

УДК 621.316.1

П. Г. Плешков, доц., канд. техн. наук, В. В. Зінзура, асист.
Кіровоградський національний технічний університет

Розробка та експериментальне дослідження роботи мікропроцесорної системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора

Для сучасних систем електропостачання особливо актуальним постає питання покращення якості електричної енергії. Існуючі методи та технічні засоби зниження рівнів показників якості електричної енергії в електричних мережах хоча і є досить ефективними, проте вимагають значних капіталовкладень, що стримує їх широке розповсюдження. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є удосконалення систем автоматичного управління технічних засобів регулювання напруги. Стаття присвячена розробці алгоритму роботи блоку управління пристроєм регулювання напруги під навантаженням силового трансформатора із схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем», розробці принципових електричних схем блоку управління та експериментального стенду, розробці макету пристрою. Проведено експериментальне дослідження якості роботи системи автоматичного регулювання напруги. Результати експериментальних досліджень показали, що при застосуванні запропонованого пристрою регулювання напруги спостерігається зниження рівнів показників якості електричної енергії (усталеного відхилення напруги, коефіцієнтів несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовностях) до значень, що не перевищують нормально допустимі.

багатокритеріальна оптимізація, безконтактний пристрій РПН

П. Г. Плешков, доц., канд. техн. наук, В. В. Зінзура, асист.
Кіровоградский национальный технический университет

Разработка и экспериментальное исследование работы микропроцессорной системы автоматического управления устройством РПН силового трансформатора

Для современных систем электроснабжения, особенно актуальным становится вопрос улучшения качества электрической энергии. Существующие методы и технические средства снижения уровней показателей качества электрической энергии в электрических сетях хоть и являются достаточно эффективными, но требуют значительных капитальных вложений, что сдерживает их широкое распространение. Один из путей решения данной проблемы – это усовершенствование систем автоматического управления технических средств регулирования напряжения. Статья посвящена разработке алгоритму работы блока управления устройством регулирования напряжения под нагрузкой силового трансформатора со схемой соединения обмоток «треугольник/звезда с нулем», разработке принципиальных электрических схем блока управления и экспериментального стенда, разработке макета устройства. Проведено экспериментальное исследование качества работы системы автоматического регулирования напряжения. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение предложенного устройства регулирования напряжения наблюдается снижение уровней показателей качества электрической энергии (установившегося отклонения напряжения, коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям) до значений, которые не превышают нормально допустимые.

многокритеріальна оптимізація, бесконтактное устройство РПН

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Для сучасних систем електропостачання важливим є питання зниження рівнів показників якості електричної енергії (ПЯЕ), що характеризують відхилення та несиметрію напруг. 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 регулювання напруги під навантаженням (РПН) силових трансформаторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Задача удосконалення САУ пристроєм РПН силового трансформатора з метою одночасного зменшення рівнів відхилення та несиметрії напруг розглядалась в [1, 2, 3, 4, 5]. В роботі [3] запропоновано математичну модель управління безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем» на основі математичного апарату багатокритеріальної оптимізації. В роботі [2] запропоновано метод розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги. Проте, для визначення ефективності даного методу розв'язку необхідно на основі запропонованої в [3] математичної моделі управління розробити структурну схему САУ пристроєм РПН та дослідити якість її роботи.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка алгоритму роботи та експериментальне дослідження роботи мікропроцесорної САУ пристроєм РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем».

Викладення матеріалу та результати. В роботі [3] сформульовано задачу багатокритеріальної оптимізації управління безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем»:

$$\begin{cases} Q_1(\mathbf{K}) = |\Delta U_1(\mathbf{K})| = |U_1(\mathbf{K}) - U_{\text{ном}}| \rightarrow \min; \\ Q_2(\mathbf{K}) = U_2(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ Q_3(\mathbf{K}) = U_0(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ Q_4(\mathbf{K}) = |\Delta U_{A\phi}(\mathbf{K})| = |U_{A\phi}(\mathbf{K}) - U_{\phi, \text{ном}}| \rightarrow \min; \\ Q_5(\mathbf{K}) = |\Delta U_{B\phi}(\mathbf{K})| = |U_{B\phi}(\mathbf{K}) - U_{\phi, \text{ном}}| \rightarrow \min; \\ Q_6(\mathbf{K}) = |\Delta U_{C\phi}(\mathbf{K})| = |U_{C\phi}(\mathbf{K}) - U_{\phi, \text{ном}}| \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega; \end{cases} \quad (1)$$

де $\mathbf{Q}(\mathbf{K}) = (Q_1(\mathbf{K}), Q_2(\mathbf{K}), Q_3(\mathbf{K}), Q_4(\mathbf{K}), Q_5(\mathbf{K}), Q_6(\mathbf{K}))$ – вектор критеріїв управління; $\mathbf{K} = (k_a, k_b, k_c)$ – вектор коефіцієнтів трансформації трансформатора у фазах А, В, С (вектор управління); $\Delta U_1(\mathbf{K})$ – різниця значень модуля напруги прямої послідовності та номінальної напруги (пропорційний відхиленню напруги); $U_2(\mathbf{K})$ – напруга зворотної послідовності; $U_0(\mathbf{K})$ – напруга нульової послідовності; $\Delta U_{A\phi}(\mathbf{K})$, $\Delta U_{B\phi}(\mathbf{K})$, $\Delta U_{C\phi}(\mathbf{K})$ – різниця значень модулів фазних напруг у фазах А, В, С та номінальної фазної напруги; $\Omega = \{\mathbf{K} \in \mathbb{R}^6 | k_{i \min} \leq k_i \leq k_{i \max}, i = a, b, c\}$ – область допустимих значень вектора коефіцієнтів трансформації трансформатора, 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 трансформатора 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. Методика розв'язку задачі (1), заснована на запропонованому методі, містить два етапи розв'язку задачі:

1 етап. Оптимізацією окремих критеріїв визначаються координати утопічної точки $Q_{yt} = (\Delta U_{1yt}, U_{2yt}, U_{0yt}, \Delta U_{Ayt}, \Delta U_{Byt}, \Delta U_{Cyt})$ в просторі критеріїв $\{Q\} \subset R^6$.

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 K^{opt} в просторі управління $\Omega \subset R^6$.

Задача знаходження аналітичних виразів для визначення координат утопічної точки $Q_{yt} = (\Delta U_{1yt}, U_{2yt}, U_{0yt}, \Delta U_{Ayt}, \Delta U_{Byt}, \Delta U_{Cyt})$ детально описана в роботах [1, 3].

Для знаходження кінцевого розв'язку задачі (1) зважаючи на велику кількість критеріїв, найдоцільніше скористатись методом, заснованим на мінімізації евклідової відстані до утопічної точки. Для задачі (1) даний метод знаходження кінцевого розв'язку можна записати у вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned} & \sqrt{\left(\frac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{1yt}}{\Delta U_{1нд}}\right)^2 + \left(\frac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2yt}}{U_{2нд}}\right)^2 + \left(\frac{U_0(\mathbf{K}) - U_{0yt}}{U_{0нд}}\right)^2} + \\ & \sqrt{\left(\frac{\Delta U_a(\mathbf{K}) - \Delta U_{ayt}}{\Delta U_{ф.нд}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_b(\mathbf{K}) - \Delta U_{byt}}{\Delta U_{ф.нд}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_c(\mathbf{K}) - \Delta U_{cyt}}{\Delta U_{ф.нд}}\right)^2} \rightarrow \min; \quad (2) \\ & \mathbf{K} \in \Omega. \end{aligned} \right.$$

де $\Delta U_{1нд}, U_{2нд}, U_{0нд}, \Delta U_{ф.нд}$ – нормально допустимі значення відповідних ПЯЕ згідно ГОСТ 13109-97.

Узагальнена структурна схема САУ пристроєм РПН силового трансформатора, що працює електричній мережі з глухозаземленою нейтраллю наведена на рис. 1.

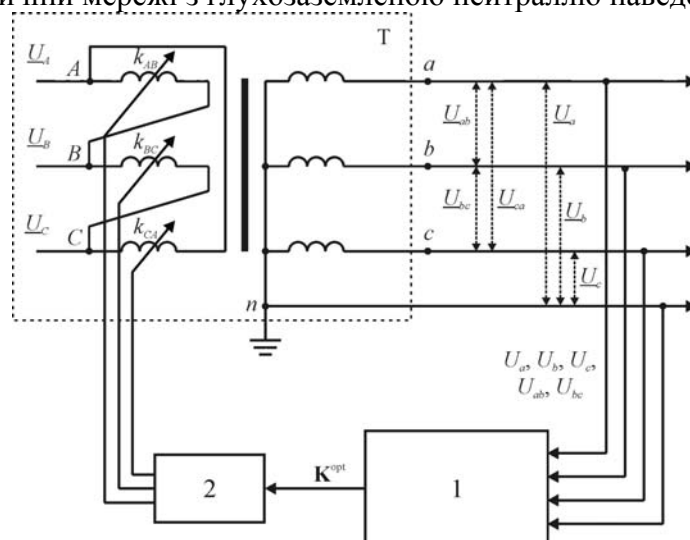


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема регулювання напруги в електричній мережі з глухозаземленою нейтраллю

На рис. 1: Т – силовий трансформатор; 1 – блок управління пристроєм РПН силового трансформатора, в основу роботи якого покладено алгоритм знаходження розв'язку задачі (1); 2 – система управління напівпровідниковими ключами пристрою РПН силового трансформатора.

Для проведення експериментального дослідження якості роботи запропонованої САУ, необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробка алгоритму роботи запропонованого регулятора напруги, в основу якого покладена методика розв'язку задачі (1).
2. Розробка принципової схеми регулятора напруги, розробка макету пристрою.
3. Розробка лабораторного стенду та проведення експериментальних досліджень.

Алгоритм роботи регулятора напруги, в основу якого покладено методику розв'язку задачі (1) представлений у вигляді блок-схеми на рис. 1.

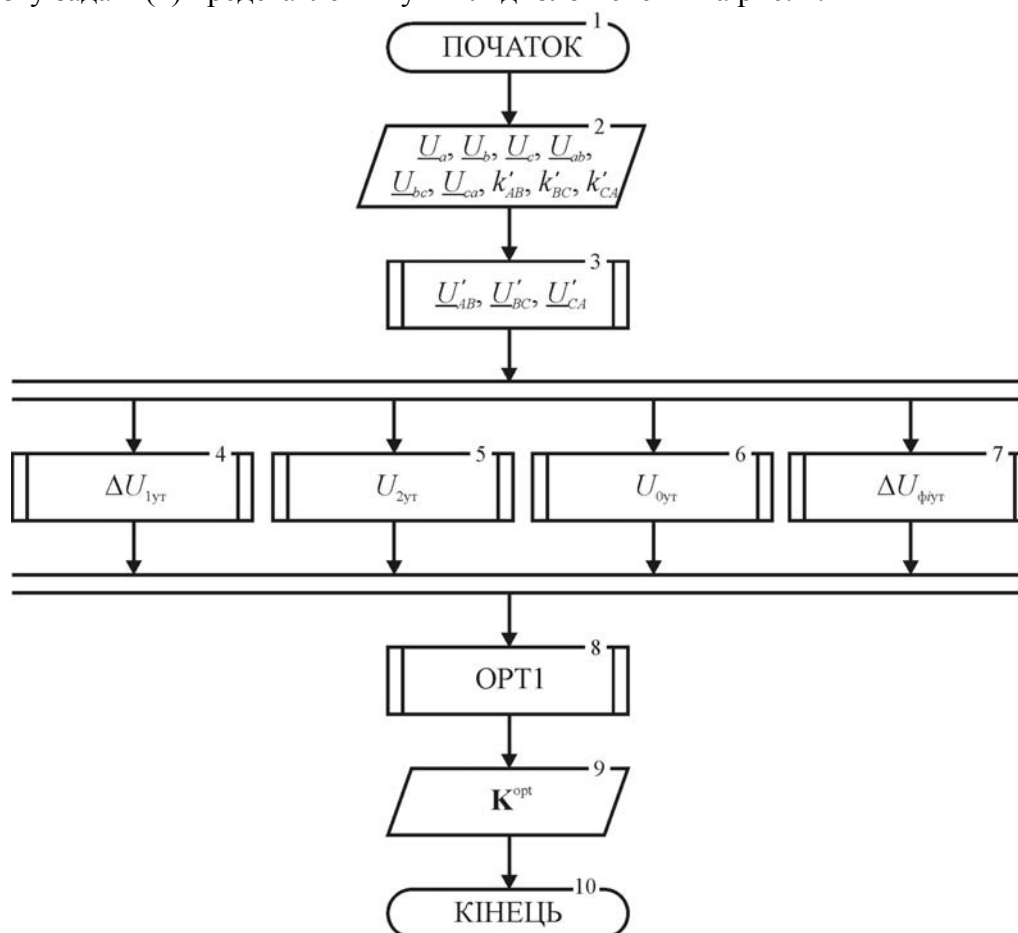


Рисунок 2 – Алгоритм роботи САУ пристроєм РПН силового трансформатора

Алгоритм роботи регулятора напруги, блок-схема якого зображена на рис. 2 полягає в наступному:

1. Вимірюються діючі значення фазних U_a, U_b, U_c та міжфазних U_{ab}, U_{bc} напруг на стороні НН силового трансформатора (блок 2).
2. Виміряні діючі значення фазних U_a, U_b, U_c та міжфазних U_{ab}, U_{bc} напруг на стороні НН силового трансформатора разом із значенням коефіцієнтів трансформації $\mathbf{K}^{\text{opt}} = (k'_{AB}, k'_{BC}, k'_{CA})$, прийнятих на попередньому кроці розрахунку надходить до блоку

3, в якому відбувається розрахунок комплексів напруг \underline{U}'_{AB} , \underline{U}'_{BC} , \underline{U}'_{CA} на стороні ВН силового трансформатора.

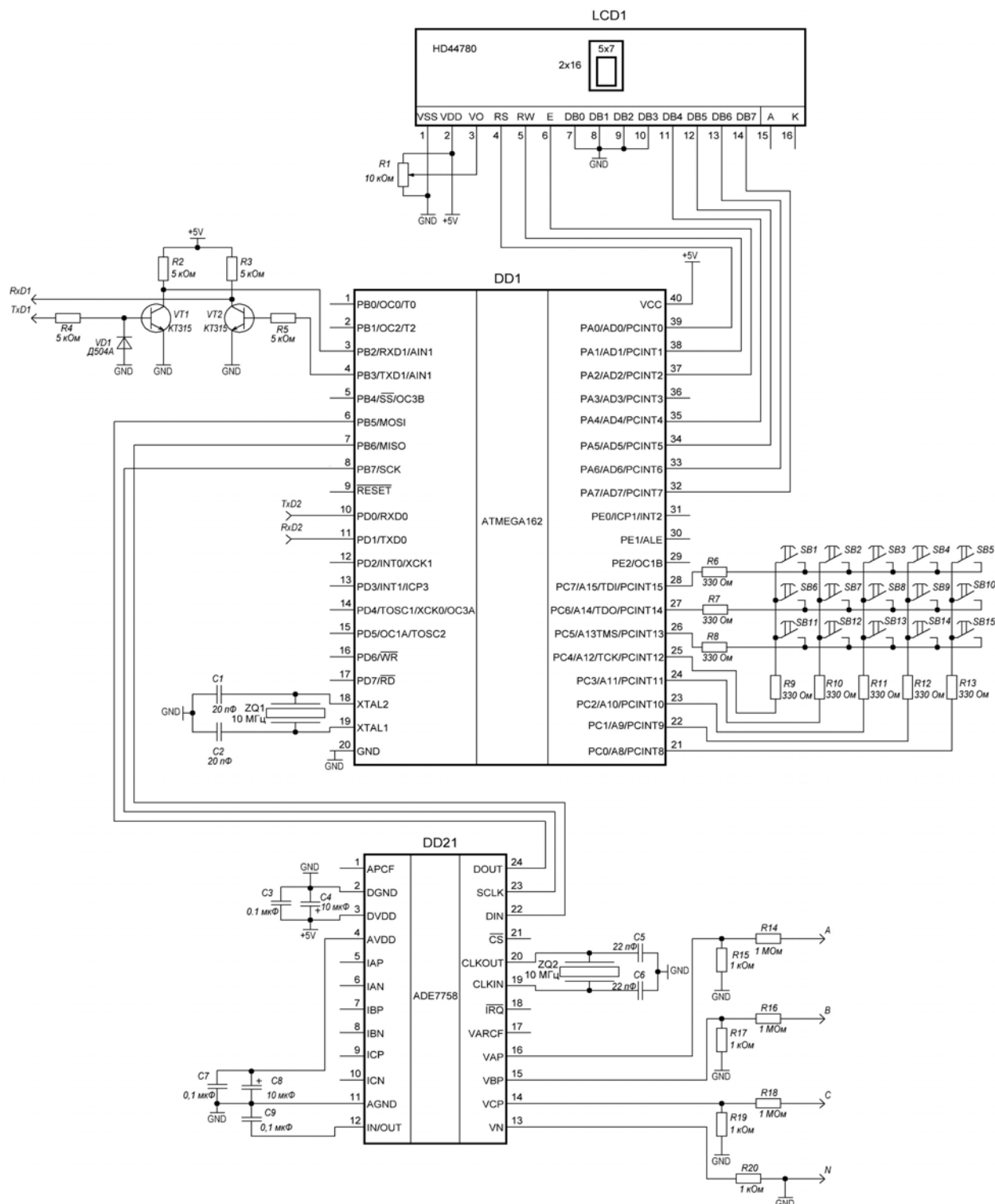


Рисунок 3 – Принципова електрична схема блоку управління пристроєм РПН силового трансформатора

3. Розраховані значення \underline{U}'_{AB} , \underline{U}'_{BC} , \underline{U}'_{CA} надходять до блоків 4, 5, 6, 7 в яких відбувається розрахунок $\Delta U_{1\text{yT}}$, $U_{2\text{yT}}$, $U_{0\text{yT}}$ і $\Delta U_{\text{фiYT}}$ відповідно.

4. Розраховані в блоках 4, 5, 6, 7 значення $\Delta U_{1ут}$, $U_{2ут}$, $U_{0ут}$ і $\Delta U_{фiут}$ разом надходять до блоку 8, в якому визначається кінцевий розв'язок \mathbf{K}^{opt} задачі (1) згідно виразу (2). Розрахунок \mathbf{K}^{opt} проводиться в дискретні моменти часу, проміжки між якими обмежуються лише часом перехідного процесу в мережі.

Принципова електрична схема блоку управління пристроєм РПН силового трансформатора, в основу роботи якого покладено описаний вище алгоритм керування, зображена на рис. 3.

Основний елемент блоку управління, схема якого зображена на рис. 3 – мікроконтроллер (МК) Atmega162. Atmega162 – економічний 8-розрядний МК, що заснований на посиленій AVR RISC архітектурі.

Для вимірювання діючих значень фазних та міжфазних напруг було використано мікросхему трьохфазного високоточного вимірювача параметрів електричної мережі ADE7758. Мікросхема ADE7758 містить високоточні АЦП, цифровий інтегратор, послідовний порт SPI, та може виконувати обробку сигналу, необхідну для вимірювання активної, реактивної і повної енергії і розрахунку діючих значень струмів та напруг. Похибка вимірювання діючого значення напруги складає 0,5 %.

Обмін даними між Atmega162 та ADE7758 відбувається за допомогою послідовного порту SPI. Для індикації даних було використано рідкокристалічний екран WH1602B.

Зовнішній вигляд макету блоку управління пристроєм РПН силового трансформатора наведено на рис. 4.

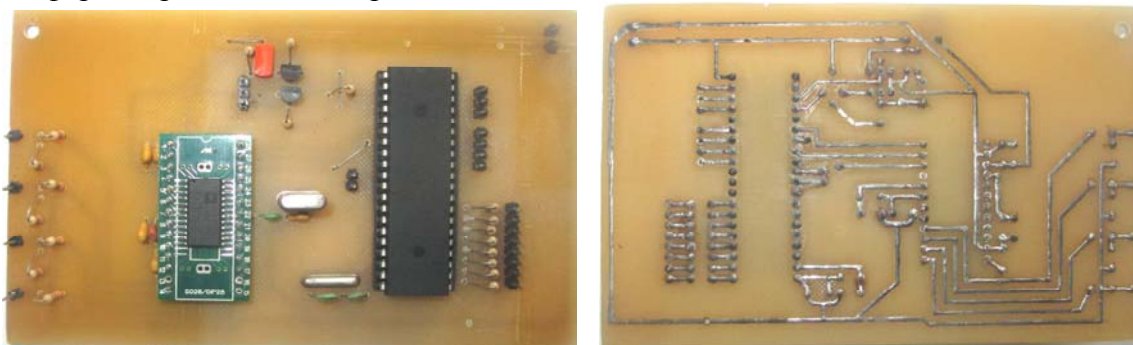


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд макету блоку управління пристроєм РПН

Для експериментального дослідження якості роботи запропонованої САУ пристроєм РПН було розроблено лабораторний стенд. Принципова схема лабораторного стенду зображена на рис. 5.

На рис. 5.: R_2 , R_4 , R_6 – змінні активні опори, що моделюють опір енергосистеми; Т1 – силовий трансформатор потужністю $S_{ном} = 3$ кВА, номінальною напругою обмоток НН і ВН $U_{ном} = 380$ В (коефіцієнт трансформації трансформатора $k_t = 1$), схема з'єднання обмоток – «трикутник/зірка з нулем»; R_1 , R_3 , R_5 , L_1 , L_2 , L_3 – активні опори та індуктивності, що моделюють активно-індуктивне навантаження трансформатора.

Принципова схема безконтактного пристрою РПН силового трансформатора зображена на рис. 6. В якості силових ключів в даній схемі було використано симістори BT139. Для управління симісторними ключами було застосовано МК Atmega8; передача даних від керуючого МК блоку управління до МК безконтактного РПН здійснюється за допомогою УСАПП.

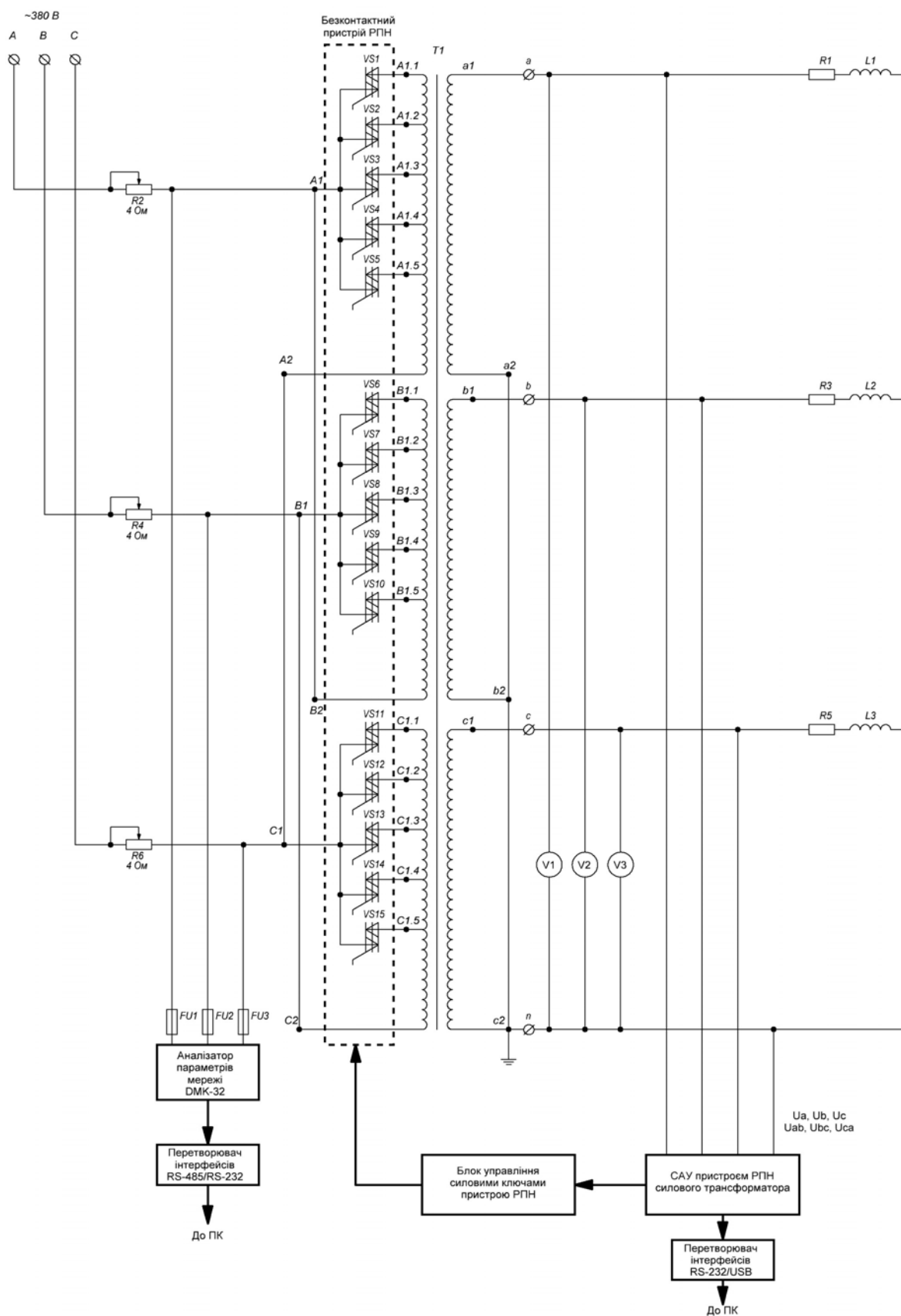


Рисунок 5 – Принципова схема лабораторного стану для дослідження якості роботи САУ пристроєм РПН силового трансформатора

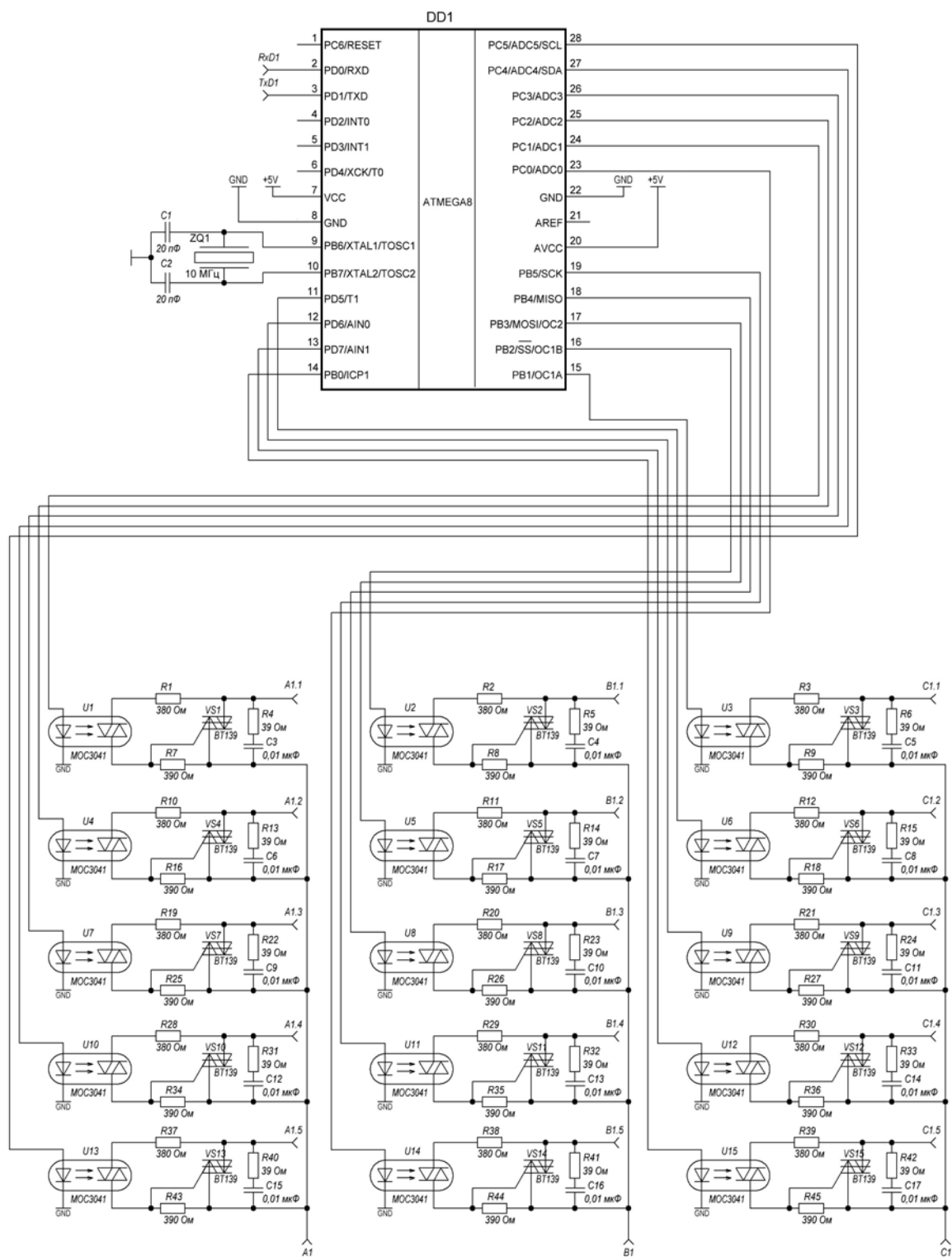


Рисунок 6 – Принципова електрична схема безконтактного пристрою РПН силового трансформатора

Для вимірювання ПЯЕ (усталене відхилення напруги, коефіцієнти несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовності, усталене відхилення фазних напруг) на стороні первинної обмотки застосовувався аналізатор параметрів мережі DMK-32, результати вимірювання з якого через перетворювач інтерфейсів RS-485/RS-232 надходили до ПК для подальшої статистичної обробки. Вимірювання ПЯЕ на стороні

вторинної обмотки силового трансформатора здійснювалося за допомогою блоку управління пристроєм РПН, який передавав діючі значення фазних та міжфазних напруг, положення відпайок РПН для кожної з фаз, а також значення вищеперерахованих ПЯЕ до ПК за допомогою інтерфейсу RS-232.

Результати експериментальних досліджень приведені на рисунках 7, 8, 9 та в табл. 1.



а –сторона первинної обмотки; б – сторона вторинної обмотки

Рисунок 7 – Графіки зміни усталеного відхилення напруги



а –сторона первинної обмотки; б – сторона вторинної обмотки

Рисунок 8 – Графіки зміни коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності



Рисунок 8 – Графік зміни коефіцієнту несиметрії напруг по нульовій послідовності

Таблиця 1 – Результати статистичної обробки експериментальних даних

№ з/п	ПЯЕ	Математичне очікування, M , %	Середньо-кватратичне відхилення, σ , %	Інтегральна ймовірність, P , %
Сторона первинної обмотки трансформатора				
1.	δU_1	-5,37	0,23	44
2.	K_2	2,04	0,40	45
Сторона вторинної обмотки трансформатора				
3.	δU_1	-1,81	0,88	100
4.	K_2	1,43	0,36	97
5.	K_0	1,14	0,41	98
6.	δU_a	-2,33	1,14	100
7.	δU_b	-1,28	1,48	98
8.	δU_c	-1,77	1,15	99

Як показали результати експериментальних досліджень, застосування запропонованого блоку управління пристроєм РПН силового трансформатора дозволяє знизити рівні ПЯЕ (усталене відхилення напруги, відхилення фазних напруг, коефіцієнти несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовностях) до нормально допустимих значень, регламентованих ГОСТ 13109-97.

Висновки.

В результаті проведеного дослідження:

1. Проведено розробку алгоритму роботи мікропроцесорного блоку управління пристроєм РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем», в основу якого покладено методику розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах.

2. Розроблено принципові електричні схеми блоку управління та експериментального лабораторного стенду, розроблено макет пристрою.

3. Проведені експериментальні дослідження якості роботи САУ пристроєм РПН силового трансформатора показали, що застосування даного пристрою дозволяє знизити рівні усталеного відхилення напруги та коефіцієнтів несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовностях до нормально допустимих значень.

Список літератури

1. Плешков П. Г. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм / П. Г. Плешков, 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
3. Зінзура В.В. Задача багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричній мережі з глухозаземленою нейтраллю. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – Вип. 25.Ч.2 – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 227-234.
4. Зінзура В.В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. - № 3. – С. 99-109.

5. Бурбело М. Й. Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах / М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 76 – 79.

Piotr Pleshkov, Vasiliy Zinzura

Kirovograd National Technical University

Development and experimental research of the microprocessor control system of on-load tap changer of power transformer

For modern power supply systems, particularly topical issue of improving the quality of electrical energy. Existing methods and technical means of reducing the levels of quality of electric energy in electric networks though are quite effective, but require significant capital investments, which hinders their widespread use. One way to solve this problem - it is an improvement of automatic control systems of technical means of voltage regulation. Article is devoted to the development of the algorithm of the control unit device-load power transformer winding connection with the scheme "D/Y to zero," the development of schematic diagrams of the control unit and the experimental stand, the development model of the device. An experimental study on the quality of the system of automatic voltage regulation. Results of experimental studies have shown that the application of the proposed device voltage regulation decrease levels of quality of electric energy (steady voltage deviation, coefficient of voltage unbalance on the negative and zero sequence) to values that do not exceed the normal allowable.

multicriteria optimization, contactless OLTC

Одержано 28.04.14

УДК 620.4+658.22

П.Г.Плешков, доц., канд. техн. наук, Ю.И.Казанцев, доц., канд. техн. наук, Р.В.Телюта, канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет

Оптимизация размещения компенсирующих устройств в системе электроснабжения промышленного предприятия методом неопределённых множителей Лагранжа

В статье рассматривается оптимизационная задача как основа рационального использования электрической энергии.

компенсирующие устройства, расход электрической энергии, стохастические характеристики, методы оптимизации

П.Г.Плешков, доц., канд.техн.наук, Ю.И.Казанцев, доц.,канд.техн.наук, Р.В.Телюта, канд.техн.наук

Кіровоградський національний технічний університет

Оптимізація розміщення компенсуючих пристроїв в системі електропостачання промислового підприємства методом невизначених множників Лагранжа

У статті розглядається оптимізаційне завдання як основа раціонального використання електричної енергії.

компенсуючі пристрої, витрата електричної енергії, стохастичні характеристики, методи оптимізації

© П.Г.Плешков, Ю.И.Казанцев, Р.В.Телюта, 2014