Є.Зубко
Моделювання електричних властивостей процесу виготовлення пористого кремнію методом електролітичного анодування

Розроблено комплекс математичного імітаційного моделювання, що описує динамічні зміни електричних властивостей кремнієвих підкладок з різною структурою й рівнем легування при виготовленні пористого кремнію методом електролітичного анодування.

E.Zubko
Design of electric properties of process of making of porous silicon the method of electrolytic anodization

The complex of mathematical imitating modelling which describes dynamic changes of electric properties of silicon substrates with different structure and level doping at manufacturing of porous silicon by a method electrolytic anodizings is developed.

Получено 28.10.11

УДК 621.316.1

В. В. Зінзура, асист.
Кіровоградський національний технічний університет

Методи розв’язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах

В статті проведено аналіз існуючих методів розв’язків задач багатокритеріальної оптимізації, здійснено вибір методу розв’язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах, який найбільш повно враховує вимоги ГОСТ 13109-97 стосовно нормально допустимих значень показників якості електричної енергії. Даний метод розв’язку може бути покладений в основу законів регулювання автоматичних систем управління силовим трансформатором з безконтактним пристроєм РПН, що працює в мережі з ізольованою нейтраллю або зі схемою з’єднання обмоток Δ/Z («трикутник»/«зустрічний зигзаг»)
відхилення напруги, несиметрія напруги, багатокритеріальна оптимізація, парето-оптимальна множина, утопічна точка

В сучасних системах електропостачання нерідко спостерігаються перевищення допустимих показників якості електричної енергії. Це призводить до ряду негативних наслідків: збільшення втрат електричної енергії в електричних мережах, передчасне зношення електричної ізоляції електроприймачів та вихід їх з ладу, поява похибок в системах обліку електричної енергії та ін.

Найбільш дієвим та поширеним способом зниження рівнів показників якості електричної енергії до допустимих меж є застосування спеціальних технічних засобів.

Для зниження рівнів несиметрії напруги зазвичай застосовують різноманітні симетрувальні установки (несиметричні батареї конденсаторів, симетрувальні трансформатори, компенсатори струму нейтралі тощо). Основним недоліком, притаманним всім симетрувальним установкам, що стримує їх широке розповсюдження, є їх висока вартість.

Для зниження рівнів усталеного відхилення напруги застосовують пристрої регулювання напруги. Найпоширенішим технічним засобом регулювання напруги в електричних мережах є силовий трансформатор з механічним пристроєм регулювання під навантаженням (РПН). Проте даний спосіб регулювання напруги має ряд недоліків, найголовнішими з яких є: велика вартість трансформаторів з РПН; низька швидкодія механічного регулятора РПН; обмежена кількість перемикань, що пов'язано з комутуванням номінального струму механічними контактами за рахунок чого знижується якість регулювання і, як наслідок, − якість електричної енергії та ін.

Більш досконалими пристроями РПН, які позбавлені всіх вищеперерахованих недоліків, є так звані безконтактні пристрої РПН. В якості комутуючих елементів в них використовуються потужні напівпровідникові (транзисторні або тиристорні) ключі. Окрім високої швидкодії, набагато більшого ресурсу перемикань, кращої ремонтопридатності такі пристрої РПН мають ще одну − можливість змінювати коефіцієнт трансформації трансформатора в кожній фазі окремо, не залежно від інших. Це дозволяє впливати не лише на усталене відхилення напруги, а й одночасно знижувати рівні несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовностях. Тому досить актуальною є задача розробки законів управління силовим трансформатором з безконтактним пристроєм РПН, які б забезпечували одночасне зниження рівнів відхилення та несиметрії напруги. Найдоцільніше розглядати таку задачу, як задачу багатокритеріальної (векторної) оптимізації.

Питання одночасного зниження рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг розглядалося в роботах [1, 2]. Робота [2] присвячена розробці закону управління симетрувальним трансформатором, в основу якого покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації. Недоліком запропонованого способу регулювання напруги є те, що необхідно використовувати спеціальний технічний пристрій − симетрувальний трансформатор, що призводить до підвищення капіталовкладень в електричну мережу. В роботах [3] і [4] пропонується для вирішення задачі векторної оптимізації регулювання режиму роботи силового трансформатора з безконтактним пристроєм РПН використовувати метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Проте в даних роботах відсутнє обґрунтування вибору методу розв'язку задачі векторної оптимізації.

Метою даної статті є вибір та обґрунтування методу розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах, що містять трансформатор з безконтактним пристроєм РПН.

Задачу багатокритеріальної оптимізації регулювання режиму роботи силового трансформатора з безконтактним пристроєм РПН, що працює в мережі з ізольованою нейтраллю або зі схемою з'єднання обмоток Δ/Z («трикутник»/«зустрічний зигзаг») можна записати у вигляді [3]:

$$\begin{cases} Q_1(\mathbf{K}) = \left|\Delta U_1(\mathbf{K})\right| \to \min; \\ Q_2(\mathbf{K}) = U_2(\mathbf{K}) \to \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega; \end{cases} \tag{1}$$

де $\mathbf{Q}(\mathbf{K}) = \left(Q_1(\mathbf{K}),\ Q_2(\mathbf{K}), Q_3(\mathbf{K})\right)$ – *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;

$\Omega = \left\{ \mathbf{K} \in \mathbb{R}^3 \middle| k_{i\min} \le k_i \le k_{i\max},\ i = a, b, c \right\}$ – 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.

З формальної точки зору, розв'язком задачі багатокритеріальної оптимізації є множина точок, що характеризуються тим, що кожна точка цієї множини, поступаючись іншим точкам по декількох критеріях, переважає їх хоча б по одному з критеріїв [5]. Така множина точок називається множиною ефективних, або парето-оптимальних розв'язків. Але такий розв'язок не може задовольнити через те, що для більшості задач необхідно знайти єдиний розв'язок (очевидно, що він буде належати множині парето-оптимальних розв'язків). Для остаточного розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації завжди необхідно ввести додаткову інформацію, за допомогою якої проводиться вибір кінцевого розв'язку із множини ефективних розв'язків [6].

Існує декілька груп методів розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації [7]:
- методи, засновані на накладенні обмежень на критерії;
- методи, засновані на лінійному згортанні критеріїв;
- методи, засновані на пошуку компромісного розв'язку;
- методи інтерактивного програмування;
- методи цільового програмування.

Розглянемо найбільш поширені методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації на прикладі задачі (1).

1. Метод головного критерію [8] належить до методів, заснованих на накладанні обмежень на критерії. Він полягає в тому, що в якості цільової функції обирається один з критеріїв, а всі інші вводяться як обмеження. Таким чином, задача векторної оптимізації зводиться до задачі умовної скалярної оптимізації. Обравши в якості головного критерію, наприклад, $\left|\Delta U_1(\mathbf{K})\right|$, задачу (1) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} \left|\Delta U_1(\mathbf{K})\right| \to \min; \\ U_2(\mathbf{K}) \le U_{2\max}; \\ \mathbf{K} \in \Omega; \end{cases} \tag{2}$$

де $U_{2\max}$ – верхні межі обмеження критерію $U_2(\mathbf{K})$.

Основним недоліком такого методу є складність вибору головного критерію серед багатьох критеріїв, що знаходяться в протиріччі одні з одними [6]. Також в точці оптимуму нерідко спостерігається невиправдано вдале значення головного критерію, в порівнянні з іншими. Крім того, при виборі занадто вимогливого обмеження $U_{2\max}$ може спостерігатися пустий розв'язок.

2. Метод лінійного згортання [8] застосовується у випадку, якщо відома відносна важливість кожного з критеріїв. Даний метод полягає в лінійному об'єднанні всіх критеріїв шляхом введення вагових коефіцієнтів. Для задачі (1) маємо:

$$\begin{cases} F_1(\mathbf{K}) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i Q_i(\mathbf{K}) \to \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega; \end{cases} \tag{3}$$

де $F_1(\mathbf{K})$ − скалярний критерій, що являє собою лінійну комбінацію критеріїв;

α_i − вагові коефіцієнти.

m – кількість критеріїв.

Вагові коефіцієнти α_i при цьому можуть розглядатися як показники відносної значимості окремих критеріїв. Чим більший пріоритет надається, наприклад, критерію $Q_1(\mathbf{K})$, тим більший вклад в суму (3) він повинен давати, і, як наслідок, тим більше значення α_1 повинне бути прийняте. Зазвичай вагові коефіцієнти використовуються у нормованому вигляді, тобто задовольняють рівності $\sum_{i=1}^{m} \alpha_i = 1,\ \alpha_i \geq 0$ [7].

Основним недоліком даного методу є те, що при наявності досить різнохарактерних критеріїв задача вибору значень набору коефіцієнтів α_i є досить складною. До того ж, апріорі невідомо, в яких співвідношеннях між собою повинні знаходитись вагові коефіцієнти α_i для отримання бажаного співвідношення між критеріями $Q_i(\mathbf{K})$ в оптимальній точці. Також часто спостерігається велика чутливість отриманого розв'язку, тобто коли малим приростам вагових коефіцієнтів α_i відповідають великі прирости критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$.

3. Максимінні (мінімаксні) методи [8] належать до методів, заснованих на пошуку компромісного розв'язку. Для задачі (1) мінімаксний метод можна сформулювати у вигляді:

$$\begin{cases} F_2(\mathbf{K}) = \max_{i=1,\dots,m} Q_i(\mathbf{K}) \to \min \\ \mathbf{K} \in \Omega; \end{cases} \tag{4}$$

де $F_2(\mathbf{K})$ − скалярний критерій (цільовий функціонал).

Тут, на відміну від методу лінійного згортання, на цільовий функціонал впливає лише той критерій, якому в даній точці $\mathbf{K}$ відповідає найбільше значення відповідної функції $Q_i(\mathbf{K})$. Якщо у випадку лінійного згортання можливі невиправдано невдалі значення деяких $Q_i(\mathbf{K})$ за рахунок досить вдалих значень інших критеріїв, то у випадку мінімаксного згортання шляхом мінімізації $F_2(\mathbf{K})$ можна отримати гарантовану нижню оцінку для всіх критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$.

Недоліком даного методу розв'язку є неможливість отримання в точці оптимуму бажаного співвідношення між критеріями $Q_i(\mathbf{K})$ (якщо воно відоме).

4. Адаптивний метод [6] належить до методів інтерактивного програмування. Він засновується на використанні експертних розв'язків в процесі вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації. Суть його полягає в наступному. Експерту надається певна точка $\mathbf{K}_j$ на парето-оптимальній множині розв'язків, і вказуються числові значення всіх критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$ в цій точці. Експерт приймає рішення, по якому з *i* критеріїв необхідно виконати мінімізацію. В отриманій точці $\mathbf{K}_{j+1}$ визначаються числові значення всіх критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$ і знову надаються експерту і так далі до тих пір, доки експерт не зупиниться на розв'язку $\mathbf{K}_*$, який він визнає оптимальним.

Даний метод застосовується для вирішення задач, які складно піддаються формалізації і для вирішення яких необхідні знання експерта. Зрозуміло, що даний метод не може бути покладений в основу роботи автоматичних систем регулювання.

5. Лексикографічна оптимізація [8] належить до методів цільової оптимізації. Застосовується у випадку, якщо можна провести ранжування критеріїв за ступенем важливості. Суть методу полягає в наступному. Спочатку проводиться мінімізація критерію, що має найбільший пріоритет, наприклад $Q_1(\mathbf{K})$. У випадку існування декількох розв'язків цієї задачі, проводиться мінімізація другого критерію $Q_2(\mathbf{K})$, а оптимальне значення першого вводиться як обмеження і т. д.

Застосування даного методу для розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації якості електричної енергії пропонується в [2, 9, 10].

Недоліком цього методу є складність проведення ранжування критеріїв, що знаходяться в протиріччі одні з одними. До того ж в точці оптимуму спостерігаються невиправдано вдалі значення критеріїв, що мають більший пріоритет. Даний метод неможливо використовувати при наявності рівнозначних критеріїв.

Загальним недоліком для всіх вище перерахованих методів розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації є невизначеність в обґрунтуванні важливості критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$.

6. Метод наближення до утопічної (ідеальної) точки в просторі критеріїв в понятті деякої міри [5] також належить до методів цільової оптимізації. Застосування даного методу є одним із способів подолання невизначеності в обґрунтуванні важливості критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$.

Під утопічною точкою слід розуміти точку $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\min}, Q_{2\min}, ..., Q_{m\min})$, координатами якої є оптимальні значення по кожному з критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$.

Розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом наближення до утопічної точки визначається в два етапи:

1 етап. Оптимізацією окремих критеріїв визначаються координати утопічної точки $Q_{\text{ут}} = (Q_{\text{ут}1}, Q_{\text{ут}2}, ..., Q_{\text{ут}i})$ в просторі критеріїв $\{\mathbf{Q}\} \subset \mathbb{R}^m$.

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 $\Omega \subset \mathbb{R}^{\mathrm{k}}$.

Спосіб вимірювання відстані ρ обирається одним з наступних [11]:

$$\rho_{L^p} = \left(\sum_{i=1}^{m} \left| Q_i(\mathbf{K}) - Q_{\text{ут}i} \right|^p \right)^{\frac{1}{p}}. \tag{5}$$

Всі співвідношення (5) задовольняють аксіомам відстані. Відстань ρ_{L^1} ($p = 1$) називається архімедовою відстанню, ρ_{L^2} ($p = 2$) − евклідовою. При $p \to \infty$ вираз (5) набуває вигляду:

$$\rho_C = \max_{i=1, ..., m} \left\{ \left| Q_i(\mathbf{K}) - Q_{\text{ут}i} \right| \right\}. \tag{6}$$

Відстань (6) називається чебишевською. В залежності від вибору відстані вигляд поверхонь рівновіддаленості $\rho = \mathrm{const}$ отримується різним, внаслідок чого різнитись будуть і розв'язки, що виділяються із множини ефективних розв'язків.

Розглянемо детальніше другий етап розв'язку задачі для відстаней ρ_{L^2} і ρ_C.

1. Мінімізація евклідової відстані ρ_{L^2} (або квадрату відстані $\rho^2_{L^2}$) від утопічної точки до множини парето-оптимальних розв'язків [5]:

$$\begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{m} \mu_i \frac{\left(Q_i(\mathbf{K}) - Q_{\text{ут}i}\right)^2}{\beta_i} \to \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \tag{7}$$

де β_i − коефіцієнти, що враховують різнорідність критеріїв (зазвичай приймаються рівними максимальному відхиленню відповідного критерію);

μ_i − вагові коефіцієнти, що враховують важливість кожного з критеріїв.

Геометрична інтерпретація даного методу на прикладі задачі (1) приведена на рис. 1 (точка Q_{E}).

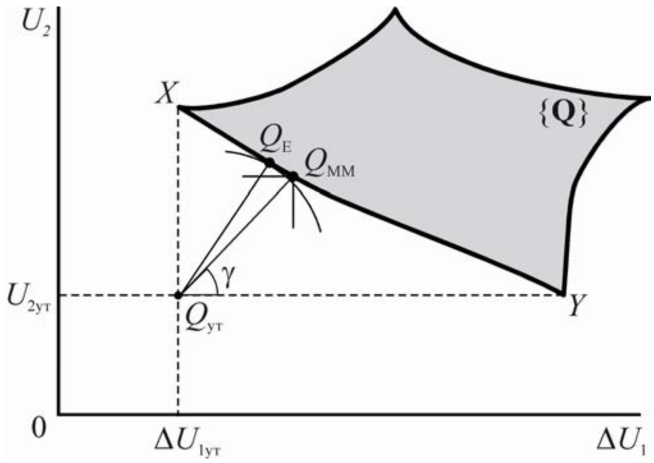


Рисунок 1 – Геометрична інтерпретація розв'язків задачі багатокритеріальної оптимізації для ρ_{L^2} і ρ_C.

2. Мінімізація чебишевської відстані ρ_C від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків дає більш «справедливий» результат по відношенню до кожного з критеріїв [5]. Для задачі (1) маємо:

$$\begin{cases} \max\limits_{i=1,2} \left\{ \mu_i \left| \dfrac{Q_i(\mathbf{K}) - Q_{\text{ут}i}}{\beta_i} \right| \right\} \to \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{cases} \tag{8}$$

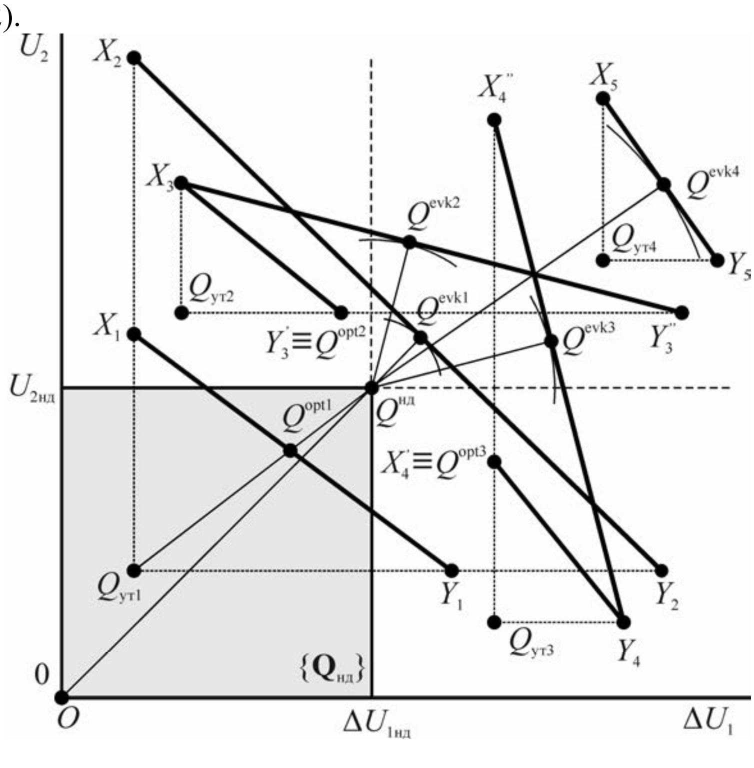
Геометрична інтерпретація такого мінімаксного методу наближення до утопічної точки на прикладі задачі (1) приведена на рис. 1 (точка Q_{MM}). Як видно з рис. 1, розв'язком задачі (8) є точка, яка знаходиться на перетині кривої XY та променя, що виходить з утопічної точки $Q_{\text{ут}}$ під кутом γ. У випадку нормування критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$ $\gamma = 45°$.

Мінімізація найбільшого з відхилень від утопічної точки дає більш «економічний» розв'язок, такий, при якому сума всіх відносних втрат (під втратами слід розуміти віддалення від утопічної точки) буде мінімальною.

Згідно ГОСТ 13109-97, для кількісної характеристики якості електричної енергії застосовуються нормально допустимі та гранично допустимі значення показників якості електричної енергії. Значення показників якості електричної енергії на затискачах електроприймачів за встановлений період часу не повинно перевищувати нормально допустимі з інтегральною ймовірністю 95 % [12]. Тому підхід до розв'язку задачі (1) повинен максимально враховувати вимоги ГОСТ 13109-97 стосовно нормально допустимих значень показників якості електроенергії. Зважаючи на це, найдоцільнішим видається підхід до розв'язку задачі, заснований на наближенні до утопічної точки в просторі критеріїв.

Аналітичні вирази для знаходження координат утопічної точки для задачі (1) опубліковані в [3], тому розглянемо лише другий етап розв'язку.

Шляхом математичного моделювання було встановлено, що парето-оптимальна множина розв'язків в просторі критеріїв для задачі (1) має вигляд близький до лінійного (рис. 2).



Жирними лініями виділені множини ефективних розв'язків $\{\mathbf{Q}_{\text{ef}}\}$

Рисунок 2 – Геометрична інтерпретація розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1) шляхом наближення до утопічної точки

Для якомога кращого забезпечення вимог ГОСТ 13109-97 стосовно інтегральної ймовірності нормально допустимих значень показників якості електричної енергії, в основу пропонованого методу розв'язку задачі покладено наступні міркування:

1. У випадку, коли множина ефективних розв'язків $\{\mathbf{Q}_{\text{ef}}\}$ та множина нормально допустимих значень $\{\mathbf{Q}_{\text{нд}}\}$ перетинаються, тобто $\{\mathbf{Q}_{\text{ef}}\} \cap \{\mathbf{Q}_{\text{нд}}\} \neq \varnothing$, розв'язок слід

шукати як мінімаксне наближення до утопічної точки у вигляді (8) при значеннях вагових коефіцієнтів:

$$\mu_i = \frac{\alpha_i}{\sum\limits_{i=1}^{m} \alpha_i}, \tag{9}$$

де α − коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$\alpha_i = \frac{\beta_i}{\beta_i - Q_{\text{ут}i}}, \tag{10}$$

де $\beta = \{\Delta U_{1\text{нд}}, U_{2\text{нд}}\}$ − множина нормально допустимих значень показників якості електричної енергії.

Такий підхід дозволить завжди обирати із множини парето-оптимальних розв'язків $\{\mathbf{Q}_{\text{ef}}\}$ такий, який з одного боку, завжди буде належати множині нормально допустимих значень $\{\mathbf{Q}_{\text{нд}}\}$, а з іншого – забезпечувати співвідношення критеріїв в точці оптимуму близьке до бажаного (рівномірного). Геометричною інтерпретацією розв'язку даної задачі (рис. 2) є точка Q^{opt1}, що лежить на перетині кривої X_1Y_1 та променя, що виходить із утопічної точки $Q_{\text{ут1}}$ та проходить через точку $Q^{\text{нд}}(\Delta U_{1\text{нд}}, U_{2\text{нд}})$.

2. У випадку, коли $\{\mathbf{Q}_{\text{ef}}\} \cap \{\mathbf{Q}_{\text{нд}}\} = \varnothing$, з множини ефективних розв'язків слід обирати розв'язок, який має найменшу евклідову відстань до множини $\{\mathbf{Q}_{\text{нд}}\}$. Це дозволить забезпечити мінімальні відхилення критеріїв від множини нормально допустимих розв'язків $\{\mathbf{Q}_{\text{нд}}\}$в точці оптимуму.

Даний метод можна записати наступним чином:

$$\mathbf{K}^{\text{opt}} = \begin{cases} \mathbf{K}^{\text{opt1}}, \left(\Delta U_{1\text{ут}} \le \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_{2\text{ут}} \le U_{2\text{нд}}\right) \wedge \left(\Delta U_1^{\text{opt1}} \le \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_2^{\text{opt1}} \le U_{2\text{нд}}\right); \\ \mathbf{K}^{\text{opt2}}, \left(\Delta U_{1\text{ут}} \le \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_{2\text{ут}} > U_{2\text{нд}}\right) \wedge \left(\Delta U_1^{\text{opt2}} \le \Delta U_{1\text{нд}}\right); \\ \mathbf{K}^{\text{opt3}}, \left(\Delta U_{1\text{ут}} > \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_{2\text{ут}} \le U_{2\text{нд}}\right) \wedge \left(U_2^{\text{opt3}} \le U_{2\text{нд}}\right); \\ \mathbf{K}^{\text{evk}}, \left[\left(\Delta U_{1\text{ут}} \le \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_{2\text{ут}} \le U_{2\text{нд}}\right) \wedge \left(\Delta U_1^{\text{opt1}} > \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_2^{\text{opt1}} > U_{2\text{нд}}\right)\right] \vee \\ \vee \left[\left(\Delta U_{1\text{ут}} \le \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_{2\text{ут}} > U_{2\text{нд}}\right) \wedge \left(\Delta U_1^{\text{opt2}} > \Delta U_{1\text{нд}}\right)\right] \vee \\ \vee \left[\left(\Delta U_{1\text{ут}} > \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_{2\text{ут}} \le U_{2\text{нд}}\right) \wedge \left(U_2^{\text{opt3}} > U_{2\text{нд}}\right)\right] \vee \\ \vee \left[\left(\Delta U_{1\text{ут}} > \Delta U_{1\text{нд}}\right) \wedge \left(U_{2\text{ут}} > U_{2\text{нд}}\right)\right]. \end{cases} \tag{11}$$

де $\mathbf{K}^{\text{opt}}$ − розв'язок задачі (11);

$\mathbf{K}^{\text{opt}j}$ − розв'язок задачі

$$\begin{cases} \max\left\{ \mu_1^{(j)} \left| \dfrac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{\text{ут}}}{\Delta U_{1\text{нд}}} \right|,\ \mu_2^{(j)} \left| \dfrac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2\text{ут}}}{U_{2\text{нд}}} \right| \right\} \to \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \tag{12}$$

при $j=1$: $\mu_1^{(1)} = \dfrac{\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2}$; $\mu_2^{(1)} = \dfrac{\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2}$;

$j=2$: $\mu_1^{(2)} = 0$; $\mu_2^{(2)} = 1$;

$j=3$: $\mu_1^{(3)} = 1$; $\mu_2^{(3)} = 0$;

де $\alpha_1 = \dfrac{\Delta U_{\text{нд}}}{\Delta U_{\text{нд}} - \Delta U_{\text{ут}}}$, $\alpha_2 = \dfrac{U_{2\text{нд}}}{U_{2\text{нд}} - U_{2\text{ут}}}$;

$Q^{\text{opt}i}\left(\Delta U_1^{\text{opt}i}, U_2^{\text{opt}i}\right)$ – значення критеріїв в точці $\mathbf{K}^{\text{opt}i}$;

$\mathbf{K}^{\text{evk}}$ – розв'язок задачі

$$\begin{cases} \sqrt{\left(\dfrac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{\text{ут}}}{\Delta U_{1\text{нд}}}\right)^2 + \left(\dfrac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2\text{ут}}}{U_{2\text{нд}}}\right)^2} \to \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{cases} \tag{13}$$

На рис. 3. приведено графічну ілюстрацію розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1) методами, описаними вище.

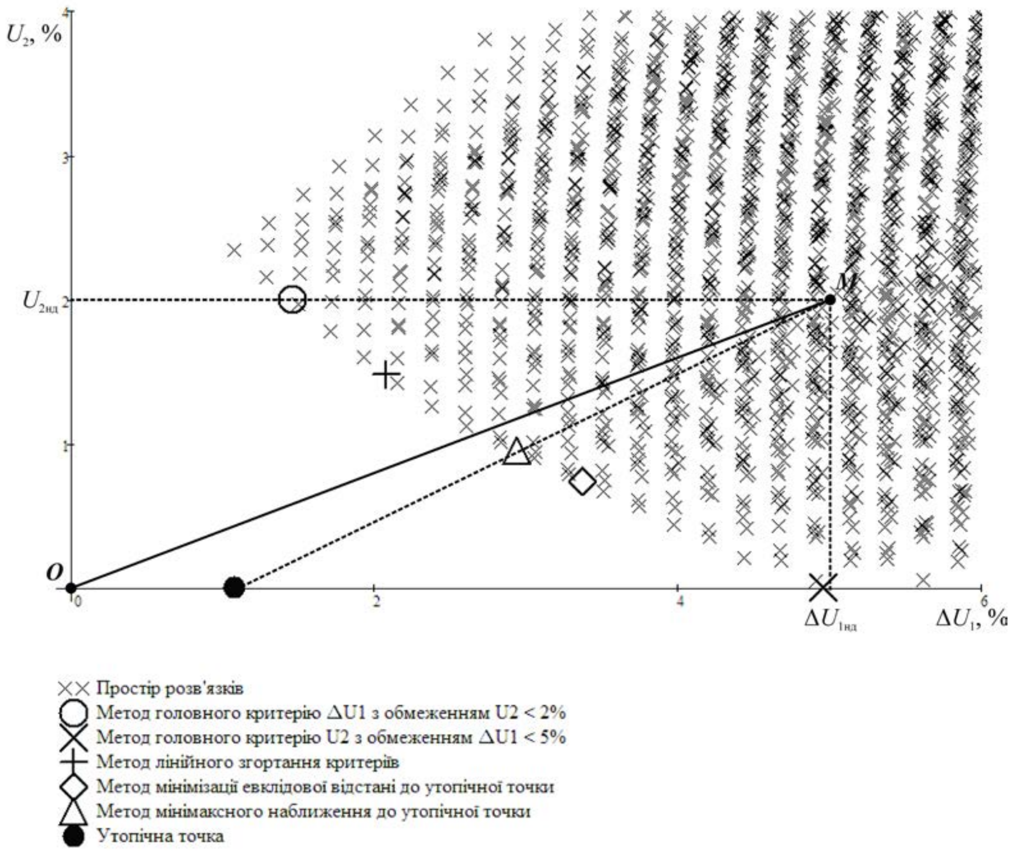


Рисунок 3 – Графічна ілюстрація числового прикладу розв'язку задачі (1)

Як видно з рис. 3 найбільш близьким до бажаного є розв’язок, отриманий в результаті мінімаксного наближення до утопічної точки. Непоганий результат показує також мінімізація евклідової відстані. Всі інші методи дають невиправдано завищені значення одного з критеріїв над іншим в точці оптимуму.

Таким чином, в результаті проведеного дослідження:

1. Проаналізовано існуючі методи розв’язку задач багатокритеріальної оптимізації, які можуть бути покладені в основу роботи автоматичних систем регулювання.

2. Запропоновано метод розв’язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги, заснованого на наближенні до утопічної точки в просторі критеріїв. Даний метод якомога краще враховує вимоги ГОСТ 13109-97 до значень показників якості електричної енергії. Він може бути покладений в основу законів регулювання автоматичних систем управління силовим трансформатором з безконтактним пристроєм РПН, що працює в мережі з ізольованою нейтраллю або зі схемою з’єднання обмоток Δ/Z («трикутник»/«зустрічний зигзаг»).

Список літератури

1. Бурбело М. Й. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. − № 6. – С. 242 – 251.
2. 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.
3. Плєшков П. Г. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм / П. Г. Плєшков, 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.
4. Плєшков П. Г. Оптимальне керування пристроєм РПН силового трансформатора, що працює в мережі з глухозаземленою нейтраллю / П. Г. Плєшков, В. В. Зінзура, М. В. Кубкін // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 117 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2011. – С. 97−99.
5. Нетушил А. В., Балтрушевич А.В., Бурляев В.В. и др. Теория автоматического управления: нелинейные системы, управление при случайных воздействиях: учебник для вузов / Под ред. Нетушила А.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1983 – 432 с.
6. Растригин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
7. Машунин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации. – М.: Наука, 1986. – 141 с.
8. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
9. Аввакумов В. Г. Об одной лексикографической задаче многоцелевой оптимизации качества электроэнергии / В. Г. Аввакумов, А. М. Волоцкий // Изв. ВУЗов Энергетика. – 1977. − № 7. – С. 8−12.
10. Зорин В. В. Об одном правиле предпочтения частных целей в задачах многоцелевой оптимизации качества электроэнергии / В. В. Зорин, А. М. Волоцкий // Электрические сети и системы. Республиканский межведомственный науч.-техн. Сб. – 1987. – Вып. 23. – С. 43−46.
11. Токарев В. В. Методы оптимальных решений. В 2 т. Т.2. Многокритериальность. Динамика. Неопределенность. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 420 с.
12. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

В. Зинзура
Методы решения задачи многокритериальной оптимизации регулирования напряжения в электрических сетях

В статье проведен анализ существующих методов решения задач многокритериальной оптимизации, произведен выбор метода решения задачи многокритериальной оптимизации регулирования напряжения в электрических сетях, который как можно лучше учитывает требования ГОСТ 13109-97 касательно нормально допустимых значений показателей качества электроэнергии. Данный метод решения может быть положен в основу законов регулирования автоматических систем управления силовым трансформатором с бесконтактным устройством РПН, который работает в сети с изолированной нейтралью или со схемой соединения обмоток Δ/Z («треугольник»/«встречный зигзаг»).

V. Zinzura
The justification of the solution of the problem of multicriteria optimization of voltage control in power networks

The article analyzes the existing methods for solving problems of multiobjective optimization, selection method for solving the problem of the multiobjective optimization of the voltage control in networks, which allows for as much as possible about the requirements of GOST 13109-97 normally allowable values of quality of electric power. This solution method can be used as a basis control laws automated control systems with contactless voltage transformer load tap-changer, who work in networks with isolated neutral.

Одержано 06.04.12

УДК 620.4+658.22

Ю.И.Казанцев, доц., канд. техн. наук, Р.В.Мотрой, магистр
Кировоградский национальный технический университет

Исследование электропотребления и оптимальное размещение компенсирующих устройств в системе электроснабжения ремонтно-механического завода

В статье показаны вывод энергетических характеристик, являющихся основой нормирования расходов электроэнергии и её рационального использования, а также экономия электроэнергии за счёт оптимального размещения компенсирующих устройств.
энергетические характеристики, корреляционный анализ, методы оптимизации

Рост электропотребления в промышленности предъявляет новые требования к точности и обоснованности решений различных технико-экономических и оптимизационных задач, решаемых в энергетике и связанных, в конечном итоге, с рациональным использованием электрической энергии.

Исследования в этой области заложены в работах Вейца В.И., Авилова-Карнаухова Б.Н., Ястребова П.П., Гофмана И.В., Каялова Г.М., Константинова Б.А., Волобринского С.Д. и др.

Рациональное использование электроэнергии не является конъюктурной задачей. Эта задача повседневной работы инженерного корпуса предприятия по экономии энергоресурсов.