

П.Г. ПЛЄШКОВ, канд. техн. наук, «Кіровоградський національний технічний університет»  
В.В. ЗІНЗУРА, асистент, «Кіровоградський національний технічний університет»

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗІ СХЕМОЮ З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК «ТРИКУТНИК/ЗІРКА З НУЛЕМ»

Розроблено структурну схему САУ пристроєм РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем», в основу якої покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації. Застосування запропонованої САУ забезпечує одночасне зниження рівнів усталеного відхилення напруги та коефіцієнтів несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовностях в електричних мережах. Проведено дослідження якості роботи запропонованої САУ шляхом математичного моделювання.

**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 досліджень та публікацій.** Задача удосконалення САУ пристроєм РПН силового трансформатора з метою одночасного зменшення рівнів відхилення та несиметрії напруг розглядалась в [1-5]. У 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. У 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 та дослідження роботи САУ пристроєм РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем», в основу роботи якої покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації.

**Викладення матеріалу та результати.** У 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;  $\Omega = \{\mathbf{K} \in \mathbb{R}^6 \mid k_{i\min} \leq k_i \leq k_{i\max}, i = a, b, c\}$  -

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, який проводиться в два етапи:

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  $\rho$  від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації  $K^{opt}$  в просторі управління  $\Omega \subset R^6$ .

Задачу 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 описано 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

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

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

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

На рис. 1:1 - блок розрахунку комплексів напруг  $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$  на стороні високої напруги (ВН) по відомих діючим значенням міжфазних напруг  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  на стороні низької напруги (НН) та значенню  $K^{opt}$  на попередньому кроці розрахунку; 2,3,4,5,6 - блоки визначення  $\Delta U_{1yt}, U_{2yt}, U_{0yt}, \Delta U_{фйт}$  відповідно; 6 - блок визначення кінцевого розв'язку задачі (1)  $K^{opt}$  згідно формул (2); 7 - блок затримки сигналу на один крок розрахунку.

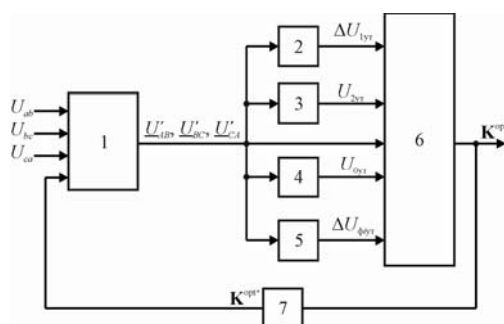


Рис. 1. Структурна схема САУ пристроєм РПН силового трансформатора

САУ, структурна схема якої зображено на рис. 1, працює так. Виміряні діючі значення  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  міжфазних напруг на стороні НН силового трансформатора разом із значенням коефіцієнтів трансформації  $K^{opt'}$ , прийнятих на попередньому кроці розрахунку надходить до блоку 1, в якому відбувається розрахунок комплексів напруг  $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$  на стороні ВН силового трансформатора. Далі значення  $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$

надходять до блоків 2,3,4,5 у яких відбувається розрахунок  $U_{1yt}, U_{2yt}, U_{0yt}$  і  $U_{фйт}$  відповідно. Після чого дані з блоків 1,2,3,4,5 надходять до блоку 6, у якому визначається кінцевий розв'язок задачі (1)  $K^{opt}$ . Значення вектора  $K^{opt}$  з блоку 6 надходить до керуючого органу РПН, який виконує перемикання відпайок обмоток трансформатора, а також блоку затримки сигналу 7, 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. Узанальнена модель Simulink регулювання напруги приведена на рис. 2.

На рис. 2: "Трансформатор" - модель силового трансформатора ТМ-250/10, оснащеного безконтактним пристроєм РПН з діапазоном регулювання напруги  $\pm 2 \times 2,5 \%$ ; "Вимірювач ВН" - модель вимірювача діючих значень напруг  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , усталеного відхилення трьохфазної напруги  $\Delta U_1$  та коефіцієнту несиметрії напруги по зворотній  $K_2$  послідовності на стороні ВН силового трансформатора; "Вимірювач НН" - модель вимірювача діючих значень напруг  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ , усталеного відхилення трьохфазної напруги  $\Delta U_1$  - усталеного відхилення фазних напруг  $\Delta U_{\phi i}$ , та коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній  $K_2$  та нульовій  $K_0$  послідовностях 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 Memobox;

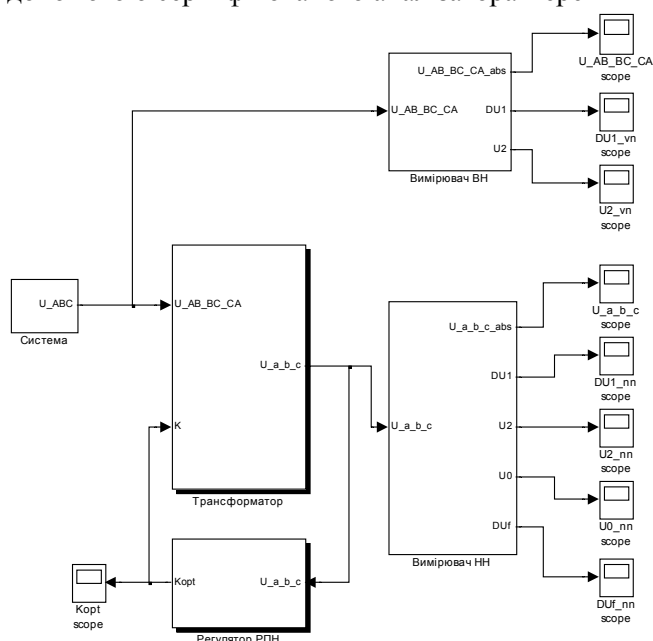


Рис. 2. Модель Simulink системи регулювання напруги

"Регулятор РПН" - модель САУ пристроєм РПН. Модель блоку "Регулятор РПН" приведена на рис. 3.

На рис. 3: "Transformer\_" - блок визначення векторів  $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$  по значенням  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ ,  $\mathbf{K}^{opt}$  (відповідає блоку 1 на рис. 1);

"DU1ut" - блок визначення  $\Delta U_{1yt}$  (блок 2 на рис. 1); "U2ut" - блок визначення  $U_{2yt}$  (блок 3 на рис. 1); "U0ut" - блок визначення  $\Delta U_{0yt}$   $U_{0yt}$  (блок 4 на рис. 1); "DUf\_ut" - блок визначення  $\Delta U_{fyt}$  (блок 5 на рис. 1); "Optimiztion" - блок визначення  $\mathbf{K}^{opt}$  (блок 6 на рис. 1); "Transport Delay" - блок затримки сигналу на 1 крок розрахунку (блок 7 на рис. 1); "Kmin",

"Kmax" - блоки, що задають мінімальне та максимальне значень коефіцієнтів трансформації силового трансформатора.

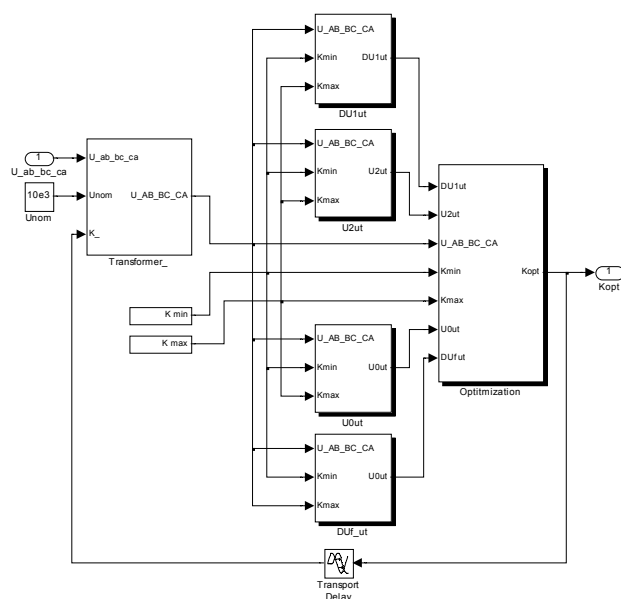


Рис. 3. Модель Simulink САУ пристроєм РПН силового трансформатора

На рис. 4 наведено графіки зміни  $\delta U_1$ ,  $K_2, K_0$  при використанні запропонованої САУ пристроєм РПН. Як видно з рис. 4 як значення  $\delta U_1$ , так і значення  $K_2$  і  $K_0$  не перевищують нормально допустимих меж.

Статистичні показники  $\delta U_1, K_2, K_0$ ,  $\Delta U_{\phi i}$  для напруг на стороні ВН трансформатора, на стороні НН при застосуванні класичної САУ РПН та при використанні запропонованої САУ пристроєм РПН силового трансформатора наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Статистичні показники показників якості електричної енергії у випадку оптимального і класичного регулювання

| Показник якості електричної енергії                         | Математичне очікування, $M$ , % | Середньо-квадратичне відхилення, $\sigma$ , % | Інтегральна ймовірність, $P$ , % |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| Сторона ВН силового трансформатора                          |                                 |                                               |                                  |
| $\delta U_1$                                                | -5,37                           | 0,28                                          | 12,6                             |
| $K_2$                                                       | 1,81                            | 0,45                                          | 65,9                             |
| Сторона НН силового трансформатора (класичне регулювання)   |                                 |                                               |                                  |
| $\delta U_1$                                                | -0,32                           | 0,28                                          | 100                              |
| $K_2$                                                       | 1,91                            | 0,47                                          | 58,8                             |
| $K_o$                                                       | 1,03                            | 0,43                                          | 98,4                             |
| $\delta U_a$                                                | -1,66                           | 1,24                                          | 100                              |
| $\delta U_b$                                                | 0,45                            | 1,57                                          | 100                              |
| $\delta U_c$                                                | 0,28                            | 0,82                                          | 100                              |
| $\delta U_1$                                                | -1,55                           | 0,82                                          | 100                              |
| Сторона НН силового трансформатора (оптимальне регулювання) |                                 |                                               |                                  |
| $\delta U_1$                                                | -1,55                           | 0,82                                          | 100                              |
| $K_2$                                                       | 1,25                            | 0,35                                          | 98,1                             |
| $K_o$                                                       | 1,22                            | 0,34                                          | 99,7                             |
| $\delta U_a$                                                | -1,67                           | 1,21                                          | 100                              |
| $\delta U_b$                                                | -1,2                            | 1,03                                          | 100                              |
| $\delta U_c$                                                | -1,59                           | 1,02                                          | 100                              |

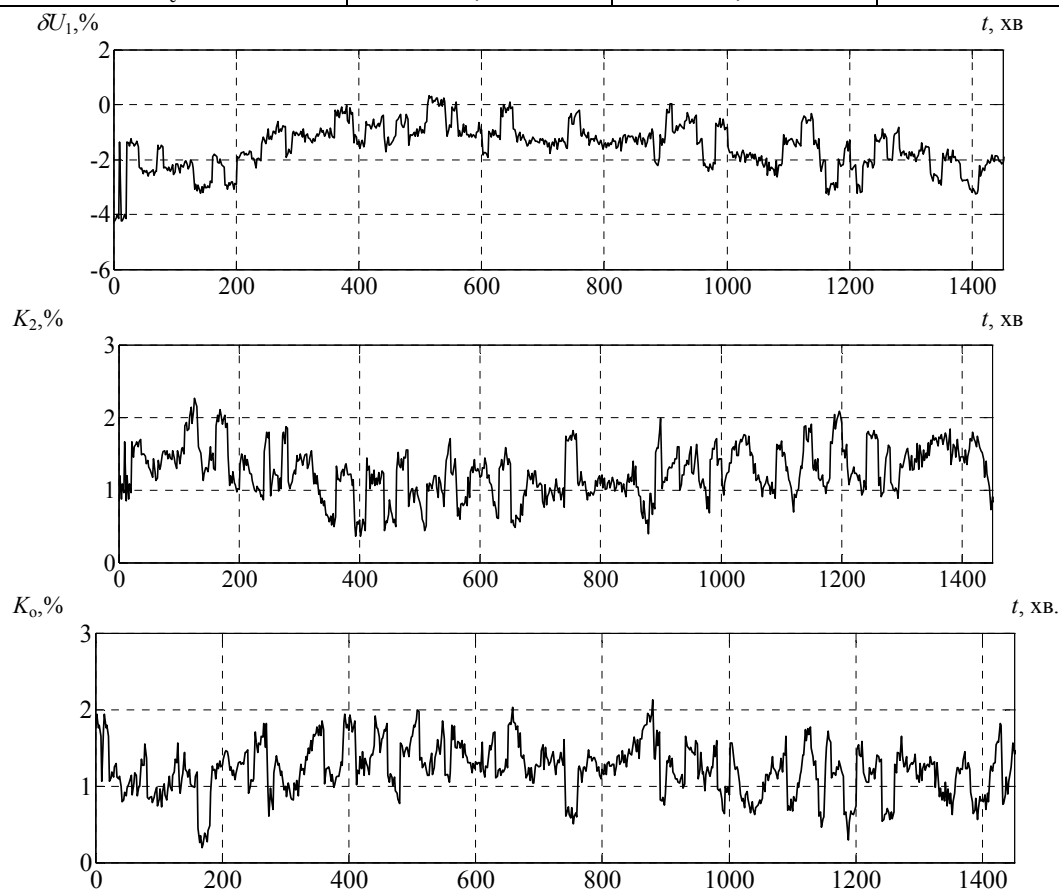


Рис. 4. Графіки зміни  $\delta U_1$ ,  $K_2$ ,  $K_o$  на стороні НН силового трансформатора при застосуванні оптимальної САУ пристроєм РПН силового трансформатора

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** На основі математичної моделі управління пристроєм РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем», 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 усталеного відхилення напруги, а й рівнів несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовностях.

У подальших дослідженнях необхідно розглянути питання розробки САУ пристроєм РПН силових трансформаторів з іншими схемами з'єднання обмоток трансформатора.

Для зменшення рівнів ПЯЕ найбільш перспективним видається застосування САУ пристроєм РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зигзаг з нулем», оскільки дана схема з'єднання обмоток виключає наявність напруги нульової послідовності на стороні НН силового трансформатора.

Також не вирішеним залишається питання технічної реалізації запропонованої САУ пристроєм РПН силового трансформатора.

### *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.

Рукопис подано до редакції 26.03.14