

# МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РЕМ З ПРИСТРОЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РПН В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

Шполянський О.Г., к.т.н., Слюсар Є.В., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

**Вступ.** Стабільність напруги в електроенергетичних системах є одним з найважливіших факторів забезпечення надійної роботи електричних мереж. Державний стандарт ДСТУ EN 50160:2014 визначає відхилення напруги в нормальному режимі  $\pm 5\%$  та в межах  $\pm 10\%$  від  $U_{ном}$  при умовах, коли електроенергія постачається електромережами без зв'язку з енергосистемою або особливо віддаленим споживачам [1].

Регулювання напруги в розподільній електричній мережі (РЕМ) здійснюється декількома засобами. Одним з них є пристрій регулювання під навантаженням (РПН) трансформатора. Регулювання здійснюється на стороні вищої напруги (ВН). Величина ступеня РПН, в залежності від типу, може становити від 1,3 до 2,5%. Кількість ступеней – від 5 до 19. Зазвичай, у РПН трансформаторів з більшою кількістю ступенів величина ступеня є меншою. Менша величина ступеня дозволяє підвищити точність регулювання напруги. Трансформатори з РПН здатні здійснювати регулювання напруги на стороні низької напруги (НН) в діапазоні до  $\pm 16\%$ .

Перемикання без збудження (ПБЗ) застосовується для регулювання напруги при сезонній зміні навантажень або зміні складу та потужності споживачів. Для ПБЗ використовуються чотири додаткових відгалуження, величина кожного ступеня 2,5%. Регулювання здійснюється в межах  $\pm 5\%$ . Недоліком такого регулювання є необхідність відключення трансформатора від електричної мережі для зміни відгалуження. Тому, незважаючи на зміну навантаження протягом доби, коефіцієнт трансформації у нього залишається незмінним [2].

Класифікація пристроїв перемикання силових трансформаторів зображена на рис. 1.

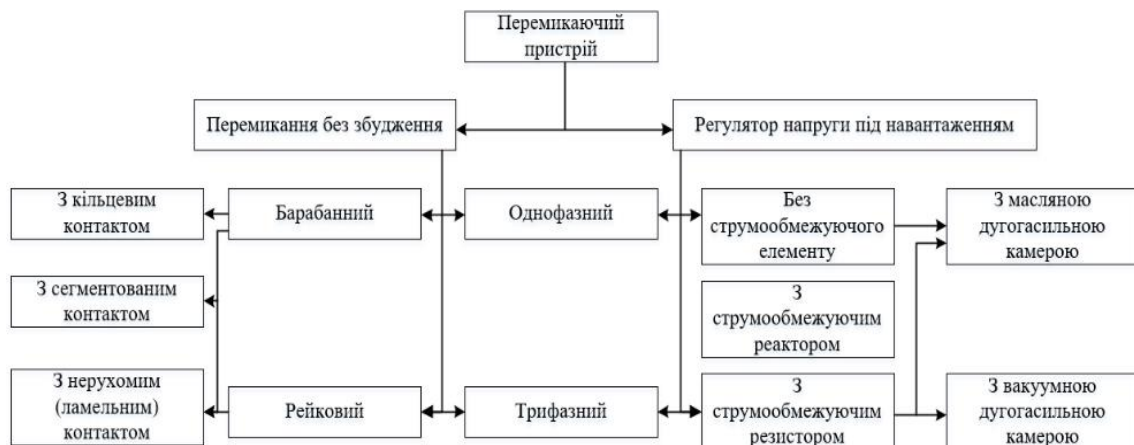


Рисунок 1 – Класифікація перемикаючих пристроїв силових трансформаторів

**Мета.** Розробка моделі пристрою автоматичного керування для трансформатора з РПН та моделювання режиму розподільної електричної мережі в середовищі Matlab/Simulink.

**Матеріали і результати досліджень.** Зменшення або збільшення значення напруги на вторинній обмотці трансформатора досягається шляхом змінення кількості витків первинної обмотки. Основним відгалуженням, що відповідає номінальному коефіцієнту трансформації, є відгалуження з індексом «0». Якщо РПН в цьому положенні, то при прикладанні на стороні ВН трансформатору номінальної напруги  $U_{1н}$  на стороні НН також буде номінальна напруга  $U_{2н}$ . Пристрій перемикавання дає змогу ступінчасто збільшувати (+ $n$ ) або зменшувати (- $n$ ) кількість витків первинної обмотки. Кількість витків у кожного ступеня однакова, а загальне число ступеней -  $2n$  [2, 3]. Схема пристрою РПН зображена на рис. 2.

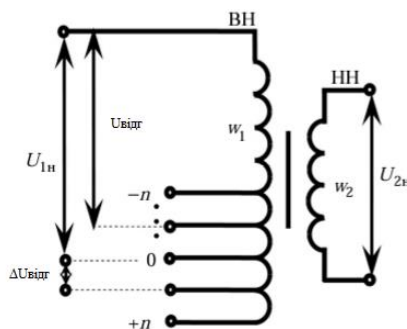


Рисунок 2 – Схема пристрою РПН

У разі змінного добового навантаження виконується зустрічне регулювання (струмова компенсація). Цей підтип регулювання напруги є найпоширенішим. Зустрічне регулювання це регулювання рівня напруги на шинах НН центру живлення (ЦЖ) в залежності від струму навантаження. Такий вид регулювання означає підвищення напруги зі зростанням навантаження і навпаки. Під час максимальних навантажень для компенсації втрат напруги рівень напруги на шинах НН ЦЖ підтримують на 5-10% вищим за номінальне значення, а в період мінімальних навантажень - не вищим за номінальне.

Стабілізація рівня напруги застосовується для споживачів з практично незмінним навантаженням, наприклад для тризмінних підприємств, де рівень напруги необхідно підтримувати постійним.

Двоступеневе регулювання напруги виконується для електроприймачів з вираженим двоступеневим характером зміни навантаження (однорічні підприємства). При цьому підтримуються два рівні напруги протягом доби відповідно до графіка навантаження [4].

Моделювання роботи автоматичного регулятора РПН здійснювалось наступним чином:

- 1) визначалась верхня  $U_+$  і нижня  $U_-$  межа напруги на шинах НН трансформатора ЦЖ:

$$U_+ = (100 + U_0 + IK_i + 0,5U_tK_z)U_1/100, \quad (1)$$

$$U_1 = (100 + U_0 + IK_i - 0,5U_tK_z)U_1/100; \quad (2)$$

2) визначалась необхідність і напрямок перемикавання:

- $U_1 < U_2 < U_+$  – перемикавання відгалуження не здійснюємо;
- $U_2 < U_1$  і  $U_2 + U_t \leq U_2 + N_u U_t$  – здійснюємо перемикавання відгалуження вгору. Коефіцієнт трансформації розраховується за (3).

$$N = U_2/U_1 + U_t/100; \quad (3)$$

- $U_2 > U_+$  і  $U_2 - U_t \geq U_2 + N_d U_t$  – здійснюємо перемикавання відгалуження вниз. Коефіцієнт трансформації визначається за формулою (4).

$$N = U_2/U_1 - U_t/100, \quad (4)$$

де  $U_1$  – напруга трансформатора ВН, В;  $U_2$  – напруга трансформатора НН, В;  $I$  – струм навантаження через трансформатор, А;  $U_t$  – величина добавки одного відгалуження, %;  $K_z$  – коефіцієнт нечутливості регулювання;  $K_i$  – коефіцієнт пропорційності за струмом, %/А;  $U_0$  – базова добавка напруги, %;  $N$  – коефіцієнт трансформації;  $N_u$  – кількість відгалужень вгору;  $N_d$  – кількість відгалужень вниз.

Моделювання роботи пристрою автоматичного керування РПН і фрагменту розподільної електричної мережі було здійснено в програмному комплексі Matlab/Simulink. Модель фрагменту розподільної мережі зображено на рис. 3.

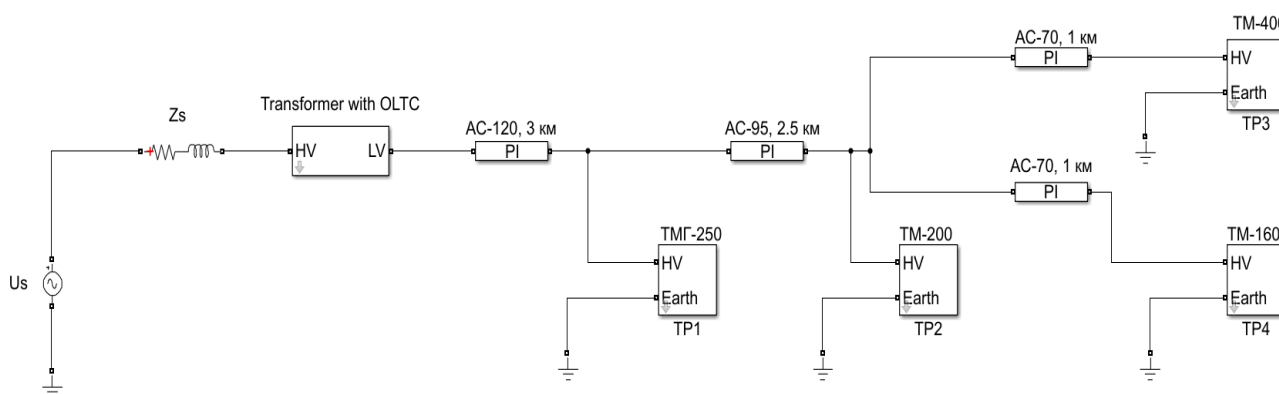


Рисунок 3 – Модель фрагменту розподільної електричної мережі в програмному комплексі Matlab/Simulink

Елементами моделі фрагменту розподільної мережі є:

- $U_s$  – джерело змінної напруги 110 кВ;
- $Z_s$  – еквівалентний опір системи;
- Transformer with OLTC – трансформатор ТМН-2500 напругою 110/10 кВ з РПН і діапазоном регулювання  $\pm 8 \times 1,5\%$ ;

- ТР1-ТР4 – трансформаторні підстанції, в складі яких трансформатори ТМГ-250, ТМ-200, ТМ-400, ТМ-160, напругою 10/0,4 кВ з ПБЗ і діапазоном регулювання  $\pm 2 \times 2,5\%$ ;
- В блоках ТР1-ТР4 знаходяться блоки активного і реактивного навантаження;
- Лінії електропередачі представлені Рі – подібними секціями довжиною 1-3 км і марками проводів АС-70, АС-95, АС-120.

Трансформаторні підстанції мають добові графіки навантажень, які наближені до реальних: житловий масив 5-9 поверхових будинків, житловий квартал з громадськими установами, двозмінне та тризмінне підприємство.

Навантаження в схемі представлено у вигляді керованих активного опору  $R_n$  і індуктивності  $L_n$ . Активна і реактивна складові навантаження є незалежними одна від одної. Вони визначаються за формулами:

$$R_n = \frac{U_{нн}}{I \cos \varphi}, \quad L_n = \frac{U_{нн}}{2\pi f \cdot I \sin \varphi},$$

де  $I$  і  $\varphi$  – амплітуда струму навантаження і кут навантаження, які визначаються добовими графіками;  $U_{нн}$  – напруга трансформаторної підстанції на стороні НН,  $f$  – частота мережі - 50 Гц.

Для визначення закону регулювання і відгалужень ПБЗ, проводяться розрахунки параметрів  $K_i$  та  $U_0$  згідно (5-8). Якщо  $K_i \neq 0$ , то буде діяти закон зустрічного регулювання, якщо  $K_i = 0$ , то буде діяти закон стабілізації напруги.

$$dU_{max}^p = dU_{max}^A, \quad (5)$$

$$dU_{min}^p = \frac{dU_{min}^A + dU_{min}^B}{2}, \quad (6)$$

$$K_I = \frac{dU_{max}^p - dU_{min}^p}{I_{max} - I_{min}}, \quad (7)$$

$$U_0 = dU_{max}^p - K_I \cdot I_{max}, \quad (8)$$

де  $dU_{max}^A$  – напруга електрично найдалшого ТП (ТП3) в момент часу, коли досягається значення струму  $I_{max}$ ,  $dU_{min}^A$  і  $dU_{min}^B$  – напруга електрично найближчого ТП (ТП1) в момент часу, коли досягається значення струму  $I_{min}$ ,  $K_i$  – коефіцієнт пропорційності за струмом, %/А;  $U_0$  – базова добавка напруги, %.

В результаті розрахунків було визначено характеристики закону зустрічного регулювання напруги:  $U_0 = 0,021 \%$ ,  $K_i = 0,015 \%/A$ . За значеннями  $U_0$  і  $K_i$  було виконано моделювання режиму роботи розподільної мережі. На рис. 4 представлено добовий графік напруги на шинах НН ЦЖ  $U_{нн}$ , верхню  $U_{нн+}$  і нижню  $U_{нн-}$  межі регулювання напруги. Як бачимо, значення  $U_{нн}$  знаходиться приблизно в межах 9,92 - 10,13 кВ, а діапазон відхилення від номінальної напруги складає  $-0,8 \div 1,3 \%$ .

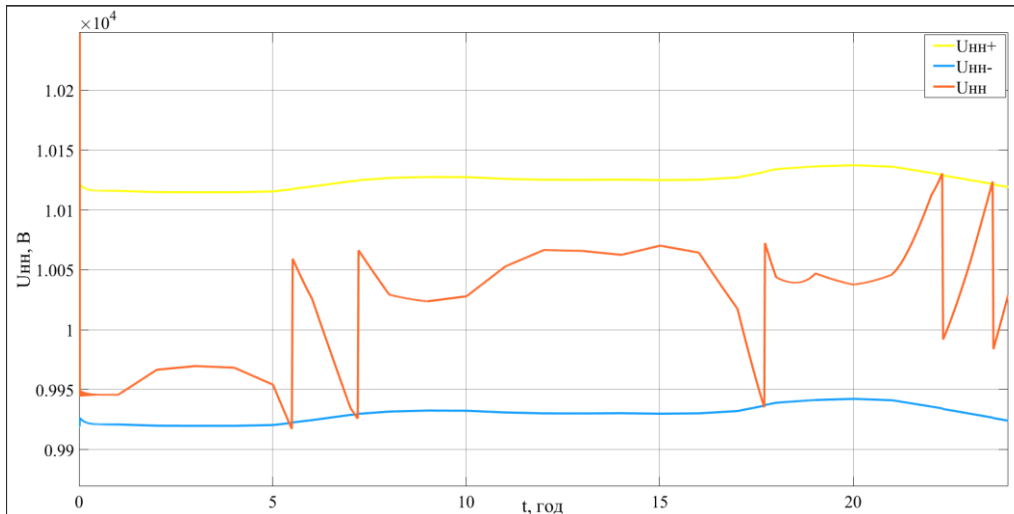


Рисунок 4 – Добовий графік напруги на шинах НН центру живлення та межі його регулювання для визначеного закону регулювання

На рис. 5 та рис. 6 представлені добові графіки напруги на шинах НН ТП1 і ТП3. Номінальна лінійна напруга для мереж низької напруги має значення 380 В [1]. Відхилення напруги у продовж доби на шинах НН ТП1 складає приблизно 3,58 В – 5,78%, а ТП3 – 3,95 В – 6,05%. Це перевищує допустиме відхилення 5%. Для усунення цього порушення рекомендується перемкнути відгалуження ПБЗ трансформаторів ТП на одну ступень, зменшивши напругу на стороні НН на 2,5%.

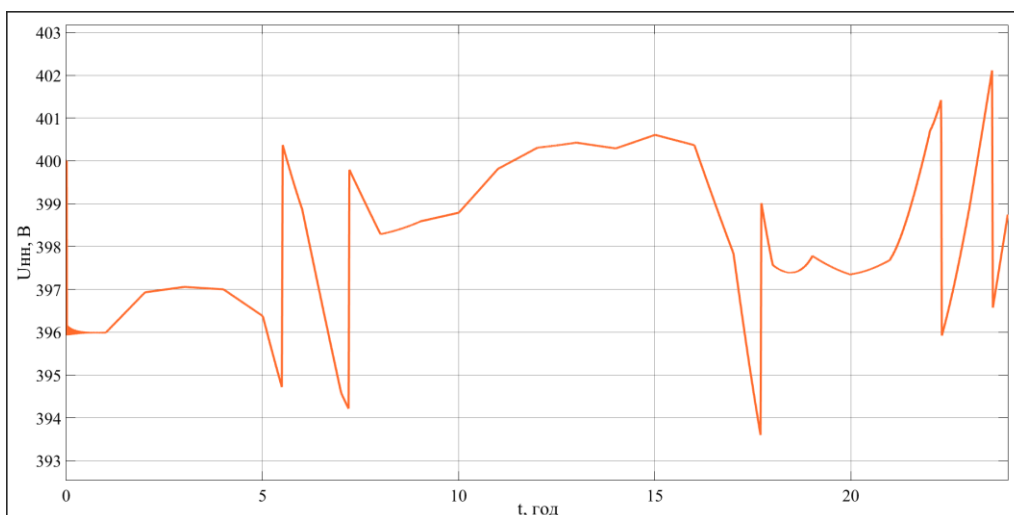


Рисунок 5 – Добовий графік напруги на шинах НН ТП1

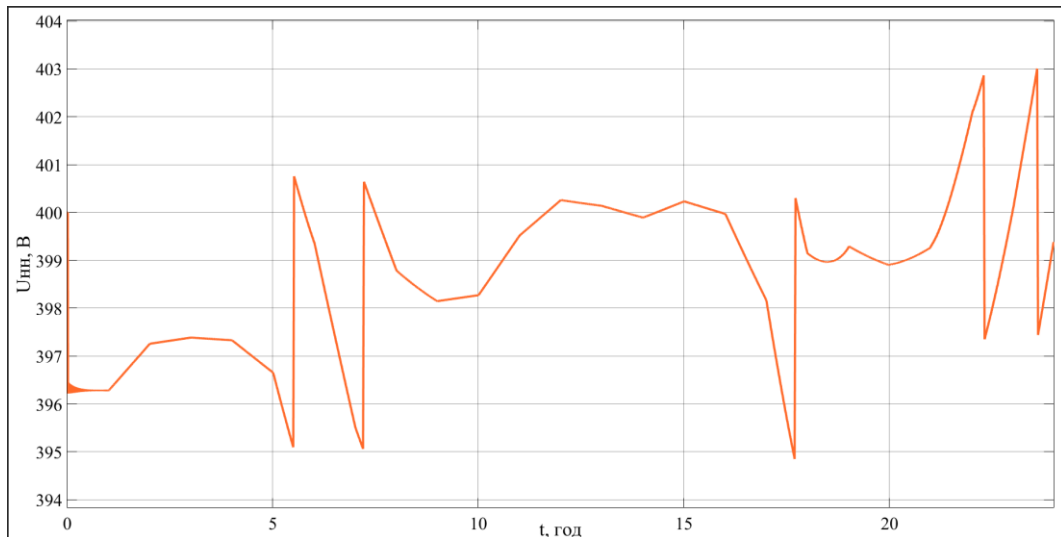


Рисунок 6 – Добовий графік напруги на шинах НН ТПЗ

**Висновок.** В роботі представлена модель РЕМ з пристроєм автоматичного керування РПН, яка виконана в середовищі Matlab/Simulink. Здійснено моделювання режимів РЕМ та розраховано значення параметрів для налаштування пристрою автоматичного керування РПН: базової добавки напруги  $U_0 = 0,021 \%$  і коефіцієнту пропорційності за струмом  $K_i = 0,015 \%/A$ . Застосування закону зустрічного регулювання напруги із зазначеними параметрами дозволило забезпечити відхилення напруги на шинах НН ЦЖ від номінальної у продовж доби в межах  $-0,8 \div 1,3 \%$ .

Було визначено, що для підтримання напруги на шинах НН трансформаторів ТП в межах допустимого для нормальних режимів необхідно перемкнути відгалуження ПБЗ трансформаторів ТП на одну ступень, зменшивши напругу на стороні НН на 2,5%.

#### Перелік посилань

1. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. [Чинний від 2014-05-20]. Вид. офіц. Київ : МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ України, 2014 - 32 с.
2. Горяжа В. М. Конспект лекцій з курсу «Електрична частина станцій та підстанцій» (частина 1) (для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / В. М. Горяжа, А. О. Карюк; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 149 с.
3. Calovic, M. S. Modeling and analysis of under-load tap-changing transformer control systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (7), 1984, pp.1909-1915.
4. Грабко, В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН, 2005. – 33 с.