

УДК 621.316.13

*М.С. ТАРАНУХА, Р.В. ТЕЛЮТА, В.В. ЗІНЗУРА***ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РЕАКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА УМОВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

Запропоновано підхід до керування режимами реактивних навантажень розподільчих електричних мереж номінальною напругою 6-10 кВ шляхом використання симетро-компенсувальних установок. Розроблено структурну схему системи автоматичного керування режимами реактивної потужності розподільчих електричних мереж, яка базується на розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації знайденому методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Проведене комп'ютерне моделювання показало перевагу запропонованої системи автоматичного керування над існуючими.

Ключові слова: система автоматичного керування, розподільчі електричні мережі, реактивні навантаження, несиметрія напруг

Вступ. На сучасному етапі розвитку електричних мереж важливим є питання підвищення ефективності та економічності їх роботи. Особливо гостро ця проблема стоїть для розподільчих електричних мереж (РЕМ) номінальною напругою 10-35 кВ. Це пов'язано з тим, що в зазначених РЕМ, зважаючи на їх велику протяжність рівень втрат електричної енергії є досить високим. Зниженню ефективності роботи РЕМ також сприяє понаднормове зниження рівнів показників якості електроенергії (ПЯЕ) за рахунок наявності потужних промислових споживачів із різко змінним та несиметричним графіком електричних навантажень. Найбільш ефективним способом зниження втрат електроенергії в РЕМ є впровадження заходів з компенсації реактивної потужності. Найбільш поширеним в РЕМ технічним засобом компенсації реактивної потужності є батареї статичних конденсаторів (БСК).

Як відомо, БСК здійснюють багатофункціональний вплив на параметри режиму електричної мережі, а саме на рівень споживання реактивної потужності, усталене відхилення напруги та на рівні несиметрії напруг (у випадку варіанту конструктивного виконання БСК з регулюючими (симетрувальними) секціями). Такі симетро-компенсувальні пристрої набули досить широкого розповсюдження в РЕМ через їх високу ефективність. Проте, зважаючи на їх багатофункціональний вплив не лише на рівні компенсації реактивної потужності та несиметрії напруг, але й на рівень усталеного відхилення напруги, за певних обставин в РЕМ можуть виникнути такі випадки, коли при ввімкненні симетрувально-компенсуючого пристрою буде спостерігатись понаднормове значення усталеного відхилення напруг [1]. Це, в свою чергу, призводить до появи додаткових збитків від зниження якості електроенергії і тим самим до зниження ефективності роботи РЕМ.

Постановка задачі. Задача розробки нових методів та засобів підвищення ефективності роботи РЕМ, 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 керування (САК) симетро-компенсувальними пристроями з метою врахування їх впливу не лише на рівні споживання реактивної потужності та несиметрії напруг, але і на рівні усталеного відхилення напруг в РЕМ.

Аналіз публікацій. В роботах [1-2] запропоновано САК симетро-компенсувальними пристроями, що враховує їх вплив на рівні усталеного відхилення напруг. Проте, область застосування запропонованої в [1-2] САК обмежується лише РЕМ номінальною напругою 0,4 кВ (мережі з глухозаземленою нейтраллю), і тому запропоновані в [1-2] САК не можуть бути застосовані для симетро-компенсувальних пристроїв, встановлених в РЕМ номінальною напругою 6-10 кВ (мережі з ізольованою нейтраллю). В роботах [1-3] пропонується розглядати задачу одночасного зниження рівня споживання реактивної потужності та рівнів усталеного відхилення і несиметрії напруг як задачу багатокритеріальної оптимізації. Розроблені в [1-3] алгоритми роботи САК симетро-компенсувальними пристроями базуються на реалізації розв'язків зазначеної задачі багатокритеріальної оптимізації, знайдених методом головного критерію. Як показано в роботі [4], для вирішення подібного класу задач з успіхом можуть застосовуватись і інші методи вирішення задач багатокритеріальної оптимізації.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи РЕМ номінальною напругою 6-10 кВ шляхом удосконалення САК симетро-компенсувальних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

– формалізувати задачу автоматичного керування симетро-компенсувальним пристроєм, що працює в РЕМ номінальною напругою 10 кВ як задачу багатокритеріальної оптимізації та обрати метод її розв'язку;

– розробити структурну схему САК параметрами режиму РЕМ номінальною напругою 10 кВ, що містить симетро-компенсувальний пристрій, в основу роботи якої покладено знайдені розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації;

– розробити комп'ютерну імітаційну модель САК симетро-компенсувальним пристроєм, що працює в РЕМ номінальною напругою 10 кВ та з її допомогою визначити ефект від застосування розробленої САК в порівнянні з базовою.

Основна частина. Як було зазначено вище, задачу одночасного зниження рівня споживання реактивної потужності та рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг найдоцільніше

© М. С. Тарануха, Р. В. Телюта, В. В. Зінзура, 2015

розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Кількість критеріальних функцій в постановці даної задачі залежить від режиму роботи нейтралі РЕМ. Так, для РЕМ номінальною напругою 10 кВ (мережа з ізольованою нейтраллю) характерна наявність лише симетричних складових напруг прямої та зворотної послідовності. Тому, для цього випадку, задачу керування симетро-компенсувальним пристроєм можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \varphi(\mathbf{X}) = \frac{Q_c(\mathbf{X})}{P_c(\mathbf{X})} \rightarrow \min; \\ |\Delta U_1(\mathbf{X})| = |U_1(\mathbf{X}) - U_{\text{ном}}| \rightarrow \min; \\ U_2(\mathbf{X}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega, \end{cases} \quad (1)$$

де $\mathbf{X} = (x_{AB}, x_{BC}, x_{CA})$ – вектор реактивних опорів фаз БСК (вектор керування);

$\operatorname{tg} \varphi(\mathbf{X})$ – коефіцієнт реактивної потужності;

$P_c(\mathbf{X})$, $Q_c(\mathbf{X})$ – відповідно активна та реактивна потужності, що споживаються з живлячої мережі;

$U_1(\mathbf{X})$ – напруга прямої послідовності;

$\Delta U_1(\mathbf{X})$ – різниця значень модуля напруги прямої послідовності та номінальної напруги (пропорційна усталеному відхиленню напруги);

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга мережі;

$U_2(\mathbf{X})$ – напруга зворотної послідовності;

$\Omega = \mathbf{R}^3 | x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad i = AB, BC, CA$ – область допустимих значень \mathbf{X} , яка визначається діапазоном регулювання БСК (допустимий простір керування);

$x_{i \min}, x_{i \max}, i = AB, BC, CA$ – відповідно мінімальне та максимальне значення реактивних опорів БСК для кожної з фаз.

Як показано в роботі [4], найбільш доцільним методом розв'язку задач багатокритеріальної оптимізації, подібних до задачі (1) є метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв, який проводиться в два етапи:

1 етап. Оптимізацією окремих критеріїв визначаються координати утопічної точки $Q_{ym} = (\operatorname{tg} \varphi_{ym}, \Delta U_{1ym}, U_{2ym})$ в просторі критеріїв $\{Q\} \subset \mathbf{R}^3$.

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

Результати проведених досліджень показали, що підхід до знаходження аналітичних виразів для координат утопічних точок, який запропонований в роботі [5], є недоцільним. Це пов'язано з дуже великою громіздкістю отриманих аналітичних виразів, що практично унеможливило їх застосування. Тому, для знаходження координат утопічних точок для

задачі (1) найдоцільніше скористатись одним із числових методів вирішення задач скалярної умовної оптимізації функції багатьох змінних.

Кінцевий розв'язок задачі (1) засновується на знаходженні мінімальної евклідової відстані від утопічної точки до множини парето-оптимальних розв'язків:

$$\begin{cases} \left[\left(\frac{\operatorname{tg} \varphi(\mathbf{X}) - \operatorname{tg} \varphi_{ym}}{K_{\operatorname{tg} \varphi}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta U_1(\mathbf{X}) - \Delta U_{1ym}}{K_{\Delta U_1}} \right)^2 + \left(\frac{U_2(\mathbf{X}) - U_{2ym}}{K_{U_2}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega. \end{cases} \quad (1)$$

де $K_{\operatorname{tg} \varphi}$, $K_{\Delta U_1}$, K_{U_2} – вагові коефіцієнти, що враховують пріоритетність кожного з критеріїв.

Узагальнена структурна схема САК симетро-компенсувальним пристроєм, в основу якої покладено описані вище правила знаходження оптимального вектора керування, представлена на рис. 1.

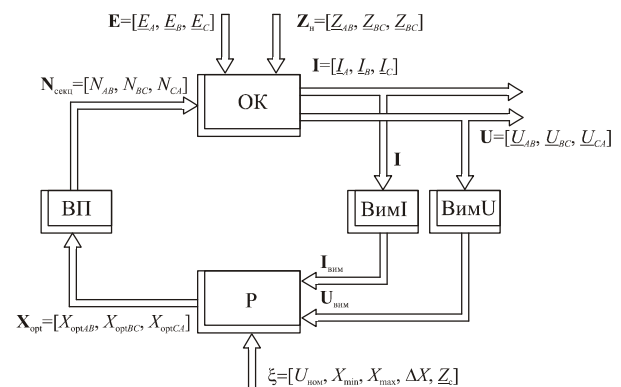


Рис. 1 – Узагальнена структурна схема САК симетро-компенсувальним пристроєм

На рис. 1: ОК – об'єкт керування; ВимІ – вимірник комплексних значень струмів; ВимU – вимірник комплексних значень напруг; Р – регулятор, що реалізує описаний вище алгоритм знаходження оптимального вектора керування; ВП – виконавчий пристрій, що забезпечує пофазну зміну реактивних опорів БСК; $\mathbf{E} = [E_A, E_B, E_C]$ – матриця фазних е.р.с. живлячої системи; $\mathbf{Z}_n = [Z_{nAB}, Z_{nBC}, Z_{nCA}]$ – матриця комплексів фазних навантажень; $\mathbf{I} = [I_A, I_B, I_C]$ – матриця комплексів навантажень струмів; $\mathbf{U} = [U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}]$ – матриця комплексів напруг; $\mathbf{I}_{\text{вим}}$, $\mathbf{U}_{\text{вим}}$ – відповідно матриця виміряних значень комплексів струмів та напруг; $\mathbf{X}_{\text{opt}} = [X_{\text{optAB}}, X_{\text{optBC}}, X_{\text{optCA}}]$ – оптимальний вектор керування (вектор реактивних опорів фаз БСК); $\mathbf{N}_{\text{секц}} = [N_{AB}, N_{BC}, N_{CA}]$ – вектор номерів регулюючих секцій кожної з фаз БСК; $\xi = [U_{\text{ном}}, X_{\min}, X_{\max}, \Delta X, Z_c]$ – вектор задаючих параметрів; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга мережі; X_{\min} , X_{\max} – відповідно значення мінімального та максимального реактивного опору БСК; ΔX – значення реактивного опору, що відповідає ступені регулювання БСК; Z_c – комплексний опір фази живлячої системи.

Комп'ютерна модель Matlab/Simulink, створена на основі запропонованої структурної схеми САК симетро-компенсувальним пристроєм, зображена на рис. 2.

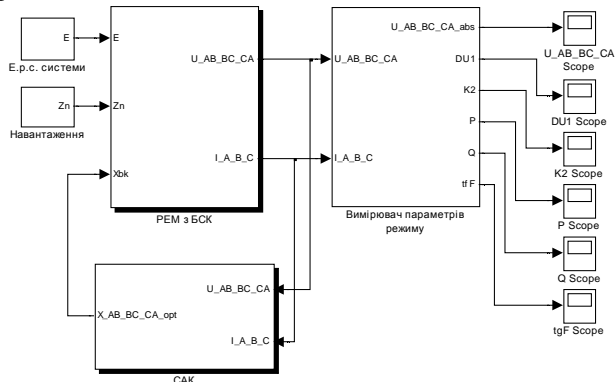


Рис. 2 – Узагальнена комп'ютерна модель Matlab/Simulink САК симетро-компенсувального пристрою

На рис. 2: "Е.р.с. системи" – модель е.р.с. живлячої мережі, виходом якої є комплекси е.р.с. в фазах А, В, С;

"Навантаження" – модель завдання електричних навантажень; в якості вихідних даних для моделювання були взяті реальні часові діаграми активних та реактивних навантажень, що були виміряні протягом доби на одній із підстанцій ПАТ «Кіровоградобленерго» з допомогою сертифікованого аналізатора мережі FLUKE 1744 Metobox; "PEM з БСК" модель PEM, що містить симетро-компенсувальний пристрій (модель об'єкту керування); "Вимірювач параметрів режиму" – модель вимірювача параметрів режиму (лінійних напруг U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , фазних струмів I_A, I_B, I_C , активної P_c та реактивної Q_c потужностей, коефіцієнта реактивної потужності $tg\phi$, усталеного відхилення напруг ΔU_1 та коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності K_2); "САК" – модель САК симетро-компенсувальним пристроєм, в основу якої покладено описані вище алгоритми знаходження розв'язків задачі багатокритеріальної оптимізації методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

Модель блоку "САК" зображена на рис. 3.

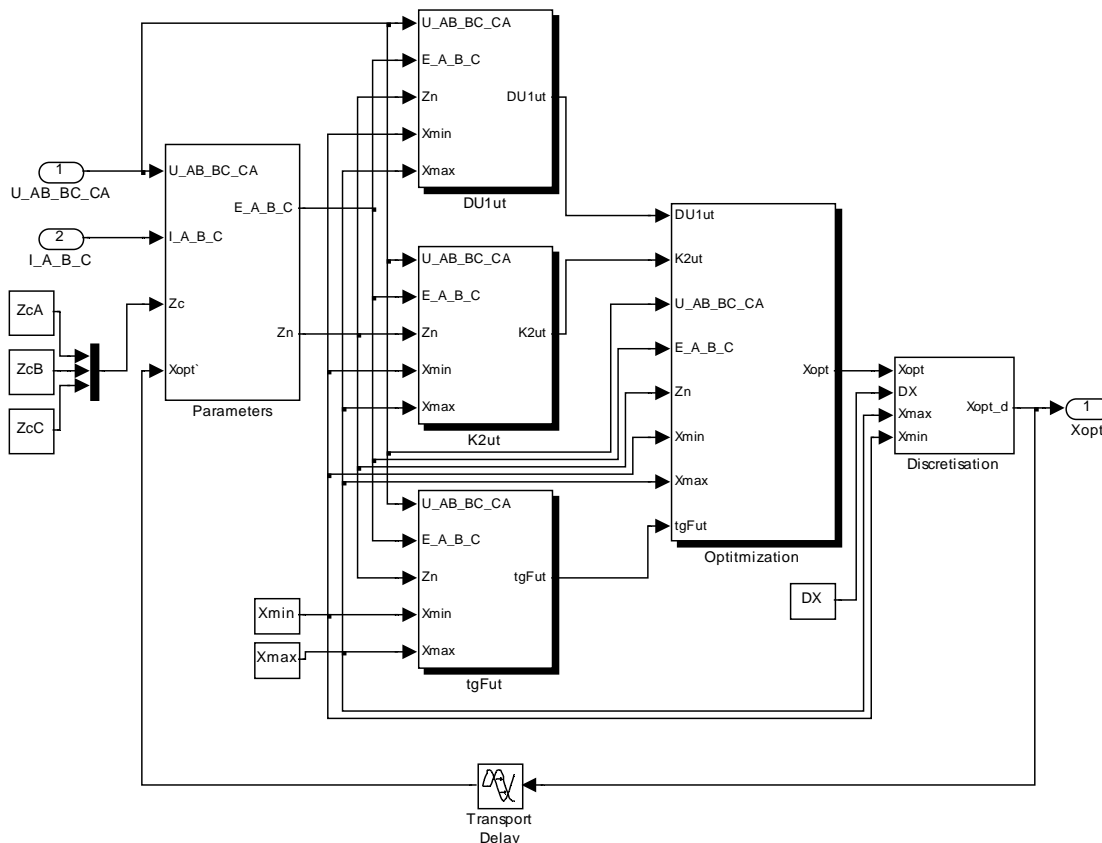


Рис. 3 – Модель Matlab/Simulink блоку «САК»

На рис. 3: "Parameters" – блок визначення параметрів моделі об'єкту керування, що не піддаються безпосередньому вимірюванню (опір навантаження, е.р.с. системи); "tgFut", "DU1ut", "K2ut" – блоки визначення координат утопічної точки $Q_{yt} = (tg\phi_{yt}, \Delta U_{1yt}, U_{2yt})$, для визначення яких було застосовано безградієнтний числовий метод вирішення задач скалярної умовної оптимізації функції багатьох змінних, а саме метод Нелдера-Міда;

"Optimization" – блок визначення кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації згідно виразу (2); "TransportDelay" – блок затримки сигналу на 1 крок розрахунку; "Discretisation" – блок дискретизації оптимального вектора керування; "Xmin", "Xmax" – блоки, що задають мінімальне та максимальне значення опорів фаз БСК; "DX" – блоки, що задає значення реактивного опору, що відповідає ступені регулювання БСК.

Для дослідження ефекту від застосування запропонованої в роботі САК симетро-компенсувальним пристроєм було проведено порівняльне комп'ютерне моделювання роботи запропонованої та базової САК. В якості базової САК було обрано САК симетро-компенсувальним пристроєм, яка здійснює керуючі впливи для досягнення одночасного зниження рівнів споживання реактивної потужності та рівня несиметрії напруг по зворотній послідовності без урахування впливу симетро-компенсувального пристрою на усталене відхилення напруги. Результати комп'ютерного моделювання базової та запропонованої САК наведені на рис. 4-6 та у табл. 1.

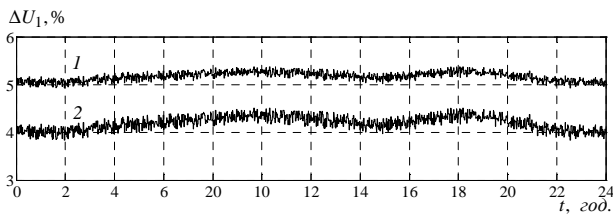


Рис. 4 – Графіки зміни ΔU_1 для базової (1) та запропонованої (2) САК: 1 – базова САК; 2 – запропонована САК.

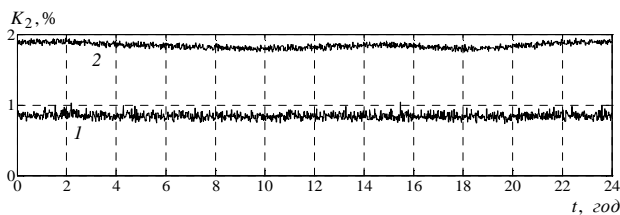


Рис. 5 – Графіки зміни K_2 для базової (1) та запропонованої (2) САК: 1 – базова САК; 2 – запропонована САК.

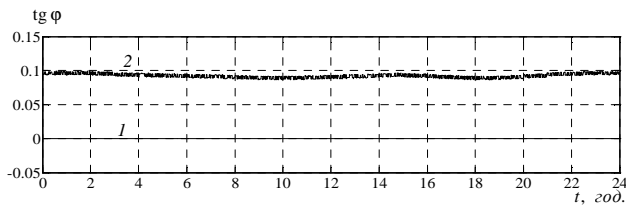


Рис. 6 – Графіки зміни $\text{tg } \varphi$ для базової (1) та запропонованої (2) САК: 1 – базова САК; 2 – запропонована САК.

Таблиця 1 – Результати статистичної обробки ΔU_1 та K_2 .

№ з/п	Параметр режиму	Математичне очікування, $M(\%, \text{ в.од.})$	Середньо-квадратичне відхилення, σ^2	Інтегральна ймовірність потрапляння в нормально-допустимі (задані) межі, P
Базова САК симетро-компенсувальним пристроєм				
1.	ΔU_1	5,171	0,093	0,04
2.	K_2	0,843	0,044	1,00
3.	$\text{tg } \varphi$	0,001	$3,31 \cdot 10^{-5}$	1,00
Розроблена САК симетро-компенсувальним пристроєм				
4.	ΔU_1	4,198	0,143	1,00
5.	K_2	1,841	0,040	1,00
6.	$\text{tg } \varphi$	0,92	0,003	1,00

Як видно з наведених результатів комп'ютерного моделювання базової та розробленої САК (рис. 4-6) а

також з результатів подальшої їх статистичної обробки (табл. 1), запропонована САК на відміну від базової не допускає керувань, за яких спостерігалися б понаднормові значення усталеного відхилення напруги в РЕМ ($\pm 5\%$). При цьому значення двох інших параметрів режиму – коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності K_2 та коефіцієнту реактивної потужності $\text{tg } \varphi$ як у випадку моделювання базової САК, так і у випадку моделювання запропонованої САК не перевищують нормально допустимого для K_2 ($K_{2\text{нд}} = 2\%$) та заданого для $\text{tg } \varphi$ ($\text{tg } \varphi_{\text{зд}} = 0,15$) значень.

Висновки. В результаті проведених наукових досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Задачу керування симетро-компенсувальним пристроєм, що працює в РЕМ номінальною напругою 6-10 кВ найдоцільніше розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації.

2. Для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації одночасного зниження рівня споживання реактивної потужності та рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг найдоцільніше застосувати метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

3. Результати комп'ютерного моделювання розроблених САК, в основу роботи яких покладено знайдені розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації підтвердили перевагу запропонованої САК над базовою. Так, при практично рівних значеннях рівня компенсації реактивної потужності та коефіцієнту несиметрії напруг, інтегральна ймовірність потрапляння в нормально допустимі межі усталеного відхилення напруг для розробленої моделі виявилась на 96 % більшою, ніж для базової моделі.

Список літератури: 1. Червінська Т.М. Математична модель керування реактивною потужністю в електричних мережах з несиметричною напругою / Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №3(62) Частина 1. – С. 161 – 164. 2. Червінська Т.М. Математичні моделі керування реактивною потужністю та несиметрією напруги в електричній мережі / Терешкевич Л.Б., Червінська Т.М., Кузьменко М.В. // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Выпуск 32. – 2010. 3. Червінська Т.М. Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі / Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Промелектро. – 2008. – №5. – С. 16 – 20. 4. 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. 5. Плишков П.Г. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм / П.Г. Плишков, 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.

Bibliography (transliterated): 1. Chervinska T.M. Matematychna model keruvannia reaktivnoiu potuzhnistiu v elektrychnykh merezhakh z nesymetrichnoiu napruhoiu. L.B. Tereshkevych, T.M. Chervinska. Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. 2010. No 3(62) Part 1. 161–164. Print. 2. Chervinska T.M. Matematychni modeli keruvannia reaktivnoiu potuzhnistiu ta nesymetriieiu napruhu v elektrychnii merezhi. Tereshkevych L.B., Chervinska T.M., Kuzmenko M.V. Sbornyk nauchnykh trudov

Donbasskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta. No 32. 2010. Print. 3. *Chervinska T.M.* Keruvannya reaktivnoiu potuzhnistiu v umovakh nesymetrii napruhy merezhi. *L.B. Tereshkevych, T.M. Chervinska.* Promelektro. 2008. No 5. 16–20. Print. 4. *Zinzura V.V.* Metody rozviazku zadachi bahatokryterialnoi optymizatsii rehuliuвання napruhy v elektrychnykh merezhakh. Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho unyversytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. Vol. 25. Part.1 Kirovohrad: KNTU, 2012. 350-360.

Print. 5. *Plieshkov P.H.* Teoretychni zasady optimalnoho keruvannia prystroiem RPN sylovoho transformatora za vektornym kryteriiem. *P.H. Plieshkov, V.V. Zinzura, M.V. Kubkin.* Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho unyversytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. Vol. 24. Part.2. Kirovohrad: KNTU, 2011. 164-173.

Надійшла (received) 09.10.2015



Тарануха Марина Сергіївна – студентка, кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент», Кіровоградський національний технічний університет м. Кіровоград

Taranukha Marina Sergiyivna – student, department of "Electrical systems and energy management", Kirovograd National Technical University. Kirovograd.



Телюта Руслан Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Кіровоградський національний технічний університет, доцент кафедри "Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент", м. Кіровоград

Teluyta Ruslan Vasil'evich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kirovograd National Technical University, Associate Professor at the Department of "Electrical systems and energy management", Kirovograd.



Зінзура Василь Васильович – кандидат технічних наук, старший викладач, Кіровоградський національний технічний університет, старший викладач кафедри "Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент", м. Кіровоград

Zinzura Vasily Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kirovograd National Technical University, Department of "Electrical systems and energy management", Kirovograd.