

В.В. ЗІНЗУРА, асистент, КНТУ, Кіровоград

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Розроблено структурну схему системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора, застосування якої дозволяє одночасно знижувати рівні відхилення та несиметрії напруги по зворотній послідовності в електричній мережі з ізольованою нейтраллю, а також досліджено якість роботи запропонованої системи шляхом математичного моделювання в середовищі Simulink.

Ключові слова: система автоматичного управління, силовий трансформатор, математичне моделювання.

Вступ. На сучасному етапі розвитку систем електропостачання досить актуальним є питання якості електроенергії (ПЯЕ). Як відомо, завищені показники якості електричної енергії, негативно впливають на роботу електричних споживачів, викликають додаткові втрати в елементах електричних мереж та ін. Існуючі методи зменшення рівнів відхилення та несиметрії напруги не завжди є ефективними з точки зору техніко-економічних показників.

Постановка задачі. Задача розробки нових методів та засобів зниження рівня цих ПЯЕ які, з одного боку, були б досить ефективними, а з іншого – не вимагали б значних капіталовкладень є досить актуальною. Одним із шляхів вирішення даної задачі є удосконалення систем автоматичного управління (САУ) пристроєм РПН силового трансформатора.

Аналіз публікацій. В роботі [1] запропоновано математичну модель управління безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора, в основу якої покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації. В роботі [2] проведено розробку методу розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричній мережі з ізольованою нейтраллю. Проте, для визначення ефективності даного методу зниження рівнів відхилення та несиметрії напруги в електричних мережах необхідно на основі запропонованої в [1] математичної моделі управління провести розробку структурної схеми САУ пристроєм РПН, а також дослідити якість роботи розробленої САУ.

© Зінзура В.В., 2012

Мета статті. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора, що забезпечує одночасне зниження рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруги по зворотній послідовності в мережі з ізольованою нейтраллю.

Основна частина. В роботі [1] сформульовано математичну модель управління безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора, що працює в мережі з ізольованою нейтраллю:

$$\begin{cases} Q_1(\mathbf{K}) = |\Delta U_1(\mathbf{K})| = |U_1(\mathbf{K}) - U_{ном}| \rightarrow \min; \\ Q_2(\mathbf{K}) = U_2(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega; \end{cases} \quad (1)$$

де $\mathbf{Q}(\mathbf{K}) = (Q_1(\mathbf{K}), Q_2(\mathbf{K}), Q_3(\mathbf{K}))$ – вектор критеріїв управління; $\mathbf{K} = (k_A, k_B, k_C)$ – вектор коефіцієнтів трансформації трансформатора у фазах А, В, С (вектор управління); $U_1(\mathbf{K})$ – напруга прямої послідовності; $\Delta U_1(\mathbf{K})$ – різниця значень модуля напруги прямої послідовності та номінальної напруги (пропорційний відхиленню напруги); $U_{ном}$ – номінальна напруга мережі ($U_{ном} = 1$); $U_2(\mathbf{K})$ – напруга зворотної послідовності; $\Omega = \{\mathbf{K} \in \mathbb{R}^3 \mid k_{i \min} \leq k_i \leq k_{i \max}, i = A, B, C\}$ – область допустимих значень \mathbf{K} , яка визначається глибиною регулювання коефіцієнта трансформації (допустимий простір управління); $k_{i \min}, k_{i \max}, i = A, B, C$ – відповідно мінімальне та максимальне значення коефіцієнту трансформації для кожної з фаз.

Значення напруг та значення коефіцієнтів трансформації в рівняння (1) підставляються у відносних одиницях, віднесених до номінальних значень.

Як показано в роботі [2], найбільш доцільним способом розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1) є розв'язок її шляхом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв, який проводиться в два етапи:

1 етап. Оптимізацією окремих критеріїв визначаються координати утопічної точки $Q_{ym} = (\Delta U_{1ym}, U_{2ym})$ в просторі критеріїв $\{Q\} \subset \mathbb{R}^2$.

2 етап. Шляхом розв'язку задачі скалярної оптимізації відстані ρ від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації \mathbf{K}^* в просторі управління $\Omega \subset \mathbb{R}^3$.

Задача знаходження аналітичних виразів для визначення координат утопічної точки Q_{ym} детально описана в роботі [1], тому наведемо

лише кінцеві вирази для знаходження її розв'язку.

Вираз для знаходження ΔU_{Iym} :

$$\Delta U_{Iym} = \begin{cases} 0, \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) \neq \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}); \\ |\Delta U_1(\mathbf{K}_{\min})|, \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) = \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}) = -1; \\ |\Delta U_1(\mathbf{K}_{\max})|, \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) = \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}) = 1; \end{cases} \quad (2)$$

де $\mathbf{K}_{\min} = (k_{A \min}, k_{B \min}, k_{C \min})$, $\mathbf{K}_{\max} = (k_{A \max}, k_{B \max}, k_{C \max})$ – вектори мінімальних і максимальних коефіцієнтів трансформації трансформатора; ΔU_1 – відхилення напруги прямої послідовності.

Вираз для знаходження U_{2ym} :

$$U_{2ym} = \begin{cases} U_2 [\Phi_{2A}(k_{B \min}, k_{C \max}), k_{B \min}, k_{C \max}], (k_{B2} < k_{B \min}) \wedge \\ \wedge \{[(k_{A2} < k_{A \min}) \wedge (\xi_2 \leq 1)] \vee (k_{A \min} \leq k_{A2} \leq k_{A \max})\}; \\ U_2 [\Phi_{2A}(k_{B \max}, k_{C \min}), k_{B \max}, k_{C \min}], (k_{B1} > k_{B \max}) \wedge \\ \wedge \{[(k_{A1} > k_{A \max}) \wedge (\xi_2 > 1)] \vee (k_{A \min} \leq k_{A1} \leq k_{A \max})\}; \\ U_2 [k_{A \min}, \Phi_{2B}(k_{A \min}, k_{C \max}), k_{C \max}], (k_{A2} < k_{A \min}) \wedge \\ \wedge \{[(k_{B2} < k_{B \min}) \wedge (\xi_2 > 1)] \vee (k_{B \min} \leq k_{B2} \leq k_{B \max})\}; \\ U_2 [k_{A \max}, \Phi_{2B}(k_{A \max}, k_{C \min}), k_{C \min}], (k_{A1} > k_{A \max}) \wedge \\ \wedge \{[(k_{B1} > k_{B \max}) \wedge (\xi_2 \leq 1)] \vee (k_{B \min} \leq k_{B1} \leq k_{B \max})\}; \\ U_2 [k_{A \min}, k_{B \max}, \Phi_{2C}(k_{A \min}, k_{B \max})], \left(\xi_2 > \frac{k_{B \max}}{k_{A \min}}\right) \wedge \\ \wedge \neg [(k_{B2} < k_{B \max}) \vee (k_{A1} > k_{A \min})]; \\ U_2 [k_{A \max}, k_{B \min}, \Phi_{2C}(k_{A \max}, k_{B \min})], \left(\xi_2 < \frac{k_{B \min}}{k_{A \max}}\right) \wedge \\ \wedge \neg [(k_{A2} < k_{A \max}) \vee (k_{B1} > k_{B \min})]; \\ 0, \left(\frac{k_{B \min}}{k_{A \max}} \leq \xi_2 \leq \frac{k_{B \max}}{k_{A \min}}\right) \wedge \neg \{[(k_{A2} < k_{A \min}) \wedge (k_{B2} < k_{B \max})] \vee \\ \vee [(k_{A1} > k_{A \min}) \wedge (k_{B1} > k_{B \max})] \vee [(k_{A2} < k_{A \max}) \wedge \\ \wedge (k_{B2} < k_{B \min})] \vee [(k_{A1} > k_{A \max}) \wedge (k_{B1} > k_{B \min})]\} \end{cases} \quad (3)$$

де $U_{Aa}, U_{Ap}, U_{Ba}, U_{Bp}, U_{Ca}, U_{Cp}$ – активні та реактивні складові векторів напруг $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ відповідно; $\Phi_{2A}(k_B, k_C), \Phi_{2B}(k_A, k_C), \Phi_{2C}(k_A, k_B)$ – розв'язки рівнянь $\partial U_2(\mathbf{K})/\partial k_A = 0, \partial U_2(\mathbf{K})/\partial k_B = 0, \partial U_2(\mathbf{K})/\partial k_C = 0$ відповідно; ξ_2 – постійний коефіцієнт; $k_{A1}, k_{B1}, k_{A2}, k_{B2}$ – значення коефіцієнтів трансформації, отримані в результаті підстановки в рівняння системи (4) значень $k_{C \min}, k_{C \max}$ відповідно;

$$\left\{ \begin{array}{l} k_A = \frac{U_{Aa}U_{Ba} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ba} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Bp} + U_{Ap}U_{Bp}}{U_{Ba}U_{Ca} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Bp}U_{Ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ba}U_{Cp} + U_{Bp}U_{Cp}} k_C; \\ k_B = \frac{U_{Aa}U_{Ba} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ba} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Bp} + U_{Ap}U_{Bp}}{U_{Aa}U_{Ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ca} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Cp} + U_{Ap}U_{Cp}} k_C. \end{array} \right. \quad (4)$$

Метод знаходження кінцевого розв'язку задачі (1) описаний в роботі [2]:

$$\mathbf{K}^{opt} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{K}^{opt1}, (\Delta U_{Iym} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} \leq U_{2no}) \wedge \\ \wedge (\Delta U_I^{opt1} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_2^{opt1} \leq U_{2no}); \\ \mathbf{K}^{opt2}, (\Delta U_{Iym} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} > U_{2no}) \wedge (\Delta U_I^{opt2} \leq \Delta U_{Ino}); \\ \mathbf{K}^{opt3}, (\Delta U_{Iym} > \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} \leq U_{2no}) \wedge (U_2^{opt3} \leq U_{2no}); \\ \mathbf{K}^{evk}, [(\Delta U_{Iym} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} \leq U_{2no}) \wedge (\Delta U_I^{opt1} > \Delta U_{Ino}) \wedge \\ \wedge (U_2^{opt1} > U_{2no})] \vee [(\Delta U_{Iym} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} > U_{2no}) \wedge \\ \wedge (\Delta U_I^{opt2} > \Delta U_{Ino})] \vee [(\Delta U_{Iym} > \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} \leq U_{2no}) \wedge \\ \wedge (U_2^{opt3} > U_{2no})] \vee [(\Delta U_{Iym} > \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} > U_{2no})]. \end{array} \right. \quad (5)$$

де \mathbf{K}^{opt} – розв'язок задачі (5); \mathbf{K}^{optj} – розв'язок задачі (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \left\{ \mu_1^{(j)} \left| \frac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{Iym}}{\Delta U_{Iнд}} \right|, \mu_2^{(j)} \left| \frac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2ym}}{U_{2нд}} \right| \right\} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{array} \right. \quad (6)$$

при $j = 1$: $\mu_1^{(1)} = \alpha_1 / (\alpha_1 + \alpha_2)$, $\mu_2^{(1)} = \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)$; при $j = 2$:
 $\mu_1^{(2)} = 0$, $\mu_2^{(2)} = 1$; при $j = 3$: $\mu_1^{(3)} = 1$, $\mu_2^{(3)} = 0$;
 $\alpha_1 = |\Delta U_{Iнд} / (\Delta U_{Iнд} - \Delta U_{Iym})|$, $\alpha_2 = |U_{2нд} / (U_{2нд} - U_{2ym})|$;

$Q^{opti}(\Delta U_I^{opti}, U_2^{opti})$ – точка в просторі критеріїв з координатами $\Delta U_1(\mathbf{K}^{opti})$ та $U_2(\mathbf{K}^{opti})$; \mathbf{K}^{evk} – розв'язок задачі (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\left(\frac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{Iym}}{\Delta U_{Iнд}} \right)^2 + \left(\frac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2ym}}{U_{2нд}} \right)^2} \rightarrow \min. \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{array} \right. \quad (7)$$

Задачі (6), (7) – це задачі скалярної оптимізації функції багатьох змінних, для їх вирішення необхідно скористатись одним із чисельних методів.

Структурна схема САУ, що реалізує математичну модель управління (1) представлена на рис. 1.

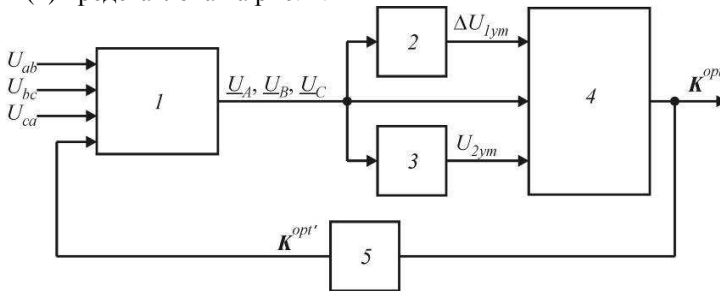


Рис. 1. Структурна схема САУ пристроєм РПН силового трансформатора

На рис. 1: 1 – блок розрахунку комплексів напруг \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C на стороні високої напруги (ВН) по відомим діючим значенням міжфазних напруг U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} на стороні низької напруги (НН) та значенню \mathbf{K}^{opt} на попередньому кроці розрахунку (для трансформатора із схемою з'єднання обмоток "зірка/трикутник"); 2 – блок визначення

ΔU_{Iym} згідно формул (2); 3 – блок визначення U_{2ym} згідно формул (3); 4 – блок визначення кінцевого розв'язку згідно формул (5); 5 – блок затримки сигналу на один крок розрахунку.

САУ, структурна схема якої зображена на рис. 1, працює наступним чином. Виміряні діючі значення U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} міжфазних напруг на стороні низької напруги силового трансформатора разом із значенням коефіцієнтів трансформації K^{opt} , прийнятих на попередньому кроці розрахунку надходять до блоку 1, в якому відбувається розрахунок комплексів напруг \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C на стороні ВН силового трансформатора. Далі значення \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C надходять до блоків 2 і 3, в яких відбувається розрахунок ΔU_{Iym} і U_{2ym} відповідно. Після чого дані з блоків 1, 2, 3 надходять до блоку 4, в якому визначається кінцевий розв'язок задачі (1) K^{opt} . Значення вектора K^{opt} з блоку 4 надходить до керуючого органу РПН, який виконує перемикання відпайок обмоток трансформатора, а також блоку затримки сигналу 5, з якого на наступному кроці розрахунку надходить до блоку 1. Розрахунок K^{opt} проводиться в дискретні моменти часу, проміжки між якими обмежуються лише часом перехідного процесу в мережі.

Для дослідження якості роботи запропонованої САУ було проведено математичне моделювання в середовищі Simulink. Узагальнена модель Simulink регулювання напруги приведена на рис. 2.

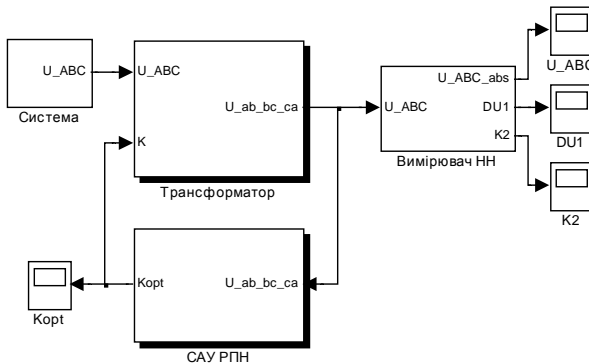


Рис. 2. Модель Simulink системи регулювання напруги

На рис. 2: "Трансформатор" – модель силового трансформатора

ТМН-400/35, оснащеного безконтактним пристроєм РПН з діапазоном регулювання напруги $\pm 6 \times 1,5 \%$; "Вимірювач НН" – модель вимірювача діючих значень напруг U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , відхилення напруги δU_1 та коефіцієнту несиметрії напруги по зворотній послідовності K_2 на стороні НН силового трансформатора; "Система" – модель електричної системи; в якості вихідних даних для моделювання були взяті реальні часові діаграми діючих значень міжфазних напруг, що були виміряні протягом доби на одній із підстанцій ПАТ "Кіровоградобленерго" з допомогою сертифікованого аналізатора мережі FLUKE 1744 Метобокс; "САУ РПН" – модель САУ пристроєм РПН.

Модель блоку "САУ РПН" приведена на рис. 3, на якому: "Subsystem" – блок визначення векторів \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C по значенням U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , K^{opt} (відповідає блоку 1 на рис. 1); "DUut" – блок визначення ΔU_{1ym} (блок 2 на рис. 1); і "U2ut" – блок визначення U_{2ym} (блок 3 на рис. 1); "Optimization" – блок визначення K^{opt} (блок 4 на рис. 1); "Transport Delay" – блок затримки сигналу на 1 крок розрахунку (блок 5 на рис. 1); "Kmin", "Kmax" – блоки, що задають мінімальне та максимальне значень коефіцієнтів трансформації.

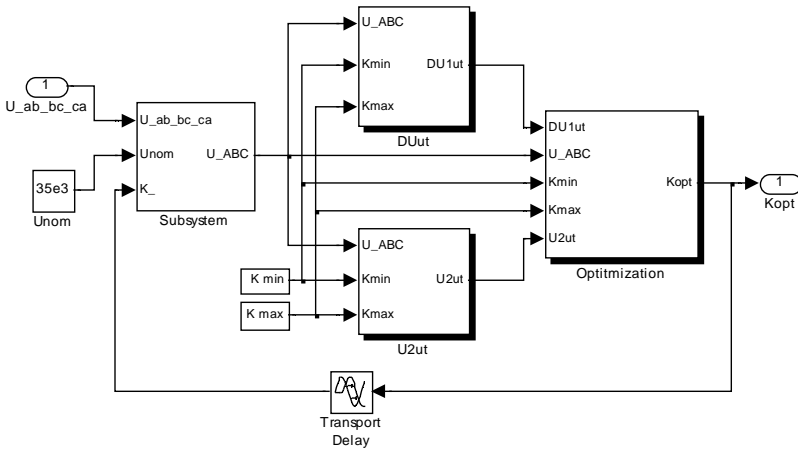


Рис. 3. Модель Simulink САУ РПН силового трансформатора

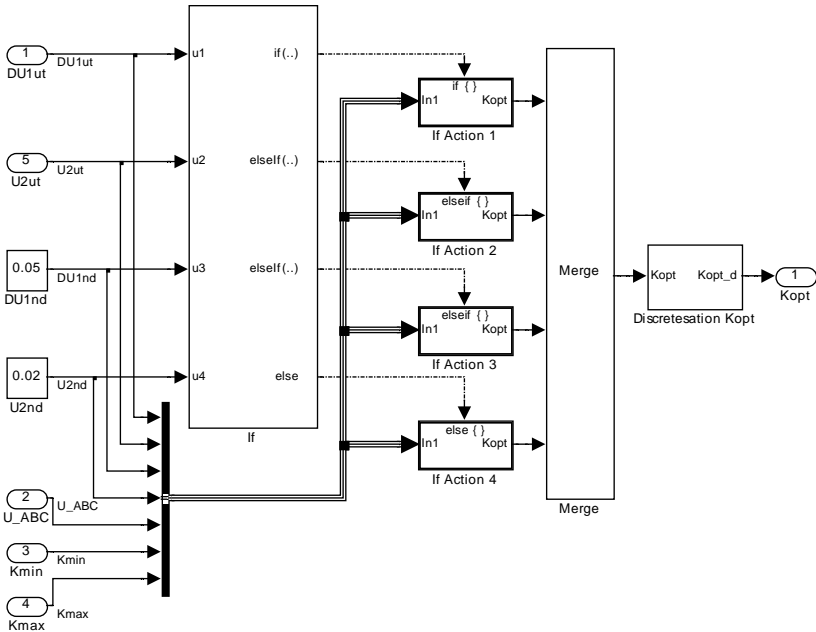


Рис. 4. Модель Simulink САУ пристроєм РПН силового трансформатора

Модель блоку "Optimization" приведена на рис. 4, на якому: "DU1nd", "K2nd" – блоки, що задають нормально допустимі значення δU_1 та K_2 відповідно; "Discretisation Kopt" – блок дискретизації значень коефіцієнтів трансформації трансформатора; блоки "If", "If Action 1"... "If Action 4", "Merge" реалізують умовний оператор.

На рис. 5 наведено графіки зміни δU_1 та K_2 на стороні ВН силового трансформатора. Як можна бачити, значення відхилення напруги досить тривалий проміжок часу перевищують нормально допустимі межі $\delta U_{1нд} = \pm 5\%$; значення K_2 також практично весь період спостереження лежать за межами нормально допустимого значення $K_{2нд} = 2\%$.

На рис. 6 наведено графіки зміни δU_1 та K_2 при використанні класичної САУ пристроєм РПН силового трансформатора. З рис. 6 видно, що хоча значення δU_1 і не виходять за межі $\delta U_{1нд}$, значення K_2 залишилися на тому ж рівні, що і на стороні ВН.

На рис. 7 наведено графіки зміни δU_1 та K_2 при використанні за-

пропонованої САУ пристроєм РПН. Як видно з рис. 7, як значення δU_1 , так і значення K_2 не перевищують нормально допустимих меж.

Статистичні показники δU_1 та K_2 для описаних вище трьох варіантів моделювання, наведені в таблиці.

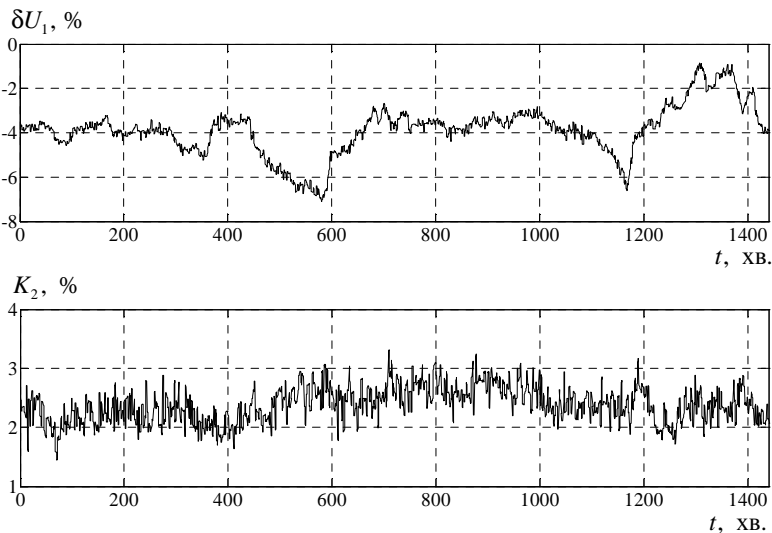


Рис. 5. Графіки зміни $\delta U_1, K_2$ без регулювання напруги

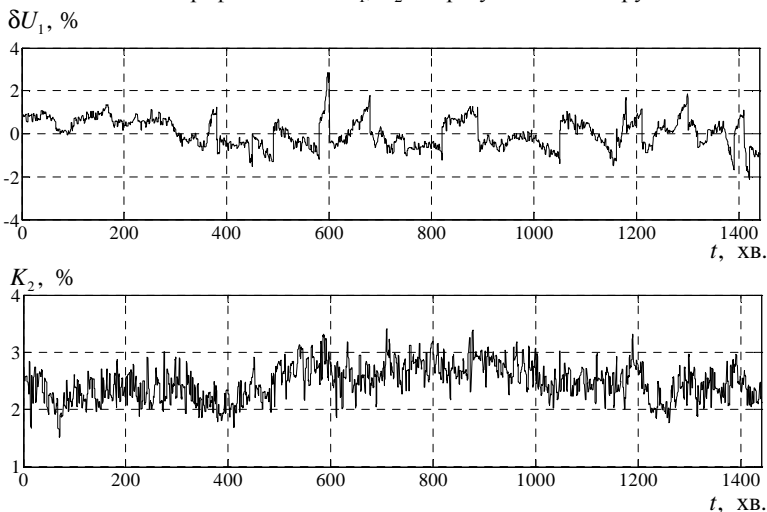


Рис. 6. Графіки зміни $\delta U_1, K_2$ при класичному регулюванні напруги

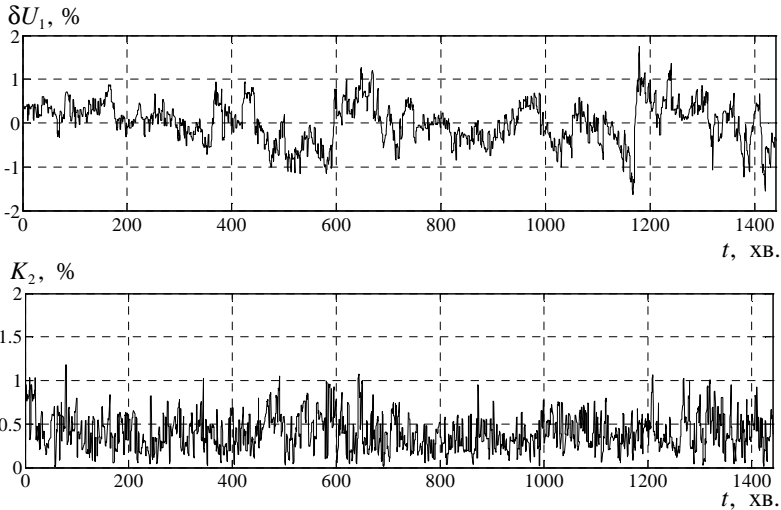


Рис. 7. Графіки зміни δU_1 , K_2 при оптимальному регулюванні напруги

Таблиця – Статистичні показники δU_1 та K_2 .

№ з/п	Показник якості електроенергії	Математичне очікування, M , %	Середньоквадратичне відхилення, σ^2 , %	Інтегральна ймовірність, P , %
Сторона ВН силового трансформатора				
1.	δU_1	-3,88	1,10	87,0
2.	K_2	2,38	0,30	11,2
Сторона НН силового трансформатора (класичне регулювання)				
3.	δU_1	0,04	0,67	100
4.	K_2	2,44	0,32	5,9
Сторона НН силового трансформатора (оптимальне регулювання)				
5.	δU_1	0,004	0,46	100
6.	K_2	0,40	0,21	100

Висновки. На основі математичної моделі управління пристроєм РПН силового трансформатора, в основу роботи якої покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації, розроблено структурну схему САУ, досліджено якість її роботи шляхом математичного моделювання в середовищі Simulink. Результати математичного моделювання показали, що запропонована САУ пристроєм РПН силового трансформатора має перевагу над класичною САУ РПН за рахунок зниження не лише рівня відхилення напруги δU_1 , а й рівня несиметрії напруги по зворотній послідовності K_2 .

Список літератури: 1. Плесков П.Г. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм / П.Г. Плесков, В.В. Зінзура, М.В. Кубкін // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 24. – Ч. 2. – Кіровоград: КНТУ, 2011. – С. 164-173. **2.** Зінзура В.В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 25.Ч.1. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 350-360.



Зінзура Василь Васильович. Захистив диплом магістра в Кіровоградському державному технічному університеті у 2008 р. за спеціальністю “Електротехнічні системи електроспоживання”. З цього ж року навчається в аспірантурі КНТУ. Асистент кафедри “Електротехнічні системи” Кіровоградського національного технічного університету з 2011 р.
Наукові інтереси пов'язані з проблемами регулювання напруги та зменшення втрат в електричних мережах.

Надійшла до редколегії 27.09.2012

УДК 621.316.1

Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора / Зінзура В.В. // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2012. – № 49 (955). – С. 99-109. Бібліогр.: 2 назв.

Разработана структурная схема системы автоматического управления устройством РПН силового трансформатора, использование которой позволяет одновременно снижать уровни отклонения и несимметрии напряжения по обратной последовательности в электрической сети с изолированной нейтралью, а так же исследовано качество работы предложенной системы путем математического моделирования в среде Simulink.

Ключевые слова: система автоматического управления, силовой трансформатора, математическое моделирование.

A block diagram of the automatic control system for the OLTC of the power transformer, the use of which permits to simultaneously reduce levels of deviation and voltage unbalance on the reverse sequence in the electrical network with isolated neutral is developed. It was also investigated the quality of the proposed system by mathematical simulation in Simulink.

Keywords: automatic control system, power transformer, mathematical modeling.