припадає на трансформатори, близько 10 % — на інші споживачі.

В електричній системі у кожний момент часу має місце рівність електроенергії, що виробляється і споживається. При цьому має місце рівність потужностей, як активної, так і реактивної, які виробляються і споживаються. Баланс реактивної потужності в усій системі в цілому визначає

деякий середній рівень напруги. Напруги у вузлах мережі електричної системи в той чи іншій мірі відрізняються від середнього рівня, причому ця різниця визначається конфігурацією мережі, навантаженням та іншими факторами, від яких залежить спад напруги. Баланс реактивної потужності для усієї системи в цілому не може вичерпно визначити вимоги, які висувають до потужності джерела реактивної потужності. Необхідно оцінювати можливості отримання потрібної реактивної потужності як в системі, так і в окремих її районах.

Порушення балансу реактивної потужності приводить до зміни рівня напруга в мережі. Якщо генерована реактивна потужність буде більше споживаної реактивної потужності, то напруга в мережі підвищується. При дефіциті реактивної потужності напруга в мережі знижується. Застосування додаткових джерел реактивної потужності на підстанціях електричної мережі дозволяє змінювати або регулювати напругу у вузлах мережі, наближуючи її до бажаної напруга. Компенсація реактивної потужності є ефективним засобом підвищення техніко-економічних показників електричних систем та підвищення якості електроенергії.

Регулювання напруги забезпечує компенсацію втрат напруга у системі електропостачання з метою підтримання заданої якості напруга на затискачах електроприймачів.

У загальному вигляді напруга у споживачів дорівнює:

$$U = U_{ДЖ} \pm E\frac{P \cdot R + (Q + Q_K) \cdot (X_L - X_C)}{U_{НОМ}} \qquad (4.1)$$

де $U_{дж}$ - напруга в центрі живлення;

E - додаткова напруга, що утворюється пристроями регулювання (трансформаторами та автотрансформаторами);

P,Q — активна та реактивна потужності споживачів;

$Q_к$ — реактивна потужність компенсуючих пристроїв;

$(X_L - X_C)$ — реактивний опір мережі.

Регулювати напругу можуть генератори електричних станцій. При повному навантаженні й номінальному коефіцієнті потужності напругу генераторів можна регулювати в межах ± 5 %. Проте таке регулювання на підприємствах можливе тільки у разі наявності власної генерації.

В енергосистемі можливості регулювання обмежені вимогами стійкості паралельної роботи генераторів.

Для підтримання заданої якості напруги на затискачах електроприймачів можна використовувати такі способи зміни та регулювання напруги:

зміна режиму напруги або регулювання напруги на шинах центрів живлення (ЦЖ);

зміна величини втрат напруги в окремих елементах мережі (лініях, трансформаторах) або на кількох ділянках мережі одночасно;

зміна коефіцієнтів трансформації трансформаторів з ПБЗ та РПН і автотрансформаторів.

Із формули (4.1) виходить, що величину втрат напруги можна змінювати шляхом зменшення опорів або реактивної потужності яка передається.

Опір ліній залежить від матеріалу і перерізу проводів, від конструктивного виконання мережі та числа паралельно працюючих ланцюгів. Матеріал і конструктивне виконання ліній вибирають незалежно від режиму напруги. Число паралельно працюючих ліній або трансформаторів також визначається іншими умовами (надійністю роботи, пропускною спроміжністю).

Практично зміну опорів мережі зв'язують із зміною режиму напруги в ній тільки в двох випадках:

при виборі перерізу проводів і жил кабелів за допустимою втратою напруги;

при застосуванні поздовжньої ємнісної компенсації.

Принципова схема лінії напругою *35 кВ* з пристроєм поздовжньої ємнісної компенсації і схема заміщення зображені на рис. 4.1.

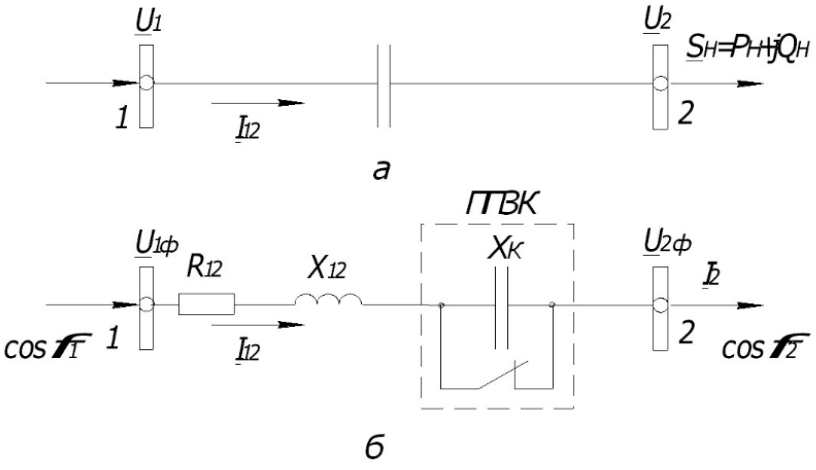

Рисунок 4.1. – Принципова схема заміщення ПЛ напругою 35 кВ з повздовжньою компенсацією

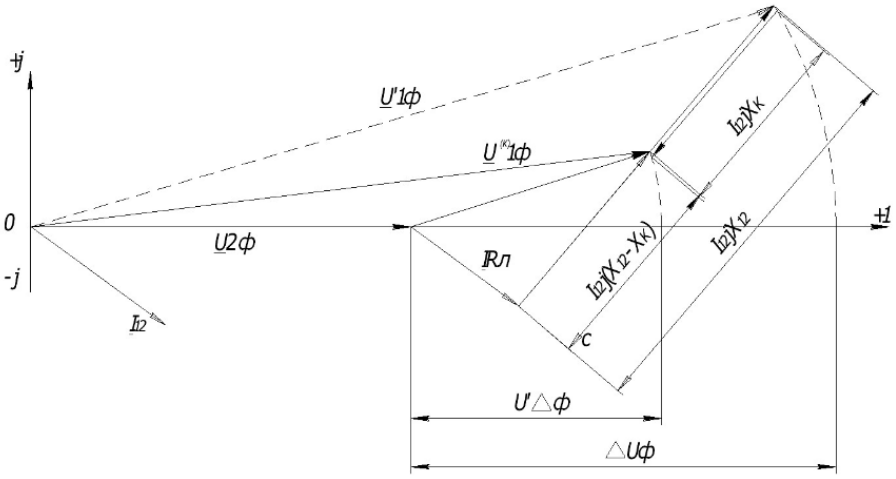

Рисунок 4.2. – Векторна діаграма для мережі з повздовжньою компенсацією

Втрати напруги при поздовжній ємнісній компенсації визначаються співвідношеннями:

$$U = \sqrt{3} \cdot I_{12a} \cdot R_{12} + \sqrt{3} \cdot I_{12p} \cdot (X_{12} + X_K) = \frac{P_2 \cdot R_{12} + Q_2 \cdot (X_{12} + X_K)}{U_2} \qquad 4.2)$$

При вмиканні компенсуючих пристроїв паралельно навантаженню (рис.4.3) втрати напруги визначаються за формулою:

$$U = \frac{P_2 \cdot R_{12} + (Q_2 + Q_K) \cdot X_{12})}{U_2} \qquad (4.3)$$

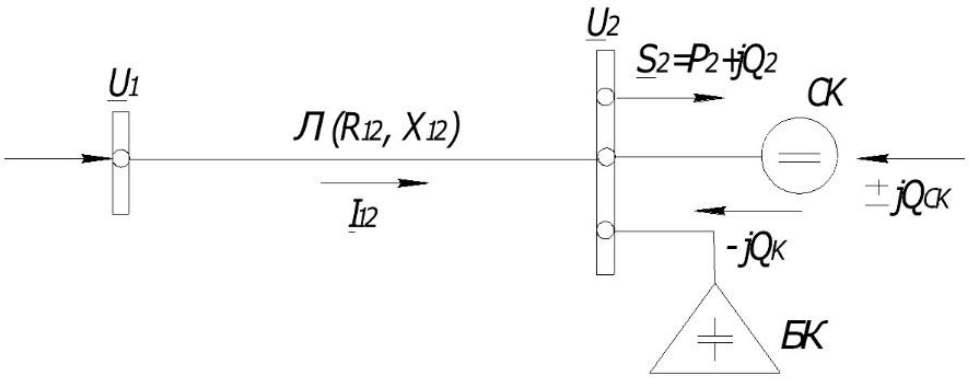

Рисунок 4.3 - Принципова схема мережі з поперечною компенсацією

Векторна діаграма струмів і напруг для схеми з БК зображена на рис.4.4а. Ця діаграма відповідає і роботі СК в режимі перезбудження.

Векторна діаграма для режиму споживання СК реактивної потужності зображена на рис.4.4б. Таким чином, основним призначенням БК і СК є

зменшення реактивної потужності, що передається лінією, а отже зменшення втрат потужності та енергії в мережі.

Рівняння балансу реактивної потужності для електричної мережі, принципова схема якої зображена на рис.4.3:

$$Q_{ДЖ} + Q_K + Q_C = Q_2 + \Delta Q_{12} \qquad (4.4)$$

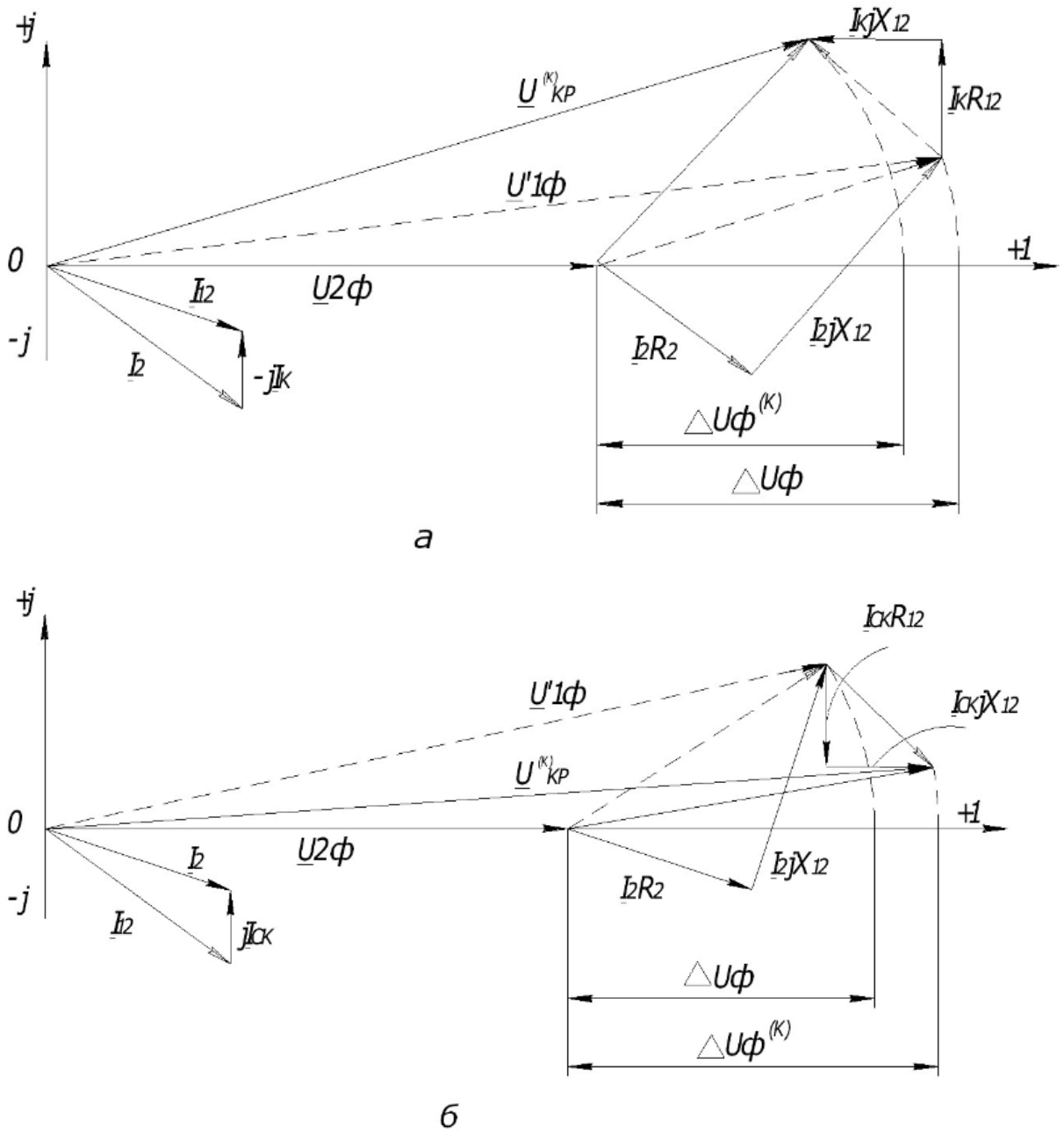

Рисунок 4.4. – Векторна діаграма

В лабораторній роботі розглядаються задачі регулювання зміни напруги, а також балансування реактивної потужності в електричній мережі, принципова схема якої зображена на рис.4.5.

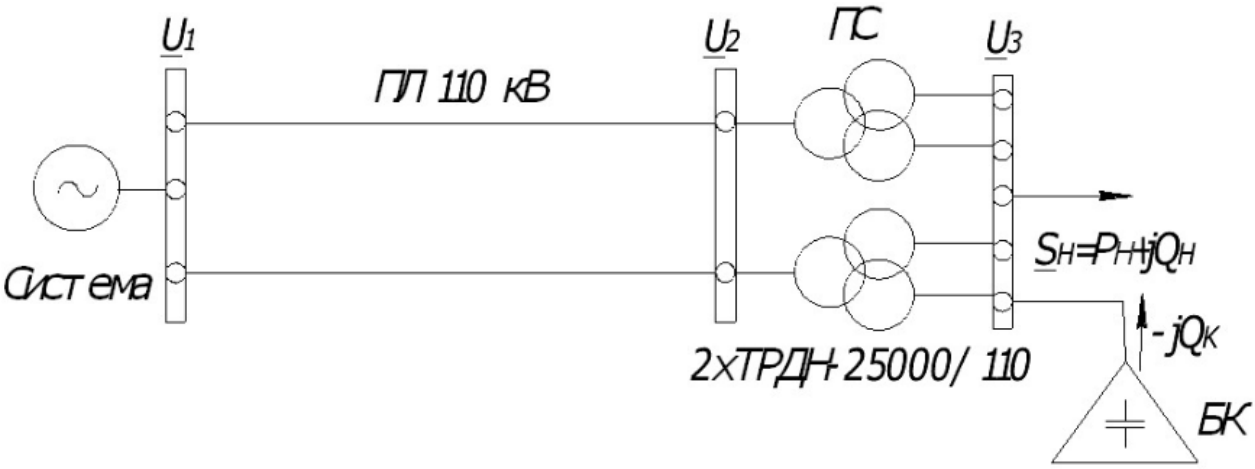

Рисунок 4.5 — Принципова схема досліджуваної мережі

Досліджувана електрична мережа складається із дволанцюгової лінії електропередачі напругою *110 кВ*, знижувальних трансформаторів з розщепленими обмотками та активно-індуктивного навантаження. На підстанції встановлено два трансформатори типу *ТРДН -25000/110*. Лінія напругою *110 кВ* виконана проводами марки *АС-150*, довжина лінії *150 км*.

В режимах максимального навантаження та післяаварійному напруга джерела живлення *121 кВ*, навантаження $S_{нmax}$ *= (27 + j 23) МВА.* В режимі мінімального навантаження напруга джерела живлення *112 кВ і* $S_{нmin}$ *= (13,5 + j 11,5) МВА.* В аварійному режимі роботи відбувається раптове вимикання одного ланцюга лінії електропередачі.

Як компенсуючі пристрої в усіх випадках умовно приймаються БК напругою *10 кВ*, які встановлюються в мережах вторинної напруга приймальної підстанції. Сумарна встановлена потужність конденсаторних батарей вибирається із рівняння балансу реактивної потужності при нормальному режимі максимального навантаження підстанції. Умови балансу реактивної потужності вважаються виконаними, якщо при максимальному навантаженні на початку лінії коефіцієнт потужності знаходиться в діапазоні $tg\ \varphi_1$ *= 0,48 - 0,6.*

При всіх інших значеннях навантаження приймальної підстанції за умовою балансу реактивної потужності вона не повинна передаватися від електропередачі в систему. За дотриманням цієї умови необхідно особливо уважно слідкувати в режимі мінімального навантаження.

На шинах 10 кВ знижувальної підстанції в нормальному режимі роботи повинен виконуватись закон зустрічного регулювання напруга в діапазоні +5% - 0% — при зміні навантаження підстанції від максимального до мінімального. При аварійному вимкненні одного кола на шинах 10 кВ напруга не повинна бути нижче номінального рівня.

4.3 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Ознайомитись з методичними вказівками до роботи.

2. Знати відповіді на всі контрольні запитання.

3. Розрахувати параметри схеми заміщення мережі, принципова схема якої зображена на рис. 4.5.

4. Визначити реактивну потужність і ємність БК для поперечної компенсації.

4.4 Порядок проведення лабораторної роботи

1. Підготувати дані, необхідні для вводу в ЕОМ (див. табл. 3.1, л/р №3).

2. Визначити параметри усталених режимів мережі в наступних режимах:

а) режимі максимального навантаження;

б) режимі мінімального навантаження;

в) режимі максимального навантаження для післяаварійного стану мережі.

3. Обробити результати розрахунків та звести їх до табл. 4.1.

4. Для поліпшення режиму напруги та підвищення економічності роботи мережі в нормальному та післяаварійному режимах роботи необхідно здійснити:

а) поздовжню компенсацію;

б) поперечну ємнісну компенсацію.

Поздовжню ємнісну компенсацію здійснити зменшенням реактивного опору лінії на 50% для всіх досліджуваних режимів.

Поперечну ємнісну компенсацію здійснити підмиканням до шин навантаження ємнісного елемента, ємність якого визначається з рівняння балансу реактивної потужності при $tg\varphi_З = 0,3$:

$$Q_К = P_Н \cdot (tgX_Н + tgX_К)$$

Загальна потужність підстанції після встановлення пристроїв для компенсації реактивної потужності:

$$S_Н = P_Н + j(Q_Н + Q_К)$$

5. Дослідити, як впливає поперечна компенсація на режим роботи мережі при мінімальному навантаженні і $U_1 = 112$ *кВ* та опрацювати одержані результати.

6. За одержаними результатами визначити коефіцієнти потужності на початку ЛЕП; втрати напруги на лініях, в трансформаторах і мережі; відхилення напруги на навантаженні; втрати потужності; ККД лінії електропередачі; побудувати епюри зміни напруги в мережі.

7. За результатами розрахунків побудувати векторні діаграми напруги та струмів.

4.5 Зміст звіту

1. Назва і мета роботи.

2. Вихідні дані. Принципова схема.

3. Схема заміщення з параметрами елементів.

4. Таблиця результатів і їх обробка.

5. Векторні діаграми та епюри зміни напруги в мережі.

6. Аналіз експериментальних та розрахункових даних і висновки по роботі.

4.6 Контрольні запитання

1. Задачі і способи регулювання напруги.

2. Показники якості електроенергії.

3. Зустрічне регулювання напруги.

4. Регулювання напруги на електростанціях і знижувальних підстанціях.

5. Регулювання напруги зміною опору мережі. Векторна діаграма.

6. Регулювання напруги зміною потоків реактивної потужності. Векторна діаграма.

7. Баланс реактивної потужності в електроенергетичній системі.

8. Додаткові джерела реактивної потужності: синхронні компенсатори, батареї конденсаторів, тиристорні компенсатори, характеристика, переваги та недоліки.

Література

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592с.

2. Буслова Н.В., Винославский В.Н., Денисенко Г.И., Перхач В.С. Электрические системы и сети. — К.: Выща шк., 1985. — 395 с.

3. Блок В.М. Электрические сети и системы. — М.: Высш. шк., 1986. — 430с.

4. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ Под ред. С.С. Рокотяна, И.И. Шапиро. — М.: Энергоатомиздат, 1985. —285 с.

Таблиця 4.1- Розрахункові та експериментальні дані

Режим		Розрахункові дані									Аналіз результатів розрахунків								
		U_1	U_2	U_3	$S_{дж}$	$S_{п12}$	$S_{к12}$	$S_{п23}$	$S_н$	$Q_с$	V	η	$\Delta P_м$	$\Delta U_л$	$\Delta P_л$	$\Delta Q_л$	$\Delta U_т$	$\Delta P_т$	$\Delta Q_т$
		кВ	кВ	кВ	МВА	МВА	МВА	МВА	МВА	МВАр	%	%	МВт	кВ	МВт	МВАр	кВ	МВт	МВАР
НР	Без комп.	121																	
	Повзд.	121																	
	Попер.	121																	
ПАР	Без комп.	121																	
	Повзд.	121																	
	Попер.	121																	
МІН	Без комп	112																	
	Попер.	112																	

ДОДАТОК А

Трансформатори з вищою напругою 35 кВ

Тип	Sном, МВ А	Напруга обмотки		Втрати кВт		Uк, %	Iх, %
		ВН	НН	Рх	Рк	ВН - НН	
ТМ-100/35	0,1	35	0.4	0,42	1,97	6,5	2,6
ТМ- 160/35	0,16	35	0,4 0,69	0,62 0,62	2,65 3,1	6,5 6,5	2,4 2,4
ТМ-250/35	0,25	35	0,4 0,69	0,9 0,9	3,7 4,2	6,5 6,5	2,3 2,3
ТМН- 400/35	0,4	35	0,4 0,69	1,2 1,2	5,5 5,9	6,5 6,5	2,1 2,1
ТМН-630/35	0,63	35	0,4 0,69 6,3 11	1,6 1,6 1.6 1,6	7,6 8,5 7,6 7,6	6,5 6.5 6,5 6,5	2 2 2 2
ТМ-1000/35	1	35	3,15 6,3 10,5	2 2 2	11,6 11,6 11,6	6,5 6,5 6,5	1,4 1,4 1,4
ТМН -1000/35	1	35	0,4 0,69 6.3 11	2,1 2,1 2.1 2,1	12,2 12,2 11,6 11,6	6.5 6,5 6,5 6,5	1,4 1,4 1,4 1,4
ТМ- 1600/35	1,6	35	0,4 0,69 3,15 6,3 10,5	2,75 2,75 2,75 2,75 2,75	18 18 16,5 16,5 16,5	6,5 6,5 6,5 6,5 6,5	1,3 1,3 1,3 1,3 1,3
ТМН- 1600/35	1.6	35	0,4 0,69 6,3 11	2,9 2,9 2,9 2,9	18 18 16,5 16,5	6,5 6,5 6,5 6,5	1,3 1.3 1,3 1.3
ТМН-2500/35	2,5	35	0,69 6,3 11	 4,1 4,1	 23,5 23,5	6,5 6.5 6,5	1 1 1
ТМ-4000/35	4	35	3,15 6,3 10,5	5,3 5,3 5,3	33,5 33,5 33,5	7.5 7,5 7,5	0,9 0,9 0,9
ТМН-4000/35	4	35	6.3 11	5,6 5,6	33,5 33,5	7,5 7,5	0,9 0,9
ТМ-6300/35	6,3	35	3,15 6.3 10,5	7,6 7,6 7,6		7,5 7,5 7,5	0,8 0,8 0,8
ТМН-6300/35	6,3	35	6,3 11	8 8	46,5 46,5	7,5 7,5	0,8 0,8

Тип	Sном, MB·A	Напруга обмотки			Втрати, кВт		Uк, %		Iх, %
		ВН	СН	НН	Рх	Рк	ВН - НН	СН - НН	
ТД -10000/35	10	38.5		6,3 10,5					
ТД- 16000/35	16	38,5		6,3 10,5					
ТДНС-10000/35	10	36,75		3,15 6,3 10,5	12 12 12	81 60 60	14 8 8		0,75 0,75 0,75
ТДНС- 16000/35	16	36,75		6.3 10,5	17 17	85 85	10 10		0,7 0,7
ТРДНС-25000/35	25	36,75		6,3—6,3 . 6,3—10,5 10,5—10,5	25 25 25	115 115 115	10,5 10,5 10,5		0.65 0,65 0,65
ТРДНС-32000/35	32	36,75		6,3—6,3 6,3—10,5 10,5—10.5	29 29 29	145 145 145	12,7 12,7 12,7	40 40 40	0,6 0,6 0,6
ТРДНС-32000/35-72У1	32	36,75		6,3—6,3 6,3—10,5 10,5—10,5	26 26 26	145 145 145	12,7 12,7 12,7		0,45 0,45 0,45
ТРДНС-40000/35	40	36,75		6,3—6,3 6,3—10,5 10,5—10,5	36 36 36	170 170 170	12,7 12,7 12,7	40 40 40	0,5 0,5 0,5
ТРДНС-63000/35	63	36,75		6,3—6,3 6,3—10,5 10,5—10,5	50 50 50	250 250 250	12,7 12,7 12,7	40 40 40	0,45 0,45 0,45
ТДЦ-80000/35	80	38,5		6,3 10,5	53 53	280 280	9,5 9,5		0,3 0,3
ТДТН-6300/35	6.3	35	10,5 13,8 15,75	6,3	12 12 12	55 55 55	7,5 7,5 7,5	16 16 16	1,2 1,2 1,2
ТДТН- 10000/35	10	36,75	10,5 13,8 15,75	6,3	19 19 19	75 75 75	16,5 16,5 16,5	7 7 7	1 1 1
ТДТН- 16000/35	16	36,75	10,5 13,8 15,75	6,3	28 28 28	115 115 115	16,5 16,5 16,5	7 7 7	0,95 0,95 0,95

Примітка: Для трансформаторів з розчепленню обмоткою в графі U_K СН-НН дані U_K НН1-НН2, напруга короткого замикання цих трансформаторів U_K ВН-НН и U_K НН1-НН2 віднесенні до номінальної потужності трансформатора.

Трансформатори з вищою напругою 110 кВ

тип	Sном, МВ А	Напруга обмотки			Втрати, кВт		Uк, %		Iх, %
		ВН	СН	НН	Рх	Рк	ВН - НН	СН - НН	
ТД -10000/35	10	38.5		6,3 10,5					
ТД- 16000/35	16	38,5		6,3 10,5					
ТДНС-10000/35	10	36,75		3,15 6,3 10,5	12 12 12	81 60 60	14 8 8		0,75 0,75 0,75
ТДНС- 16000/35	16	36,75		6.3 10,5	17 17	85 85	10 10		0,7 0,7
ТРДНС-25000/35	25	36,75		6,3—6,3 . 6,3—10,5 10,5—10,5	25 25 25	115 115 115	10,5 10,5 10,5		0.65 0,65 0,65
ТРДНС-32000/35	32	36,75		6,3—6,3 6,3—10,5 10,5—10.5	29 29 29	145 145 145	12,7 12,7 12,7	40 40 40	0,6 0,6 0,6
ТРДНС-32000/35-72У1	32	36,75		6,3—6,3 6,3—10,5 10,5—10,5	26 26 26	145 145 145			0,45 0,45 0,45
ТРДНС-40000/35	40	36,75		6,3—6,3 6,3—10,5 10,5—10,5	36 36 36	170 170 170	12,7 12,7 12,7	40 40 40	0,5 0,5 0,5
ТРДНС-63000/35	63	36,75		6,3—6,3 6,3—10,5 10,5—10,5	50 50 50	250 250 250	12,7 12,7 12,7	40 40 40	0,45 0,45 0,45
ТДЦ-80000/35	80	38,5		6,3 10,5	53 53	280 280	9,5 9,5		0,3 0,3
ТДТН-6300/35	6.3	35	10,5 13,8 15,75	6,3	12 12 12	55 55 55	7,5 7,5 7,5	16 16 16	1,2 1,2 1,2
ТДТН- 10000/35	10	36,75	10,5 13,8 15,75	6,3	19 19 19	75 75 75	16,5 16,5 16,5	7 7 7	1 1 1
ТДТН- 16000/35	16	36,75	10,5 13,8 15,75	6,3	28 28 28	115 115 115	16,5 16,5 16,5	7 7 7	0,95 0,95 0,95

Примітка: 1. Для трансформаторів з розчепленню обмоткою в графі U_K СН-НН U_K НН1-НН2, напруга короткого замикання цих трансформаторів U_K ВН-НН та U_K НН1-НН2 віднесенні до номінальної потужності трансформатора. 2. Для триобмоткових трансформаторів втрати короткого замикання вказані на основному відгалуженні для основної пари обмоток ВН-СН.

Трансформатори та автотрансформатори з вищою напругою 220-500 кВ

Вища напруга 220 кВ												
Тип трансформатора	Sн, МВА	напруга обмотки, кВ			Рх, кВт	Рк,кВт			Uк,%			Iх, %
		ВН	СН	НН		ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	
ТД-80000/220	80	242		6,3;10,5;13,8	79		315			11		0,45
ТДЦ-125000/220	125	242		10,5;13,8	120		380			11		0,55
ТЦ-160000/220	160	242		13,8;15,75	. . .		. . .			. . .		. . .
ТДЦ(ТЦ)-200000/220	200	242		13,8;15,75;18	130		660			11		0,4
ТДЦ(ТЦ)-250000/220	250	242		13,8;15,75	207		600			11		0,5
ТДЦ(ТЦ)-400000/220-73	400	242		13,8;15,75;20	330		880			11		0,4
ТДЦ-400000/220-78Т1	400	237		21	315		850			11		0,5
ТЦ-630000/220-74У1	630	242		15,75;20	380		1200			12,5		0,35
ТНЦ-630000/220	630	242		15,75;20;24	400		1200			12,5		0,35
ТНЦ-1000000/220	1000	242		24	480		2200			11,5		0,4
ТРДН-32000/220	32	230		6,3-6,3;6,6-6,6 11-6,6;11-11	45		150			11,5	28	0,65
ТРДНС-32000/220	32	230		6,3-6,3	. . .		. . .			. . .		. . .
ТРДНС-40000/220	40	230		6,3-6,3;6,6-6,6 11-11;11-6,6	50		170			11,5	28	0,6
ТРДНС-40000/220-80Т1	40	230		6,3-6,3	45/50		170			11,5	. . .	0,6
ТРДН(ТРДЦН)-63000/220	63	230		6,3-6,3;6,6-6,6 11-11;11-6,6	70		265			11,5	28	0,5
ТРДНС-63000/220	63	230		6,3-6,3	. . .		. . .		12,5	. . .	. . .	. . .
ТРДЦН-100000/220	100	230		11-11 .	102		340		12,5	12,5	28	0,65
ТРДЦН-160000/220	160	230		11-11.	155		500		22	12,5	28	0,6
ТРДЦН-200000/220	200	230		11-11.	. . .		. . .		. . .	. . .	. . .	. . .
ТДТН-25000/220	25	230	38,5	6,6;11	45	130	. . .	. . .	15	20	6,5	0,9
ТДТН-40000/220	40	230	38,5	6,6;11	54	220	. . .	. . .	11	22	9,5	0,55
ТДТН-40000/220-81У1	40	230	38,5	6,6;11	48/55	220	. . .	. . .	11	12,5	9,5	0,5

Вища напруга 220 кВ												
Тип трансформатора	Sн, МВА	напруга обмотки, кВ			Рх, кВт	Рк,кВт			Uк,%			Iх, %
		ВН	СН	НН		ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	
ТДТН-63000/220	63	230	38,5	6,6;11	. . .	. . .	. . .	. . .	11	. . .	. . .	. . .
ТДЦТН-63000/220-74Т1	63	230	36,3	6,6	74	320	. . .	. . .	11	28,8	12,6	0,5
АТДЦТН-63000/220	63	230	121	6,6;11;38,5	37	200	. . .	. . .	11	35	22	0,45
АТДЦТН-125000/220	125	230	121	6,3;6,6;10,5;11;38,5	65	315	235	230	11	45	28	0,4
АТДЦТН-200000/220	200	230	121	6,3;6,6;38,5;10,5;11	105	430	360	320	11	32	20	0,45
АТДЦТН-250000/220	250	230	121	10,5;11;38,5	120	500	. . .	. . .	11	32	20	0,4
АТДЦТН-250000/220/110	250	230	121	11;13,8;15,75;38,5	145	520	. . .	. . .	11	32	20	0,5
Вища напруга 330 кВ												
Тип трансформатора	Sн, МВА	напруга обмотки, кВ			Рх, кВт	Рк,кВт			Uк,%			Iх, %
		ВН	СН	НН		ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	
ТДЦ-125000/330	125	347		10,5;13,8	125		380			11		0,55
ТДЦ(ТЦ)-200000/330	200	347		13,8;15,75;18	180		520			11		0,5
ТДЦ-250000/330	250	347		13,8;15,75	214		605			11		0,5
ТЦ-250000/330	250	347		13,8	214		605			11		0,5
ТДЦ-400000/330	400	347		20	300		790			11,5		0,45
ТЦ-400000/330	400	347		15,75;20	300		790			11,5		0,45
ТЦ-630000/330-71У1	630	347		15,75;20;24	345		1300			11		0,35
ТНЦ-630000/330	630	347		15,75;20;24	345		1300			11,5		0,35
ТЦ-1000000/330-69У1	1000	347		24	480		2200			11,5		0,4
ТЦН-1000000/330	1000	347		24	480		2200			11,5		0,4
ТНЦ-1250000/330	1250	347		24	715		2200			14,5		0,55
ТРДНС-40000/330	40	330		6,3-6,3;10,5-10,5 10,5-6,3	80		180			11	28	0,8
ТРДЦН-63000/330	63	330		6,3-6,3;10,5-10,5 10,5-6,3	100		230			11	28	0,8
АТДЦТН-125000/330/110	125	330	115	6,3;6,6;10,5;38,5;11	100	345	. . .	. . .	10	35	24	0,45

Тип трансформатора	Sн, МВА	напруга обмотки, кВ			Рх, кВт	Рк,кВт			Uк,%			Iх, %
		ВН	СН	НН		ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	
Вища напруга 330 кВ												
АТДЦТН-200000/330/110	200	330	115	6,3;6,6;10,5;11;38,5	155	560	400	350	10,5	38	25	0,45
АТДЦТН-250000/330/150	250	330	158	10,5;38,5	160	620	. . .	. . .	10,5	54	42	0,45
АТДЦН-400000/330/150	400	330		165	180	720	. . .	. . .		11		0,25
АТДЦТН-240000/330/220	240	330	242	11;38,5	130	430	260	. . .	9,5	74	60	0,5
АОДЦТН-133000/330/220	133	$330/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	10,5;38,5	50	250	. . .	. . .	9	60	48	0,2
Вища напруга 500 кВ												
ТДЦ-250000/500	250	525		13,8;15,75;20	205		590			13		0,45
ТЦ-250000/500	250	525		13,8;15,75	205		590			13		0,45
ТДЦ-400000/500	400	525		13,8;15,75;20	315		790			13		0,45
ТЦ-400000/500	400	525		20;15,75	315		790			13		0,45
ТЦ-630000/500	630	525		15,75;20;24	420		1210			14		0,4
ТНЦ-1000000/500	1000	525		24	570		1800			14,5		0,45
ОРЦ-333000/500	333	$525/\sqrt{3}$		15,75-15,75;20-20	. . .		. . .			. . .		. . .
ОРЦ-417000/500	417	$525/\sqrt{3}$		15,75-15,75	. . .		. . .			. . .		. . .
ОРНЦ-533000/500	533	$525/\sqrt{3}$		15,75-15,75;24-24	230		1260			13,5	41	0,15
ОРНЦ-533000/500	533	$525/\sqrt{3}$		24-24/1,73	230		1260			13,5	41	0,15
АОРЦТ-135000/500/220	135	$525/\sqrt{3}$	$242/\sqrt{3}$	13,8-13,8;18-18	120	320			9,5	31	20	0,5
АОРДЦТ-135000/500/220	135	$525/\sqrt{3}$	$242/\sqrt{3}$	13,8-13,8;18-18	150	360			9,5	31	20	0,5
АТДЦТН-250000/500/110	250	500	121	10,5;38,5	200	690	223	179	13	33	18,5	0,4
АТДЦН-500000/500/220	500	500		230	220	1050				12		0,3
АОДЦТН-167000/500/330	167	$500/\sqrt{3}$	$330/\sqrt{3}$	10,5;38,5	61	300			9,5	67	61	0,2
АОДЦТН-167000/500/220	167	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	10,5;11;38,5;13,75 15,75;20	90	315	100	80	11	35	21,5	0,25
АОДЦТН-267000/500/220	267	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	10,5;13,8;38,5; 15,75	125 125	470 470	115	95	11,5 11,5	37 37	23 23	0,25 0,25