

# КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ З РПН В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ. ФІЗИЧНІ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ

Наконечний В.О., магістрант, Банін Д.Б., доцент

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем*

**Вступ.** Для забезпечення регламентованого рівня напруги в електричних мережах енергосистем необхідно здійснювати її регулювання. Головним засобом є зміна коефіцієнту трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів за допомогою пристрою РПН, який в залежності від конструктивних рішень реалізується в сучасних комп'ютерних комплексах різними математичними моделями. Коректність цих моделей суттєво впливає на якість розрахунків, аналізу та оптимізації електричних режимів. Дослідження множин різних режимних ситуацій дозволяє виявити функціональні та технологічні переваги та вади тих чи інших конструкційних рішень.

**Мета роботи.** Завданням даної роботи являється визначення груп трансформаторів з РПН, які використовуються в енергосистемах. Буде класифіковано трансформатори, в залежності від місця розташування РПН, а також розроблення їхніх математичних та фізичних моделей.

**Матеріали та результати досліджень.** Напруга являється однією з головних характеристик режиму роботи та важливим показником якості електричної енергії. Оскільки електричне навантаження в мережі постійно змінюється, що призводить до коливання рівнів напруги в ній, важливо підтримувати ці відхилення від номінального значення на допустимому рівні.

Трансформаторні обмотки забезпечують додатковими відгалуженнями, переключенням яких, можна забезпечити допустиме відхилення напруги на шини НН (СН) підстанції. У силовому трансформаторі переключення відгалуження може бути здійснено без збудження (ПБЗ) або під навантаженням (РПН). Пристрої ПБЗ, як правило, встановлені на малопотужних трансформаторах, які дозволяють виконувати регулювання напруги на  $\pm 5\%$  від номінальної, за допомогою ручних одно та трьохфазних перемикачів. Завдяки встановленому РПН на трансформаторі, можна виконувати переключення відгалужень не розриваючи електричне коло в межах від  $\pm 10$  до  $\pm 16\%$  ступенями приблизно по  $1,5\%$ . Для того, щоб РПН не спрацьовував на незначні коливання напруги, встановлюють автоматичні регулятори, що мають зону нечутливості та витримку часу.

Прийнято трансформатори класифікувати за трьома групами [1]:

- 1) понижуючі двохобмоткові трансформатори (рис. 1, а);
- 2) трьохобмоткові трансформатори та автотрансформатори (рис. 1, б);
- 3) трансформатори зв'язку мереж з різними класами напруг (рис. 1, в).

Трансформатори другої та третьої групи використовують для централізованого регулювання напруги, оскільки режим роботи мережі НН визначає режим роботи регулятора для трансформаторів першої групи.

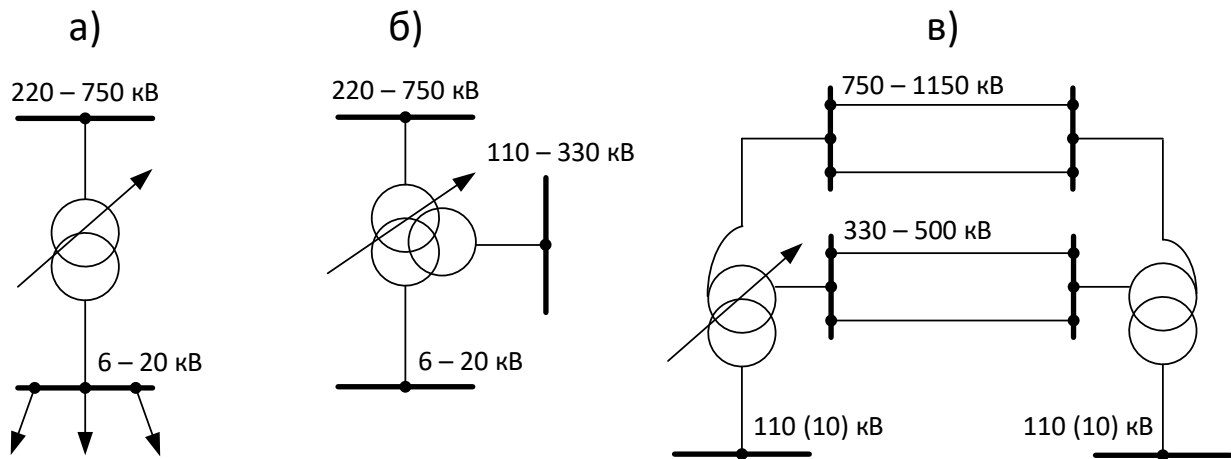


Рисунок 1 – Трансформатори з РПН

Відмітимо наступні паспортні дані трансформаторів:

$U_{ВН}$ ,  $U_{СН}$ ,  $U_{НН}$  – номінальні напруги обмоток ВН, СН, НН;

$N_T$ ,  $N_{НОМ}$  – поточний та номінальний номер регульованого відгалуження РПН;

$\Delta U\%$  – крок регулювання РПН в процентах до напруги, де встановлено РПН.

При виводі будемо використовувати наступні умови та припущення:

\* Введемо додаткове позначення  $dU = \Delta U\% / 100$  і  $dN = (N_T - N_{НОМ})$ ;

\* Будемо використовувати номінальні значення коефіцієнтів трансформації  $K_{ВН}$ ,  $K_{СН}$ ,  $K_{НН}$  та номінальні кількості витків в обмотках  $\omega_{ВН}$ ,  $\omega_{СН}$ ,  $\omega_{НН}$ , а також  $\omega_T$  – кількість витків РПН для даного  $N_T$ ;

\* Розрахункові режимні характеристики і регульовані параметри позначаємо  $U_B$ ,  $U_C$ ,  $U_N$ ,  $K_B$ ,  $K_C$ ,  $K_N$ .

\* Номінальні параметри визначаються у відповідності з паспортними даними:

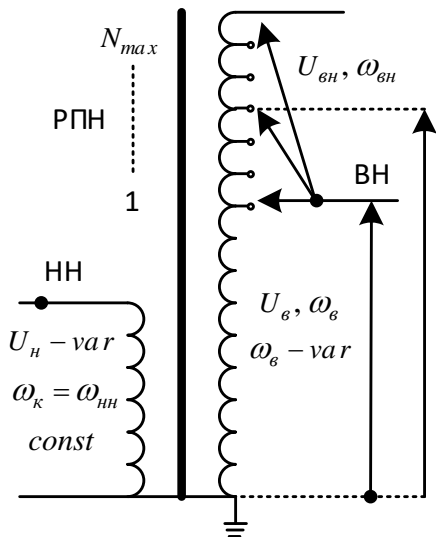
$$K_{ВН} = \omega_{ВН} / \omega_{ВН} = U_{ВН} / U_{ВН} = 1 \text{ (завжди),}$$

$$K_{СН} = \omega_{ВН} / \omega_{СН} = U_{ВН} / U_{СН},$$

$$K_{НН} = \omega_{ВН} / \omega_{НН} = U_{ВН} / U_{НН}.$$

Виведемо фізичні та математичні моделі для трьохобмоткового трансформатора з РПН на ВН та для двох варіантів трансформаторів, де РПН встановлено на лінійному виході СН та в нейтралі трансформатора.

Відгалуження для регулювання розміщуються на ВН, оскільки на цій обмотці струм має менше значення, в порівнянні з іншими, що в свою чергу дозволяє конструктивно спростити пристрій для переключення. Для того, щоб збільшити діапазон для регулювання напруги, при цьому не збільшуючи кількість відгалужень, використовують ступені тонкого та грубого регулювання. Фізична модель та механізм виведення коефіцієнтів трансформації для даного трансформатора приведені на рис. 2.



Математична модель розрахунку К<sub>н</sub>

$$K_n = \omega_{вн} / \omega_{нн} = (\omega_{вн} + \omega_r) / \omega_{нн}$$

$$\frac{\omega_{вн} + \omega_r}{\omega_{нн}} = \frac{\omega_{вн}}{\omega_{нн}} \cdot (1 + dN \cdot dU)$$

$$\frac{\omega_{вн}}{\omega_{нн}} + \frac{\omega_r}{\omega_{нн}} = \frac{\omega_{вн}}{\omega_{нн}} + \frac{\omega_{вн}}{\omega_{нн}} \cdot dN \cdot dU, \quad \omega_r = \omega_{вн} \cdot dN \cdot dU$$

$$K_n = \frac{\omega_{вн} + \omega_{вн} \cdot dN \cdot dU}{\omega_{нн}} = K_{нн} (1 + dN \cdot dU)$$

Рисунок 2 – Фізична модель (а) та математична модель (б), формули для визначення коефіцієнтів трансформації з РПН на ВН

Величина  $\omega_r$  не являється самостійним параметром, а зв'язана з кроком регулятора РПН ( $dU$ ) відносно номіналу.

Фізичні моделі трансформаторів з РПН на лінійному виході СН та РПН в нейтралі приведені на рис. 3.

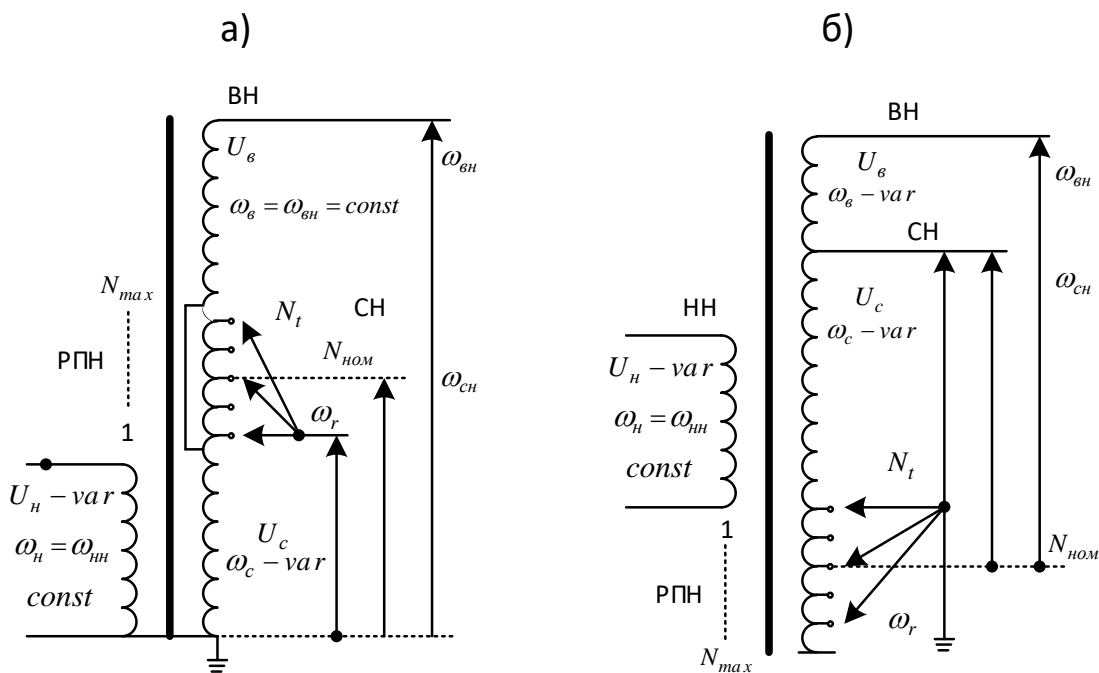


Рисунок 3 – Фізичні моделі трансформаторів з РПН на лінійному виході СН (а) та РПН в нейтралі (б)

Розміщення РПН на лінійному виході СН дозволить виконувати незалежне регулювання, тобто виконувати його завдяки використанню обмотки на лінійному виході СН. Перемикаючий пристрій буде мати дещо складнішу

конструкцію, оскільки потрібно враховувати його роботу з повним номінальним струмом. Також ізоляція вийде дорожчою, бо вона має витримувати повну напругу обмотки СН.

Завдяки розміщенню РПН в нейтралі, спрощується не тільки ізоляція перемикаючого пристрою, а й його конструкція, бо в спільній обмотці протікає різниця струмів. Відбувається зв'язне регулювання, тобто при перемиканні відгалужень змінюється кількість витків в обмотці високої напруги та обмотці середньої напруги. При виконанні такого регулювання, відбувається різка зміна індукції в сердечнику та коливання напруги на обмотці низької напруги [2].

Для розглянутих автотрансформаторів задіємо аналогічний математичний підхід складання рівняння, де зліва маємо відношення кількості витків обмоток, а справа умови регулювання « $dN, dU$ ».

Для автотрансформатора з РПН на лінійному виході СН маємо:

$$K_{\epsilon} = K_{\text{вн}} = 1, \quad K_{\text{н}} = \omega_{\text{вн}} / \omega_{\text{нн}} = K_{\text{нн}}, \quad K_{\text{с}} = \frac{\omega_{\text{вн}}}{\omega_{\text{сн}} + \omega_{\text{r}}} = \frac{\omega_{\text{вн}}}{\omega_{\text{сн}} \cdot (1 + dN \cdot dU)},$$

$$\omega_{\text{вн}} \cdot \omega_{\text{сн}} + \omega_{\text{вн}} \cdot \omega_{\text{сн}} \cdot dN \cdot dU = \omega_{\text{вн}} \cdot \omega_{\text{сн}} + \omega_{\text{r}} \cdot \omega_{\text{вн}}, \quad \omega_{\text{r}} = \omega_{\text{сн}} \cdot dN \cdot dU,$$

$$K_{\text{с}} = \frac{\omega_{\text{вн}}}{\omega_{\text{сн}} + \omega_{\text{сн}} \cdot dN \cdot dU} = \frac{K_{\text{сн}}}{1 + dN \cdot dU}.$$

Для автотрансформатора з РПН в нейтралі отримаємо:

$$K_{\text{с}} = \frac{\omega_{\text{вн}} + \omega_{\text{r}}}{\omega_{\text{сн}} + \omega_{\text{r}}} = \frac{\omega_{\text{вн}}}{\omega_{\text{сн}} \cdot (1 + dN \cdot dU)},$$

$$\omega_{\text{вн}} \cdot \omega_{\text{сн}} + \omega_{\text{вн}} \cdot \omega_{\text{r}} = \omega_{\text{вн}} \cdot \omega_{\text{сн}} + \omega_{\text{сн}} \cdot \omega_{\text{r}} + \omega_{\text{вн}} \cdot \omega_{\text{сн}} \cdot dN \cdot dU + \omega_{\text{сн}} \cdot \omega_{\text{r}} \cdot dN \cdot dU,$$

$$\omega_{\text{r}} = \frac{\omega_{\text{вн}} \cdot \omega_{\text{сн}} \cdot dN \cdot dU}{(\omega_{\text{вн}} - \omega_{\text{сн}} \cdot (1 + dN \cdot dU))}.$$

Введемо два додаткові позначення  $A_{\text{в}}$  та  $A_{\text{с}}$ :

$$A_{\epsilon} = \frac{\omega_{\text{r}}}{\omega_{\text{вн}}} = \frac{\omega_{\text{сн}} \cdot dN \cdot dU}{(\omega_{\text{вн}} - \omega_{\text{сн}} \cdot (1 + dN \cdot dU))} = \frac{dN \cdot dU}{(K_{\text{сн}} - (1 + dN \cdot dU))},$$

$$A_{\text{с}} = \frac{\omega_{\text{r}}}{\omega_{\text{сн}}} = \frac{\omega_{\text{вн}} \cdot dN \cdot dU}{(\omega_{\text{вн}} - \omega_{\text{сн}} \cdot (1 + dN \cdot dU))} = \frac{K_{\text{сн}} \cdot dN \cdot dU}{(K_{\text{сн}} - (1 + dN \cdot dU))}.$$

З врахуванням цих позначень отримуємо значення коефіцієнтів трансформації як функції тільки її параметрів:

$$K_{\epsilon} = \frac{1 + A_{\text{в}}}{1 + A_{\text{с}}}, \quad K_{\text{н}} = K_{\text{нн}} \cdot (1 + A_{\text{в}}) = K_{\text{нн}} \cdot K_{\text{в}},$$

$$K_{\text{с}} = \frac{K_{\text{сн}} \cdot (1 + A_{\text{в}})}{1 + A_{\text{с}}} = K_{\text{сн}} \cdot K_{\text{в}} / (1 + A_{\text{в}}).$$

Проведемо числовий експеримент: нехай маємо автотрансформатор з РПН в нейтралі типу АТДЦТН-125000/330/115/10,5.

$U_{\text{вн}} = 330$  кВ;  $U_{\text{сн}} = 115$  кВ;  $U_{\text{нн}} = 10,5$  кВ;  $K_{\text{вн}} = 1$ ;  $K_{\text{сн}} = 2,8696$ ;  $K_{\text{нн}} = 31,4286$ ;

$dN = -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ;  $dU = 0,02$ ;  $N_{\text{max}} = 13$ ;  $N_{\text{ном}} = (13+1)/2 = 7$ .

У відповідності з цими номінальними параметрами, а також при умові  $dU=0,02$  отримаємо параметри регулювання даного АТ. Результати приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Контрольна таблиця для АДЦТН-125000/330/115/10,5

dN	РПН на виводі СН				РПН в нейтралі АТ			
	К <sub>в</sub>	К <sub>с</sub>	К <sub>н</sub>	%	К <sub>с</sub>	К <sub>н</sub>	%	%
-6	1	3,2609	31,4286	-12	3,2609	29,5330	-12	6,4185
-5	1	3,1884	31,4286	-10	3,1884	29,8329	-10	5,3487
-4	1	3,1191	31,4286	-8	3,1191	30,1389	-8	4,2791
-3	1	3,0527	31,4286	-6	3,0527	30,4513	-6	3,2093
-2	1	2,9891	31,4286	-4	2,9821	30,7702	-4	2,1396
-1	1	2,9281	31,4286	-2	2,9281	31,0969	-2	1,0666
0	1	2,8696	31,4286	0	2,8696	31,4286	0	0
1	1	2,8133	31,4286	2	2,8133	31,7684	2	-1,0697
2	1	2,7592	31,4286	4	2,7592	32,1157	4	-2,1395
3	1	2,7071	31,4286	6	2,7071	32,4707	6	-3,2094
4	1	2,6570	31,4286	8	2,6570	32,6335	8	-3,6923
5	1	2,6087	31,4286	10	2,6087	33,2016	10	-5,3402
6	1	2,5621	31,4286	12	2,5621	33,5842	12	-6,4186

Графіки зміни напруги на СН і НН при регулюванні режиму приведені на рис. 4.

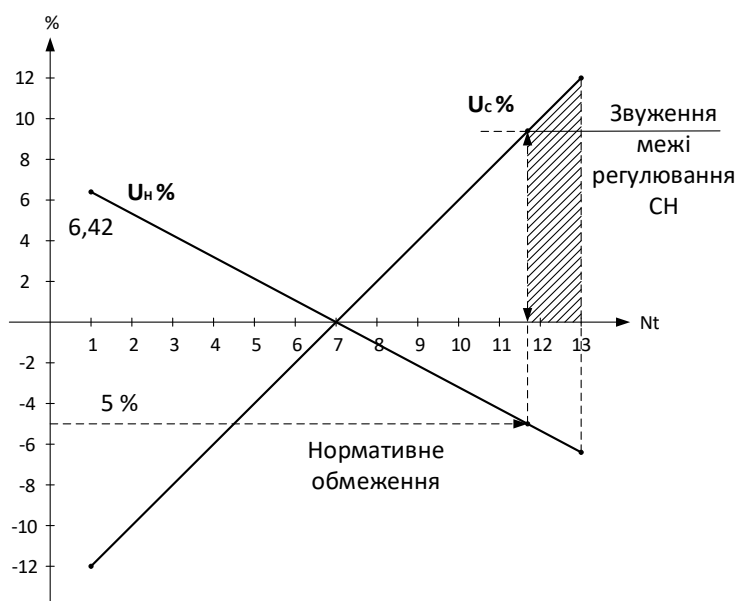


Рисунок 4 – Графіки змін напруги на СН і НН для АТ з РПН в нейтралі

Як видно, для АТ з РПН в нейтралі, при регулюванні режиму, змінюється напруга на СН і НН, при чому зустрічно. Відмітимо, що в зв'язку зі зниженням напруги на НН до допустимих 5 % звужуються межі регулювання на СН.

Розроблені математичні моделі автотрансформаторів та наведені матеріали досліджень використані при аналізі режимів експериментальної розрахункової схеми ДРС\_EXR, об'ємом 688 вузлів, 75 контурів, 40 АТ 330/110 кВ, 7 вузлів БП, 2 вузлів ФМ. Структурна схема показана на рис. 5. Представлені компоненти схеми з аббревіатурами підстанцій та ОСР. Наведена

режимна графіка типової підстанції 330/110 кВ. Проаналізовано ряд ремонтних та післяаварійних режимів. Задіяний комп'ютерний комплекс РАОТВ [3].

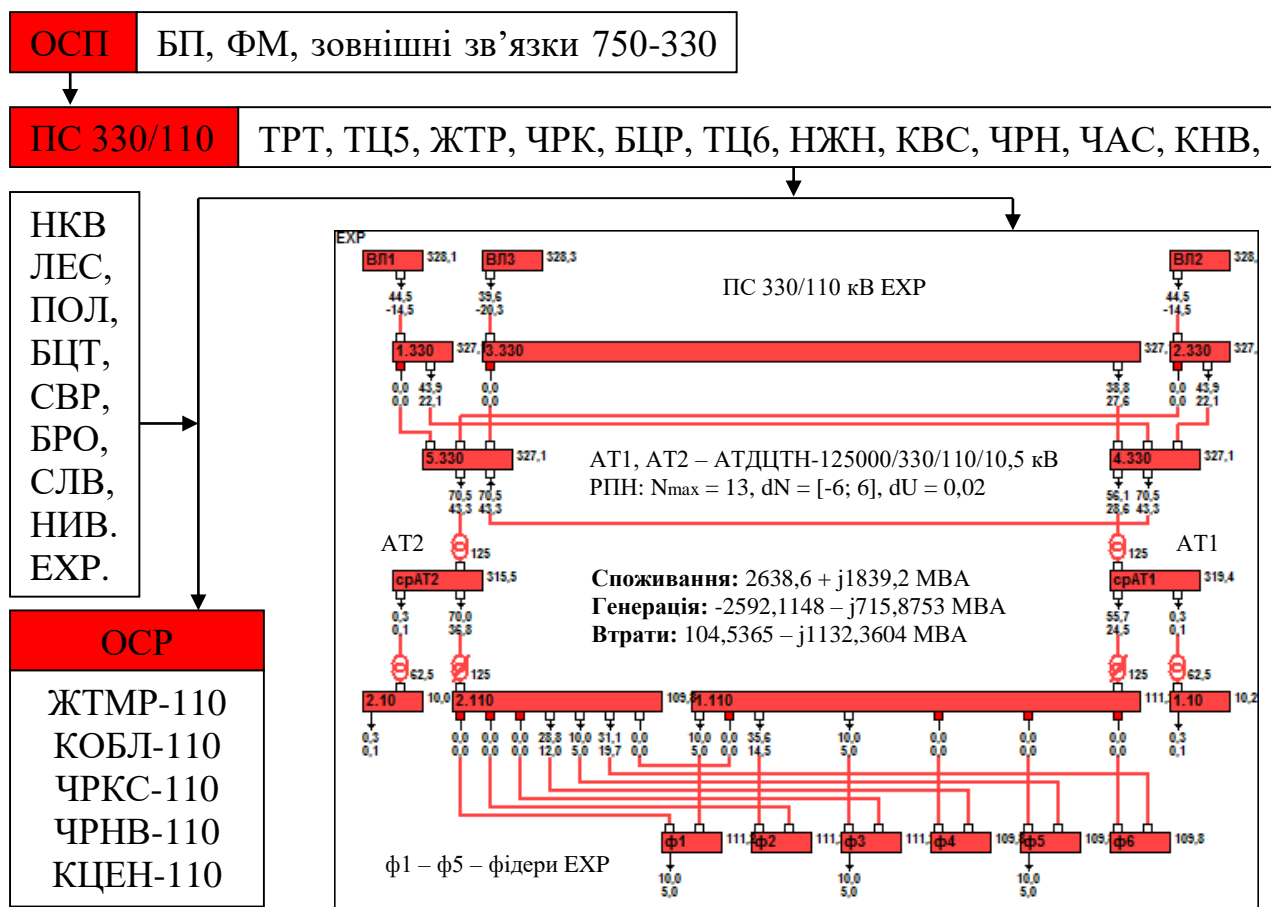


Рисунок 5 – Структурна дослідницька схема ОСП

**Висновки.** Класифіковано трансформатори, за використанням в енергосистемах на три групи та визначено область їхнього застосування. Визначено конструктивні та функціональні особливості трансформаторів, які пов'язані з розміщенням РПН та розроблено для них математичні та фізичні моделі. Обчислено коефіцієнти трансформації для АТДЦТН-125000/330/100/10,5 при розміщенні РПН на СН та в нейтралі. Для варіанту з РПН в нейтралі графічно виявлено, що при зниженні напруги на НН до 5 % звужуються межі регулювання на СН. Дослідження базуються на розрахунках режимів дослідницької промислової схеми об'ємом 688 вузлів.

#### Перелік посилань

1. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах/ В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с., ил.
2. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: Учеб. пособие для вузов: Учеб. пособие для сред. проф. образования /Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 176 с.
3. Інструкції користувача програмного комплексу "Розрахунок, аналіз і оптимізація технологічних втрат" (РАОТВ). НТУУ "КПІ", ФЕА, ГНДЛ "Автоматизація управління електричними мережами вищих класів напруги", Київ, 2009.