

Лекція 7

(2 години)

ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ВТРАТИ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

7.1 Вплив відхилень напруги на роботу споживачів електричної енергії

Як відмічалось вище, найефективніше споживачі електричної енергії працюють при номінальній напрузі. Проте забезпечити всіх споживачів номінальною напругою практично не можливо. Всякий провідник має певний опір, тому проходження електричного струму по електричній мережі пов'язане із втратами напруги. Ці втрати не залишаються сталими, так як навантаження мережі постійно змінюється на протязі доби, сезону, року і т.д.

Внаслідок зміни навантаження змінюється і втрата напруги в мережі, і, як наслідок, змінюється напруга на затискачах у споживачів. Ці зміни можуть бути швидкими і короткочасними (наприклад під час пуску асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором) або повільними і тривалими (при поступовій зміні навантаження на протязі доби або року і при плавному регулюванні напруги).

Короткочасні і швидкі стрибкоподібні зміни напруги в мережі називають коливанням напруги.

Повільну плавну зміну напруги, що зумовлена зміною навантаження, називають відхиленням напруги. **Відхилення напруги** – це алгебраїчна різниця між напругою в даній точці і номінальною напругою мережі. Відхилення напруги виражають у вольтах або у відсотках від номінальної напруги мережі.

При розподілі навантаження вздовж лінії, що виконана проводом постійного перерізу, відхилення напруги в різних точках мережі буде різними (рисунок 7.1). На початку мережі (точка А) напруга найбільша, а в кінці (точка В) – найменша. Номінальною напруга буде лише в точці С.

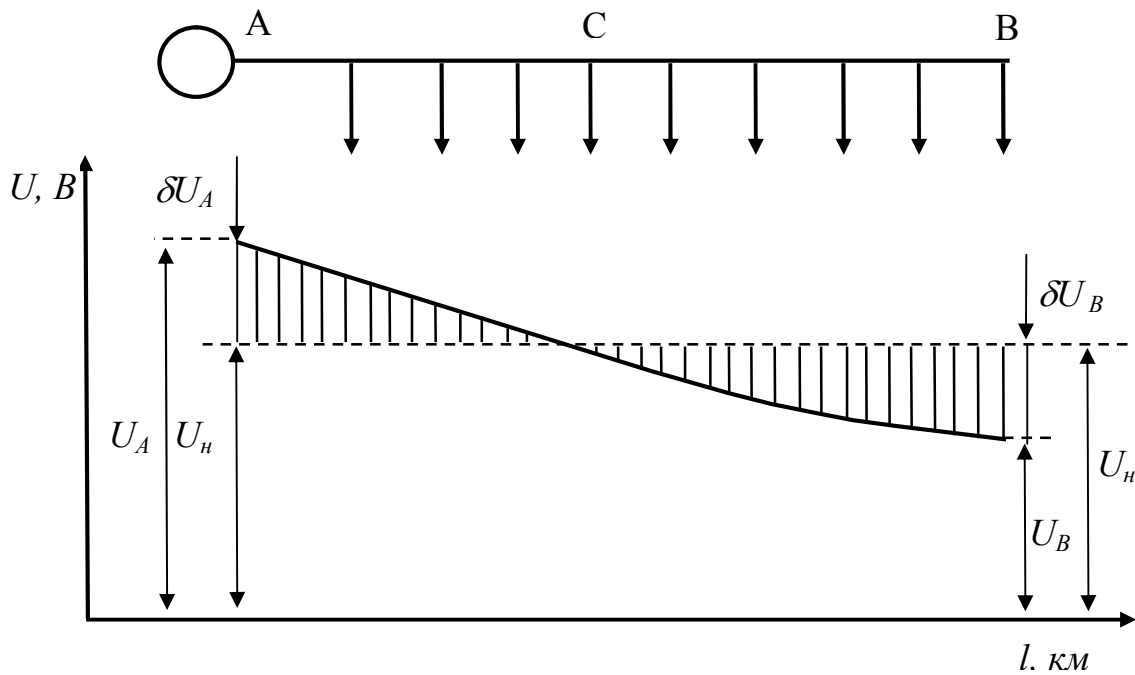


Рисунок 7.1 – Епюра розподілу напруги в лінії із рівномірним навантаженням

Відхилення напруги у вольтах на початку лінії (точка А):

$$\delta U_A = U_A - U_n. \quad (7.1)$$

Відхилення напруги у вольтах в кінці лінії (точка В):

$$\delta U_B = U_B - U_n. \quad (7.2)$$

де U_A , U_B – відповідно напруга на початку та в кінці лінії, В;
 U_n – номінальна напруга мережі, В.

Відхилення напруги від номінальної впливає на роботу споживачів електричної енергії. Найбільш чутливі до зміни напруги лампи розжарювання. При зміні напруги лише на 1% потужність лампи змінюється на 1,5 %, світловий потік на 3,5 %, світлова віддача на 1,8 %, строк служби на 12...13%. Із сказаного слідує, що для ламп розжарювання відхилення напруги від номінальної є дуже не бажаним.

Люмінесцентні лампи менш чутливі до зміни напруги. При зміні напруги на 1% їх світловий потік змінюється на 1 %, а світлова віддача на 0,5 %. Проте при зниженні напруги на 6...7 % вони не загоряються, а при збільшенні напруги на 6...7 % перегріваються дроселі та інша допоміжна апаратура.

Нагрівальні прилади (плити, праски, електропечі, електрокип'ятильники та ін.) відносно мало реагують на зміну напруги. Але потрібно враховувати те, що їх електрична потужність змінюється пропорційно квадрату напруги ($P=U^2/R$). Це означає, наприклад, що при напрузі 90 % від номінальної, електрична праска потужністю 800 Вт розвиває потужність лише 648 Вт (81%).

Зниження напруги веде до зменшення потужності електродвигунів. Важливо відмітити, що момент на валу асинхронного електродвигуна змінюється пропорційно квадрату прикладеної напруги (наприклад, при напрузі 90 % від номінальної момент обертання становитиме 81 % від номінального. Тому при зниженні напруги нормально завантаженого двигуна він може зупинитися (перекинутися), при цьому його ізоляція виходить із ладу.

В діючих нормах встановлено, що в електричних мережах загально користування напруга на затискачах струмоприймачів не повинна перевищувати більше ніж на 5% і знижуватися також більше ніж на 5% від номінальної напруги мережі, тобто знаходитися в межах $\pm 5\%$ від U_n . Допускається максимально допустиме короточасне відхилення напруги до $\pm 10\%$.

Напруга (відхилення напруги) у споживачів в значній мірі залежить від втрати напруги в елементах електричної мережі. Рівень напруги можна підвищити шляхом підвищення напруги на шинах джерела живлення. Зменшити коливання напруги можна шляхом збільшення перерізу проводів, але це веде до збільшення вартості лінії. Доцільно підтримувати рівень напруги в мережі шляхом регулювання.

Електричні мережі необхідно проектувати таким чином, щоб найбільші відхилення напруги не перевищували допустимі значення і були якомога ближчими до них, щоб запобігти зайвих витрат металу проводів.

Втрата напруги в лінії пов'язана безпосередньо із відхиленням напруги. Для лінії (рисунок 7.1) відхилення напруги виражається наступним чином (7.1), (7.2):

$$\delta U_A = U_A - U_n. \quad \delta U_B = U_B - U_n.$$

Віднімемо із першого виразу другий, і отримаємо:

$$\delta U_A - \delta U_B = U_A - U_B = \Delta U_{AB}. \quad (7.3)$$

Із виразу (7.3) видно, що втрата напруги в лінії ΔU_{AB} дорівнює різниці між відхиленням напруги на початку і в кінці даної лінії.

Як відмічалось вище, навантаження в лінії не залишається незмінним, а постійно і плавно змінюється.

Спостереження показали, що мінімальне навантаження в розподільних електричних мережах не знижується менш ніж до 25 % від максимального, тобто $S_{\min} \geq 0,25S_{\max}$.

Відповідно, розрахунок електричних мереж виконують для двох випадків: для навантаження 100 і 25 % максимуму. В першому випадку (100% навантаження) втрата напруги в мережі буде максимальною і напруга у найбільш віддалених споживачів буде найнижчою. Відповідно, лінію розраховують таким чином, щоб відхилення напруги було більше -5% , тобто

$$\delta U^{100} \geq -5\%U_n. \quad (7.4)$$

І навпаки, при навантаженні 25 % від максимуму втрата напруги в мережі приблизно в 4 рази менша, тому напруга в мережі, а особливо у споживачів, що розташовані поблизу підстанції, може значно перевищувати номінальну. В цьому випадку приймають заходи, щоб відхилення напруги на затискачах у споживача при 25% навантаженні не були більшими $+5\%$, тобто

$$\delta U^{25} \leq +5\%U_{ном}. \quad (7.5)$$

7.2 Вплив елементів електричної мережі на відхилення напруги

До складу електричної мережі входять генератори, трансформатори (підвищувальні та знижувальні), проводи ліній

електропередачі та ін., які по різному впливають на відхилення напруги у споживачів. Для визначення відхилення напруги у споживачів необхідно враховувати вплив вказаних елементів.

Генератори електричних станцій можуть підтримувати напругу на затискачах незмінною (сталою) при будь-якому навантаженні або забезпечувати зустрічне регулювання напруги.

Режим сталої напруги, в якому працюють генератори енергетичних систем, полягає в тому, що напруга генератора під час його експлуатації, не залежно від навантаження, підтримується незмінною і на 5% перевищує номінальну напругу мережі. Режим сталої напруги генератора виражають наступним чином:

$$\delta U_2^{100} = \delta U_2^{25} = +5\%. \quad (7.6)$$

Режим зустрічного регулювання, в якому можуть працювати генератори переважно ізольованих електростанцій, полягає в тому, що напруга генератора регулюється пропорційно зміні навантаження. Застосування зустрічного регулювання дозволяє збільшити допустиму втрату напруги в мережі. Можливі наступні граничні відхилення на затискачах генератора при зустрічному регулюванні:

$$\delta U_2^{100} = +10\%; \quad \delta U_2^{25} = 0\%. \quad (7.7)$$

Трансформатори

Наближена схема заміщення фази трансформатора представляє собою послідовно включені активний r_{mp} та реактивний x_{mp} опори. При проходженні струму через ці опори втрату напруги в трансформаторах визначають за відомим виразом:

$$\Delta U_{mp} = \sqrt{3} I_{\max} (r_{mp} \cdot \cos \varphi + x_{mp} \cdot \sin \varphi) .$$

В довідкових таблицях технічних даних трансформаторів значення опорів обмоток не наводяться. В цих таблицях є дані про напругу короткого замикання трансформатора $u_k\%$, струм неробочого ходу $I_x\%$, втрати потужності неробочого ходу $\Delta P_x\%$

та короткого замикання $\Delta P_{м.н}$ %. Використовуючи вказані параметри втрату напруги в трансформаторі можна визначити за виразами:

$$\Delta U_{mp} = U_n \frac{S_{max}}{S_n} \left(\frac{u_a \%}{100} \cdot \cos \varphi + \frac{u_p \%}{100} \cdot \sin \varphi \right), \quad (7.8)$$

$$\Delta U_{mp} \% = \frac{S_{max}}{S_n} (u_a \% \cdot \cos \varphi + u_p \% \cdot \sin \varphi), \quad (7.9)$$

де u_a %, u_p % – відповідно, активна та реактивна складова напруги короткого замикання трансформатора, %.

В свою чергу активна складова напруги короткого замикання визначається за виразом:

$$u_a \% = \frac{\sqrt{3} I_{н.мп}}{U_n} 100, \quad (7.10)$$

або

$$u_a \% = \frac{\Delta P_{м.н.}}{S_n} 100. \quad (7.11)$$

Реактивна складова напруги короткого замикання визначається за виразом:

$$u_p \% = \sqrt{(u_k \%)^2 - (u_a \%)^2}. \quad (7.12)$$

Для трансформаторів споживчих підстанцій, при максимальному завантаженні, втрату напруги приймають наступною:

$$\Delta U_{mp}^{100} = (4...5)\%. \quad (7.13)$$

Відповідно при завантаженні трансформатора близько 25% втрату напруги приймають:

$$\Delta U_{mp}^{25} = 0,25 \cdot \Delta U_{mp}^{100}. \quad (7.14)$$

Вказані величини втрати напруги в трансформаторах приймають для наближених розрахунків.

Для компенсації втрати напруги в обмотках трансформаторів, їх виготовляють таким чином (вибір певної кількості витків обмотки), що в них забезпечується *стала надбавка*, яка дорівнює +5% (+10% – для трансформаторів 35/10 кВ із регулюванням напруги під навантаженням).

Якщо до первинної обмотки знижувального трансформатора підвести номінальну напругу, то на холостому ході напруга на вторинній обмотці становитиме 105% (110%) номінальної напруги мережі (наприклад 35/10,5 кВ, 35/11кВ, 10/0,4 кВ).

Крім того сучасні трансформатори виготовляють з перемикачем відгалужень обмоток без збудження (ПБЗ) (при відключенні трансформатора від мережі) і з регулятором відгалужень обмотки під навантаженням (РПН) (без відключення його від мережі).

Трифазні знижувальні трансформатори із ПБЗ на напругу до 35 кВ включно мають в обмотці вищої напруги п'ять відгалужень (-5; -2,5; 0; +2,5; та + 5%) – це *регульована або змінна надбавка*. Відповідно, загальна надбавка трансформатора (сума постійної та регульованої (змінної) надбавок) в трансформаторах із ПБЗ може змінюватися від 0 до +10 % (**0** (+5, -5); **+2,5** (+5, -2,5); **+5** (+5, 0); **+7,5** (+5, +2,5); **+ 10%** (+5, +5)).

При експлуатації трансформатора можна встановлювати будь-яке відгалуження. В різні сезони року, в залежності від завантаження трансформатора, можна перемикати відгалуження. Основним завданням проектувальника є підбір оптимального відгалуження.

При використанні знижувального трансформатора у якості підвищувального, при підведенні до первинної обмотки напруги 105% – у вторинній обмотці буде напруга 100%. Відповідно, якщо до первинної обмотки підвести напругу 100%, то у вторинній буде 95%.

Таким чином постійна надбавка поміняє знак і становитиме – 5%. Змінні надбавки поміняються місцями, а загальна надбавка прийме значення від 0 до –10% (**0** (-5, +5); **-2,5** (-5, +2,5); **-5** (-5, 0); **-7,5** (-5, -2,5); **- 10%** (-5, -5))

При регулюванні напруги під навантаженням (РПН) перемикання здійснюється автоматично ступенями. Так, наприклад, для трансформаторів 35/10 кВ потужністю 1000...6300 кВА регулювання здійснюється в діапазоні – 9...+ 9 % (кроком 1,5%).

Більш ефективним є регулювання напруги при використанні трансформаторів із РПН. В цьому випадку, частіше за все, здійснюється зустрічне регулювання, тобто із зростанням навантаження напруга підвищується, а із зменшенням – знижується.

Шини живлячих підстанцій

За вимогами Правил улаштування електроустановок на шинах вторинної напруги підстанцій 110/35, 35/10, 110/35/10 та 110/10 кВ необхідно забезпечити зустрічне регулювання напруги в межах від 0 до + 5% номінальної напруги мережі. Тобто відхилення напруги на шинах підстанції повинні бути наступними:

$$\delta U_{ПС}^{100} = +5\%; \quad \delta U_{ПС}^{25} = 0\%. \quad (7.15)$$

На практиці відхилення напруги на шинах підстанцій часто виходять за вказані межі із різних причин. Це необхідно враховувати при проектуванні електричних мереж.

При проектуванні електричних мереж необхідно отримати від енергопостачального підприємства інформацію про відхилення напруги на шинах підстанції, від якої здійснюється живлення району.

При значному відхиленні напруги на шинах підстанції застосовують спеціальні заходи регулювання напруги в мережі.

Проводи повітряних ліній

Втрату напруги в проводах повітряних ліній при максимальному навантаженні $\Delta U_{ПЛ}^{100}$ визначають методом, який було розглянуто вище (лекція 6, вирази (6.38) та (6.39)).

Так як втрата напруги в лінії пропорційна навантаженню, то при мінімальній потужності, що споживається, в проводах повітряної лінії вона становить 25 % від максимального значення:

$$\Delta U_{ПЛ}^{25} = 0,25 \Delta U_{ПЛ}^{100}. \quad (7.16)$$

7.3 Визначення допустимої втрати напруги в мережі за таблицею відхилень

Допустима втрата напруги в мережі визначається допустимим відхиленням напруги у споживачів, яке повинне знаходитися в межах $\pm 5\%$, та рівнем відхилення напруги на шинах джерела живлення (генератора, трансформаторної підстанції).

Відхилення напруги і втрата її в мережі пов'язані між собою рівнянням (7.3):

$$\delta U_A - \delta U_B = U_A - U_B = \Delta U_{AB},$$

Для визначення допустимої втрати напруги в мережі складають таблицю відхилень напруги.

У таблиці розглядають два режими роботи мережі: режим максимальних навантажень (100%) і режим мінімальних навантажень (25%). У таблицю заносять всі елементи електричної мережі, від точки, для якої відомий режим напруги (генератор, шини трансформаторної підстанції) – до споживачів.

Таблицю відхилень напруги складають для найбільш віддаленої від джерела живлення трансформаторної підстанції і для найбільш наближеної підстанції.

Для обох режимів навантаження (100 і 25 %) записують усі відомі відхилення напруги на елементах мережі. Далі вибирають відгалуження трансформаторів. За режимом максимального навантаження визначають допустиму втрату напруги в лініях.

Загальна допустима втрата напруги в мережі під час 100 % навантаження визначається за виразом:

$$\Delta U_{\text{доп}}^{100} = \delta U_{\text{живл.}}^{100} + \sum (\delta U_{\text{пост.}} + \delta U_{\text{змін.}}) - \sum \Delta U_{\text{втр.}}^{100} - \delta U_{\text{спож.}}^{100}, \quad (7.17)$$

де $\delta U_{\text{живл.}}^{100}$ – відхилення напруги біля джерела живлення при 100% навантаженні (для мережі 10...0,4кВ – на шинах 10 кВ ТП 35/10кВ), %;

$\delta U_{\text{спож.}}^{100}$ – допустиме відхилення напруги у споживача при 100 % навантаженні, %; $\delta U_{\text{спож.}}^{100} = -5\%$;

$\sum (\delta U_{\text{пост.}} + \delta U_{\text{змін.}})$ – сума постійних та змінних надбавок напруги трансформаторів, %;

$\sum \Delta U_{\text{втр.}}^{100}$ – сумарні втрати напруги в лініях та в трансформаторах при 100% навантаженні, %.

Одержану за виразом (7.17) загальну допустиму втрату напруги $\Delta U_{\text{доп}}^{100}$ необхідно розділити між лініями різних класів напруги, що входять до складу мережі.

Доцільність вибраних відгалужень трансформаторів перевіряють за відхиленням напруги у споживачів у режимі мінімального навантаження $\delta U_{\text{спож.}}^{25}$ (порівнюють із допустимим).

Відхилення напруги у найближчого споживача при 25% навантаженні перевіряємо за виразом:

$$\delta U_{\text{спож.}}^{25} = \delta U_{\text{живл.}}^{25} + \sum (\delta U_{\text{пост.}} + \delta U_{\text{перем.}}) - \sum \Delta U_{\text{втр.}}^{25} \leq +5\% \quad , \quad (7.18)$$

де $\delta U_{\text{живл.}}^{25}$ – відхилення напруги біля джерела живлення при 25 % навантаженні (для мережі 35/10/0,4кВ – на шинах 10кВ підстанції 35/10кВ), %;

$\sum (\delta U_{\text{пост.}} + \delta U_{\text{змін.}})$ – сума постійних та змінних надбавок напруги трансформаторів, %;

$\sum \Delta U_{\text{втр.}}^{25}$ – сумарні втрати напруги в лініях та в трансформаторах при 25% навантаженні, %.

Розглянемо варіант живлення споживачів від шин 10 кВ ТП 35/10 кВ. Визначальним тут є відхилення напруги в місці приєднання мережі до підстанції (шини 10 кВ). Перед проектуванням електричної мережі необхідно отримати від енергопостачальної організації про рівень відхилення напруги на шинах 10 кВ підстанції 35/10 кВ.

Визначимо допустиму втрату напруги для мережі, що наведена на рисунку 7.2.

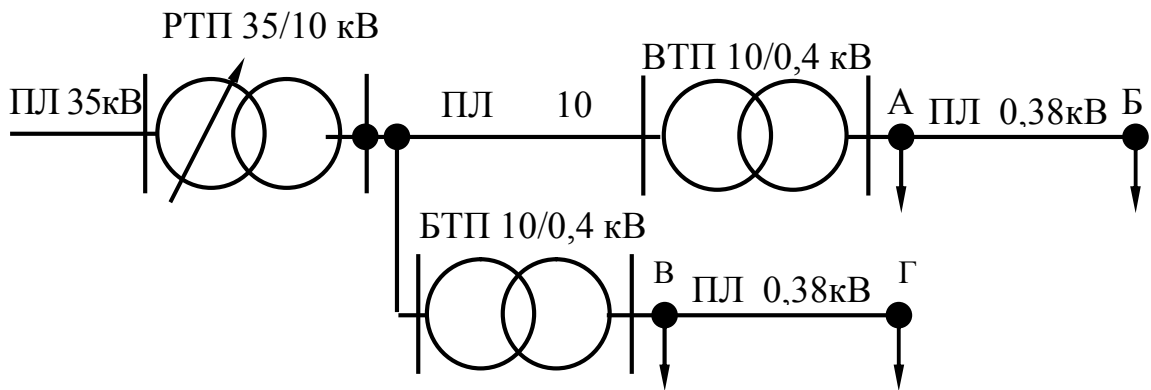


Рисунок 7.2 – Розрахункова схема електричної мережі

Будемо вважати, що РТП 35/10 кВ (джерело живлення) має пристрої автоматичного регулювання напруги під навантаженням (РПН), що дає змогу підтримувати напругу на шинах 10 кВ РТП в межах:

$$\delta U_{\text{спож.}}^{100} = +5\%, \quad \delta U_{\text{живл.}}^{25} = 0\%.$$

Для розрахунку допустимої втрати напруги в мережі 10 та 0,38 кВ складаємо таблицю відхилень напруги (таблиця 7.1).

Для віддаленої ТП 10/0,4 кВ (ВТП) приймаємо надбавку трансформатора + 7,5 % (+5 – постійна; +2,5 – змінна надбавка). Тоді сумарно допустима втрата напруги в мережах 10 і 0,38 кВ до точки Б за виразом (7.17) становить:

$$\Delta U_{\text{дон Б}}^{100} = +5 + (+5 + 2,5) - 4 - (-5) = 13,5\%.$$

Таблиця 7.1 – Таблиця відхилень напруги на елементах мережі

Елемент мережі	Відхилення напруги, %			
	Найбільш віддалена ТП 10/0,4 кВ (ВТП)		Найближча ТП 10/0,4 кВ (БТП)	
	100%	25%	100%	25%
Відхилення напруги на шинах 10 кВ	+5	0	+5	0
Лінія 10 кВ	- 6.0	-1,5	0	0
Трансформатор 10/0,4 кВ:				
– постійна надбавка	+5	+5	+5	+5
– перемінна надбавка	+2,5	+2,5	-2,5	-2,5
– втрати	- 4	-1	- 4	-1
Лінія 0,38 кВ	- 7,5	0	- 7,5	0
Відхилення напруги у споживача	- 5	5 < +5	- 5	4 < +5

Загальна втрата напруги $\Delta U_{\text{дон} B}^{100}$, %, ділиться приблизно порівну між мережами (лініями) напругою 10 та 0,38 кВ:

$$\Delta U_{\text{дон} 10}^{100} = -6\%, \quad \Delta U_{\text{дон} 0,38}^{100} = -7,5\%.$$

За виразом (7.18) перевіримо відхилення напруги у найближчого споживача при 25% навантаженні віддаленої ТП (ВТП) (точка А). Будемо вважати, що втрата напруги в мережі 0,38 кВ до точки А дорівнює нулю – $\Delta U_{0,38}^{25} = 0\%$ (споживач розташований безпосередньо біля шин 0,4 кВ ТП – лінія має малу довжину), тоді:

$$\delta U_{\text{спож. А}}^{25} = 0 + (+5 + 2,5) - (1,5 + 1 + 0) = 5\% = +5\%.$$

Умова виконується.

За допустимою втратою напруги в лінії 10кВ, яка дорівнює – 6 % (таблиця 7.1), перевіряються вибрані перерізи проводів лінії 10 кВ.

Фактична втрата напруги в мережі визначається шляхом розрахунків. Вона не повинна перевищувати допустиму:

$$\Delta U_{\text{факт. 10}}^{100} \leq \Delta U_{\text{дон} 10}^{100}.$$

Для найближчої ТП 10/0,4 кВ (БТП) приймаємо надбавку трансформатора +2,5 % (+5 – постійна; –2,5 – змінна надбавка). Так як до БТП лінія 10 кВ має дуже незначну довжину, то втрата напруги в ній дорівнює 0 ($\Delta U_{10}^{100} = \Delta U_{10}^{25} = 0$). Тоді допустима втрата напруги в мережі 0,38 кВ до точки Г складе:

$$\Delta U_{\text{дон} 0,38}^{100} = +5 + (+5 - 2,5) - (0 + 4) - (-5) = 7,5\%.$$

Відхилення напруги в режимі мінімальних навантажень до точки В:

$$\delta U_{\text{спож. В}}^{25} = 0 + (+5 + 0) - (0 + 1 + 0) = 4\% < +5\%.$$

Умова виконується.

За допустимою втратою напруги в лінії 0,38 кВ (для ВТП та БТП, таблиця 7.1), яка дорівнює –7,5% перевіряються вибрані перерізи

проводів ПЛ-0,38 кВ. Фактична втрата напруги в лінії 0,38 кВ, визначена шляхом розрахунків, не повинна перевищувати допустиму:

$$\Delta U_{\text{факт. } 0,38}^{100} \leq \Delta U_{\text{дон } 0,38}^{100}.$$

При проектуванні мережі лише однієї підстанції ТП 10/0,4 кВ (ПТП), яка може бути розташована в будь-якому місці мережі 10 кВ (рисунок 7.3) постає питання визначення втрати напруги в мережі 0,38 кВ цієї підстанції.

Аналогічно, як і в попередньому випадку, для визначення допустимої втрати напруги в мережі 10 та 0,38 кВ складається таблиця відхилень (таблиця 7.2).

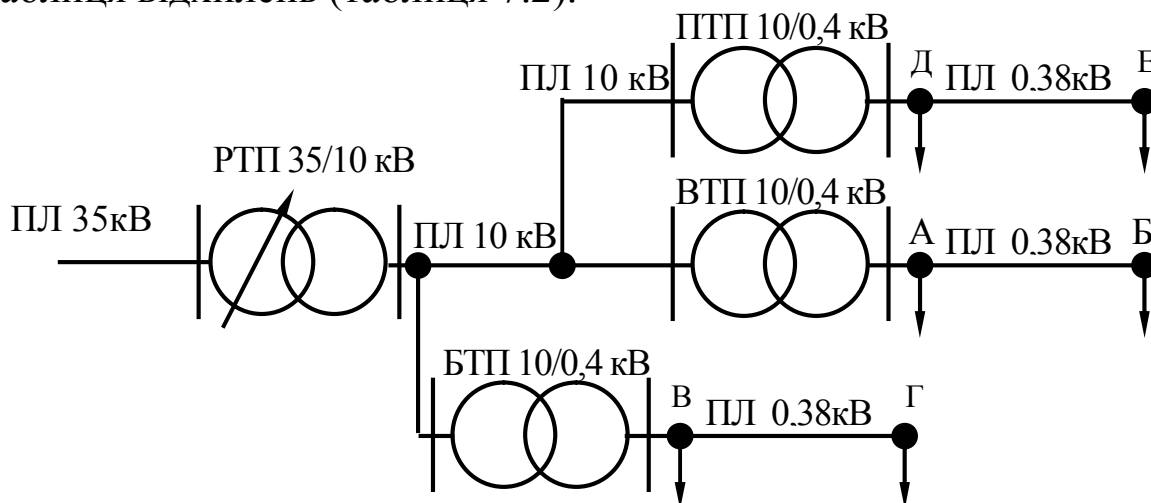


Рисунок 7.3 – Розрахункова схема електричної мережі

Таблиця 7.2 – Таблиця відхилень напруги на елементах мережі

Елемент мережі	Відхилення напруги, %			
	Найбільш віддалена ТП 10/0,4 кВ (ВТП)		Проектована ТП 10/0,4 кВ (ПТП)	
	100%	25%	100%	25%
Відхилення напруги на шинах 10 кВ	+5	0	+5	0
Лінія 10 кВ	-6,0	-1,5	-3,0	0,75
Трансформатор 10/0,4 кВ:				
– постійна надбавка	+5	+5	+5	+5
– перемінна надбавка	+2,5	+2,5	-2,5	-2,5
– втрати	-4	-1	-4	-1
Лінія 0,38 кВ	-7,5	0	-8,0	0
Відхилення напруги у споживача	-5	5 = +5	-5	3,25 < +5

Для віддаленої підстанції (ВТП) розрахунки виконуються аналогічно як і в попередньому прикладі (таблиця 7.2).

За допустимою втратою напруги в лінії 10 кВ, яка дорівнює -6% (таблиця 7.2), перевіряються вибрані перерізи проводів лінії 10 кВ.

Фактична втрата напруги в мережі визначається шляхом розрахунків. Вона не повинна перевищувати допустиму:

$$\Delta U_{\text{факт. } 10}^{100} \leq \Delta U_{\text{дон } 10}^{100}.$$

Після вибору перерізу проводів ПЛ 10 кВ визначається фактична втрата напруги в лінії 10 кВ до шин 10 кВ проектованої ТП 10/0,4кВ (ПТП).

Припустимо, що фактична втрата напруги в лінії 10 кВ до шин 10 кВ ПТП (рисунок 7.3) складає $\Delta U_{\text{факт } 10}^{100} = -3\%$. Значення фактичної втрати напруги до ПТП підставляємо в таблицю 7.2 і визначаємо допустиму втрату напруги в лініях 0,38 кВ, що відходять від ПТП.

Для проектованої ТП 10/0,4 кВ (ПТП) приймаємо надбавку трансформатора $+5\%$ ($+5$ – постійна; 0 – перемінна надбавка). Тоді допустима втрата напруги в мережі 0,38 кВ до точки Е складе:

$$\Delta U_{\text{дон } 0,38}^{100} = +5 + (+5 + 0) - (3 + 4) - (-5) = 8\%.$$

Відхилення напруги в режимі мінімальних навантажень до точки Д:

$$\delta U_{\text{спож. В}}^{25} = 0 + (+5 + 0) - (0,75 + 1 + 0) = 3,25\% < +5\%.$$

Умова виконується.

За допустимою втратою напруги в лінії 0,38 кВ (для ПТП, таблиця 7.2), яка дорівнює -8% перевіряються вибрані перерізи проводів ПЛ 0,38 кВ. Фактична втрата напруги в лінії 0,38 кВ, визначена шляхом розрахунків, не повинна перевищувати допустиму:

$$\Delta U_{\text{факт. } 0,38}^{100} \leq \Delta U_{\text{дон } 0,38}^{100}.$$

7.4 Перевірка електричної мережі на коливання напруги під час пуску електричних двигунів

Пусковий струм короткозамкнених електродвигунів у 4...7,5 разів більший від їх номінального струму. Тому втрата напруги в мережі при пуску електродвигуна в кілька разів більша від втрати напруги при його нормальній роботі, що приводить до різкого зниження напруги на клеммах електродвигунів.

Пуски електродвигунів здійснюються не часто, а тривалість пуску здебільшого не перевищує 10 с. Тому відхилення напруги при пуску електродвигунів допускають значно більші, ніж при нормальній роботі. Проте пусковий момент повинен бути достатнім для розгону електродвигуна до номінальних обертів.

Для електродвигунів з легкими умовами пуску (початковий момент приводного механізму менший за $1/3 M_{\text{дв}}$, або дорівнює йому) допускається зменшення напруги на затискачах, у момент пуску, не нижче як на 30 % від номінальної. На затискачах інших електродвигунів напруга не повинна знижуватись більш як на 20 % .

Колівання напруги в мережі перевіряють здебільшого при пуску короткозамкнених електродвигунів, приєднаних до джерела електроенергії (трансформатора) через повітряну лінію.

Для того, щоб коливання напруги в мережі 0,38 кВ під час пуску асинхронного електродвигуна знаходилося у заданих межах, необхідно щоб виконувалася умова:

$$\Delta U_{\text{факт}} \% \leq \Delta U_{\text{дон}} \%, \quad (7.19)$$

де $\Delta U_{\text{дон}} \%$ – допустиме коливання (втрата) напруги в мережі, %;
 $\Delta U_{\text{факт}} \%$ – фактичне коливання (втрата) напруги в мережі, %.

Наближене значення фактичного коливання напруги у процентах, при пуску двигуна, визначають за формулою:

$$\Delta U_{\text{факт}} \% = \frac{z_{\text{м}}}{z_{\text{м}} + z_{\text{дв}}} \cdot 100 \% , \quad (7.20)$$

де Z_M – повний опір електричної мережі, Ом;
 $Z_{\text{дв}}$ – повний опір короткого замикання двигуна, Ом.

Причому:

$$z_{\text{дв.}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \kappa_i \cdot I_{n.\text{дв.}}}, \quad (7.21)$$

де U_n – номінальна напруга мережі, В;
 κ_i – кратність пускового струму електродвигуна;
 $I_{n.\text{дв}}$ – номінальний струм електродвигуна (каталожні дані), А.
При живленні від трансформатора повний опір мережі визначається за виразом:

$$z_M = z_L + z_{mp}, \quad (7.22)$$

де Z_L – повний опір лінії від трансформатора до двигуна, Ом;
 Z_{mp} – повний опір короткого замикання трансформатора, Ом.

Повний опір лінії від трансформатора до двигуна:

$$z_L = \sum l_i \sqrt{r_{0i}^2 + x_{0i}^2}, \quad (7.23)$$

де r_{0i}, x_{0i} – питомі опори проводів i -тої ділянки лінії, Ом/км;
 l_i – довжина i -ї ділянки лінії, км.

Повний опір короткого замикання трансформатора:

$$z_{mp} = \frac{u_k \% \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{n.mp}}, \quad (7.24)$$

де $u_k \%$ – напруга короткого замикання трансформатора, %;
 U_n – номінальна напруга трансформатора з низької сторони, кВ;
 $S_{n.mp}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА.

Перевіряємо умову (7.19):

$$\Delta U_{\text{факт}} \% \leq \Delta U_{\text{дон}} \%.$$

7.5 Регулювання напруги в електричних мережах

Регулювання напруги в електричних мережах покращує режим напруги у споживачів, підвищуючи при цьому якість електричної енергії, що поставляється споживачам.

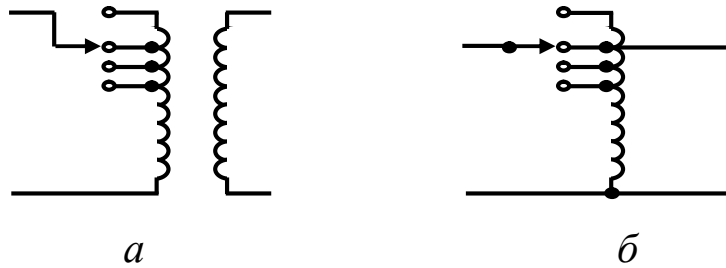
Регулювання напруги також підвищує допустиму втрату напруги в мережі до межі, яка визначається економічною доцільністю, що веде до зниження витрат металу на проводи.

Напругу в електричних мережах, на сьогодні, можна підтримувати за допомогою мережевих регуляторів напруги різних типів, перемиканням відгалужень трансформаторів, включенням в мережу конденсаторів (паралельно або послідовно).

Мережеві регулятори напруги призначені для регулювання напруги в будь-яких точках мережі. Чим ближче регулятор до споживача тим ефективніше регулювання напруги. В якості регуляторів застосовують трансформатори або автотрансформатори із зміною коефіцієнту трансформації під навантаженням (рисунок 7.4).

Відгалуження обмотки виконують із високої сторони (менші струми). Перемикач відгалужень виконують таким чином, щоб забезпечити перемикання без розриву кола. Керування регуляторами здійснюється автоматично. В якості первинного перетворювача (датчика) напруги застосовується реле напруги. Для відстроювання від короткочасних змін напруги в мережі і для зменшення кількості перемикачів протягом доби передбачається витримка часу яку забезпечує реле часу. Перемикання відгалужень здійснюється електродвигуном постійного струму.

Промисловість випускає трансформатори із РПН типу ТМН. Для потужностей 1000...6300 кВА, частіше за все, застосовують межі регулювання $\pm 9\%$ ($\pm 6 \times 1,5 \%$). В перемикачі є шість ступенів тонкого регулювання і один ступінь грубого регулювання (рівний половині діапазону регулювання).



a – трансформатора із регулюванням напруги під навантаженням;
б – автотрансформатора із регулюванням напруги під навантаженням

Рисунок 7.4 – Схема однієї фази

Вказані регулятори дозволяють підтримувати напругу на виводах трансформатора на рівні 105 % U_n . Таким шляхом здійснюється компенсація втрати напруги в лінії і в трансформаторі.

На рисунку 7.5 представлена функційна схема простого пристрою автоматично регулювання напруги під навантаженням.

Регулятор приєднують до вимірювального трансформатора напруги TV і трансформатора струму ТА через трансформатори TVL та TAL.

Зміна коефіцієнта трансформації здійснюється за законом зустрічного регулювання. У разі відхилення напруги від заданого рівня вихідні реле регулятора (KL1, KL2) посиляють у привід перемикача відгалужень сигнали «Вище» (KL1) або «Нижче» (KL2) з витримкою часу, що створюється органом витримки часу ОВЧ.

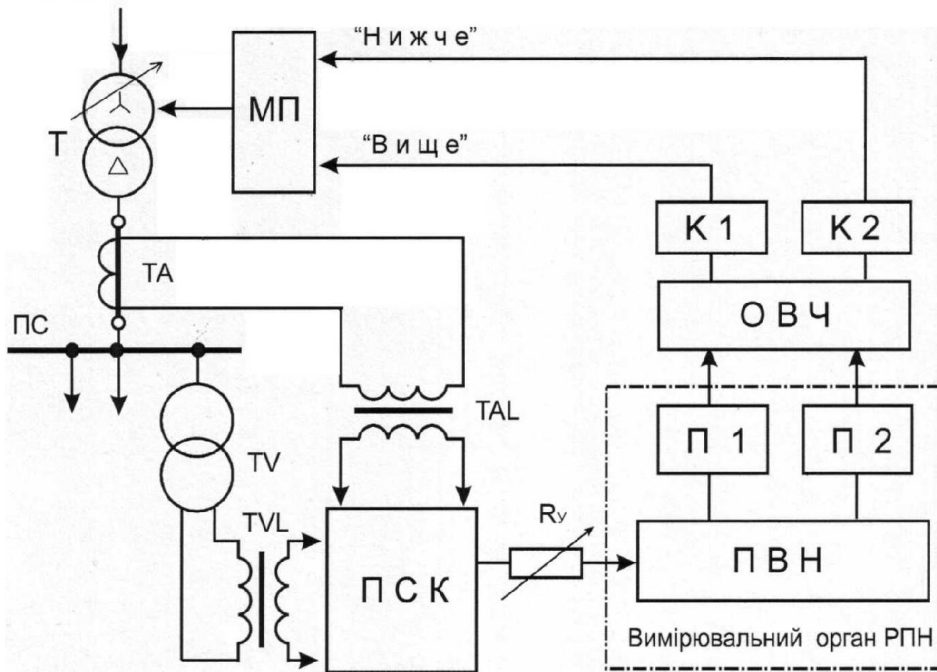


Рисунок 7.5 – Функційна схема регулятора напруги під навантаженням

Вимірювальний орган регулятора (перетворювач відхилення напруги – ПВН) може реагувати на зміну:

– значення напруги у місці встановлення регулятора (за вимкненого пристрою струмової компенсації (ПСК));

– значення геометричної суми напруги у місці встановлення регулятора і падіння напруги від струму лінії в еквівалентному опорі ПСК (струмова компенсація падіння напруги в лінії);

– значення напруги у місці встановлення регулятора з корекцією від струму в живильній лінії.

Вимірювальний орган має два виходи за кількістю каналів регулятора.

Підсилювач з релейною характеристикою П1 реагує на зниження напруги в мережі, а П2 — на зростання напруги.

Пристрій струмової компенсації ПСК здійснює імітацію падіння напруги в розподільній мережі. Активний та реактивний опори мережі можуть імітуватися різними за характером опорами, наприклад тільки активними, а потрібні фази складових падіння напруги отримують добором відповідних фаз струму. За допомогою R_y вибирається уставка спрацювання регулятора.

Послідовне (поздовжнє) підключення конденсаторів.

Як відомо, втрати напруги в лінії залежать від номінальної напруги, навантаження та електричного опору:

$$\Delta U = \sqrt{3} (I \cdot r \cdot \cos \varphi + I \cdot x \cdot \sin \varphi) ,$$

або

$$\Delta U = \frac{\sum P \cdot r + \sum Q \cdot x}{U_n} .$$

Таким чином, змінювати значення втрат напруги в мережі на практиці можна шляхом зміни опору мережі (лінії) та її навантаження.

Для компенсації втрати напруги в повітряних лініях (зниження опору лінії) використовують послідовне підключення конденсаторів.

У повітряних лініях електропередачі з великим перерізом проводів реактивний опір x є значно більшим в порівнянні із активним r . Відповідно, втрата напруги в лінії значною мірою залежить від величини її реактивного опору.

При послідовному підключенні конденсаторів втрата напруги в лінії:

$$\Delta U = \sqrt{3} I (r \cos \varphi + (x_L - x_C) \sin \varphi), \quad (7.25)$$

або

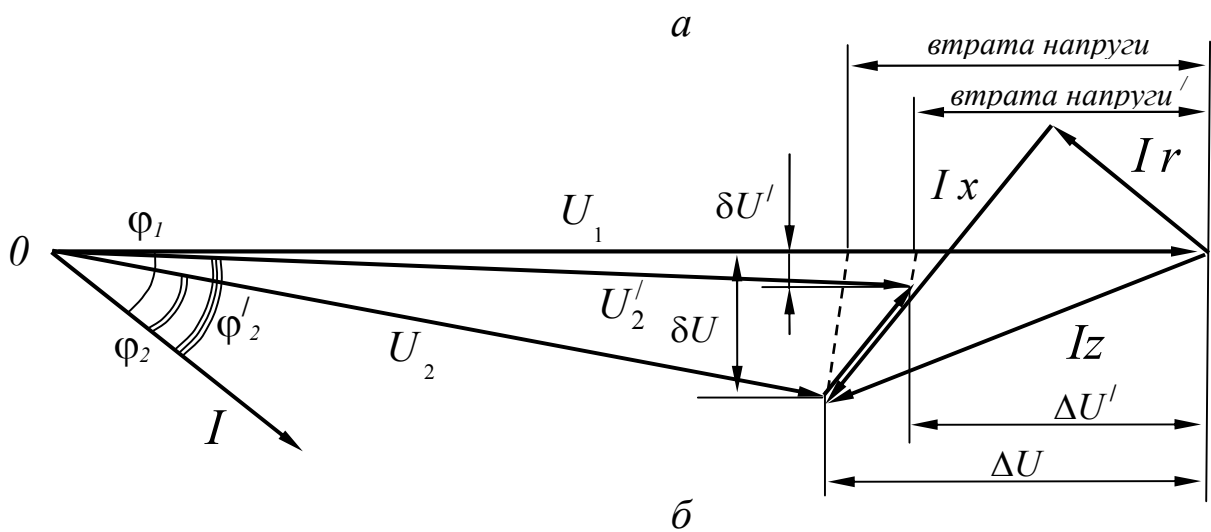
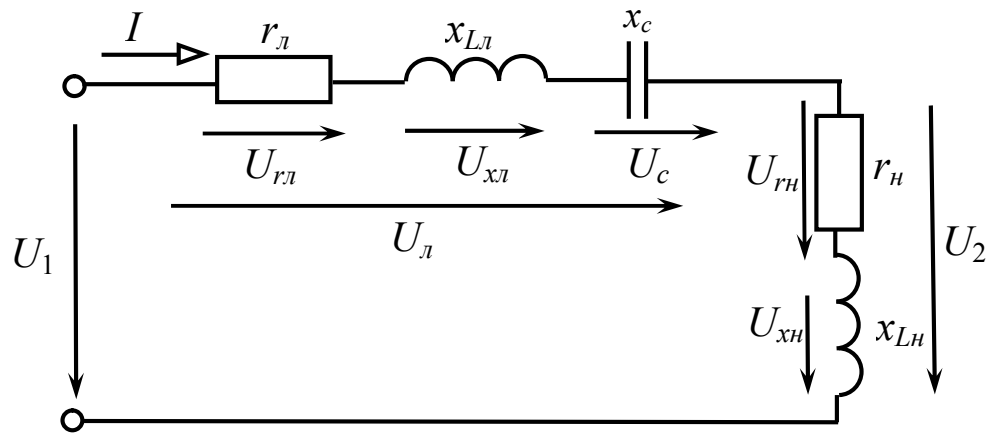
$$\Delta U = \frac{\sum P \cdot r + \sum Q \cdot (x_L - x_C)}{U_n}. \quad (7.26)$$

Зменшення втрати напруги в мережі, перш за все, залежить від коефіцієнта потужності навантаження. Коефіцієнт потужності розподільних мереж в період максимального навантаження становить 0,7...0,9. Застосування поздовжньої компенсації втрати напруги в таких мережах є доцільним.

При послідовному підключенні конденсаторів в лінію (рисунк 7.6, а) ступінь компенсації залежить від струму, тобто із зростанням навантаження зростає і компенсація втрати напруги. Особливо ефективно компенсуються втрати напруги від пуску потужних електродвигунів, коли при значному пусковому струмі спостерігається низький коефіцієнт потужності.

Так як конденсатори в нормальному режимі знаходяться під напругою, що становить 5...20% від напруги мережі, то їх вибирають на найближче стандартне значення напруги, яке значно менше напруги мережі. При короткому замиканні майже вся напруга мережі буде прикладена до конденсаторів, тому їх необхідно захищати від перенапруги. Послідовно підключені конденсатори захищати від перенапруги можна за допомогою іскрових проміжків або розрядників.

Векторна діаграма напруги без поздовжньої ємнісної компенсації та із нею представлена на рисунку 7.6, б.



a – схема заміщення мережі; *б* – векторна діаграма

Рисунок 7.6 – Послідовне підключення конденсаторів в лінію
Необхідна потужність конденсаторів Q_C , ВАр:

$$Q_C = \left(\sin \varphi - \sqrt{\frac{1}{(1 + \delta U_{C_*})^2} - \cos^2 \varphi} \right) \cdot S_{\max} \quad (7.27)$$

де S_{\max} – максимальна потужність мережі в місці встановлення конденсаторів, ВА;

φ – кут зсуву фаз навантаження при максимальному режимі;

δU_{C_*} – надбавка напруги, яку необхідно отримати, виражена у відносних одиницях до напруги мережі.

Із наведених вище виразів маємо, що при поздовжній компенсації необхідна надбавка напруги визначається за формулою:

$$\delta U_C = \sqrt{3} I \cdot x_{c}, \quad (7.28)$$

де I – струм навантаження мережі, А;
 x_c – ємнісний опір конденсатора, Ом.

Для вибору конденсаторів визначають їх реактивний опір:

$$x_c = \frac{Q_c}{3I^2}, \quad (7.29)$$

$$I = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3}U_n}, \quad (7.30)$$

Конденсатори підбирають таким чином, щоб їх опір був якомога ближчим до розрахункового, але не менше його.

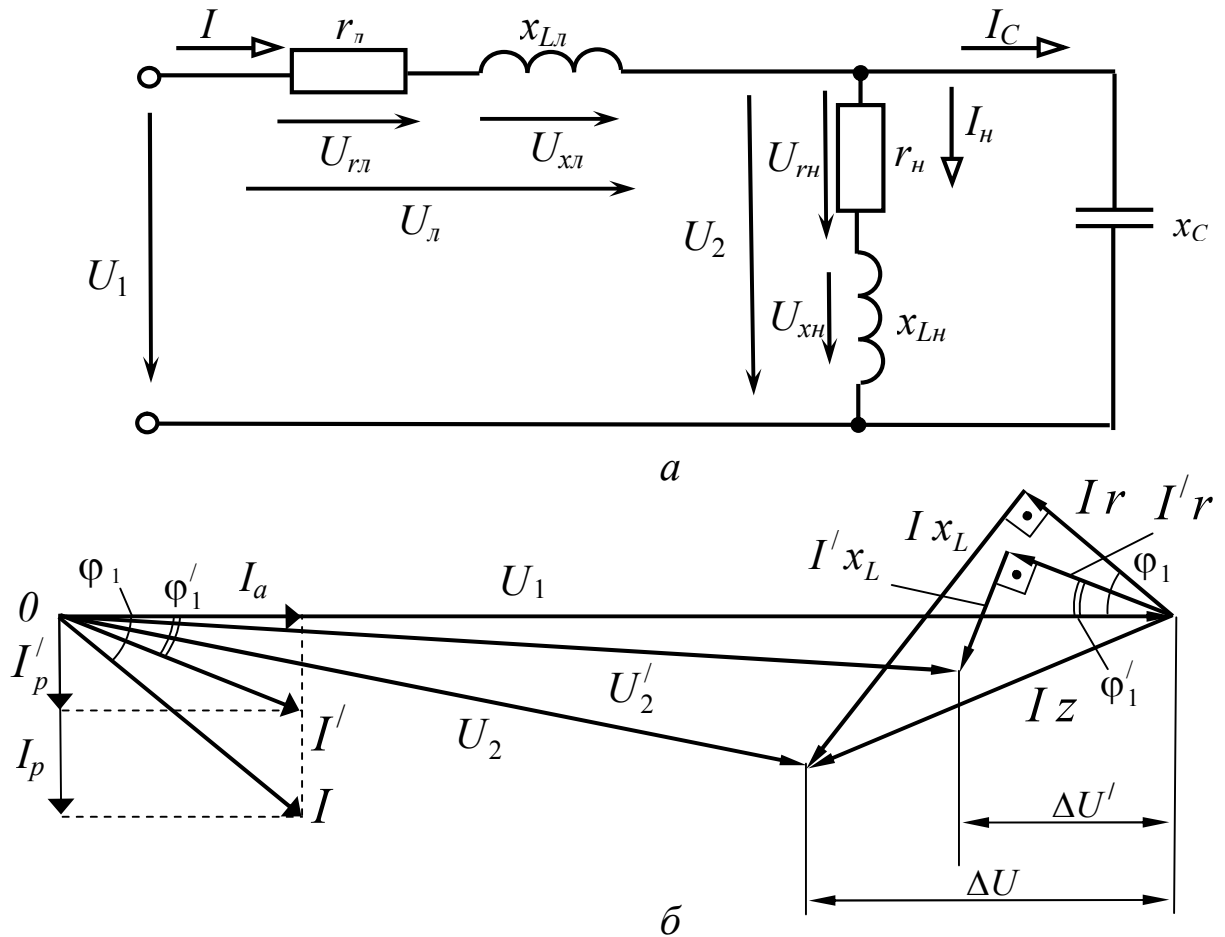
Для радіальної лінії із навантаженням в кінці, з точки зору регулювання напруги, розміщувати конденсатори можна в будь-якій точці мережі. Проте, доцільно розміщувати конденсатори в кінці лінії, біля споживача. При такому розміщенні конденсатори менше піддаються перенапругам, так як більшість коротких замикань буде виникати до них.

Паралельне підключення конденсаторів.

Іншим способом зменшення втрат напруги в мережі є компенсація реактивної потужності споживачів (зменшення навантаження споживачів) або так звана поперечна ємнісна компенсація, при якій статичні конденсатори включаються паралельно навантаженню (рисунк 7.7, а).

Як відомо, значна частина електроприймачів, що приєднані до електричної мережі, окрім активної потужності споживають також і реактивну. Основними споживачами реактивної потужності є асинхронні двигуни.

Частина реактивної потужності втрачається в обмотках трансформаторів і в проводах ліній електропередачі. Передача реактивної потужності по мережі для цих споживачів спричиняє додаткові втрати напруги та енергії.



a – схема заміщення мережі; *б* – векторна діаграма

Рисунок 7.7 – Паралельне підключення конденсаторів

Для розвантаження мережі від реактивної потужності доцільно цю потужність або її частину генерувати на місці споживання (біля споживача). Джерелом реактивної потужності є, наприклад, статичні конденсатори, що встановлюються на місці споживання і підключаються паралельно навантаженню. Конденсатор в цьому випадку є джерелом потужності, що випереджає (ємнісної) або, що те ж саме – джерелом реактивної потужності.

Втрата напруги при поперечній компенсації визначається:

$$\Delta U = \sqrt{3} (I_a \cdot r + (I_p - I_c) \cdot x), \quad (7.31)$$

або

$$\Delta U = \frac{\sum P \cdot r + \sum (Q_L - Q_C) \cdot x}{U_n}. \quad (7.32)$$

Значить при паралельному включенні конденсаторів:

$$\Delta U_{\text{рег}} = \sqrt{3} I_c \cdot x, \quad (7.33)$$

де I_c – ємнісний струм лінії, А;

x – індуктивний опір лінії, Ом.

Потужність пристрою компенсації при паралельному підключенні конденсаторів визначається за виразом:

$$Q_c = P \cdot (tg\varphi - tg\varphi'), \quad (7.34)$$

де P – активна потужність споживачів, кВт;

$P \cdot tg\varphi$ – реактивна потужність споживачів без компенсації, кВАр;

$P \cdot tg\varphi'$ – реактивна потужність, що передається по лінії при компенсації, кВАр.

Ємність конденсаторів визначається за виразом:

$$C_{комп} = \frac{Q_{комп}}{2\pi f U^2}, \quad (7.35)$$

де f – частота струму, Гц.

Векторна діаграма напруги з врахуванням поперечної компенсації представлена на рисунку 7.7 б.

Запитання для самоконтролю

1. Як впливає відхилення напруги на роботу споживачів?
2. Як пов'язані втрата та відхилення напруги в мережі?
3. Які прийнятні допустимі відхилення напруги в мережі?
4. В чому полягає принцип сталого регулювання напруги?
5. В чому полягає принцип зустрічного регулювання напруги?
6. Що таке постійна та перемінна надбавка трансформатора?
7. Яке призначення перемикача відгалужень обмоток без збудження (ПБЗ) ?
8. Скільки положень має перемикач відгалужень без збудження?
9. Що таке регулятор напруги під навантаженням (РПН)?
10. З якої сторони і чому у знижувального трансформатора встановлюється пристрій РПН?

11. Як впливають на відхилення напруги в мережі генератори електростанцій?
12. Як впливають на відхилення напруги в мережі силові трансформатори?
13. Як впливають на відхилення напруги в мережі повітряні та кабельні лінії електропередачі?
14. Які режими навантаження мережі розглядають при визначенні допустимої втрати напруги в мережі?
15. З якою метою виконують перевірку електричної мережі на коливання напруги під час пуску потужного електродвигуна?
16. Як визначається фактичне коливання напруги в мережі під час пуску електродвигуна?
17. Які технічні засоби застосовують для регулювання напруги в електричних мережах?
18. Переваги та недоліки регулювання напруги в мережі за допомогою статичних конденсаторів?