

УДК 621.316.13

С.П. ПЛЄШКОВ, канд. техн. наук, доц., П.Г. ПЛЄШКОВ, канд. техн. наук, проф.,
В.В. ЗІНЗУРА, канд. техн. наук, Кіровоградський національний технічний університет

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ДОПОМОГОЮ СИМЕТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Запропоновано підхід до керування режимами реактивних навантажень розподільчих електричних мереж номінальною напругою 6-10 кВ шляхом використання симетрокомпенсуючих пристроїв. 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: керування, оптимальний, електромережа, симетрокомпенсуючий пристрій, ефективність

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. 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 за рахунок наявності потужних промислових споживачів із різкозмінним 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 симетрокомпенсуючі 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 симетрокомпенсуючого 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.

Аналіз досліджень та публікацій. В роботах [1-2] запропоновано систему автоматичного керування (САК) симетрокомпенсуючими 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 симетрокомпенсуючих 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 симетрокомпенсуючими 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.

Постановка завдання. 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 удосконален-

ня систем автоматичного керування симетрокомпенсуючими 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.

Викладення матеріалу та результати. Як було зазначено вище, задачу одночасного зниження рівня споживання реактивної потужності та рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг найдоцільніше 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-компенсуючим 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 симетрокомпенсуючого пристрою (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; $\Omega = \mathbf{R}^3 | x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, i = AB, BC, CA$ – область допустимих значень \mathbf{X} , яка визначається діапазоном регулювання симетрокомпенсуючого пристрою (допустимий простір керування); $x_{i\min}$, $x_{i\max}$ – відповідно мінімальне та максимальне значення реактивних опорів симетрокомпенсуючого пристрою 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 $Q_{\text{ут}} = (\operatorname{tg} \varphi_{\text{ут}}, \Delta U_{1\text{ут}}, U_{2\text{ут}})$ в просторі критеріїв $\{\mathbf{Q}\} \subset \mathbf{R}^3$.

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 $\{\mathbf{Q}\} \subset \mathbf{R}^3$.

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 унеможливує 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

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

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

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

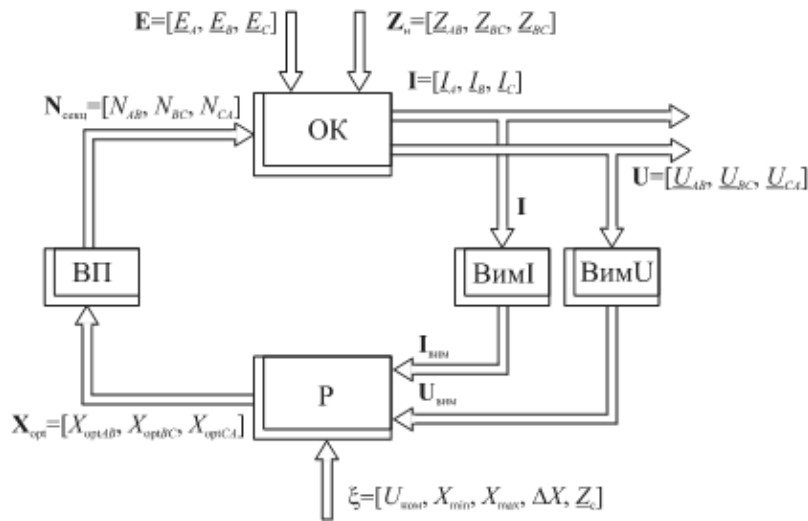


Рис. 1. Узагальнена структурна схема САК симетро-компенсувальним пристроєм

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

Комп'ютерну модель Matlab/Simulink, створену на основі запропонованої структурної схеми САК симетро-компенсувальним пристроєм, зображено на рис. 2.

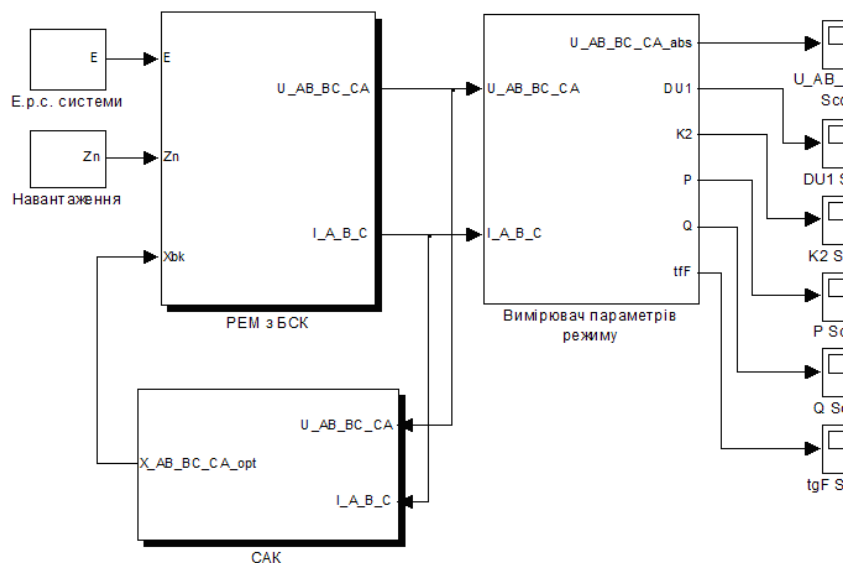


Рис. 2. Узагальнена комп'ютерна модель Matlab/Simulink САК симетро-компенсувального пристрою

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 задання 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 Memobox; "PEM з БСК" - модель PEM, що містить симетрокомпенсуючий 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 $\text{tg}\phi$, 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.

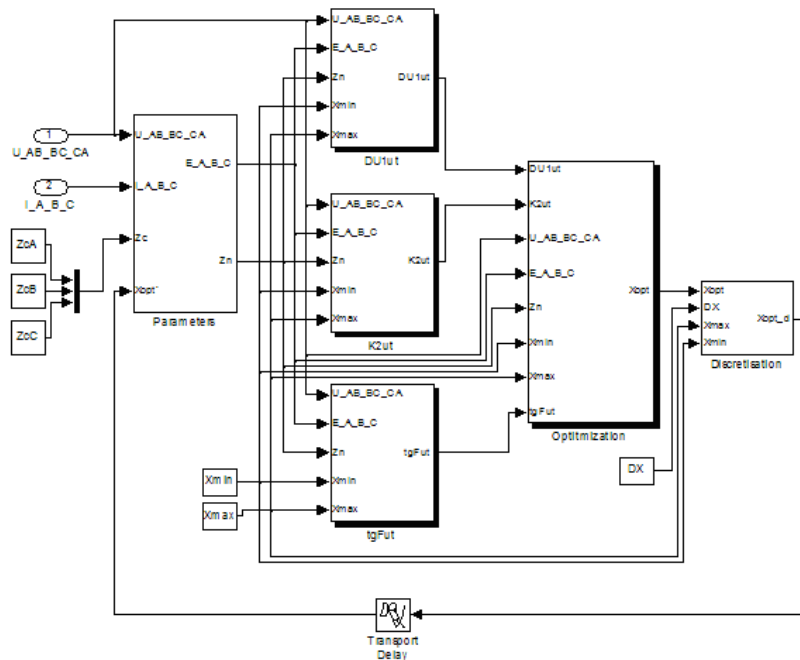


Рис. 3. Модель Matlab/Simulink блоку «САК»

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 $Q_{yt}=(\text{tg}\phi_{yt}, \Delta U_{1yt}, U_{2yt})$, для визначення яких було застосовано безградієнтний числовий метод вирішення задач скалярної умовної оптимізації функції багатьох змінних, а саме метод Нелдера-Міда; "Optimisation" - блок визначення кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації згідно виразу (2); "Transport Delay" - блок затримки сигналу на 1 крок розрахунку; "Discretisation" - блок дискретизації оптимального вектора керування; "Xmin", "Xmax" - блоки, що задають мінімальне та максимальне значення опорів фаз симетрокомпенсуючого пристрою; "DX" - блок, що задає значення реактивного опору, що відповідає ступені регулювання симетрокомпенсуючого пристрою.

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 наведено на рис. 4-6 та у табл. 1.

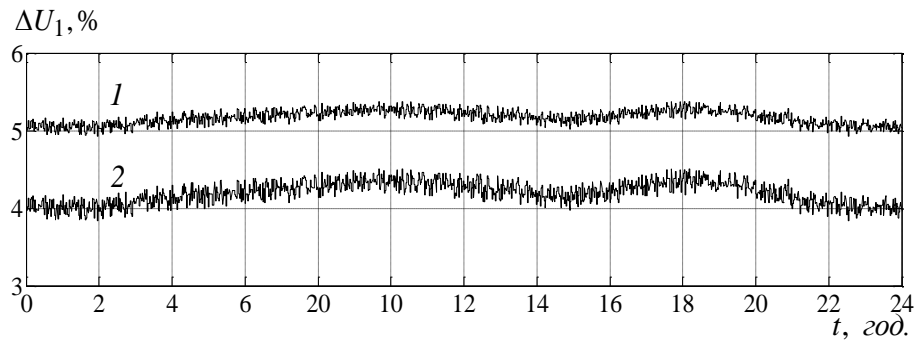


Рис. 4. Графіки зміни ΔU_1 для базової та запропонованої САК:
1 – базова САК; 2 – запропонована САК

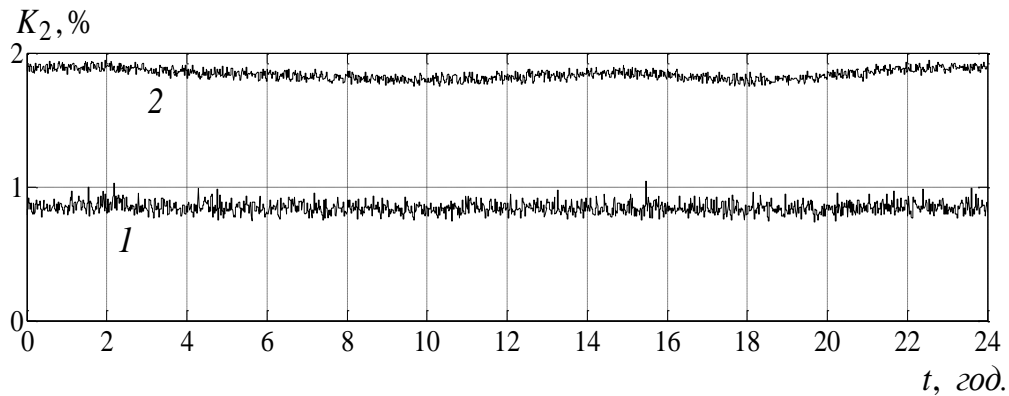


Рис. 5. Графіки зміни K_2 для базової та запропонованої САК:
1 – базова САК; 2 – запропонована САК

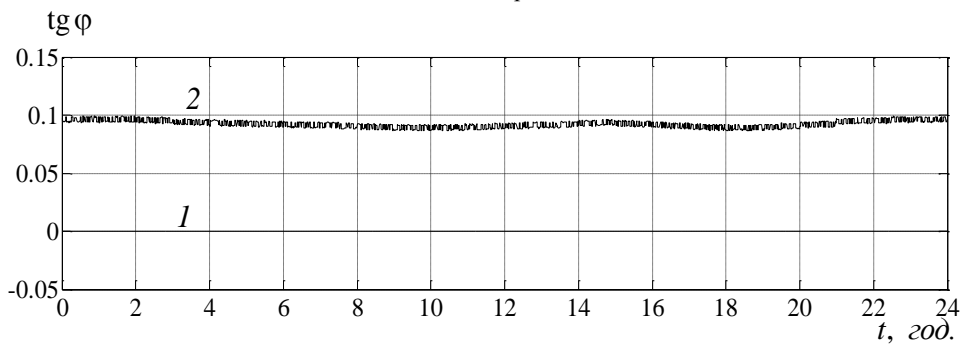


Рис. 6. Графіки зміни $\operatorname{tg} \varphi$ для базової та запропонованої САК:
1 – базова САК; 2 – запропонована САК

Таблиця 1

Результати статистичної обробки ΔU_1 та K_2

Параметр режиму	Математичне очікування, M (% в. од.)	Середньоквадратичне відхилення, σ^2	Інтегральна ймовірність потрапляння в нормально-допустимі (задані) межі, P
Базова САК симетро-компенсувальним пристроєм			
U_1	5,171	0,093	0,04
K_2	0,843	0,044	1,00
tg	0,001	$3,31 \cdot 10^{-5}$	1,00
Розроблена САК симетро-компенсувальним пристроєм			
U_1	4,198	0,143	1,00
K_2	1,841	0,040	1,00
tg	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 $\text{tg}\varphi$ ($\text{tg}\varphi_{\text{зад}}=0,15$) значень.

Висновки та напрямок подальших досліджень. У результаті проведених наукових досліджень можна зробити наступні висновки:

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

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

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. 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.

Рукопис подано до редакції 16.04.16

УДК 621.926: 524.16

Є.К. БАБЕЦЬ, канд. техн. наук, проф., В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.,
Т.В. ХОРОЛЬСЬКА, НДГРІ ДВНЗ «Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВНУТРІШНЬОМЛИННИХ НАВАНТАЖЕНЬ КУЛЬОВИХ МЛИНІВ БАГАТОСТАДІЙНОГО ПРОЦЕСУ ЗБАГАЧЕННЯ

Використано математичний апарат теорії катастроф для ідентифікації складного динамічного процесу здріблення, який дозволяє враховувати варіації нелінійних збурень текстурних характеристик сирової руди, її міцності і змінних режимів роботи устаткування та запропоновано систему керування завантаженням руди в кульові млини першої, другої, третьої стадії з врахуванням геометрії внутрішньомлинного навантаження, оцінки в часі аварійних ситуацій. Розроблено метод ідентифікації геометрії внутрішньомлинного завантаження кульових млинів шляхом діагностики траєкторії об'ємного заповнення складного технологічного об'єкту, та визначенні параметри оптимального внутрішньомлинного завантаження з мінімізацією часу знаходження матеріалу в технологічному агрегаті, па-