

О.П. Лазуренко, О.М. Мороз, С.О. Тимчук, О.О. Мірошник, О.А. Савченко

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ В СХЕМІ ПЛАВЛЕННЯ ОЖЕЛЕДІ З БЕЗІНДУКТИВНИМ КОНТУРОМ НА ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 6-10 КВ

*Мета.* Метою статті є визначення електричних характеристик та розроблення методу розрахунку і алгоритму оптимізації конструктивних параметрів автотрансформаторів, призначених для використання в схемі плавлення ожеледі з безіндуктивним контуром на повітряних лініях електропередач 6-10 кВ. *Методологія.* Розроблення техніко-економічної моделі та методу розрахунку конструктивних параметрів автотрансформатора плавлення ожеледі виконано на засадах системного підходу. Оптимізація конструкції автотрансформаторів плавлення ожеледі проведена з використанням комбінованого алгоритму на основі методу просторової сітки. *Результати.* Одержано електричні характеристики та оптимізовано конструктивні параметри серії автотрансформаторів, призначених для використання в схемі плавлення ожеледі з безіндуктивним контуром на повітряних лініях електропередач 6-10 кВ. *Наукова новизна.* Запропоновано метод розрахунку конструктивних параметрів автотрансформаторів плавлення ожеледі, особливістю якого є використання критерію мінімуму вартості активної частини та врахування зумовлених схемою вмикання автотрансформаторів технічних обмежень похибок за величиною та кутом вторинного струму. *Практичне значення.* Результати конструктивного розрахунку автотрансформаторів плавлення ожеледі є достатніми для впровадження їх серійного виробництва в промислових умовах. Бібл. 11, табл. 2, рис. 4.

*Ключові слова:* повітряна лінія електропередач, плавлення ожеледі, автотрансформатор плавлення ожеледі, техніко-економічна модель, оптимізація конструктивних параметрів.

*Цель.* Целью статьи является определение электрических характеристик и разработка метода расчета и алгоритма оптимизации конструктивных параметров автотрансформаторов, предназначенных для использования в схеме плавления гололеда с безиндуктивным контуром на воздушных линиях электропередачи 6-10 кВ. *Методология.* Разработка технико-экономической модели и метода расчета конструктивных параметров автотрансформатора плавки гололеда выполнена на основе системного подхода. Оптимизация конструкции автотрансформаторов плавки гололеда проведена с использованием комбинированного алгоритма на основе метода пространственной сетки. *Результаты.* Получены электрические характеристики и оптимизированы конструктивные параметры серии автотрансформаторов, предназначенных для использования в схеме плавки гололеда с безиндуктивным контуром на воздушных линиях электропередачи 6-10 кВ. *Научная новизна.* Предложен метод расчета конструктивных параметров автотрансформаторов плавки гололеда, особенностью которого является использование критерия минимума стоимости активной части и учет обусловленных схемой включения автотрансформаторов технических ограничений погрешностей по величине и углу вторичного тока. *Практическое значение.* Результаты конструктивного расчета автотрансформаторов плавки гололеда достаточны для внедрения их серийного производства в промышленных условиях. Библ. 11, табл. 2, рис. 4.

*Ключевые слова:* воздушная линия электропередачи, плавка гололеда, автотрансформатор плавки гололеда, технико-экономическая модель, оптимизация конструктивных параметров.

**Вступ.** На даний час найбільш ефективним шляхом захисту повітряних ліній електропередач (ПЛ) 6-10 кВ, які широко використовуються в ряді країн, від дії ожеледі є її плавлення [1]. Технологія плавлення ожеледі полягає у використанні певної схеми плавлення, яка на основі закону Джоуля–Ленца дозволяє досягти виділення в одиниці довжини проводу ПЛ теплової енергії, достатньої для розтоплення відкладень за прийнятний час, як правило близько 1 години. Для означення відповідної кількості теплової енергії в даній роботі використано термін «питома потужність плавлення ожеледі».

В схемах плавлення ожеледі часто застосовуються електросилові установки плавлення ожеледно-паморозевих відкладень (ОПВ), які узгоджують параметри енергосистеми з параметрами ліній [2]. Прикладом такої установки є автотрансформатор плавлення ожеледі (АПО), який вмикається за схемою плавлення, запропонованою в [3]. Як відомо, використання автотрансформаторів в порівнянні з трансформаторами, за рахунок наявності електричного зв'язку між обмотками, дозволяє суттєво зменшити потужність електричного апарату. Окрім цього, особливістю

запропонованої схеми плавлення є застосування безіндуктивного контуру, який дозволяє зменшити реактивну складову навантаження автотрансформатора практично до нуля.

На сьогоднішній день автотрансформатори, придатні для використання в запропонованій схемі плавлення ожеледі з безіндуктивним контуром, відсутні. Тому існує задача визначення електричних характеристик даних автотрансформаторів, розробки методу розрахунку та алгоритму оптимізації їх конструктивних параметрів.

Аналіз існуючих методів розрахунку силових трансформаторів та автотрансформаторів промислових серій [4-6] показав, що вони базуються на використанні критерію приведених витрат, який дозволяє встановити оптимальне співвідношення між капітальними та поточними витратами на трансформатор. Даний підхід не є доцільним для автотрансформаторів плавлення ожеледі, оскільки вони мають незначний сумарний річний час роботи (до 50-100 год). Врахування в методі розрахунку АПО поточних витрат приведе до зайвого ускладнення його техніко-економічної моделі і збільшення часу роботи алгори-

тму оптимізації. Окрім цього, існуючі методи розрахунку не враховують зумовлені схемою вмикання АПО обмеження за значенням кута між первинним та вторинним струмом (обмеження за кутовою похибкою) та за відносною різницею первинного та приведенного вторинного струму (обмеження за струмовою похибкою), які є важливими для АПО з точки зору забезпечення необхідної питомої потужності плавлення ожеледі.

Попередній аналіз показав, що залежності параметрів АПО від дискретних і безперервних незалежних змінних мають нелінійний характер, тому задача оптимізації конструкції такого автотрансформатора є задачею нелінійного програмування. Існує досить велика кількість алгоритмів вирішення даних задач [7-10]. Проте загальних методів вирішення задач нелінійного програмування в змішаному просторі дискретних і безперервних змінних на сьогоднішній день не розроблено. Характерний недолік існуючих методів полягає в тому, що вони не є універсальними. Застосування певних штучних прийомів дозволяє звести задачу до якого-небудь окремого типу. Одним з таких прийомів є перетворення незалежних змінних до одного типу, наприклад безперервного [10]. Але такий прийом може дати значні похибки при зворотному перетворенні змінних. Перетворення змінних до дискретного вигляду є більш прийнятним, оскільки безперервні змінні можна дискретизувати з малим кроком і одержати рішення з заданою точністю, але з великими витратами машинного часу. Проте, у разі багатоекстремального характеру цільової функції і наявності нелінійних обмежень на допустимій області рішень, практично всі методи дискретного програмування зводяться до суцільного перебору дискретних змінних. У роботі [11] запропоновано підхід до вирішення задачі нелінійного програмування для випадку дискретних і безперервних змінних в загальній постановці. Перевагою даного підходу є врахування специфіки конкретної системи та її математичної моделі, у зв'язку з чим він був прийнятий у якості основи для розробки комбінованого алгоритму оптимізації конструктивних параметрів автотрансформаторів плавлення ожеледі.

**Метою досліджень** є визначення електричних характеристик та розроблення методу розрахунку і алгоритму оптимізації конструктивних параметрів автотрансформаторів, призначених для використання в схемі плавлення ожеледі з безіндуктивним контуром на повітряних лініях електропередач 6-10 кВ.

**Розрахунок електричних параметрів автотрансформаторів плавлення ожеледі.** Для проведення оптимізації конструктивних параметрів АПО необхідно розрахувати їх бажані електричні характеристики. В [3] проведено аналіз електричних процесів в схемі плавлення ожеледі на основі автотрансформатора з безіндуктивним вторинним контуром. Показано, що запропонована схема дозволяє в режимі плавлення ожеледі збільшувати еквівалентний активний опір ПЛ в число разів

$$k_R = \frac{(1+k_I)^2(1-a)+a}{a(1-a)k_I^2}, \quad (1)$$

де  $k_I$  – коефіцієнт трансформації АПО за струмом;  $a$  – коефіцієнт співвідношення активних опорів зовнішньої та внутрішньої частин проводу

$$a = \frac{R}{R_e}, \quad (2)$$

де  $R, R_e$  – активний опір відповідно всього проводу та його зовнішньої частини.

Індуктивний опір лінії при цьому практично не змінюється.

В серії АПО було передбачено три типорозміри, які відрізняються максимальною довжиною ПЛ. Кожен з АПО призначений для плавлення відкладень на ПЛ з довжиною від деякого значення  $l_{\min}$  до значення  $l_{\max}$ . Для забезпечення необхідної питомої потужності плавлення на ПЛ з будь-якою довжиною в межах  $l_{\min} \div l_{\max}$  передбачено регулювання коефіцієнта  $k_R$ . Це також дозволить оперативно регулювати кількість теплової енергії, яка виділяється в провадах ПЛ при зміні погодних умов, впливати на час плавлення ОПВ.

Як показали оціночні розрахунки, для отримання необхідних значень питомої потужності плавлення еквівалентний активний опір ПЛ повинен бути значно більшим від еквівалентного індуктивного опору, тому останнім можна знехтувати. Тоді значення коефіцієнта  $k_R$ , який повинен забезпечуватись АПО, може бути визначене виходячи з необхідної величини питомої потужності плавлення ожеледі  $P_0=56$  кВт/км [1] на основі виразу

$$k_R \approx \frac{U^2}{3P_0 R_0 l^2}, \quad (3)$$

де  $U$  – номінальна напруга лінії, кВ;  $R_0$  – питомий активний опір проводу, Ом/км;  $l$  – довжина ПЛ, км.

Далі на основі виразів, отриманих в [3], були розраховані основні електричні параметри АПО. Результати розрахунку наведені в табл. 1. Номінальні струми та напруги обмоток АПО приймалися рівними максимальним із значень, можливих під час роботи кожного з автотрансформаторів. Окрім цього, в табл. 1 наведено допустимі значення похибок за величиною вторинного струму та його фазою відносно первинного струму. Обмеження даних похибок зумовлене схемою вмикання автотрансформаторів [3] і є необхідним з точки зору забезпечення допустимого відхилення питомої потужності плавлення ожеледі, від якої залежить час плавлення відкладень і, як наслідок, успішність цього процесу. Для вказаних у табл. 1 граничних значень похибок можливе відхилення втрат потужності в проводі складає  $\pm 10\%$ .

**Техніко-економічна модель автотрансформатора.** Для розрахунку АПО використано основи методів, які застосовуються для розрахунку силових трансформаторів та автотрансформаторів, з деякими відмінностями. Так, оскільки витратами на експлуатацію АПО, про що зазначено вище, можна знехтувати, то в якості показника їх оптимізації запропоновано використати відносно простий критерій мінімуму вартості активної частини  $C \rightarrow \min$ .

Результати розрахунку основних електричних характеристик автотрансформаторів плавлення ожеледі, покладені в основу оптимізації їх конструктивних параметрів

Типорозмір АПО	Параметри АПО								
	Довжина лінії, для якої призначено АПО, км	Діапазон довжини лінії, км	Коефіцієнт збільшення активного опору (для проводу перерізом 70 мм <sup>2</sup> )	Номінальний коефіцієнт трансформації за струмом	Номінальний струм первинної/вторинної обмоток, А	Номінальна потужність, кВА	Номінальна напруга первинної обмотки, В	Допустимі похибки	
								за значенням вторинного струму, %	за фазою вторинного струму, ° ел.
Типорозмір №1	4÷10	4÷4,7 4,7÷5,4 5,4÷6,3 6,3÷7,4 7,4÷8,6 8,6÷10	75,6 55,9 41,6 30,2 22,4 16,5	0,28 0,34 0,41 0,51 0,63 0,79	110/182	2000	6000	-5,4	±10
Типорозмір №2	4÷16	4÷4,7 4,7÷5,4 5,4÷6,3 6,3÷7,4 7,4÷8,6 8,6÷10 10÷11,7 11,7÷13,7 13,7÷16	75,6 55,9 41,6 30,2 22,4 16,5 12,0 8,8 6,6	0,28 0,34 0,41 0,51 0,63 0,79 1,04 1,40 1,99	174/182	3200	6000	-5,4	±10
Типорозмір №3	4÷25	4÷4,7 4,7÷5,4 5,4÷6,3 6,3÷7,4 7,4÷8,6 8,6÷10 10÷11,7 11,7÷13,7 13,7÷16 16÷18,5 18,5÷21,5 21,5÷25	75,6 55,9 41,6 30,2 22,4 16,5 12,0 8,8 6,6 4,8 4,1 3,5	0,28 0,34 0,41 0,51 0,63 0,79 1,04 1,40 1,99 3,23 4,67 7,83	207/182	3200	6000	-5,4	±10

Як зазначено вище, для АПО повинні бути забезпечені на належному рівні похибки – кутова та за струмом

$$f_I \leq f_{Ia}, \quad (4)$$

$$\delta_I \leq \delta_{Ia}. \quad (5)$$

АПО повинен також характеризуватись певними значеннями температури перегрівання обмоток (первинної  $\Delta t_1$  та вторинної  $\Delta t_2$ ) над навколишнім повітрям, які повинні бути не більшими за допустиме значення для прийнятого класу ізоляції  $F$  АПО  $\Delta t_a = 140$  °С (з урахуванням найбільшої можливої температури повітря під час плавлення ожеледі  $t_{air} = 0$  °С)

$$\Delta t_1 \leq \Delta t_a, \quad (6)$$

$$\Delta t_2 \leq \Delta t_a. \quad (7)$$

Перевірка на нагрівання обмоток під час короткого замикання проводилась після детального розрахунку АПО.

Таким чином, задача проектування оптимального АПО полягає в мінімізації цільової функції з урахуванням заданих обмежень. Техніко-економічна модель оптимальної конструкції АПО має вигляд системи:

$$\begin{cases} C \rightarrow \min; \\ f_I \leq f_{Ia}; \\ \delta_I \leq \delta_{Ia}; \\ \Delta t_1 \leq \Delta t_a; \\ \Delta t_2 \leq \Delta t_a. \end{cases} \quad (8)$$

АПО передбачено виконати трифазними, з літою ізоляцією та просторовою нерозрізною магнітною системою, яка дозволяє отримати рівність струмів намагнічування, а отже і похибок АПО, у всіх трьох фазах, а це, в свою чергу, усуває відмінність у втратах потужності в режимі плавлення в проводах різних фаз [6]. Для виконання осердя АПО прийнято холоднокатану анізотропну сталь марки 3405, яка характеризується прийнятними магнітними властивостями при помірній ціні. Ізоляційні відстані АПО були прийняті на основі існуючого досвіду проектування трансформаторів та діючих стандартів.

Аналіз показав, що до незалежних змінних, якими можна описати конструкцію АПО, входять:  $d$  – діаметр стрижня автотрансформатора;  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  – розміри обмотувального проводу первинної та вто-

ринної обмоток;  $n_1, n_2$  – число паралельних проводів в обмотках;  $N_{11}$  – число шарів первинної обмотки;  $B$  – магнітна індукція в стрижнях магнітної системи. Для трифазного АПО одержано залежності для цільової функції, а також основних характеристик, у тому числі тих, які підлягають обмеженню, від незалежних змінних. За винятком незначних відмінностей, вони відповідають відомим виразам, які наведені в спеціалізованій літературі з проектування та розрахунку силових трансформаторів, зокрема [4-6]. У зв'язку зі значною громіздкістю цих залежностей та їх очевидністю, в даній роботі вони не наводяться.

**Оптимізація конструктивних параметрів автотрансформаторів плавлення ожедді.** Вихідними даними для оптимізації конструктивних параметрів АПО є їх електричні характеристики, наведені в табл. 1, а також параметри вибраних електротехнічних матеріалів.

Аналіз незалежних змінних показує, що серед змінних, що дискретно змінюються, можна виділити дві групи. Перша – це змінні, які можуть приймати значення з типорозмірного ряду ( $d, h_1, h_2, b_1, b_2$ ), друга – це цілочисельні змінні ( $N_{11}, n_1, n_2$ ). Третю групу складає змінна, що безперервно змінюється,  $B$ . Таким чином, в задачі присутні три групи змінних, для варіації яких можна використовувати схеми різних методів.

За основу було взято підхід з використанням методу просторової сітки, запропонований в [11]. Даний підхід не накладає обмежень ні на тип змінних, ні на критерій ефективності. Укрупнена структура комбінованого алгоритму являє собою три вкладених один в одного етапи (рис. 1).

Перший (зовнішній) етап алгоритму реалізує зміну тих незалежних змінних, які приймають значення з типорозмірного ряду, тобто фіксується конструкція трансформатора для внутрішніх етапів. На даному етапі має сенс заміна змінних. Область значень кожної змінної обмежується типорозмірним рядом вигляду

$$\begin{cases} d = \{d_i\}, i=1, \dots, n_d; \\ h_1 = \{h_{1j}\}, j=1, \dots, n_h; \\ h_2 = \{h_{2p}\}, p=1, \dots, n_h; \\ b_1 = \{b_{1k}\}, k=1, \dots, n_b; \\ b_2 = \{b_{1m}\}, m=1, \dots, n_b. \end{cases} \quad (9)$$

Кожному елементу типорозмірного ряду ставиться у відповідність його порядковий номер (індекс). Зважаючи на однозначну відповідність індексу елементу типорозмірного ряду, можна в якості незалежних змінних оптимізації прийняти їх індекси. Задача оптимізації на даному етапі може розв'язуватися в просторі цілочисельних змінних  $i, j, p, k, m$ .

Другий (середній) етап реалізує зміну цілочисельних незалежних змінних.

На третьому (внутрішньому) етапі здійснюється варіювання безперервної змінної, оскільки, за фіксованих конструктивних параметрів, цільова функція є безперервною. На внутрішньому циклі здійснюється

розрахунок цільової функції системи і перевірка обмежень на допустиму область рішень.

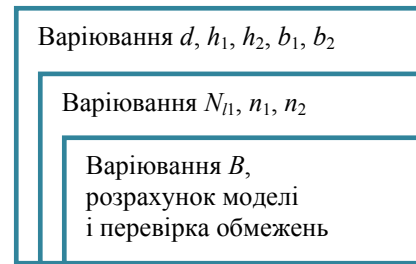


Рис. 1. Структура комбінованого алгоритму оптимізації АПО

Структура етапів, за якої для кожного поєднання значень незалежних змінних зовнішнього етапу знаходиться оптимальне для цих поєднань рішення внутрішніх етапів, приводить до реалізації принципу оптимальності Белмана на рівні структури алгоритму.

Для визначення можливості застосування на різних етапах алгоритму оптимізації методів, відмінних від методу сіток, було проведено дослідження залежності цільової функції від незалежних змінних. Аналізуючи характер залежності цільової функції від змінної  $B$  (рис. 2,а), можна відзначити, що в даному випадку функція є унімодальною. Для пошуку мінімуму цільової функції на третьому етапі комбінованого алгоритму можна скористатися схемою методу однонаправленого пошуку, причому принцип мінімакса реалізується для руху від максимального значення  $B$  до мінімального, оскільки мінімум цільової функції знаходиться поблизу максимального значення  $B$ . Максимальне значення індукції приймалось рівним  $B = 1,8$  Тл, оскільки більші значення для прийнятої марки сталі приводять до суттєвого зростання напруженості магнітного поля, яка, в свою чергу, викликає збільшення струму намагнічування і, як наслідок, похибок автотрансформатора. Більші значення індукції також викликають різке збільшення питомих втрат в сталі та її інтенсивне нагрівання. Для врахування обмежень функціонального типу, накладених на область значень цільової функції, раціонально скористатися функцією штрафу. Вона в даному випадку може бути достатньо простою, наприклад константою, величина якої є явно більшою від реальних значень цільової функції. Зважаючи на очевидну простоту, блок-схема третього етапу комбінованого алгоритму оптимізації не наводиться.

Аналіз характеру залежності цільової функції від змінних  $N_{11}, n_1, n_2$  (рис. 2,б,в) показує, що в даному випадку цільова функція не є унімодальною. Тому на другому етапі комбінованого алгоритму оптимізації слід скористатися схемою якого-небудь методу пошуку глобального оптимуму. Область варіації змінних на даному етапі відносно невелика. Тому перевага була віддана методу сканування (варіанту методу повного перебору поєднань значень змінних). Врахування обмежень функціонального типу відбувається автоматично, оскільки для кожного поєднання значень змінних  $N_{11}, n_1, n_2$  розв'язується задача третього етапу оптимізації, де обмеження вже враховані. Алгоритм методу сканування добре відомий і його блок-схема також не наводиться.

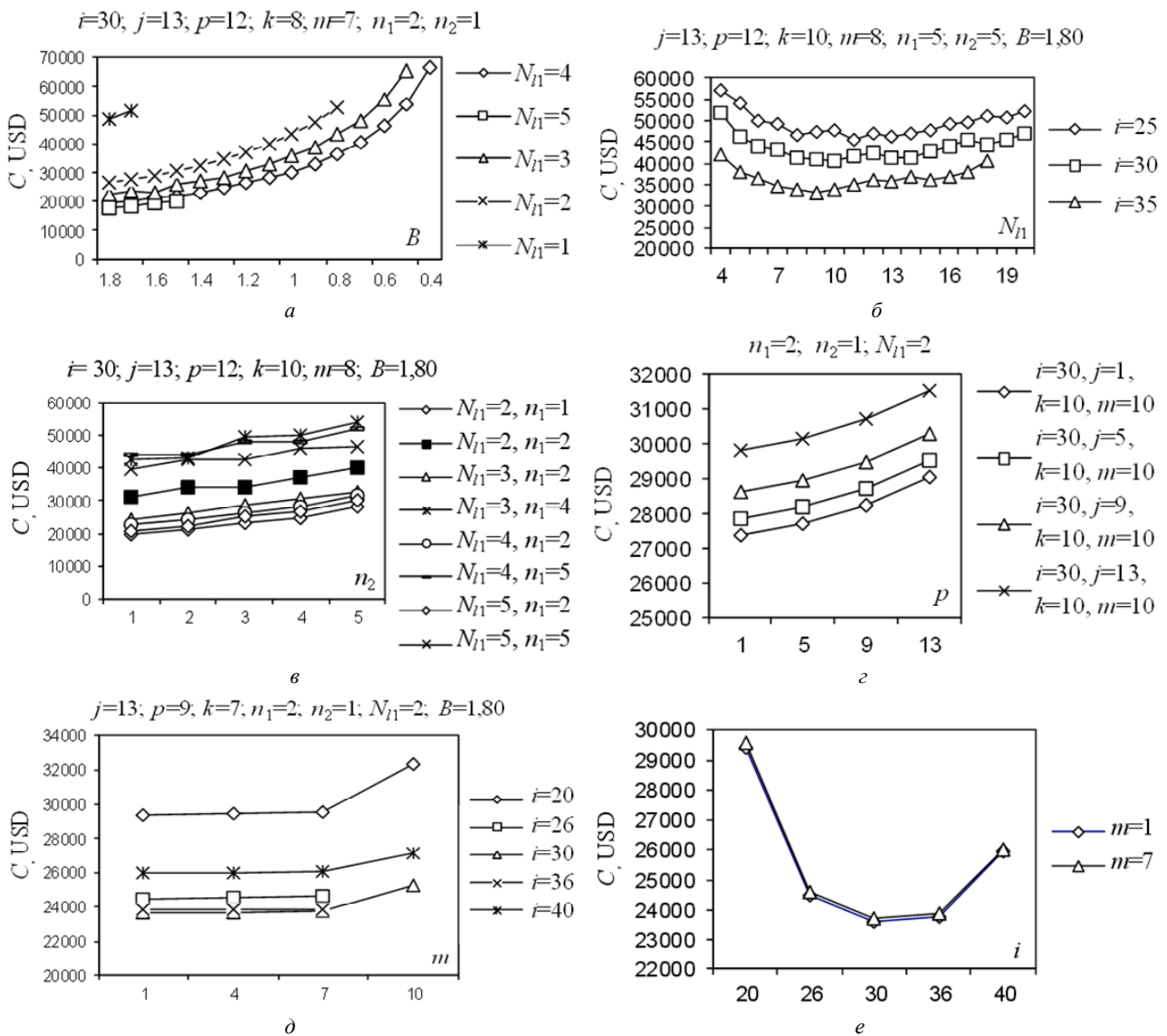


Рис. 2. Попередні дослідження цільової функції  $C$  (USD – дол. США)

Дещо більше зацікавлення викликає визначення методу оптимізації для першого етапу комбінованого алгоритму. Область зміни незалежних змінних достатньо велика (наприклад,  $i = 1, \dots, 56$ ), що робить неефективним застосування методу сканування. В той же час, аналіз характеру залежності цільової функції від незалежних змінних на даному етапі (рис. 2, з, д, е) показує, що дана функція є квазівипуклою. Цей факт дає право відійти від схеми методу повного перебору поєднань значень змінних. Пропонується застосувати схему методу просторової сітки зі змінним кроком, адаптувавши його для випадку цілочисельних змінних (крок сітки не може бути дрібним).

У загальному випадку збіжність методу просторової сітки залежить від вибору початкового кроку сітки і закону, за яким цей крок змінюється у міру звуження області пошуку оптимуму. Розрахункові дослідження збіжності розробленого варіанту алгоритму методу просторової сітки (рис. 3, 4) показали, що від величини початкового кроку сітки збіжність практично не залежить, але істотно залежить швидкість збіжності. Мінімальний час пошуку оптимуму відпо-

відає таким значенням початкового кроку сітки, за яких число вузлів сітки буде рівне одному з чисел ряду Фібоначчі, а саме – за числа вузлів по змінній  $i - 8$ , по  $j, p, k, m - 5$  час розрахунку складає близько 7 хв. Відносно закону зменшення кроку сітки, то в даному випадку застосований найбільш досліджений метод дихотомії.

Запропонований комбінований алгоритм оптимізації було реалізовано в середовищі Delphi. Результати оптимізації конструктивних параметрів АПО наведені в табл. 2.

Як видно з результатів розрахунку, допустима область рішень для кожного з АПО пов'язана в першу чергу з температурою перегрівання обмоток, яка в ряді випадків практично відповідає допустимій. Відносно високе значення допустимої температури перегрівання  $\Delta t_a = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ , яке пов'язане з особливостями роботи АПО (розрахункова температура повітря  $t_{air} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а також зовнішнє розміщення вторинної обмотки, зумовило досить високі значення густини струму в ній. Магнітна індукція в осерді АПО близька до максимальної. Для типорозміру автотрансформа-

тора №3 магнітна індукція виявилась дещо нижчою, що пояснюється активністю обмеження за струмовою похибкою.

Таблиця 2  
Результати оптимізації конструктивних параметрів автотрансформаторів плавлення ожеледі

Параметри АПО	Значення параметра для типорозміру АПО		
	№1	№2	№3
<i>Магнітна система:</i>			
Діаметр стрижня, мм	380	450	560
Довжина стрижня, мм	1464	1604	1998
Відстань між вісями стрижнів, мм	694	793	927
Маса сталі сумарна, кг	5082	7931	14952
Магнітна індукція в сталі, Тл	1,80	1,80	1,78
<i>Обмотки:</i>			
Число шарів первинної обмотки	3	4	1
Число шарів вторинної обмотки	1	2	6
Число проводів первинної обмотки	2	4	4
Число проводів вторинної обмотки	2	1	3
Радіальний розмір проводу обмотки I, мм	5,60	5,60	4,50
Вісьовий розмір проводу обмотки I, мм	11,20	11,20	6,30
Радіальний розмір проводу обмотки II, мм	2,00	3,15	5,60
Вісьовий розмір проводу обмотки II, мм	4,00	11,20	6,30
Число витків первинної обмотки	180	130	71
Максимальне число витків вторинної обмотки	142	260	555
Температура перегрівання первинної обмотки, °С	138	133	112
Температура перегрівання вторинної обмотки, °С	140	134	139
Густина струму у первинній обмотці, А/мм <sup>2</sup>	0,88	0,69	1,83
Густина струму у вторинній обмотці, А/мм <sup>2</sup>	11,27	5,14	1,70
<i>Номинальні електричні параметри:</i>			
Первинний струм, А	110	174	207
Вторинний струм, А	182	182	182
Похибка за значенням вторинного струму, %	-1,0	-1,5	-3,3
Похибка за кутом вторинного струму, ° ел.	0,9	1,3	2,8
<i>Загальні параметри АПО:</i>			
Маса автотрансформатора, кг	7915	12812	24980
Собівартість автотрансформатора, дол. США	18159	29328	57319

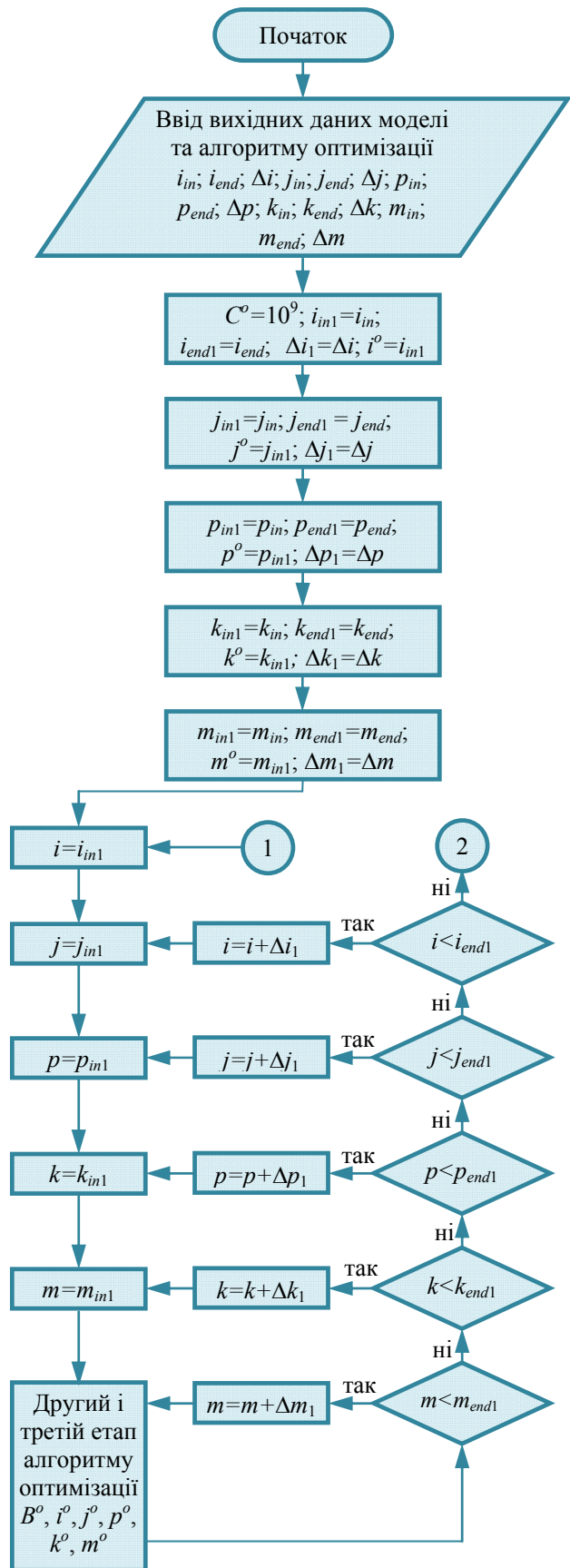


Рис. 3. Блок-схема першого етапу комбінованого алгоритму оптимізації

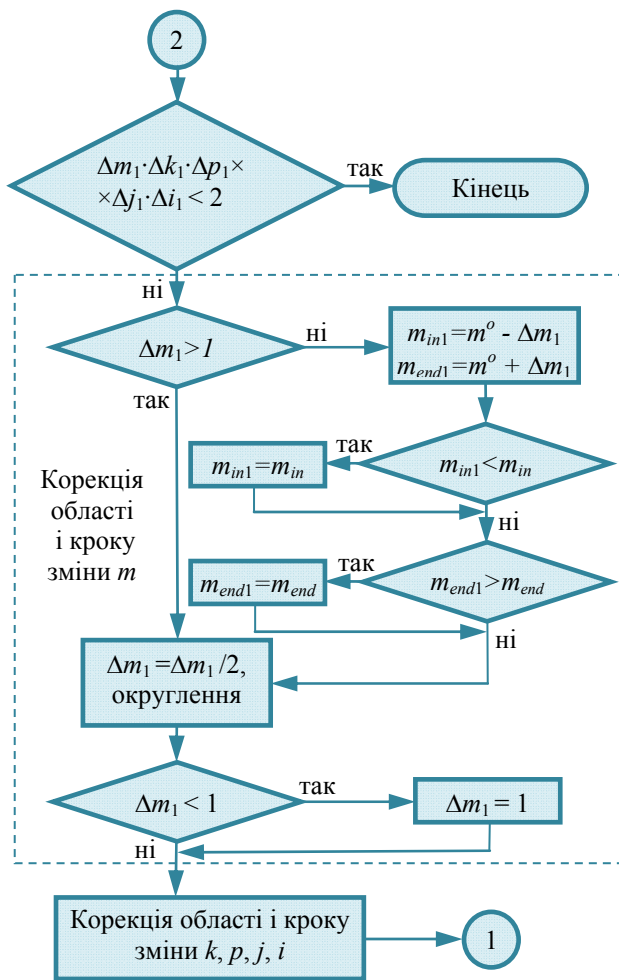


Рис. 4. Блок-схема першого етапу комбінованого алгоритму оптимізації (продовження)

### Висновки.

1. Розраховано електричні характеристики автотрансформаторів, призначених для використання в схемі плавлення ожеледі з безіндуктивним контуром на повітряних лініях електропередач 6-10 кВ, які було покладено в основу оптимізації їх конструктивних параметрів.

2. Розроблена техніко-економічна модель автотрансформатора плавлення ожеледі, яка описується дев'ятьма незалежними змінними. Запропоновано метод розрахунку та комбінований алгоритм оптимізації конструктивних параметрів автотрансформаторів плавлення ожеледі. Особливістю запропонованого методу розрахунку є використання критерію мінімуму вартості активної частини та врахування зумовлених схемою вмикання автотрансформаторів технічних обмежень похибок за величиною та кутом вторинного струму.

3. На основі отриманих електричних характеристик оптимізовано конструктивні параметри автотрансформаторів, призначених для використання в схемі плавлення ожеледі з безіндуктивним контуром на повітряних лініях електропередач 6-10 кВ. В серії автотрансформаторів передбачено три типорозміри, які відрізняються максимальною довжиною лінії електропередач. Густина струму в первинній обмотці автотрансформаторів складає близько 1 А/мм<sup>2</sup>, тоді як у вто-

ринній коливается в межах від 1,7 до 11,3 А/мм<sup>2</sup>, що пояснюється різними умовами охолодження обмоток. Магнітна індукція в магнітопроводах складає близько 1,8 Тл. Результати конструктивного розрахунку є достатніми для впровадження серійного виробництва автотрансформаторів плавлення ожеледі в промислових умовах.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Farzaneh M. *Atmospheric Icing of Power Networks*. – Berlin: Springer, 2008. – 381 p.
2. Научно-технический отчет по теме «Выбор способов и разработка целесообразных схем плавки гололеда на ВЛ различных классов напряжения в Молдавской энергосистеме». – Кишинев: НТЦ «Техинформэнерго», 2001. – 132 с.
3. Білаш І.П., Савченко О.А. Аналіз електричних процесів в пристрої захисту повітряних ЛЕП від відкладень ожеледі та паморозі // Вісник ХДТУСГ. – 2003. – Вип. 19: в 2-х т. – Т.1. – С. 91-98.
4. Бики М.А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчеты основных параметров. – М.: Знак, 2013. – 612 с.
5. Del Vecchio R.M., Poulin B., Feghali P.T., Shah D.M., Ahuja R. *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*. – New York: CRC Press, 2001. – 599 p.
6. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
7. Bazaraa M.S., Sherali H.D., Shetty C.M. *Nonlinear programming: theory and algorithms*. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 853 p.
8. Тимчук С.А., Сиротенко М.А. Алгоритм поиска оптимальных параметров системы повышения надёжности в разветвлённых распределительных сетях 10 кВ // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т.6. – №8(78). – С. 4-10. doi: 10.15587/1729-4061.2015.54626.
9. Бородакий Ю.В., Загребяев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. Нелинейное программирование в современных задачах оптимизации: учебн. пособие. – М.: НИЯУ «МИФИ», 2011. – 244 с.
10. Рубан А.И., Михалев А.С. Глобальная оптимизация с селективным усреднением смешанных переменных: непрерывных и дискретных при упорядоченных возможных значениях // Научный вестник НГТУ. – 2017. – 3(68). – С. 126-141. doi: 10.17212/1814-1196-2017-3-126-141.
11. Тимчук С.А. Способ построения алгоритма решения задачи нелинейного программирования // Вісник ХДТУСГ. – 2004. – Вип. 23. – С. 128-134.

### REFERENCES

1. Farzaneh M. *Atmospheric Icing of Power Networks*. Berlin, Springer, 2008. 381 p.
2. *Scientific and technical report on the topic «Choice of methods and development of suitable schemes for the melting of ice on the OPL of various voltage classes in the Moldovan energy system»*. Chisinau, STC «Techinformenergo» Publ., 2001. 132 p. (Rus).
3. Bilash I.P., Savchenko O.A. Analysis of electrical processes in the device for protecting air power lines from deposits of ice and frost. *Bulletin of Kharkiv State Technical University of Agriculture*, 2003, no.19, vol.1, pp. 91-98. (Ukr).
4. Biki M.A. *Proektirovanie silovykh transformatorov. Raschety osnovnykh parametrov* [Design of power transformers. Calculations of the main parameters]. Moscow, Znak Publ., 2013. 612 p. (Rus).
5. Del Vecchio R.M., Poulin B., Feghali P.T., Shah D.M., Ahuja R. *Transformer design principles: with applications*

to core-form power transformers. New York, CRC Press, 2001. 599 p.

6. Tikhomirov P. M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 582 p. (Rus).

7. Bazaraa M.S., Sherali H.D., Shetty C.M. *Nonlinear programming: theory and algorithms*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. 853 p.

8. Timchuk S. A., Sirotenko M. A. The search algorithm for optimal reliability increasing system parameters in 10 kV branched distribution networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, vol.6, no.8(78), pp. 4-10. (Rus). doi: 10.15587/1729-4061.2015.54626.

9. Borodakii Yu.V., Zagrebaev A.M., Kritsyna N.A., Kuliabichev Yu.P., Shumilov Yu.Yu. *Nelineinoe programmirovaniye v sovremennykh zadachakh optimizatsii* [Nonlinear programming in modern optimization problems]. Moscow, NIIaU «MIFI» Publ., 2011. 244 p. (Rus).

10. Ruban A.I., Mikhalev A.S. Global optimization with selective averaging of mixed variables: continuous and discrete with the ordered possible values. *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2017, no.3(68), pp. 126-141. (Rus). doi: 10.17212/1814-1196-2017-3-126-141.

11. Timchuk S.A. A method for constructing an algorithm for solving a nonlinear programming problem. *Bulletin of Kharkiv State Technical University of Agriculture*, 2004, no.23, pp. 128-134. (Rus).

Поступила (received) 12.02.2019

Лазуренко Олександр Павлович<sup>1</sup>, к.т.н.,

Мороз Олександр Миколайович<sup>2</sup>, д.т.н.,

Тимчук Сергій Олександрович<sup>2</sup>, д.т.н.,

Мірошник Олександр Олександрович<sup>2</sup>, д.т.н.,

Савченко Олександр Анатолійович<sup>2</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»,

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,

тел/phone +380 57 7076585, e-mail: lazurenkoop@i.ua

<sup>2</sup> Харківський національний технічний університет

сільського господарства ім. Петра Василенка,

61002, Харків, вул. Алчевських, 44,

тел/phone +380 57 7123432, e-mail: savoa@ukr.net

O.P. Lazurenko<sup>1</sup>, O.M. Moroz<sup>2</sup>, S.O. Tymchuk<sup>2</sup>,

O.O. Miroshnyk<sup>2</sup>, O.A. Savchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of  
Agriculture,  
44, Alchevskyyh Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

### Optimization of design parameters of autotransformers in ice melting scheme with non-inductive circuit on 6-10 kV overhead power lines.

**Purpose.** The purpose of the paper is to determine the basic electrical characteristics and to develop a calculation method and algorithm for optimizing the design parameters of autotransformers intended for use in a melting ice scheme with a non-inductive circuit on 6-10 kV overhead power lines. **Methodology.** The development of the technical and economic model and the method for calculation of the design parameters of the autotransformer for melting ice is performed on the basis of a systematic approach. Optimization of structural characteristics of autotransformers is carried out using a combined algorithm based on the spatial grid method, adapted to the case of a mixed space of discrete and continuous independent variables, and the specifics of the technical and economic model of the autotransformer. The proposed combined optimization algorithm is implemented in the Delphi environment. **Results.** Based on the required specific melting power, the main electrical characteristics of autotransformers intended for use in the melting ice scheme with a non-inductive circuit on 6-10 kV overhead lines, which were the basis for optimizing their design parameters, have been calculated. The technical and economical model of autotransformer for melting ice, which is defined by nine independent variables and describes its cost and technical parameters, is developed. On the basis of the obtained electrical characteristics, optimization of the design parameters of a series of autotransformers is carried out, which includes three standard sizes, differing in maximum length of the transmission line. **Originality.** A method of calculation of structural parameters of autotransformers for ice melting is proposed, the peculiarity of which is the use of the criterion of the minimum of the cost of the active part and taking into account the conditioned by the circuit of connection of the autotransformers the technical restrictions of errors on the value and angle of secondary current, which are important from the point of view of ensuring the permissible deviation of the specific power of melting ice. **Practical value.** Optimal correlations of geometrical sizes and electromagnetic loads of autotransformers for ice melting, their cost indicators, as well as the main design characteristics of the magnetic circuit and windings are established. Results of design calculation of autotransformers are sufficient for introduction of their serial production in industrial conditions. References 11, tables 2, figures 4.

**Key words:** overhead power line, melting of ice, autotransformer for melting of ice, technical and economic model, optimization of design parameters.