

Лекція №6

(частина 3)

ТРАНСФОРМАТОРИ

План лекції:

8. Регулювання напруги трансформаторів.
9. Схеми і групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів.
10. Паралельна робота трансформаторів.
11. Вимірювальні трансформатори.

8 Регулювання напруги трансформаторів

Обмотки ВН знижувальних трансформаторів виконують із регульовальними відгалуженнями, за допомогою яких можна одержати коефіцієнт трансформації, що трохи відрізняється від номінального. Необхідність у цьому пояснюється тим, що напруга в різних точках лінії електропередачі, куди можуть бути включені знижувальні трансформатори, відрізняється від номінального значення. Крім того, напруга в будь-якому місці лінії може змінюватися через коливання навантаження. Але оскільки напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора у всіх випадках повинна дорівнювати номінальній або незначно відрізнятися від неї, то можливість зміни коефіцієнта трансформації стає необхідною.

Регульовальні відгалуження обмоток виконують у кожній фазі або поблизу нульової точки, або посередині обмотки. У першому випадку на кожній фазі виконують по три відгалуження (рисунки 6.25, а), при цьому середнє відгалуження відповідає номінальному коефіцієнту трансформації, а два інших – коефіцієнтам трансформації, що відрізняються від номінального на $\pm 5\%$. У другому випадку обмотку розділяють на дві частини і виконують шість відгалужень (рисунки 6.25, б). Це дає можливість крім номінального коефіцієнта трансформації одержати ще чотири додаткових значення, що відрізняються від номінального на $\pm 2,5$ і $\pm 5\%$.

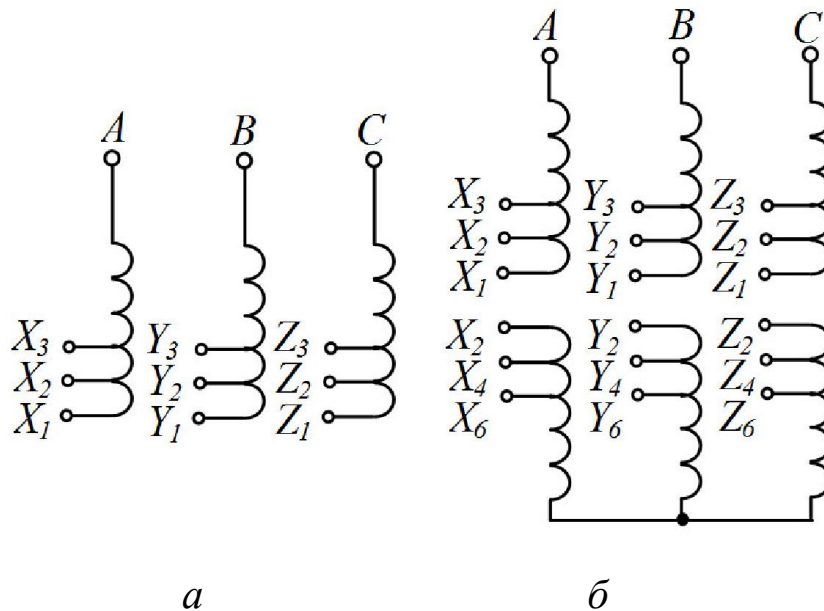


Рисунок 6.25 – Схеми обмоток трифазних трансформаторів з регульовальними відгалуженнями

Перемикачі відгалуження обмоток можна при відключеному від мережі трансформаторі (перемикання без збудження – ПБЗ) або ж без відключення трансформатора (регулювання під навантаженням – РПН). Для ПБЗ застосовують перемикачі відгалужень (рисунок 6.26). На кожену фазу встановлюють по одному перемикачу, при цьому вал, що обертає контактні кільця перемикачів по всіх фазах одночасно, зв'язаний за допомогою штанги з рукояткою на кришці бака трансформатора (рисунок 6.26).

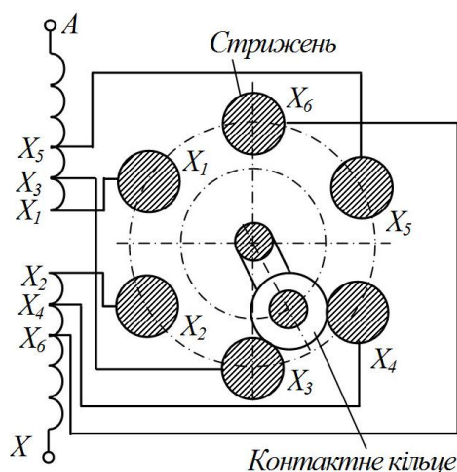


Рисунок 6.26 – Перемикач відгалужень ПБЗ

Принцип РПН також заснований на зміні коефіцієнта трансформації за допомогою регульовальних відгалужень. Однак перемикання з одного відгалуження на інше здійснюють без розриву кола робочого струму. Із цією метою обмотку кожної фази забезпечують спеціаль-

ним перемикаючим пристроєм, що складається з реактора Р двох контакторів з контактами К1 і К2 і перемикача із двома рухливими контактами П1 і П2 (рисунок 6.27, а).

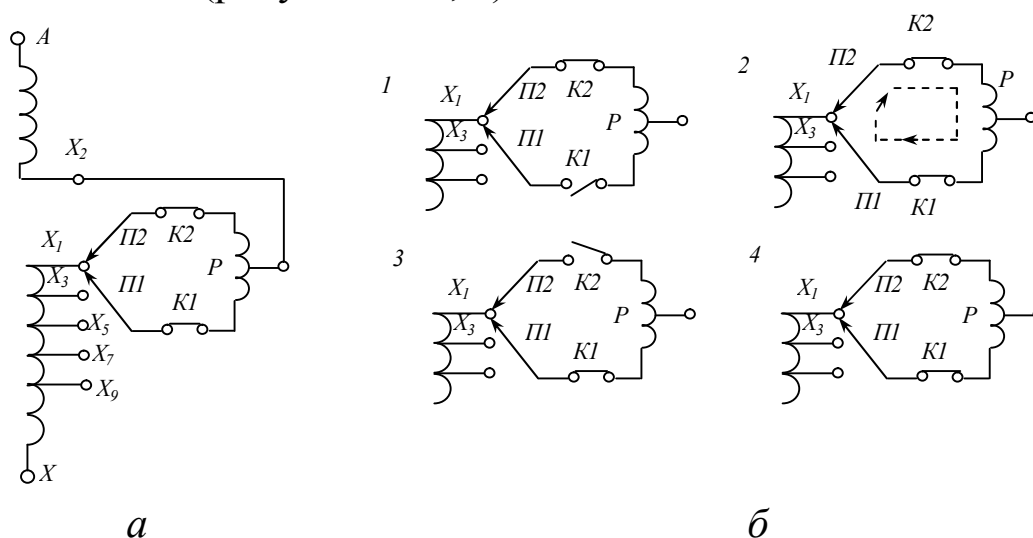


Рисунок 6.27 – Послідовність перемикання контактів під навантаженням

У робочому положенні обидва рухливих контакти перемикача перебувають на одному відгалуженні, контакти К1 і К2 замкнуті і робочий струм спрямований паралельно по двох половинах обмотки реактора. Якщо виникла необхідність перемикання з одного відгалуження на інше, наприклад з Х1 на Х3, то розімкнуться контакти контактора К1 (положення 1 на рисунку 6.27, б), рухомий контакт П1 перемикача знеструмленої вітки переводиться на інше відгалуження і контакти контактора К1 знову замикаються (положення 2). У цьому положенні частина обмотки між відгалуженнями Х1 і Х3 виявляється замкнутою. Однак струм у колі перемикаючого пристрою не досягає великого значення, тому що він обмежується опором реактора Р. У такому ж порядку здійснюється перемикання рухомого контакту К2 з відгалуження Х1 на відгалуження Х3 (положення 3 і 4). після чого процес перемикання закінчується. Апаратура РПН розташовується в одному баку із трансформатором, а її перемикання автоматизовано або здійснюється дистанційно (із щита керування). Трансформатори із РПН звичайно розраховані для регулювання напруги в межах 6-10%.

При досить значних потужностях трансформатора апаратура РПН стає занадто громіздкою. У цьому випадку застосовують регулювання напруги за допомогою вольтододаточного трансформатора, що складається із трансформатора ПТ, включеного послідовно, і регулювального автотрансформатора РА з перемикаючим пристроєм ПП (рисунок 6.28).

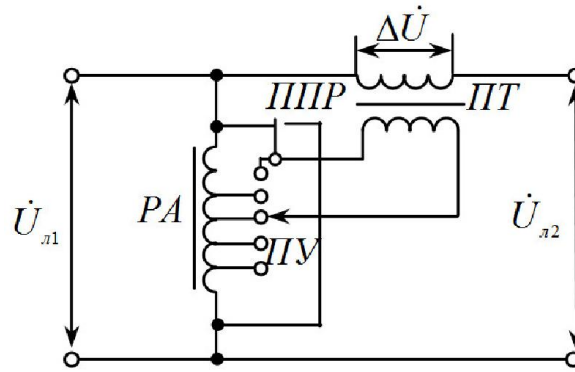


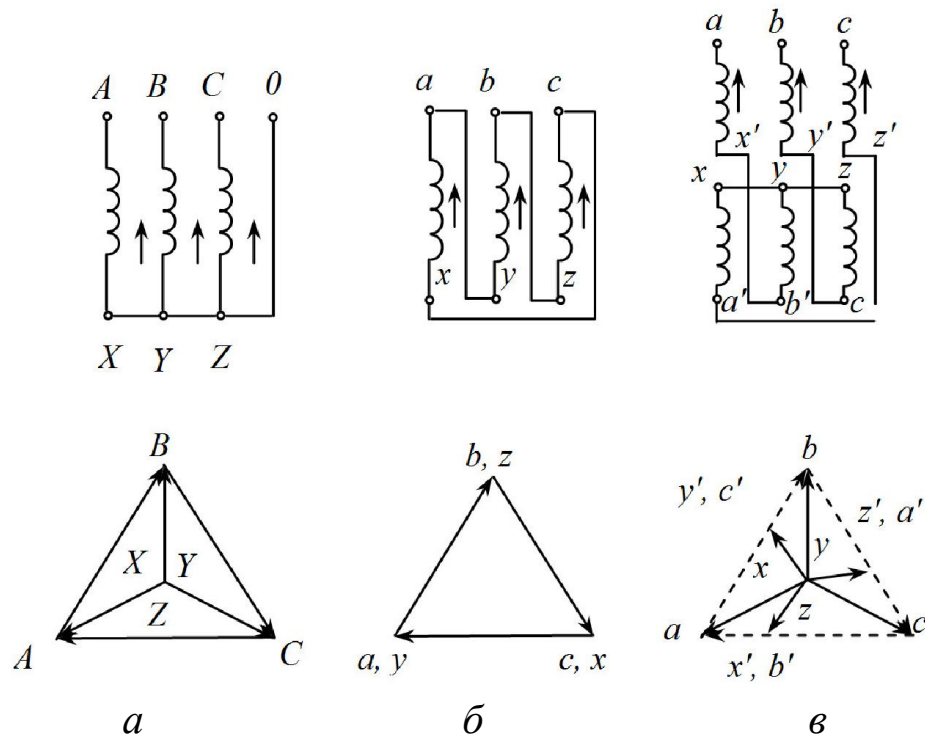
Рисунок 6.28 – Схеми включення вольтододаткового трансформатора

Напруга вторинної обмотки ΔU трансформатора ПТ підсумовується з напругою лінії $U_{л1}$ і змінює її до значення $U_{л2} = U_{л1} + \Delta U$. Величина ΔU може змінюватися за допомогою РА. При цьому перемикачем поздовжнього регулювання (ППР) можна змінювати фазу ΔU на $\pm 180^\circ$, так що одне положення ППР буде відповідати збільшенню напруги $U_{л2} = U_{л1} + \Delta U$, а інше — зменшенню напруги $U_{л2} = U_{л1} - \Delta U$. Крім того, можливі і інші способи фазового впливу на ΔU , наприклад комбінація різних схем з'єднання трифазних обмоток (зірка, трикутник) у вольтододатковому трансформаторі, що створює фазові зсуви ΔU відносно $U_{л1}$ на кути 60 , 120 і 90° (поперечне регулювання). У цих випадках зміна ΔU впливає не тільки на значення, але і на фазу напруги $U_{л2}$.

9 Схеми і групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів

Схеми з'єднання обмоток

Схемою з'єднання обмоток трансформатора називають схему, за якою з'єднують обмотки всіх фаз однієї напруги. Обмотки трифазних трансформаторів прийнято з'єднувати за наступними схемами: зірка; зірка з нульовим виводом; трикутник; зигзаг з нульовим виводом (рисунок 6.29). Схеми з'єднання обмоток трансформатора позначають дробом, у чисельнику якого зазначена схема з'єднання обмоток ВН, а в знаменнику – обмоток НН. Наприклад, Y/Δ означає, що обмотки ВН з'єднані в зірку, а обмотки НН – у трикутник.



a – зірка з нульовим проводом; *б* – трикутник; *в* – зигзаг

Рисунок 6.29 – Схеми і векторні діаграми з'єднання обмоток трифазного трансформатора

В схемах з'єднання за позитивний напрям ЕРС прийнято приймати напрям дії ЕРС від кінця обмотки до початку, що залежить від напрямку намотування обмотувального проводу. Якщо у однієї з обмоток змінити початок і кінець обмотки, то напрям ЕРС зміниться на протилежний і це буде означати, що змінився напрям намотки обмотки. Звісно таке припущення умовне, однак при роботі трифазного трансформатора, коли кожна фазна обмотка зчіпляється з потоками від інших фаз, буде мати істотне значення.

Вибір схеми з'єднання залежить від багатьох причин. Основними при виборі схеми є: вартість активних матеріалів, вартість ізоляційних матеріалів, трудомісткість виготовлення, вид навантаження та режим роботи трансформатора. Наприклад, схему зірка з нулем вибирають при відносно високій напрузі, що призводить до зниження вартості ізоляції, оскільки фазне значення напруги буде менше лінійного; схему трикутник використовують при аналізі роботи трансформатора, спираючись на величину впливу вищих гармонійних складових напруги і струмів, а також на несиметрію навантаження; схему зигзаг, як правило використовують в спеціальних трансформаторах або при нерівномірному та несиметричному навантаженні, хоча витрати обмотувального проводу при виконанні за цією схемою збільшуються на 15%.

Групи з'єднання

Під групою з'єднання розуміють кут зсуву по фазі між лінійними векторами ЕРС або напруги одноіменних фаз обмотки ВН і НН трансформатора. За одиницю кута зсуву приймають кут в 30° .

В однофазному трансформаторі ЕРС первинної та вторинної обмоток можуть збігатися за фазою чи бути зсунуті на 180° . Група з'єднання залежить від напрямку намотування обмоток і позначення виводів (маркування). Якщо обмотки трансформатора намотані в один бік і мають симетричне маркування (рисунок 6.30, а), то індуковані в них ЕРС будуть спрямовані однаково (група 0). У разі зміни маркування виводів чи напрямку намотування однієї з обмоток (рисунок 6.30, б) спостерігається зсув за фазою між векторами первинної та вторинної ЕРС на 180° (група 6). Групи з'єднань позначають цілими числами від 0 до 11.

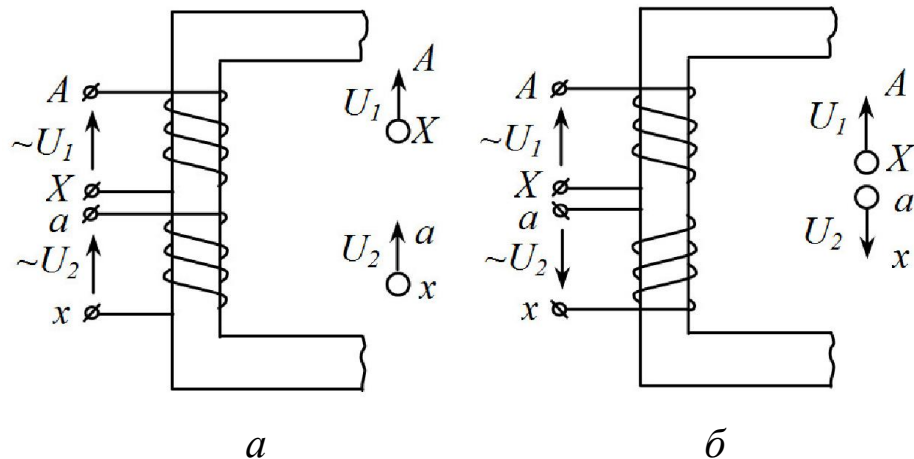
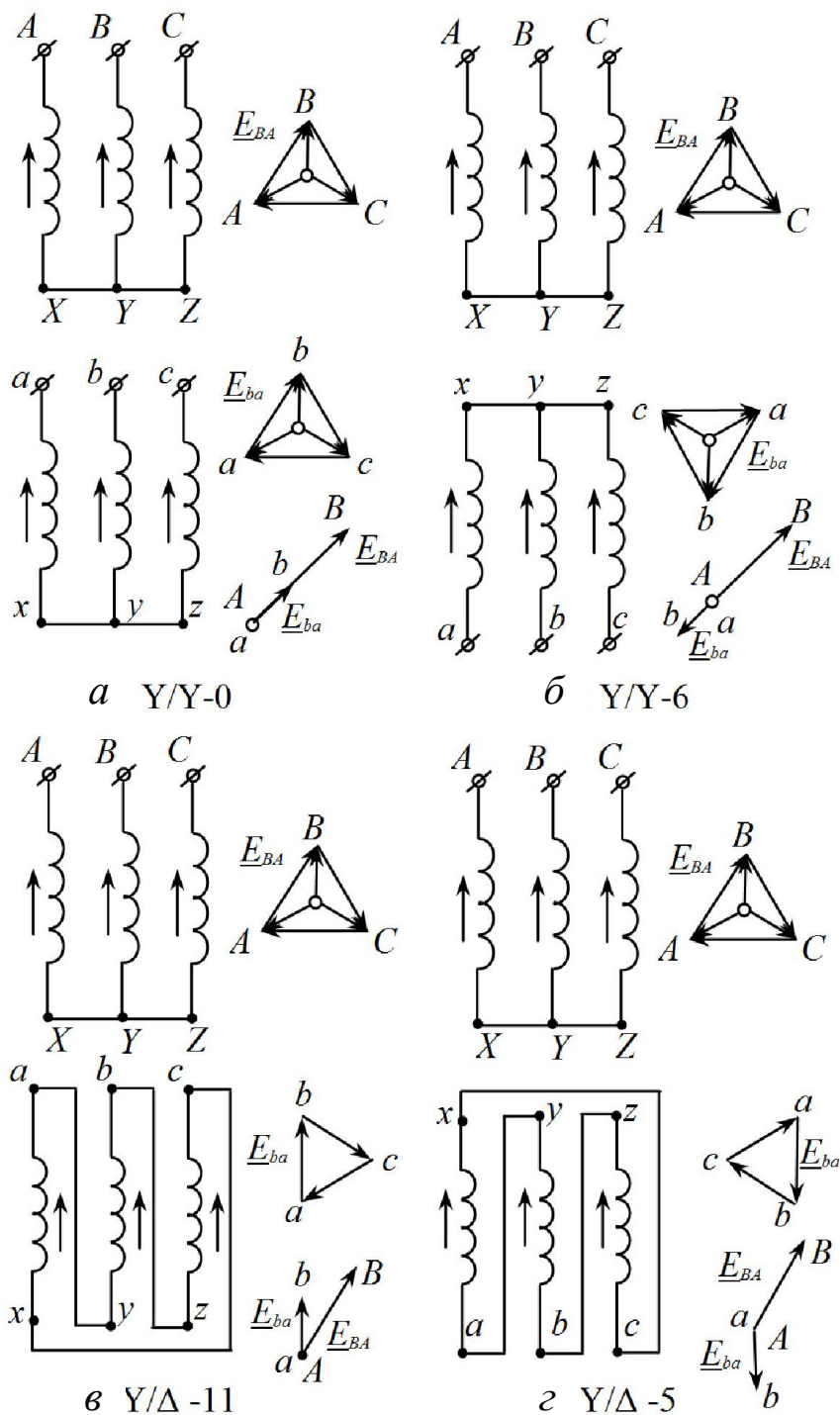


Рисунок 6.30 – Схеми і векторні діаграми з'єднання обмоток трифазного трансформатора

Із двох можливих груп з'єднань однофазних трансформаторів – I/I-0 і I/I-6 – промисловість випускає тільки I/I-0, в яких ЕРС первинної та вторинної обмоток збігаються за фазою.

У трифазних трансформаторах фазові ЕРС двох обмоток, розташованих на одному стержні, можуть, як і в однофазних трансформаторах, або збігатися, або бути протилежного напрямку. Однак залежно від схеми з'єднання обмоток і порядку з'єднання їх початків і кінців можуть виходити різні кути зсуву фаз між лінійними ЕРС. Наприклад, на рисунок 6.31 показано схеми з'єднання обмоток Y/Y та відповідні векторні діаграми для нульової (рисунок 6.31, а) і шостої (рисунок 6.31, б) груп. На рисунок 6.31, в та г показано схеми з'єднання обмоток Y/ Δ і відповідні векторні діаграми одинадцятої та п'ятої груп.

Змінюючи маркування виводів обмоток, можна одержати й інші групи з'єднання: при схемах Y/Y , Δ/Δ – парні: другу, четверту і т. ін.; при схемах Δ/Y , Y/Δ і Y/Z – непарні: першу, третю і т. ін. Відповідно до Держстандарту промисловість випускає трифазні силові трансформатори тільки двох груп – нульової та одинадцятої. Це полегшує практичне вмикання трансформаторів на паралельну роботу.



a – нульова; *б* – шоста; *в* – одинадцята; *г* – п'ята

Рисунок 6.31 – Групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора

Для позначення групи використовується циферблат стрілкового годинника (рисунок 6.32): велика стрілка вважається лінійним вектором обмотки ВН, вона ставиться на цифру 12, тоді номер групи вказує мала стрілка - лінійний вектор ЕРС обмотки НН.

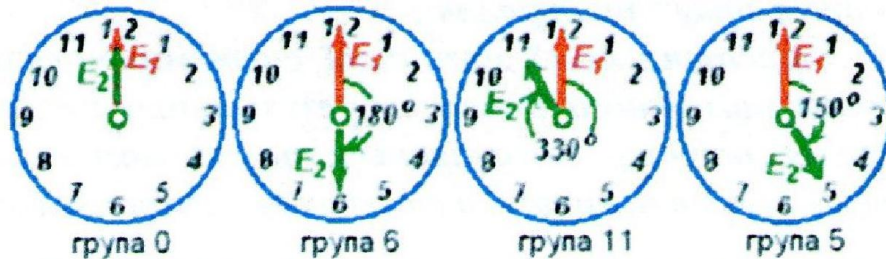


Рисунок 6.32 – Позначення груп з'єднання обмоток трансформатора із використанням годинникового циферблата

10 Паралельна робота трансформаторів

Умови вмикання трансформаторів на паралельну роботу

Паралельна робота трансформаторів необхідна:

- для забезпечення резервування в енергопостачанні споживачів у випадках аварії, проведення ремонтів, планового профілактичного обслуговування трансформаторів і сполученого з ними устаткування;
- для зменшення втрат енергії в періоди малих навантажень підстанції шляхом відключення такої частини паралельно працюючих трансформаторів, щоб ККД інших був максимальним.

Для досягнення оптимальних умов паралельної роботи трансформаторів необхідно, щоб загальне навантаження підстанції розподілялось між паралельно працюючими трансформаторами пропорційно до їх номінальних потужностей. Такий розподіл навантаження досягається, якщо у трансформаторів однакові:

- групи з'єднань обмоток;
- первинні і вторинні номінальні напруги чи, що практично те саме, коефіцієнти трансформації;
- напруги короткого замикання.

Якщо перші дві умови дотримані, то вторинні напруги відповідних фаз трансформаторів на холостому ході будуть однакові за амплітудою і фазою. У протилежному випадку вже на холостому ході виникають зрівнювальні струми, що будуть циркулювати по замкнених контурах, утворених вторинними обмотками, і трансформу-

ватися в первинні обмотки, викликаючи нерівномірне навантаження, а також зайві втрати і нагрівання трансформаторів.

Дотримання третьої умови забезпечує розподіл навантаження між трансформаторами відповідно до їх номінальних потужностей, що підвищує ККД підстанції та її навантажувальну здатність.

Крім цього, перед вмиканням трансформаторів на паралельну роботу їх обмотки повинні бути сфазовані, що означає увімкнення однойменних затискачів (як обмоток НН так і обмоток ВН) усіх паралельно працюючих трансформаторів лише на «свою» шину, а потужності трансформаторів, які вмикаються на паралельну роботу, не повинні відрізнятись більше ніж в три рази

Паралельна робота трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток

Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток при дотриманні інших умов. При паралельній роботі трансформаторів з «0» і «11» групами з'єднання, ЕРС вторинних обмоток відповідних фаз трансформаторів будуть мати однакову амплітуду, але зсунуті за фазою на 30° (рисунок 6.33).

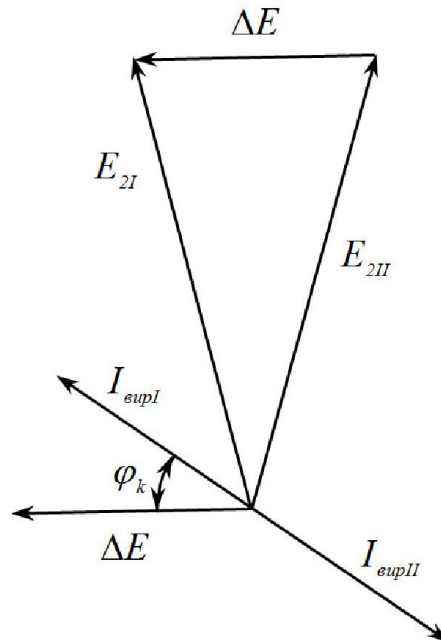


Рисунок 6.33 – Спрощена векторна діаграма ЕРС вторинних обмоток трансформаторів

В замкненому контурі вторинних обмоток виникне різниця ЕРС

$$\Delta E = 2E_2 \sin 15^\circ = 0,518E_2. \quad (6.84)$$

Відповідно до величини різниці ЕРС ΔE в обмотках протікатиме зрівнювальний струм

$$I_{зр} = \frac{\Delta E}{Z_{кI} + Z_{кII}}, \quad (6.85)$$

де $Z_{кI}$ і $Z_{кII}$ – опори короткого замикання відповідно першого і другого трансформатора

Якщо величини ΔE , $Z_{кI}$, $Z_{кII}$ представити у відносних одиницях, то відносне значення зрівнювального струму при умові $Z_{к}^* = u_{к}^*$ буде дорівнювати

$$\frac{I_{зр}}{I_{н}} = \frac{\Delta E^*}{Z_{кI}^* + Z_{кII}^*} = \frac{\Delta E^*}{u_{кI}^* + u_{кII}^*} = \frac{0,518}{0,05 + 0,05} = 5,18. \quad (6.86)$$

Тобто, зрівнювальний струм буде в 5,18 разів більше номінального. **Таким чином, паралельна робота трансформаторів з різними групами з'єднання неприпустима.** Такий висновок відноситься щодо паралельної роботи трансформаторів з парними і непарними групами з'єднання обмоток. Якщо ж обидва трансформатора мають парну або непарну групу з'єднання, то практично змінивши маркування кінців фазних обмоток, групи можна зробити однаковими і виконати умову підключення трансформаторів на паралельну роботу.

Паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації

Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації: $\kappa_I < \kappa_{II}$ і, відповідно, $E_{2I} > E_{2II}$. В даному випадку в контурі вторинних обмоток трансформаторів різниця ЕРС буде відрізнятися від нуля $\Delta E = E_{2I} - E_{2II}$. Під дією ΔE в обмотках буде протікати зрівнювальний струм, який визначається (6.85). Зрівнювальний струм у вторинних обмотках трансформаторів буде мати різні напрямки (рисунок 6.34): якщо в першому трансформаторі він протікає від початку обмотки до кінця; то в другому – від кінця до початку. Зрівнювальний струм $I_{зр}$ для першого трансформатора I є індуктивним, для другого трансформатора II – ємнісним.

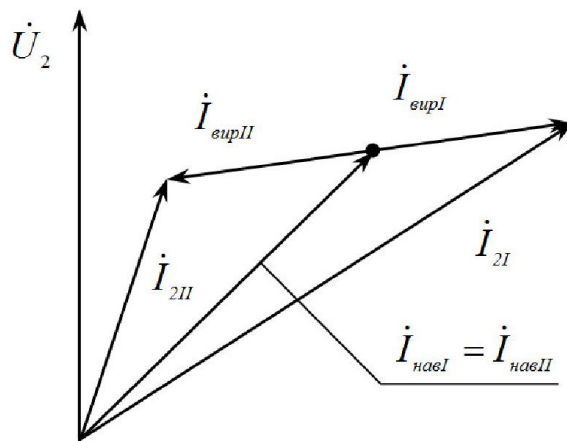


Рисунок 6.34 – Спрощена векторні діаграма струмів вторинних обмоток трансформаторів при паралельній роботі

Зрівнювальні струми змінюють напруги вторинних обмоток за рахунок падіння напруги таким чином, що встановлюється деяка напруга $E_{2I} > U_2 > E_{2II}$. При підключенні навантаження, струми навантаження $I_{навI}$ і $I_{навII}$ підсумовуються із зрівнювальними струмами, що викликає нерівність результуючих струмів і нерівномірне навантаження трансформаторів. Значення зрівнювального струму залежить від різниці коефіцієнтів трансформації. При паралельній роботі трансформаторів припустимою є відмінність коефіцієнтів трансформації на 0,5%, для трансформаторів з $k < 3$ і трансформаторів власних потреб електростанцій – на 1,0%.

Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання

Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними напругами короткого замикання при дотриманні інших умов включення.

Нехтуючи намагнічуючими струмами і використовуючи спрощену схему заміщення трансформатора, схему паралельної роботи трансформаторів можна представити у вигляді, представленому на рисунку 6.35.

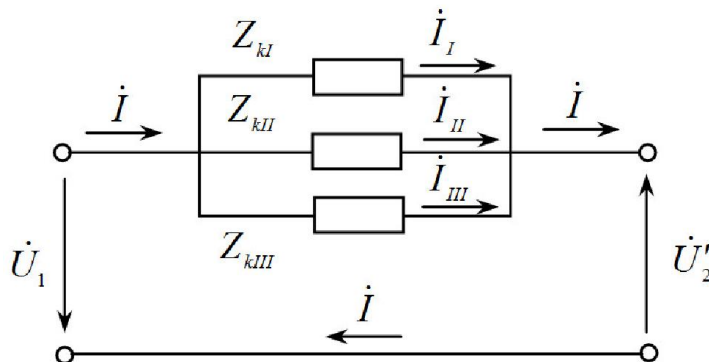


Рисунок 6.35 – Спрощена схема паралельної роботи трансформаторів

Зі схеми видно, що падіння напруги у всіх трансформаторів однакові і дорівнюють

$$\Delta U = U'_{20} - U'_2 = IZ, \quad (6.87)$$

де I – загальний струм навантаження;
 Z – еквівалентний повний опір обмоток трансформаторів.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{\kappa I}} + \frac{1}{Z_{\kappa II}} + \frac{1}{Z_{\kappa III}}} = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{Z_{\kappa n}}}.$$

Струми окремих трансформаторів

$$I_I = \frac{\Delta U}{Z_{\kappa I}} = \frac{1}{Z_{\kappa I} \sum_n \frac{1}{Z_{\kappa n}}}; I_{II} = \frac{\Delta U}{Z_{\kappa II}} = \frac{1}{Z_{\kappa II} \sum_n \frac{1}{Z_{\kappa n}}}; I_{III} = \frac{\Delta U}{Z_{\kappa III}} = \frac{1}{Z_{\kappa III} \sum_n \frac{1}{Z_{\kappa n}}}$$

В загальному випадку ці струми не співпадають за фазою, однак на практиці ці зсуви за фазою незначні і можна прийняти

$$I = I_I + I_{II} + I_{III}.$$

Таким чином підставивши відповідні значення Z_{κ} і змінивши струми на відповідні їм повні потужності, отримаємо

$$S_i = \frac{S}{\frac{u_{\kappa i \%}}{S_{ni}} \sum_n \frac{S_{nn}}{u_{\kappa n \%}}}.$$

Після визначення повних потужностей для кожного трансформатора і їх порівняння маємо співвідношення потужностей трансформатора при паралельній роботі

$$S_I : S_{II} : S_{III} = \frac{1}{u_{\kappa I \%}} : \frac{1}{u_{\kappa II \%}} : \frac{1}{u_{\kappa III \%}}. \quad (6.88)$$

Зі співвідношення видно, що відносні потужності (навантаження) паралельно працюючих трансформаторів обернено пропорційні їх напругам к.з. Інакше кажучи, при нерівності напруг к.з. паралельно працюючих трансформаторів більше навантажується трансформатор з меншою напругою к.з. В результаті це веде до перевантаження од-

ного трансформатора (з меншим u_k %) і недовантаження іншого (з більшим u_k %). Щоб не допустити перевантаження трансформатора, необхідно знизити загальне навантаження. Таким чином, нерівність напруг к.з. не допускає повного використання за потужністю паралельно працюючих трансформаторів.

З огляду на те, що практично не завжди можна підібрати трансформатори з однаковими напругами к.з., ДСТУ допускає включення трансформаторів на паралельну роботу при різниці напруг к.з. не більш ніж 10% від їх середнього арифметичного значення. Різниця в напругах к.з. трансформаторів тим більше, чим більше ці трансформатори відрізняються одне від одного за потужністю. Тому ДСТУ рекомендує, щоб відношення номінальних потужностей трансформаторів, включених паралельно, було не більш ніж 3:1.

11 Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори використовують головним чином для підключення електровимірювальних приладів в кола змінного струму високої напруги. При цьому електровимірювальні прилади виявляються ізольованими від кіл високої напруги, що забезпечує безпечну роботу обслуговуючого персоналу. Крім того, вимірювальні трансформатори дозволяють розширювати межі вимірювання приладів, тобто вимірювати великі струми і напругу за допомогою порівняно нескладних приладів, розрахованих для вимірювання малих струмів і напруг. У ряді випадків вимірювальні трансформатори служать для підключення до кіл високої напруги обмоток реле, що забезпечують захист електричних установок від аварійних режимів.

Вимірювальні трансформатори поділяють на два типи — трансформатори напруги і трансформатори струму. Перші використовуються для включення вольтметрів і інших приладів, що реагують на значення напруги (наприклад, катушок напруги ватметрів, лічильників, фазометрів і різних реле). Інші – для включення амперметрів і струмових катушок вказаних приладів.

Вимірювальні трансформатори виготовляють потужністю від п'яти до декількох сотень вольтампер; вони розраховані для спільної

роботи із стандартними приладами (амперметрами на 1; 2; 2,5 і 5 А, вольтметрами на 100 і $100\sqrt{3}$ В).

Вимірювальні трансформатор напруги виконують у вигляді двообмоткового знижувального трансформатора (рисунок 6.36, а). Для забезпечення безпечної роботи обслуговуючого персоналу вторинну обмотку ретельно ізолюють від первинної і заземлюють. Умовне позначення трансформатора напруги таке ж, як двообмоткового трансформатора.

Оскільки опори обмоток вольтметрів і інших приладів, що підключаються до трансформатора напруги, великі, то він практично працює в режимі холостого ходу. У цьому режимі можна з достатнім ступенем точності вважати, що $U_1 = U'_2 = U_2 k$.

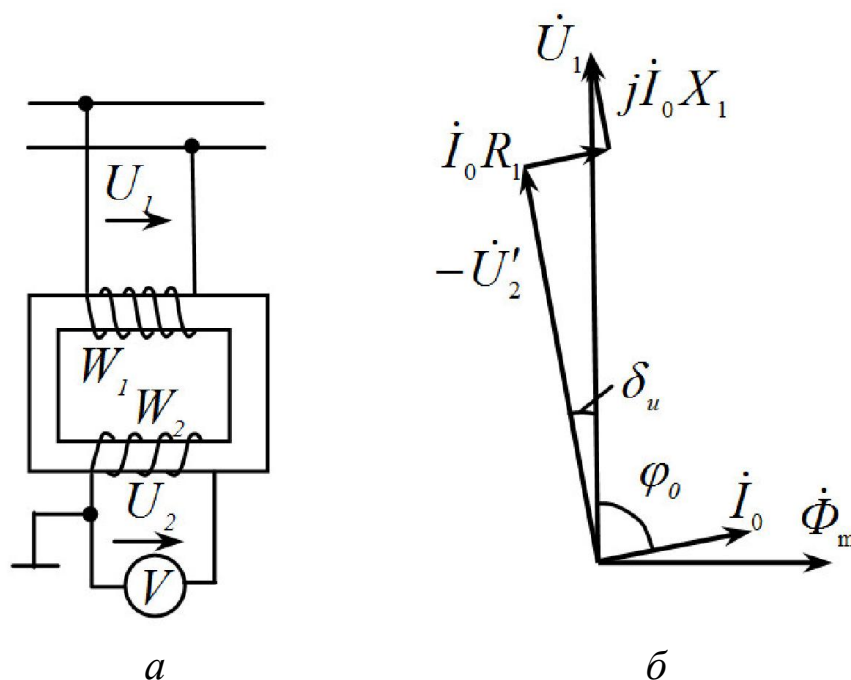


Рисунок 6.36 – Схема включення (а) і векторна діаграма вимірювального трансформатора напруги (б)

Насправді струм холостого ходу I_0 (а також невеликий струм навантаження) створює в трансформаторі падіння напруги, тому, як видно з векторної діаграми (рисунок 6.36, б), $U'_2 \neq U_1$ і між векторами цієї напруги є деякий зсув по фазі δ_u . В результаті при вимірюваннях утворюються деякі похибки.

У вимірювальних трансформаторах напруги розрізняють два види похибок:

- а) відносну похибку за напругою (за коефіцієнтом трансформації)

$$\gamma_u = [(U_2 k - U_1) / U_1] 100\%; \quad (6.89)$$

б) кутову похибку δ_u ; за її значення приймають кут між векторами \dot{U}_1 і $-\dot{U}'_2$.

Вона впливає на результати вимірювань, виконаних за допомогою ватметрів, лічильників, фазометрів і інших приладів, показання яких залежать не тільки від сили струму і напруги, але і від кута зсуву фаз між ними. Кутова похибка вважається позитивною, якщо вектор \dot{U}'_2 випереджає вектор \dot{U}_1 .

Залежно від значення похибок, що припускаються, стаціонарні вимірювальні трансформатори напруги поділяють на три класи точності: 0,5; 1 і 3, а лабораторні – на чотири: 0,05; 0,1; 0,2 і 0,5. Позначення класу відповідає значенню відносної похибки γ_u при номінальній нарузі $U_{1ном}$. Кутова похибка їх складає 20...40 кут. хв.

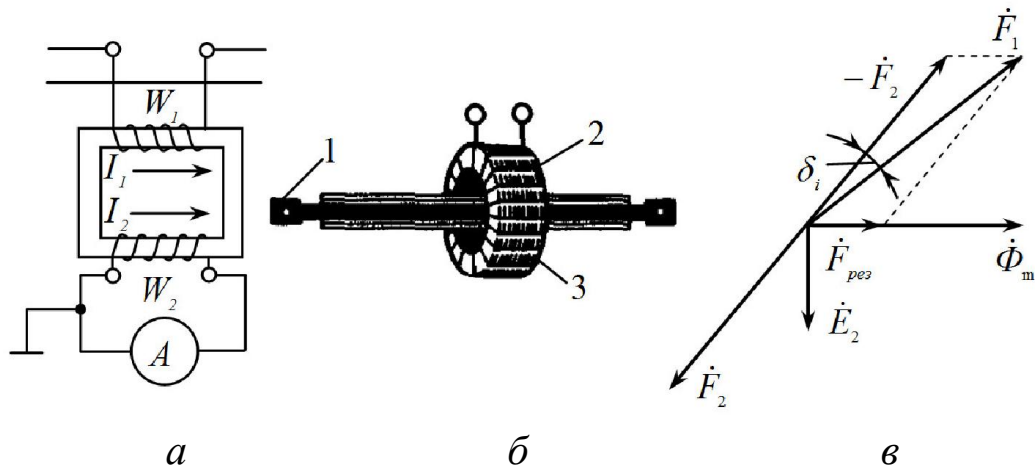
Трансформатори напруги, що випускаються промисловістю, зберігають клас точності при зміні первинної напруги від 80 до 120% від номінальної.

Для зменшення похибок γ_u і δ_u опори обмоток трансформатора Z_1 і Z_2 виконують по можливості малими, а магнітопровід виконують з високоякісної сталі достатньо великого поперечного перерізу, щоб в робочому режимі він не був насичений. Завдяки цьому забезпечується значне зменшення струму холостого ходу.

Вимірювальний трансформатор струму виконують у вигляді двообмоткового підвищувального трансформатора (рисунок 6.37) або у вигляді прохідного трансформатора, у якого первинною обмоткою служить провід, що проходить через вікно магнітопровода.

У деяких конструкціях магнітопровід і вторинна обмотка змонтовані на прохідному ізоляторі, що служить для введення високої напруги в силовий трансформатор або іншу електричну установку. Первинною обмоткою трансформатора служить мідний (алюмінієвий) стержень, що проходить усередині ізолятора (рисунок 6.37, б).

Опори обмоток амперметрів і інших приладів, що підключаються до трансформатора струму, зазвичай малі. Тому він практично працює в режимі короткого замикання, при якому струми I_1 і I'_2 у багато разів більше струму I_0 , і з достатнім ступенем точності можна вважати, що $I_1 = I'_2 = I_2 / k$.



1 – мідний стержень (первинна обмотка); 2 – вторинна обмотка;
3 – магнітопровід

Рисунок 6.37 – Схема включення вимірювального трансформатора струму (а), загальний вигляд прохідного трансформатора (б) і векторна діаграма (в)

Насправді через наявність струму холостого ходу в даному трансформаторі між векторами цих струмів є деякий кут, відмінний від 180° (рисунок 6.37, в). Це створює відносну струмову похибку

$$\gamma_i = [(I_2 k - I_1) / I_1] 100\% \quad (6.90)$$

і кутову похибку, вимірювану кутом δ_i , між векторами \dot{I}_1 і $-\dot{I}'_2$.

Похибка δ_i , вважається позитивною, якщо вектор $-\dot{I}'_2$ випереджає вектор \dot{I}_1 .

Залежно від значення похибок, що допускаються, вимірювальні трансформатори струму поділяють на п'ять класів точності: стаціонарні – 0,2; 0,5; 1; 3; 10 і лабораторні – 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2. Приведені цифри відповідають припустимій для даного класу струмовій похибці при номінальному значенні струму. Кутова похибка складає 10... 120 кут. хв.

Для зменшення струмової і кутової похибки магнітопровід трансформатора струму виготовляють з високоякісної сталі достатньо великого перерізу, щоб в робочому режимі він був не насичений ($B = 0,06 \dots 0,1$ Тл). За цих умов струм, що намагнічує, буде малий.

Слід зазначити, що розмикання кола вторинної обмотки трансформатора струму неприпустимо. Трансформатор переходить в режим холостого ходу і його результуюча МДС, в робочому режимі рі-

вна $\dot{F}_{рез} = \dot{F}_1 - \dot{F}_2$ (рисунок 6.37, в), стає $\dot{F}_{рез} = \dot{F}_1$. В результаті різко (у десятки і сотні разів) зростає магнітний потік в магнітопроводі, а індукція в ньому досягає значення $B > 2$ Тл, що приводить до сильного зростання магнітних втрат в сталі; при цьому трансформатор може згоріти. Ще більшу небезпеку становить різке підвищення напруги на виводах вторинної обмотки до декількох сотень і навіть тисяч вольт. Для запобігання режиму холостого ходу при відключенні приладів слід замикати вторинну обмотку трансформатора струму накоротко.

Контрольні запитання

1. Чому всі силові трансформатори мають пристрої для регулювання напруги?
2. Які види регулювання вторинної напруги використовуються в трансформаторах?
3. Які схеми регулювання числа витків обмотки є найбільш поширеними?
4. Чому регулювальні зони обмоток розташовуються в середині обмотки симетрично обом ярмам трансформатора?
5. В чому полягає принцип перемикання без збудження?
6. В чому полягає принцип регулювання під навантаженням?
7. Якій обмотці слід надавати перевагу при виконанні регулювальних відгалужень?
8. В яких межах здійснюється регулювання напруги з використанням ПБЗ та РПН?
9. Поясніть процес переходу перемикального пристрою з одного відгалуження на інше.
10. Поясніть можливості плавного регулювання напруги в трансформаторах.
11. Що слід розуміти під групою з'єднання обмоток трансформатора?
12. Що впливає на кути між однойменними фазними та лінійними ЕРС обмоток ВН та НН трансформатора?
13. Як за схемою з'єднання визначити групу з'єднання трансформатора?
14. Як провести з'єднання затискачів по заданій групі з'єднання трансформатора?

15. Чому при сполученні у трикутник в обмотках НН та ВН з'єднуються не одні і ті ж затискачі?
16. Які групи з'єднання називаються основними, а які похідними?
17. Як з нульової групи з'єднання отримати шосту ?
18. Як група з'єднання впливає на роботу окремого трансформатора та трансформаторів, що працюють паралельно?
19. Коли виникає потреба у паралельній роботі трансформаторів?
20. Що називається паралельною роботою трансформаторів?
21. Які умови увімкнення трансформаторів на паралельну роботу?
22. Як і коли впливає на паралельну роботу трансформаторів нерівність їх коефіцієнтів трансформації?
23. Чому необхідно щоб при паралельній роботі вторинні напруги трансформаторів були рівними?
24. Як розподіляється навантаження між трансформаторами при паралельній роботі з різними напругами КЗ?
25. Чому не дозволяється вмикати на паралельну роботу трансформатори з різними схемами та групами з'єднання?
26. Навіщо необхідно проводити фазування трансформаторів перед ввімкненням на паралельну роботу?
27. Чому не рекомендується вмикати на паралельну роботу трансформатори, потужність яких відрізняється у три і більше рази?