

## Тема 2.1. Визначення допустимої втрати напруги в електричній мережі

1. Вплив відхилень напруги на роботу споживачів електроенергії. Допустимі відхилення напруги.
2. Вплив окремих елементів електричної мережі на відхилення напруги.
3. Визначення допустимої втрати напруги за таблицею відхилень напруги.

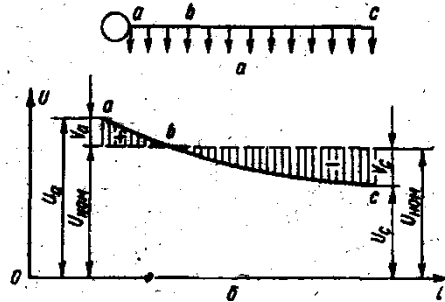
1. Найефективніше споживачі електричної енергії працюють при номінальній напрузі. Проте забезпечити подавання номінальної напруги до всіх споживачів практично неможливо. Всякий провідник має певний опір, тому проходження струму по електричній мережі пов'язане з втратами напруги. Ці втрати напруги не залишаються сталими. Зміна як активного, так і реактивного навантаження, вимикання окремих споживачів та деякі інші фактори спричиняють зміну втрат напруги в мережі, а тим самим — і зміну напруги на затискачах електроспоживачів. Ці зміни можуть бути швидкими і короткочасними (наприклад, при пуску короткозамкнених електродвигунів) або повільними і тривалими (при поступовій зміні навантаження і при плавному регулюванні напруги).

Різниця між дійсною напругою, що подається до споживача чи певної точки електромережі (при сталій напрузі або плавній і повільній її зміні), і номінальною напругою називається *відхиленням напруги*. При розподілі навантаження вздовж магістралі відхилення напруги в різних точках магістралі буде різним (мал.5.1.). На початку магістралі (точка *a*) напруга найбільша, а в кінці (точка *c*) — найменша. Відхилення напруги для точки *a*:

$$V_a = U_a - U_{\text{ном}} \quad (5.1)$$

для точки с:

$$V_c = U_c - U_{\text{ном}} \quad (5.2)$$



Мал. 5. 1. Графік розподілу напруги вздовж ліній рівномірним навантаженням:

а — схема електромережі; б — розподіл напруги

Номінальна напруга буде лише в точці b; у всіх точках : ліворуч від точки b відхилення напруги додатне, в точках, розміщених праворуч від точки b - від'ємне.

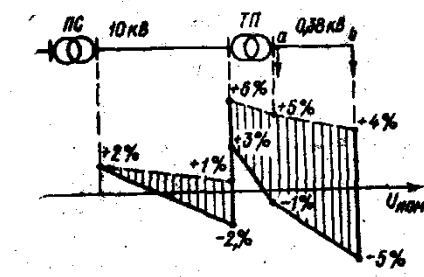
Найчутливіші до зміни напруги лампи розжарювання. При зміні напруги лише на 1 % потужність цих ламп змінюється на 1,5 %, світловий потік - на 3,5 %, світлова віддача – на 1,8%, строк служби—на 13%. Якщо напруга на лампі розжарювання більша від номінальної на 10 %, то строк служби її зменшиться в 4 рази, а при зменшенні напруги на 10 % світловий потік зменшиться до 67 % номінального.

Люмінесцентні лампи менш чутливі до зміни напруги. На кожний 1 % зміни напруги їх світловий потік також змінюється на 1 %, а світлова віддача - на 0,5 %. Проте при напрузі, меншій від номінальної на 6...7 %, ці лампи не загоряються, а при напрузі, більшій на 6—7 % номінальної, перегріваються дроселі та інша допоміжна апаратура.

Нагрівальні прилади при зміні напруги змінюють свою потужність пропорційно квадрату напруги.

Значне відхилення напруги в силових електромережах може призвести до браку у виробництві і прискореного спрацювання двигунів. Крім цього, зниження напруги веде до зменшення потужності електродвигунів. Момент обертання електродвигунів пропорційний квадрату напруги. При нарузі, наприклад, що дорівнює 90 % номінальної, момент обертання становитиме 81 % номінального.

Напруга (відхилення напруги) у споживачів в значній мірі залежить від втрати напруги в елементах електричних мереж. Рівень напруги можна дещо збільшити, підвищивши напругу джерела живлення, але при зміні навантажень коливання напруги джерела буде досить великим, а отже, будуть значними і відхилення напруги в споживачів. Крім цього, умови роботи електроізоляції допускають відхилення напруги в установках напругою до 220 кВ не більше 15 %, напругою 330 кВ - не більше 10%, з вищими напругами - не більше 5 %.



Мал.5. 2. Відхилення напруги в електромережі при максимальному (суцільна лінія) і мінімальному (пунктирна лінія) навантаженнях

Зменшити коливання напруги можна також, збільшивши переріз проводів, але це веде до значного збільшення витрати металу. Техніко-економічні розрахунки показують, що підтримувати рівень напруги в заданих межах доцільніше регулюванням напруги. Регулювання напруги поліпшує режим напруги у споживачів, підвищує якість електроенергії, що поставляється споживачам, збільшує допустиму втрату напруги в мережі, дає

змогу зменшувати переріз проводів.

При проектуванні електричних мереж вибирають засоби регулювання, межі і ступені регулювання, місця встановлення регуляторів, а також систему автоматизації регулювання напруги.

Напругу електричної мережі можна регулювати: а) зміною напруги на затискачах генератора; б) зміною коефіцієнта трансформації трансформаторів і автотрансформаторів; в) застосуванням статичних конденсаторів і синхронних компенсаторів.

Найбільш поширеним є централізоване регулювання напруги на шинах підстанцій, до яких приєднано декілька ліній. Якщо таке регулювання не забезпечує належного рівня напруги у деяких груп споживачів (при різних графіках навантаження, великій довжині лінії або підвищених вимогах до якості напруги), то його доповнюють місцевим регулюванням напруги.

У відповідності до ГОСТу нормальне відхилення напруги у споживачів електроенергії допускається в межах  $\pm 5\%$ . Максимальне відхилення допускається  $\pm 10\%$ .

Оскільки втрата напруги в електричних мережах значною мірою впливає на відхилення напруги у споживачів, проектувати і споруджувати електричні мережі треба так, щоб відхилення напруги у споживачів не виходило за допустимі значення.

Відніmemo від рівняння (5.1) рівняння (5.2):

$$V_a - V_c = U_a - U_c = \Delta U_{ac} \quad (5.3)$$

Отже, втрата напруги дорівнює різниці між відхиленнями напруги на початку і в кінці ділянки. Максимальна втрата напруги в лінії буде при максимальному навантаженні.

На мал.5.2. показано зміну відхилення напруги при максимальному і мінімальному навантаженнях. На шинах 10 кВ живильної ПС підтримується стала напруга з відхиленням  $+2\%$  номінальної. При втраті в лінії напругою

10 кВ у режимі максимального навантаження 4 % напруги відхилення її на вводі споживчої підстанції ТП становитиме - 2 %. Трансформатори для компенсації втрати напруги в обмотках при навантаженні мають сталу нерегульовану надбавку +5 %. Крім цього, силові трансформатори мають і регульовану надбавку (в звичайних трансформаторів  $\pm 2 \times 2,5$  %). Отже, беручи регульовану надбавку +0 % (разом із сталою +5 %), матимемо відхилення напруги на трансформаторі ТП +3 %, При втраті напруги в обмотках трансформаторів 4 % на виході споживчої підстанції ТП матимемо відхилення напруги - 1 %. Якщо втрата напруги в лінії 0,38 кВ становить 4 %, то відхилення напруги у найвіддаленішого споживача буде - 5 %.

Статистика показує, що мінімальне навантаження в електричних мережах, які живлять багатьох споживачів, становить не менш як 25 % максимального, тобто:

$$S_{\min} \geq 0,25 S_{\max} \quad (5.4)$$

Якщо мінімальне навантаження взяти в 4 рази меншим за максимальне, то втрата напруги в лініях і трансформаторах буде у 4 рази меншою від втрати напруги при максимальному навантаженні. На мал.5.2. пунктирною лінією показано зміну відхилень напруги в режимі мінімального навантаження. Найбільше зниження напруги буде в режимі максимального навантаження у найвіддаленішого споживача b, а максимальне підвищення напруги - в режимі мінімального навантаження у найближчого споживача а. Тому межу відхилення напруги - 5 % відносять до найвіддаленішого споживача b в режимі максимального навантаження, а +5% - для найближчого споживача а в режимі мінімального навантаження.

**2. Генератори.** На сучасних електростанціях усі генератори працюють з регуляторами напруги. Вони можуть підтримувати її на затискачах генераторів незмінною (сталою) при будь - якому навантаженні або забезпечувати зустрічне регулювання напруги.

Переважна більшість генераторів на електростанціях нашої країни працює в *режимі сталої напруги*. Незалежно від навантаження напруга на їх затискачах підтримується на 5 % вищою від номінальної напруги електромережі:

$$V_{г}^{100} = V_{г}^{25} = + 5\%.$$

У *режимі зустрічного регулювання напруга* регулюється пропорційно навантаженню. При збільшенні навантаження зростає й напруга і, навпаки, при зменшенні навантаження напруга на затискачах генератора зменшується. Найпоширенішими відхиленнями напруги генераторів при зустрічному регулюванні є  $V_{г}^{100} = +10\%$  (на 5% більше номінальної напруги генератора, яка в свою чергу більша на 5 % номінальної напруги споживачів) і  $V_{г}^{25} = 0$ .

При зустрічному регулюванні напруги генераторів збільшується допустима втрата напруги в лініях. При паралельній роботі кількох електростанцій зустрічне регулювання напруги утруднюється, оскільки в цьому випадку відбуваються значні перетікання активних і реактивних потужностей у мережі, пов'язані з неточністю в регулюванні напруги різних генераторів і різнотипними графіками навантаження. Тому зустрічне регулювання використовують лише для електростанцій, що працюють ізольовано.

Генератори електростанцій енергетичних систем працюють у режимі сталої напруги.

**Трансформатори.** Як було вже зазначено, для компенсації втрати напруги на обмотках трансформатора вибором певної кількості витків обмотки забезпечується стала надбавка, яка здебільшого дорівнює +5 %. Якщо при цьому до первинної обмотки підвести номінальну напругу, то при холостому ході напруга на вторинній обмотці становитиме 105 % номінальної напруги мережі.

Крім цього, сучасні трансформатори виготовляють з перемикачем відгалужень обмоток без збудження (ПБЗ) (при вимкненні всіх обмоток від

мережі) і з регулятором відгалужень обмотки під навантаженням (РПН).

Трифазні знижувальні трансформатори з ПБЗ на напругу до 35 кВ включно мають чотири відгалуження  $\pm 2 \times 2,5 \%$  (у трансформаторах старих випусків - три відгалуження  $\pm 5\%$ ).

Отже, загальна надбавка (сума постійної і регульованої надбавок) у трансформаторах з ПБЗ може змінюватись від 0 до 10 %.

При регулюванні напруги під навантаженням (РПН) перемикання здійснюється ступенями: у трансформаторах потужністю 25...630 кВ·А - через 1,67 % у діапазоні +10 ... - 10% (+10; +8,34; +6,67; +5; +3,34; +1,67; 0; - 1,67 і т.д.); у трансформаторах потужністю 1000...6300 кВ·А при напрузі 20 і 35 кВ - через 1,5 % у діапазоні - 9 ... +9%; при напрузі 10(6) кВ - через 1,25% у діапазоні - 10 ... +10 %; у трансформаторах потужністю 10000 ... 63 000 кВ·А - через 1,5% у діапазоні - 12...+12 %.

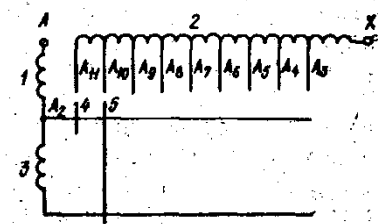
Вибір відповідного коефіцієнта трансформації трансформатора з ПБЗ дещо поліпшує режим напруги в мережі, але істотно не змінює діапазону коливання напруги, оскільки відгалуження часто міняти не можна.

Більш ефективне регулювання напруги забезпечується при використанні силових трансформаторів з РПН. Його можна здійснювати як у режимі сталої напруги, коли на вторинній обмотці незалежно від навантаження підтримується постійний рівень напруги, так і в режимі зустрічного регулювання, при якому з ростом навантаження напруга підвищується, а при зменшенні його до мінімального — зменшується до номінальної.

Якщо графіки навантаження різних споживачів не збігаються, зустрічне регулювання здійснюють в межах 5%.

Якщо не дотримуватися цієї умови, то режим напруги споживачів при регулюванні може бути навіть гіршим, ніж без регулювання. Для режиму максимального навантаження беруть відхилення напруги +5 %, а для режиму мінімального навантаження - 0 %.

Схему перемикування виводів однієї фази 1 трансформатора з РПН зображено на мал.5. 3. Всередині бакелітового циліндра перемикача по колу розміщено нерухомі контакти  $A_3 \dots A_{11}$  регулювальної обмотки 2. Рухомі контакти (основний 4 і допоміжний 5) закріплено на вертикальному валу. Рухомі контакти, переміщуючись по колу, з'єднуються з нерухомими і забезпечують приєднання певного відгалуження трансформатора. При перемикуванні на сусідній нерухомий контакт спочатку переміщується основний рухомий контакт, а потім додатковий. Таким чином, коло попереднього відгалуження вимикається лише після вмикання кола наступного ступеня регулювання, тобто перемикування відбувається без розриву кола струму навантаження. Деякий час відгалуження, що перемикаються, замкнуті рухомими контактами перемикача. Щоб не пошкодилась короткозамкнена секція, в коло вводять струмообмежуючий опір (або реактор) 3. Весь перемикач розміщують в окремому баці, наповненому маслом. Над баком закріплюють приводний механізм, за допомогою якого електродвигун прокручує вертикальний вал з рухомими контактами. Тут же розміщують допоміжну апаратуру керування.



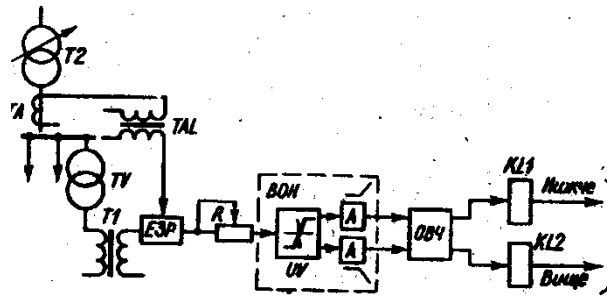
Мал.5. 3.Схема регулювання напруги під навантаженням у трансформаторах з РПН:

1 - трансформатор; 2 — регулювальна обмотка; 3 — струмообмежуючий опір; 4 — основний рухомий контакт; 5 — допоміжний рухомий контакт.

Схема автоматичного регулювання із стабілізацією напруг простіша, ніж схема зустрічного регулювання. Керування здійснюється від реле напруги, точність, його роботи становить  $\pm 1,25 \%$ . Щоб уникнути

перемикання відгалужень при короткочасному коливанні напруги, у коло керування вмикають моторне реле часу.

При зустрічному регулюванні у схему автоматичного керування перемикачем, вводять додатково елемент контролю навантаження.



Мал.5. 4. Структурна схема автоматичного регулювання коефіцієнта трансформації трансформатора.

На мал.5.4. подано структурну схему простішого пристрою автоматичного регулювання коефіцієнта трансформації трансформатора (АРКТ). Зміна коефіцієнта трансформації здійснюється за законом зустрічного регулювання. Через трансформатор напруги TV, який приєднується до шин вторинної напруги трансформатора T2, і вхідний трансформатор T1 та трансформатор струму ТА і проміжний трансформатор струму ТАЛ вмикається елемент зустрічного регулювання ЕЗР. При цьому здійснюється компаундування вимірювального органа напруги ВОН. Регулювання вхідного сигналу забезпечується резистором R. Вимірювальний орган напруги ВОН складається з вимірювального перетворювача напруги НУ і підсилювачів у релейному режимі А. Для відстроювання від короткочасних змін регульовальної напруги і зменшення кількості перемикань протягом доби (для зменшення зносу АРКТ) передбачається витримка часу органом

ОВЧ протягом десятків і сотень секунд. У цих умовах регулятор протягом

добу кілька разів запускається і повертається у вихідне положення. Команда на перемикання виводів обмотки силового трансформатора подається через проміжні реле *KL1* і *KL2*.

Для підвищення надійності роботи розроблені й використовуються безконтактні регулятори. Усунення помилкової дії роботи регулятора досягається рівним одиниці коефіцієнтом повернення пристрою.

Для перемикання виводів обмоток трансформаторів можна використовувати як однофазні перемикаючі пристрої типу РНОА на напругу 35, 110, 220 і 330 кВ, так і трифазні - РНТА на 10 і 35 кВ.

Багатоступінчасте перемикання відгалужень під навантаженням (РПН) силових трансформаторів застосовується на районних підстанціях і є основним засобом централізованого автоматичного регулювання напруги в сільськогосподарських електромережах. Місце регулювання напруги використовують лише при відповідному техніко - економічному обґрунтуванні. При цьому споживчі трансформатори з РПН застосовують тоді, коли інші засоби регулювання (вольтододаткові автотрансформатори або батареї конденсаторів) недостатні або економічно недоцільні.

Вмикають трансформатори до мережі через відгалуження, що відповідає нормальному режиму роботи мережі. Втрати напруги в трансформаторах можна вибрати в межах  $\Delta U_T^{100}=4 \dots 5\%$  і  $\Delta U_T^{25}=1 \dots 1,25\%$ .

Більшість електроспоживачів у сільській місцевості живиться від потужних державних енергосистем через підстанції 110/35, 35/10, 110/10 кВ. На живильних підстанціях з вторинною напругою понад 35 кВ забезпечується зустрічне регулювання напруги від +5 % при максимальному навантаженні до 0 % в режимі мінімального навантаження:  $\Delta U_{\text{пс}}^{100}=5\%$ ;  $\Delta U_{\text{пс}}^{25}=0\%$ .

На знижувальних підстанціях з напругою вторинної обмотки 10/6 кВ у трансформаторах з РПН можуть бути використані регулювання із стабілізацією напруги або зустрічне регулювання напруги.

Відхилення напруги в лініях створюється втратою напруги, приблизно пропорційною навантаженню. Найбільша втрата напруги в проводах буде при максимальному навантаженні, а при мінімальному навантаженні її приймають рівною 25 % максимальної:  $\Delta U_{\text{пр}}^{25} = 0,25 \Delta U_{\text{пр}}^{100}$ .

**3.** Оскільки відхилення напруги і втрата її в мережі пов'язані між собою рівнянням (5.3), для визначення допустимої втрати напруги в мережі складають таблицю відхилень напруги. У цій таблиці розглядають два режими: *режим максимальних навантажень і режим мінімальних навантажень*. У таблицю заносять усі елементи електричної мережі від точки, для якої відомий режим напруги (генератори, шини трансформаторної підстанції), до споживачів. Для обох режимів навантаження (100 і 25 %) спочатку записують усі відомі відхилення напруги, а потім, вибираючи певні відгалуження обмоток трансформаторів, за режимом максимального навантаження визначають допустиму втрату напруги в електричних лініях. Доцільність вибраного відгалуження обмотки трансформатора перевіряють за відхиленням напруги в споживачів у режимі мінімального навантаження (порівнюючи його з допустимим).

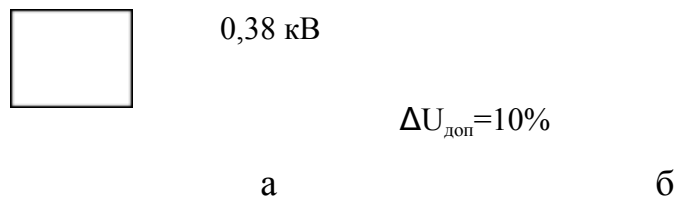
Розглянемо кілька конкретних прикладів.

1. Електрична станція з мережею напругою 0,38 кВ - (мал.5. 5). Розглянемо режим сталої напруги генераторів. Відхилення її на генераторі становить +5 % (його номінальна напруга на 5 % більша від номінальної напруги електромережі), допустиме відхилення напруги у споживачів при максимальному навантаженні дорівнює - 5 % (табл. 5.1).

Користуючись формулою (5.3), визначаємо допустиму втрату напруги в мережі при максимальному навантаженні:

$$\Delta U_{\text{доп}}^{100} = V_{\text{г}}^{100} - V_{\text{б}}^{100} = 5 - (-5) = 10 \ %.$$

Підвищення напруги порівняно з номінальною буде найбільшим у наближеного споживача *a* в режимі мінімального навантаження. Оскільки споживач *a* приєднаний до мережі на початку лінії, втрат напруги в лінії до точки приєднання цього споживача не буде.

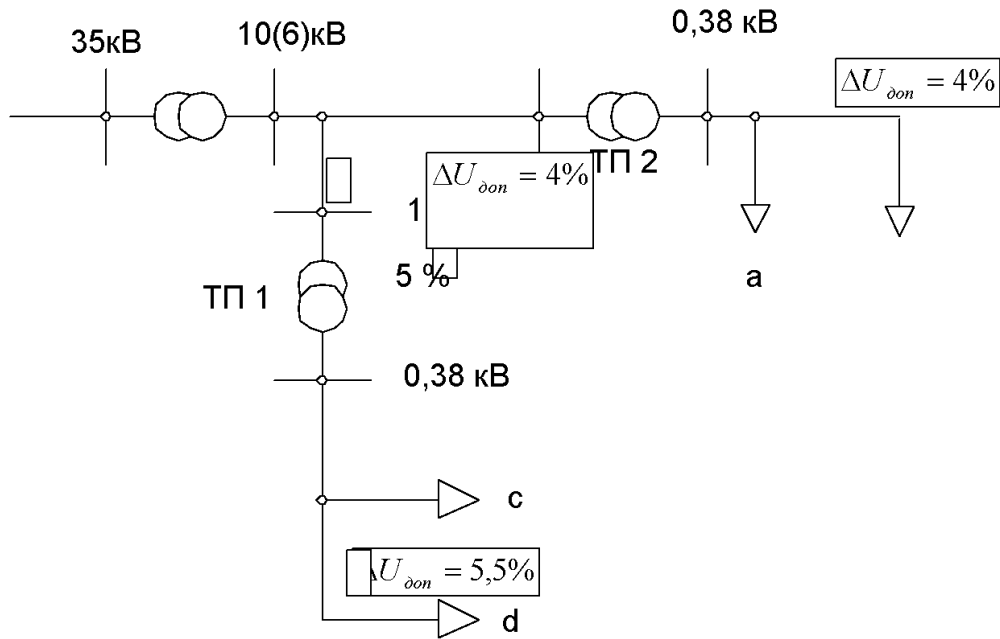


Мал. 5.5. Низьковольтна мережа невеликої електростанції.

Відхилення напруги у найближчого споживача *a* в режимі мінімального навантаження:

$$V_a^{25} = V_r^{25} - \Delta U_{\text{доп}}^{25} = 5 - 0 = 5 \% \leq + 5\%.$$

**2.** Живлення електромережі від підстанції 35/10(6) кВ або відгалуження від лінії напругою 10(6) кВ (мал.5.6.). Допустимо, що на шинах 10(6) кВ підстанції 35/10(6) кВ підтримується стала напруга, на 2 % вища від номінальної напруги мережі. У таблицю відхилень напруги занесемо відомі величини: надбавку на шинах 10(6) кВ + 2 %, сталу надбавку трансформатора 10/0,4 кВ + 5 %, втрату напруги на трансформаторі в режимі максимального навантаження - 4 %, а в режимі мінімального навантаження - 1 % (25% максимальної), допустиме відхилення напруги для найвіддаленішого споживача *b* в режимі максимального навантаження - 5 %. Невідомими залишаються надбавки відгалужень від обмоток трансформаторів і допустимі втрати напруги в електромережі [лінії напругою 10(6) і 0,38 кВ].



Мал.5. 6. Мережа підстанції 35/10(6) кВ

Найефективнішою буде робота трансформатора при основному відгалуженні обмотки. Тому спочатку розглядаємо надбавку відгалуження 0 %.

Для визначення допустимої втрати напруги в мережі треба спочатку розглянути роботу найвіддаленішого споживача  $b$ , що живиться від найвіддаленішої  $ТП2$  в режимі максимального навантаження. Втрата напруги:

$$\Delta U_{\text{доп}} = +2 + 5 - 4 - (-5) = 8\%.$$

Здебільшого допустима втрата напруги розподіляється між мережами напругою 10 і 0,38 кВ порівну.

Таблиця 5.1. Відхилення напруги в електромережі при сталій напрузі генератора, %

| Элементы                | Навантаження, % |    |
|-------------------------|-----------------|----|
|                         | 100             | 25 |
| Генератор               | +5              | +5 |
| Мережа напругою 0,38 кВ | -10             | 0  |

|           |    |    |
|-----------|----|----|
| Споживачі | -5 | +5 |
|-----------|----|----|

Розділимо допустиму втрату напруги по двох ступенях: для лінії напругою 10(6) кВ - 4 %, для лінії напругою 0,38 кВ - 4 %. У режимі мінімального навантаження втрата напруги в лінії 10(6) кВ становить 1 % (25 % максимальної), а в мережі напругою 0,38 кВ — 0 %, оскільки в цьому режимі розглядаємо відхилення напруги у найближчого споживача *a* (лінії напругою 0,38 кВ немає).

Таблиця 5.2. Відхилення напруги в мережі при живленні від шин 10(6) кВ, %

| Елементи                 | Навантаження, %     |     |                |       |
|--------------------------|---------------------|-----|----------------|-------|
|                          | Найвіддаленіша ТП 2 |     | Найближча ТП 1 |       |
|                          | 100                 | 25  | 100            | 25    |
| Шини 10 кВ               | + 2                 | + 2 | + 2            | + 2   |
| Мережа напругою 10 кВ    | - 4                 | - 1 | 0              | 0     |
| Трансформатор 10/0,4 кВ: |                     |     |                |       |
| стала надбавка           | +5                  | +5  | +5             | + 5   |
| відгалуження             | 0                   | 0   | - 2,5          | - 2,5 |
| втрати                   | - 4                 | - 1 | - 4            | - 1   |
| Мережа напругою 0,38 кВ  | - 4                 | 0   | - 5,5          | 0     |
| Споживачі                | - 5                 | + 5 | - 5            | + 3,5 |

Отже, вибрана надбавка основного відгалуження трансформатора ТП2 (0 %) буде оптимальною, відхилення напруги у споживачів при цьому знаходяться в нормативних межах ( $\pm 5$  %).

Для ТП 1 вибираємо відгалуження - 2,5%, при цьому допустима втрата напруги в мережі 0,38 кВ становитиме 5,5 %, а відхилення напруги у найближчого споживача С в режимі мінімального навантаження зменшиться до + 3,5 (табл.5.2.).