

Підвищення електромагнітної сумісності та ефективності схем живлення дугових сталеплавильних печей у нелінійних несиметричних режимах

В. Г. Турковський, А. А. Маліновський, А. З. Музичак, О. В. Турковський

Дугові сталеплавильні печі змінного струму є найпотужнішими установками серед приєднаних до електричних мереж, режим роботи яких є динамічним, несиметричним і нелінійним. Саме тому ці печі викликають увесь можливий спектр негативного впливу на якість електроенергії у мережі живлення, зокрема, коливання, несиметрію та несинусоїдність напруги.

Відомі пропозиції з покращення електромагнітної сумісності дугових електроречей переважно орієнтовані на усунення наслідків негативного їх впливу на мережі енергосистем.

Пропонований підхід та відповідне технічне вирішення скеровані на зниження рівня генерування негативного фактору й одночасно дозволяють знизити коливання, несиметрію і несинусоїдність напруги. Такий результат отриманий внаслідок того, що пропонуване рішення враховує особливості природного для дугових печей діапазону режимів. Оптимальним для таких споживачів є використання системи живлення сталого струму $I = \text{const}$ у діапазоні режимів від експлуатаційного короткого замикання до максимального навантаження та системи $U = \text{const}$ в усій іншій області режимів. Реалізація такої системи здійснюється на основі резонансного перетворювача "сталий струм – стала напруга".

Дослідженнями встановлено, що використання такої системи живлення у порівнянні з традиційною схемою дозволяє знизити несинусоїдність напруги у малопотужній мережі з 3,2 % до 2,1 % та коефіцієнт несиметрії з 3,66 до 1,35 %. Підтверджено також раніше опубліковані дані щодо суттєвого зниження коливань напруги.

Показано позитивний вплив такої системи на енергетичні показники роботи власне пічної установки, що проявляється у збільшенні потужності дуги на 12,5 %, а електричного ККД на 5,1 %. Це дозволяє підвищити продуктивність та ефективність дугових сталеплавильних печей.

Ключові слова: дугова піч, модель дуги, коливання напруги, несинусоїдність, несиметрія, продуктивність печі.

1. Вступ

Електричні дугові печі змінного струму є особливими споживачами електроенергії, які негативно впливають на якість електроенергії у мережі живлення, чим створюють проблеми для інших приймачів електроенергії. Як правило, ці проблеми металургійні підприємства вирішують шляхом встановлення пристроїв, що дозволяють підвищити якість електроенергії у мережі енергосистеми. Їх вартість є співмірна з вартістю основного технологічного електроустаткування, що зумовлює погіршення економічних показників роботи підприємств.

Разом з тим, дугові печі є найбільш поширеними уставами для отримання високоякісної сталі й з врахуванням тенденції до зростання обсягу виробництва електросталі частка їх навантаження у мережах зростатиме. Враховуючи, що потужніші технологічні агрегати мають вищу ефективність можна також очікувати подальшого збільшення одиничної потужності печей, яка може перевищити нинішній максимум 300 МВА. Таким чином розвиток ринку виробництва електросталі не передбачає зниження навантаження на електромережі.

Традиційно використовувані заходи зі зменшення негативного впливу дугових електропечей на мережі живлення спрямовані, як правило, на усунення наслідків негативного впливу печей шляхом збільшення потужності енергосистеми або використання засобів динамічної компенсації реактивної потужності.

Не дивлячись на застосування сучасних засобів динамічної компенсації, негативний вплив ДСП на мережі залишається суттєвим, тобто проблема забезпечення якості електроенергії у мережах живлення ДСП у загальному випадку не вирішена.

Зміна парадигми, що полягає у спрямуванні заходів не на усунення наслідків негативного впливу, а на зниження генерування фактора негативного впливу, може дозволити вирішувати це питання на іншому рівні, за якого з'являється можливість не лише у більшій мірі забезпечити електромагнітну сумісність, а й підвищити корисну потужність дуги й коефіцієнт корисної дії печі.

Актуальність тематики й розробки полягає у тому, що застосування ПССН для живлення ДСП дає можливість не лише суттєво знизити негативний електромагнітний вплив на мережу енергосистеми, а й одночасно покращити енергетичні показники виплавляння сталі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дугові сталеплавильні печі змінного струму (ДСП) характеризуються навантаженням, яке є швидкозмінним, стохастичним, нелінійним і несиметричним. За використання традиційної схеми електропостачання печей (ТСЕ) вказані особливості електричного режиму печей викликають зниження якості електроенергії у мережах енергосистем як на підприємствах галузі [1], так і для груп печей чи окремих установок [2]. Ступінь зниження якості електроенергії, не дивлячись на використання засобів динамічної компенсації, є настільки суттєвою, що до підприємств галузі застосовують штрафні санкції. Це свідчить про актуальність тематики, орієнтованої на забезпечення електромагнітної сумісності дугових печей з мережею.

Дугові печі є великими споживачами реактивної потужності [3], зміни значення якої викликають коливання напруги у мережі. Для зниження коливань напруги у електричних мережах традиційно використовуються різні типи засобів динамічної компенсації реактивної потужності. Їх застосування, за експериментальними даними [4], забезпечує зниження короткочасної дози флікера з 6,38 % до 3,31 %. Використання статичного синхронного компенсатора (STATCOM) може забезпечити зменшення показник короткочасного флікера у 6 разів за умови належного врахування імпедансу мережі та його змін [5]. Застосування статичного компенсатора з комутованим реактором (SVC), згідно

з [6], має також позитивний вплив на експлуатаційні характеристики печей. Для ефективної роботи компенсувальних засобів необхідно уже на стадії проектування врахувати конкретні характеристики пічної установки та особливості вузла мережі [7]. Крім того, зважаючи на динаміку процесу, важливу роль у оптимальному керуванні пристроями відіграє якість алгоритмів визначення координат режиму печі, що не піддаються безпосередньому вимірюванню [8].

Наведена у [5] максимальна кратність зменшення показника короткочасного флікеру за динамічної компенсації у 6 разів визначаються сучасними технічними можливостями силової електроніки. Однак при цьому не забезпечується належна якість електроенергії за використання потужних печей у малопотужних мережах. Крім того, позитивний вплив компенсувальних засобів на показники роботи дугової печі є доволі обмежений й дозволяє досягти, у кращому випадку, паспортних даних печі.

Оскільки електрична дуга є нелінійним елементом схеми, то піч генерує у мережу вищі гармоніки. Для їх досліджень моделювання дуг ДСП найчастіше здійснюється апроксимацією ділянок вольт-амперної характеристики дуги лінійними/нелінійними відрізками з/без врахування теплової інерційності дуги [9]. Крім того, використовуються моделі на основі штучних нейронних мереж [10] та з відтворенням хаотичних процесів у дузі [11] тощо.

Для дослідження характеристик електродугових устав також часто використовуються математичні моделі, що базуються на балансі енергії стовпа дуги. Огляд таких моделей, зокрема, Кассі й Майра виконано у роботі [12]; там же описана математична модель динамічної дуги [13], яка у роботі [14] названа моделлю Пантегова. Сталі часу цієї моделі можуть бути прийняті за даними роботи [15]. Використовується також об'єднана модель Кассі-Майра, аналіз індексів похибок (error indices) яких виконано у [16].

Для обґрунтування достовірності відтворення форми напруги дуги розглянутими моделями дуг проводилось порівняння отриманих результатів з експериментальними даними функцій напруги дуги. Опрацьовувались часові діаграми напруги дуги [17], отримані за даними вимірювань на вторинній обмотці трансформатора, а також експериментальні дані напруги дуги для печі з потужністю трансформатора 60 МВА [18].

Дугові електричні печі характеризуються у окремі періоди плавлення суттєво несиметричним навантаженням й, за експериментальними даними [19], поле очікуваних значень струмів зворотної послідовності знаходиться у межах 15–30 %. Це свідчить про значний рівень несиметрії режиму.

У схемах живлення печей використовуються засоби динамічної компенсації, які можуть зменшити коливання й несиметрію напруги у мережі. По суті, такі компенсатори є пристроями, дія яких спрямована на зменшення наслідків негативного впливу ДСП на мережі.

Концептуально перспективнішим є підхід, за якого область дії засобів скеровується безпосередньо на джерело впливу з метою зниження рівня генерування негативного фактора. Це може бути реалізовано з допомогою індуктивно-ємнісного перетворювача, який може стабілізувати змінний струм дуги й одночасно реактивну потужність та різко зменшити реактивну складову втрат на-

пруги у мережі. Характеристики резонансного перетворювача з гальванічним зв'язком реактивних елементів детально описані у [20].

Однак, враховуючи особливості ДСП з частими обривами дуг й близькими до цього аномальними режимами, такі перетворювачі не можуть бути безпосередньо використані для дугових електропечей. Необхідно, щоб зовнішня характеристика перетворювача у області робочих режимів була сталою за струмом, а у області аномальних режимів – сталою за напругою.

Перетворювач з такою характеристикою "сталій струм – стала напруга" (ПССН), дозволяє схемно стабілізувати потоки реактивної потужності [21] й у динамічних режимах суттєво знизити показник короткочасного флікеру у мережі [22] з одночасним вирівнюванням завантаження фаз. Оцінка потужності обладнання, необхідного для виконання перетворювача, наведена у [23]. Аналіз показників несиметричних режимів проводився з врахуванням стохастичного характеру навантаження печі [24].

Проведені дослідження [22] показали, що застосування резонансного перетворювача ПССН для живлення дугових сталеплавильних печей дозволяє знизити показник короткочасного флікеру більше ніж у 10 разів. Ці результати отримані за лінійної симетричної постановки задачі й необхідно їх підтвердити в умовах нелінійності та несиметрії навантаження. Крім того, у цих же умовах потрібно визначити вплив перетворювача на основні показники роботи самої печі, зокрема, на її продуктивність та ефективність. Для отримання достовірних результатів необхідно, щоб модель дуги найбільш адекватно відтворювала її реальні вольт-амперні характеристики.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підтвердження ефективності застосування схеми ПССН для живлення дугової сталеплавильної печі за нелінійного та несиметричного навантаження. Для цього необхідно визначити показники впливу на мережу (коефіцієнти зворотної послідовності та спотворення струму) й впливу на показники власне печі (корисна потужність дуги та електричний ККД). Крім того, передбачається підтвердити за нелінійного навантаження результат щодо зниження коливань напруги у 10–15 разів, отриманий за лінійного динамічного навантаження [22].

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити математичні моделі аналізованих схем живлення печі та обґрунтувати вибір моделі електричної дуги;
- визначити показники якості електроенергії у мережі за нелінійного навантаження;
- розрахувати вплив нелінійного несиметричного навантаження на основні енергетичні характеристики пічної устами та якість електроенергії у мережі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є дві схеми живлення дугової печі великої місткості ДСП-160 – традиційна схема електропостачання ТСЕ та з використанням ПССН, кожна з яких живиться від мережі малої потужності. Підтвердження

ефективності застосування схеми ПССН для живлення дугової сталеплавильної печі за нелінійного та несиметричного навантаження проводиться за результатами порівняння цих двох варіантів схеми живлення.

Суть основної гіпотези досліджень полягає у тому, що за повної ідентичності характеристик навантаження у обох випадках дані щодо якості електроенергії у мережі та показників роботи печі відповідають властивостям порівнюваних схем.

У дослідженні прийнято припущення, що індуктивність короткої мережі під час динамічних змін й несиметричного навантаження не змінюється; не враховувались також взаємоіндуктивні зв'язки між фазами короткої мережі.

Мережа енергосистеми у нелінійних режимах відтворювалась спрощеною заступною схемою з індуктивним та активним опором; відношення індуктивного опору до активного прийнято рівним 20.

Для отримання параметрів режимів схем ПССН та ТСЕ, необхідних для аналізу показників якості електроенергії та енергетичних характеристик печі, необхідно розробити математичні моделі досліджуваних схем. Ці моделі передбачено сформулювати з використанням матричних методів аналізу електричних і магнітних кіл, а їх реалізацію здійснити у програмному середовищі MatLab Simulink (США).

Для проведення якісних досліджень схем з електричною дугою необхідно оперувати адекватною моделлю дуги. Вибір такої моделі здійснюється на основі порівняльного аналізу результатів, отриманих для моделей дуги Кассі й Пантегова у схемі ТСЕ, з опублікованими експериментальними даними.

Процес розрахунку несиметричних режимів печі супроводжується суттєвим зростанням масиву даних. Їх аналіз й узагальнення результатів проводився з врахуванням стохастичного характеру навантаження на основі положень теорії імовірностей. При цьому задавались реальні межі діапазону значень математичного сподівання та середнього квадратичного відхилення змінної координати.

5. Результати дослідження схем живлення дугової печі у нелінійних несиметричних режимах

5.1. Математичні моделі схем живлення печі та обґрунтування вибору моделі дуги

Принципова схема живлення печі з перетворювачем "сталій струм стала напруга" наведена на рис. 1. Основним її елементом є резонансний перетворювач, який складається з індуктивного L та ємнісного C елементів, параметри яких вибрані з умови резонансу з врахуванням характеристик пічного трансформатора FT . Схема приєднана до мережі енергосистеми PS у спільній точці PCC . Коротка мережа SC з'єднує вторинну обвитку пічного трансформатора з власне електричною дуговою пічкою (ЕАФ).

Цей перетворювач забезпечує практично сталі значення струму дуги $I_a = \text{const}$ в умовах зміни навантаження від режиму експлуатаційного короткого замикання до максимального навантаження (область нормальних режимів). У аномальних режимах від максимального навантаження до неробочого ходу

передбачено формування ділянки характеристики, на якій напруга дуги є близькою до сталої $U_a = \text{const}$. Елементи для формування цієї ділянки характеристики на схемі не відображені. Така зовнішня характеристика перетворювача забезпечує у нормальних робочих режимах практично сталі значення споживання реактивної потужності та суттєве зменшення коливань напруги у мережі.

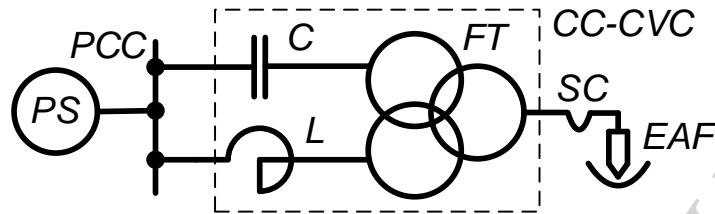


Рис. 1. Принципова схема перетворювача "сталій струм стала напруга"

Для проведення досліджень ПССН та ТСЕ схем у заданих режимах (динамічних, нелінійних та несиметричних) розроблена математична модель у матрично-векторній формі. Наведена система рівнянь (1) описує електромагнітні процеси у схемах різної конфігурації й у певній мірі дозволяє уніфікувати підхід до аналізу параметрів режиму для різних схем за рахунок спрощеної підготовки вхідних даних. Система (1) доповнюється характеристиками нелінійних елементів, зокрема, моделями дуг, а також елементами формування зовнішньої характеристики установки в області аномальних режимів. Ця система рівнянь має такий вид:

$$\begin{aligned} GMG_t \frac{d\vec{i}_k}{dt} + GRG_t \vec{i}_k + G(\vec{u}_n + \vec{u}_c) &= G\vec{e}, \\ C \frac{d\vec{u}_c}{dt} - G_t \vec{i}_k &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де \vec{i}_k – вектор-стовпець контурних координат схеми;

$\vec{u}_n, \vec{u}_c, \vec{e}$ – вектори-стовпці відповідно напруг нелінійних елементів, напруг ємнісних елементів та ЕРС віток електричного кола;

G, G_t – друга матриця інцидентій графа схеми, об'єднана для віток електричних і магнітних кіл, та її транспонована матриця;

M, R – відповідно матриці власних і взаємних індуктивностей й активних опорів віток схеми, об'єднані для електричних і магнітних кіл;

C – матриця ємностей віток схеми.

Для врахування нелінійності дуги система (1) доповнюється системою рівнянь її моделі. У роботі використана математична модель дуги Пантегова [16]. Обґрунтування вибору даної моделі та її параметрів наведено нижче. Ця модель описується наступною системою рівнянь:

$$\theta_p \frac{d\vec{i}_\theta}{dt} + \vec{i}_\theta = \vec{i}_a, \quad (2)$$

де \vec{i}_θ – вектор струму статичного стану стовпа дуги для кожної з фаз та заданої статичної вольт-амперної характеристики дуги;

\vec{i}_a – вектор-стовпець фазних струмів дуг;

θ_p – діагональна матриця сталих часу моделі дуги Пантегова.

Статична вольт-амперна характеристика дуги має спадний характер й задається рівнянням виду

$$\vec{u}_\theta = u(\vec{i}_\theta) = U_0 \left(\frac{\vec{i}_\theta}{\vec{I}_0} \right)^n, \quad (3)$$

де U_0 , \vec{I}_0 – діагональна матриця напруг вибраних точок на статичних характеристиках дуг у різних фазах та відповідний вектор струмів цих точок; n – показник степені, значення якого є від'ємними; $\vec{u}_\theta = u(\vec{i}_\theta)$ – вектор напруг статичного стану стовпа дуги.

Оскільки опір стовпа дуги визначається параметрами динамічного стану, з одного боку, й відповідними параметрами статичного стану, з іншого боку, то прирівнюючи їх можна отримати вектор напруг стовпа дуги \vec{u}_a :

$$\vec{u}_a = \vec{R}_{st} \vec{i}_a = \frac{\vec{u}_\theta}{\vec{i}_\theta} \cdot \vec{i}_a, \quad (4)$$

де \vec{R}_{st} – опір стовпа дуги.

Рівняння (1)–(4) утворюють систему, розв'язання якої дозволяє визначити необхідні параметри режиму.

Результати розрахунку отримуються у форматах миттєвих координат режиму, діючих значень параметрів, гармонічних та симетричних складових. У несиметричних режимах за відсутності струмів нульової послідовності визначаються також симетричні складові на частотах 150 та 450 Гц.

Для дослідження електродугових устав часто використовують енергетичні моделі дуг Кассі, Майра, Кассі-Майра та Пантегова. Як показано у роботі [12], модель Пантегова є узагальнювальною для наведених моделей, рівняння яких, як частковий випадок, можна отримати за певних значень констант. Позитивною її особливістю є те, що вона опирається на задану статичну вольт-амперну характеристику.

Разом з тим, ця модель дуги використовується переважно для дослідження зварювальної дуги, одинична потужність якої, як правило, є суттєво меншою від потужності дуг ДСП. Оскільки потужність установки суттєво впливає на

теплову інерційність процесів необхідно провести уточнення деяких параметрів цієї моделі, зокрема, теплової сталої часу θ_p у рівнянні (2) та константи n у (3).

Теплова стала часу моделі дуги Пантегова θ_p може бути визначена за сталою часу моделі дуги Кассі θ_c зі співвідношення $2\theta_p = \theta_c$, наведеного у [12]. Таким чином, виходячи з даних щодо сталих часу дуги Кассі [16], сталі θ_p матимуть наступні значення: на початку періоду розплавлення – 0,1 мс; завершення періоду розплавлення – 0,6 мс; у періоді окиснення – 2 мс та рафінування – 5 мс.

Для визначення показника степені статичної вольт-амперної характеристики дуги n розроблено математичну модель традиційної схеми електропостачання печі, коло живлення якої складається лише з пічного трансформатора та реактора.

Для моделювання електромагнітних процесів використана система рівнянь (1) з вилученим другим рівнянням зі складовими ємнісних елементів.

Результати розраховані для традиційної схеми живлення дугової сталеплавильної печі ДСП–160. Технічні дані пічного трансформатора: потужність 140 МВА; напруги обвиток 35/1,3 кВ; напруга та активні втрати досліду короткого замикання трансформатора, відповідно, 8 % і 0,8 %. Реактивний і активний опір короткої мережі, становлять, відповідно, 4,75 та 0,68 мОм. З врахуванням індуктивності високовольтного реактора та трансформатора сумарний реактивний опір кола становить 6,2 мОм. Кратність струму експлуатаційного короткого замикання – 1,9.

Розрахунки для традиційної схеми живлення дугової сталеплавильної печі з моделлю дуги Пантегова виконані за рівномірного завантаження фаз. На рис. 2 показані часові діаграми струму й напруги дуги з використанням моделі Пантегова у схемі ТСЕ на початку періоду розплавлення, коли $\theta_p = 0,1$ мс. Для візуальної оцінки впливу показника степені n статичної вольт-амперної характеристики дуги на форму струму й напруги дуги цей показник на діаграмі є різним для кожного періоду промислової частоти 50 Гц. За 7 періодів цей показник отримував такі 7 значень (знак мінус опущено): 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,14; 0,16; 0,18. Результати наведені для енергосистеми малої потужності зі значенням потужності короткого замикання енергосистеми по відношенню до потужності пічного трансформатора $S_{SC}^* = 8$.

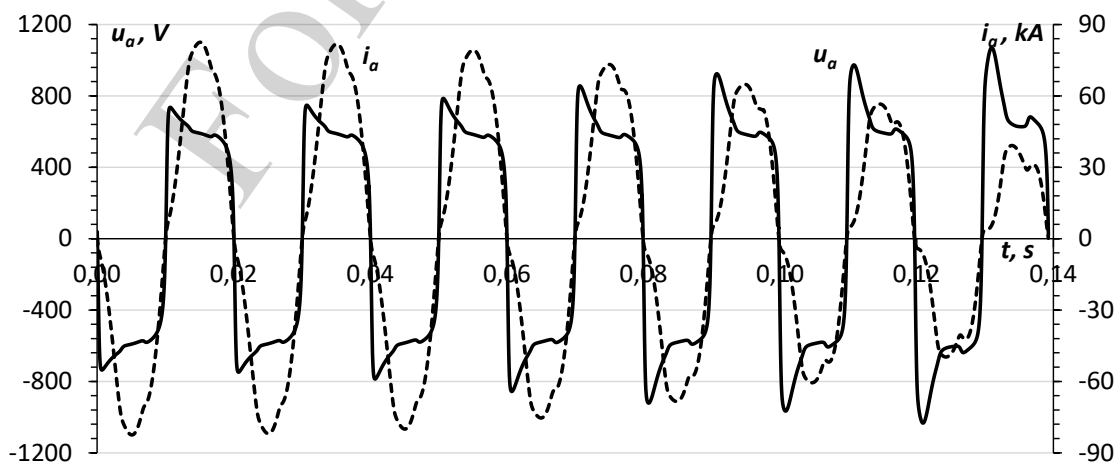


Рис. 2. Часові діаграми струму й напруги моделі дуги Пантегова з різними значеннями n

Як видно з діаграми на рис. 2, форма напруги дуги моделі Пантегова зі сталою часу 0,1 мс (початковий період плавлення) характеризується наявністю піків запалювання та погасання. Зі зростанням модуля n значення напруги піку запалювання зростає з 736 В для $|n|=0,01$ й досягає максимального значення 1070 В для $|n|=0,18$. Пік погасання для початкового значення n є ледь помітним. У міру зростання модуля показника степені цей пік зростає та за найбільшого у дослідженні значення $|n|$ досягає максимуму. Діюче значення напруги дуги у перші 2 періоди (для значень $|n|$ 0,01 та 0,02) є практично незмінним й становить 592 В, а у подальшому зростає з 594 до 670 В. Діючі значення струму дуги у перші 2 періоди зменшуються не суттєво, а у подальшому різко знижуються з 57 до 42 кА. Як видно з діаграми на рис. 5, у останні два періоди, коли $|n|$ отримує значення 0,16 та 0,18, режим горіння дуги є близьким до переривистого. Зауважимо, що напруга дуги 592 В є номінальною в умовах живлення печі від мережі малої потужності.

Струм дуги у перші два періоди має номінальна значення, а у подальшому – суттєво зменшується.

Для наведених кривих співвідношення між напругою запалювання дуги та напругою дуги у момент максимуму її струму (відносна напруга запалювання дуги) має такі значення для наведених 7 періодів: 1,26; 1,27; 1,35; 1,47; 1,59; 1,63 та 1,68. За експериментальними даними у період плавлення це відношення напруг дуги за діаграмами у [17] знаходиться у межах 1,24–1,76, а за [18] – від 1,46 до 1,6. Таким чином, за відносною напругою запалювання дуги усі розглянуті значення показника степені n дозволяють отримати форму напруги дуги, характеристики якої узгоджуються з експериментальними даними.

Таким чином, номінальні параметри режиму печі (в умовах заданої потужності енергосистеми) забезпечуються за значень модуля n рівних 0,01 і 0,02. Подальші розрахунки у роботі виконані зі значенням цього модуля 0,02.

Відповідні наведеній часовій діаграмі динамічні вольт-амперні характеристики дуги зі значенням $\theta_p = 0,1$ мс та їх статична вольт-амперна характеристика показані на рис. 3.

Якісна оцінка впливу сталої часу дуги θ_p на форму її струму й напруги може бути зроблена на основі часових діаграм, наведених на рис. 4. Вони розраховані зі змінюваним для кожного періоду значенням сталої часу дуги, яка набувала наступних значень: 0,05; 0,1; 0,25; 1,0; 2,5; 4 і 6 мс.

З діаграм рис. 4 видно, що за значень θ_p рівних 6 і 4 мс форма струму та напруги дуги є практично синусоїдними. Невеликі відхилення цих параметрів від синусоїдної форми мають місце за сталої часу 2,5 мс; за значень $\theta_p < 2,5$ мс спотворення струму та напруги є суттєвими.

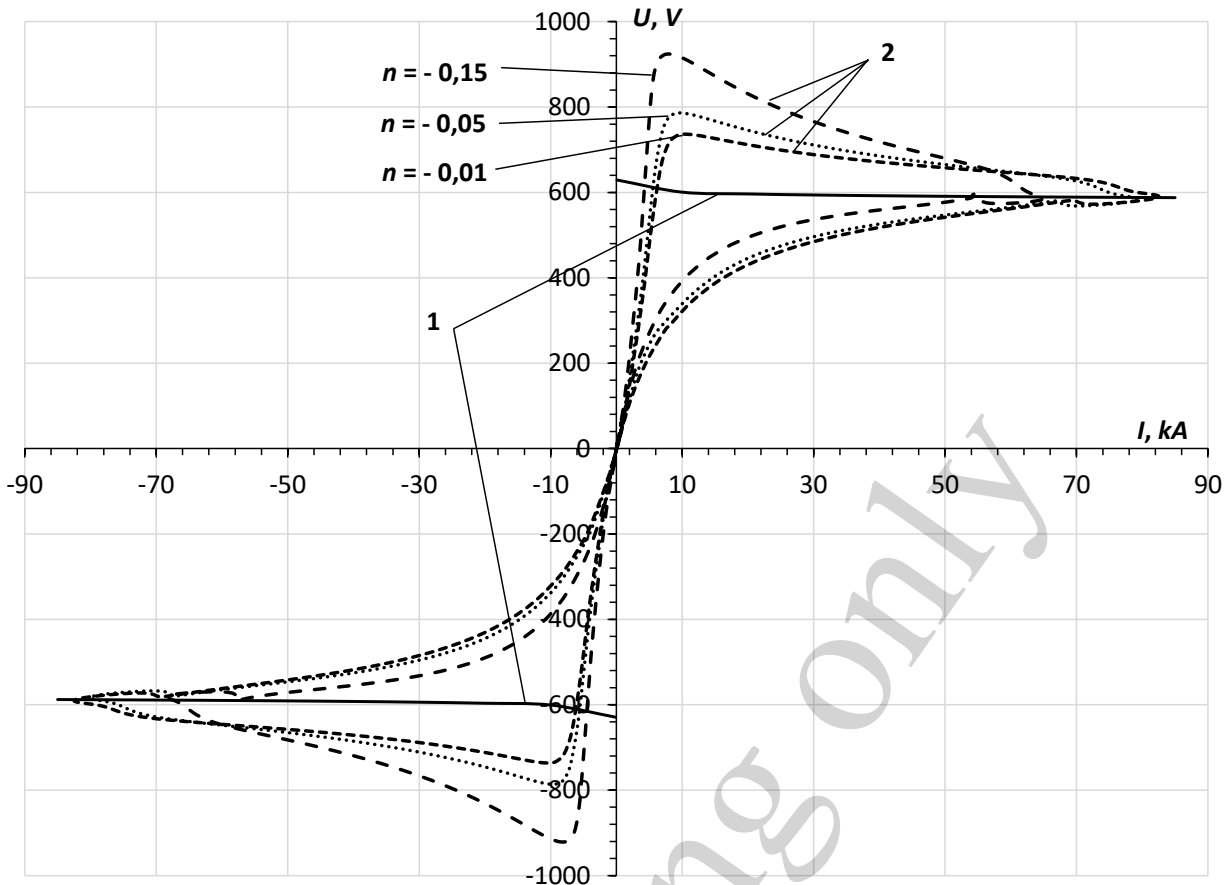


Рис. 3. Статична та відповідні їй динамічні вольт амперні характеристики моделі дуги Пантегова: 1 – статична характеристика; 2 – динамічні характеристики

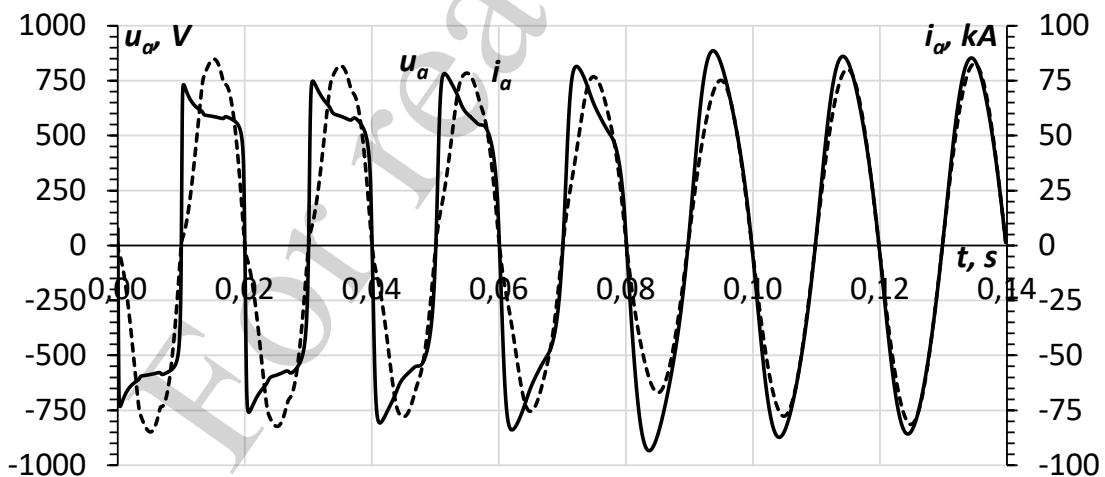


Рис. 4. Часові діаграми струму й напруги моделі дуги Пантегова з різними значеннями сталої часу

Для проведення розрахунків з моделлю дуги Кассі перше рівняння системи (1) доповнюється такими рівняннями моделі Кассі та напруги дуги:

$$\frac{\vec{\theta}_c}{g_a} \cdot \frac{d\vec{g}_a}{dt} = \frac{\vec{i}_a^2}{g_a^2 \cdot \vec{U}_c^2} - 1,$$

$$\vec{u}_a = \frac{\vec{i}_a}{g_a}, \quad (5)$$

де \vec{g}_a – провідність дуги; \vec{U}_c – напруга стовпа дуги моделі Кассі; $\vec{\theta}_c$ – стала часу моделі Кассі.

На рис. 5 наведені часові діаграми струму й напруги дуги, розраховані для таких значень параметрів: $\vec{U}_a = 590$ В; $\theta_c = 0,1$ мс.

Наведені на рис. 5 параметри режиму мають є такими: напруга піку запалювання – 686,5 В; напруга у момент максимуму струму – 592 В; значення піку напруги дуги 590 В; діюче значення струму – 63,5 кА. З наведених даних отримуємо відносно значення напруги запалювання дуги, що дорівнює 1,16.

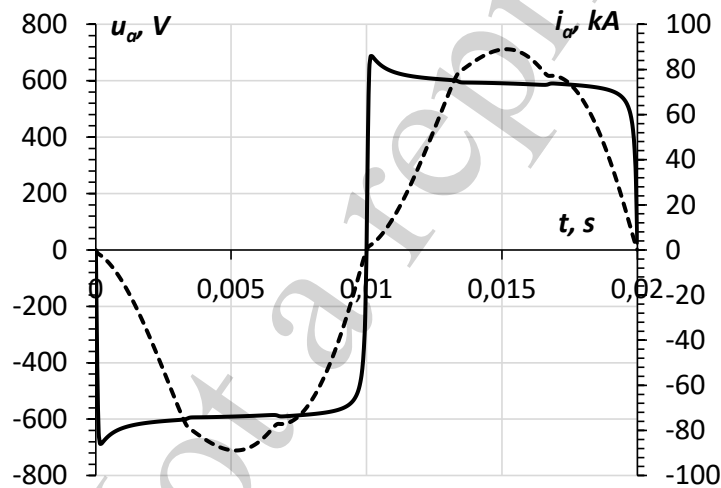


Рис. 5. Часові діаграми струму й напруги дуги моделі Кассі

Для якісної оцінки впливу сталої часу дуги на форму координат режиму на рис. 6 наведені часові діаграми струму й напруги дуги моделі Кассі зі змінюваним для кожного періоду параметром θ_c , що набував таких значень: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2,5; 4 і 6 мс. Під час порівняння діаграм слід враховувати співвідношення між сталими часу моделей дуг $2\theta_p = \theta_c$.

Як видно з рис. 6, стала часу суттєво впливає на форму напруги дуги. Разом з тим діюче значення цієї напруги, що становить 600 В, змінюється лише на 0,4 %, тобто залишається практично сталим. При цьому форма напруги дуги залишається несинусоїдною й за $\theta_c = 6$ мс.

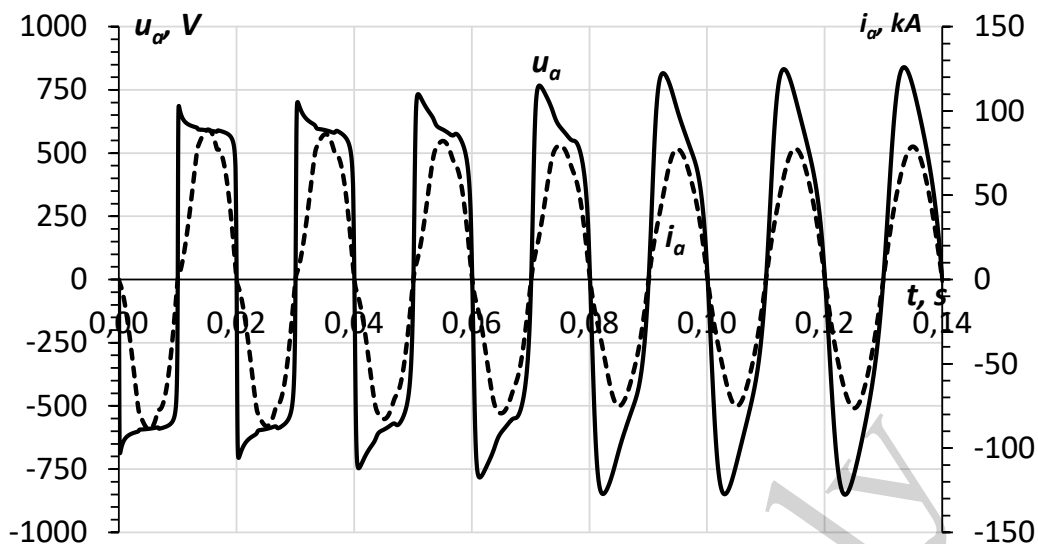


Рис. 6. Часові діаграми струму й напруги дуги моделі Кассі з різними значеннями сталої часу дуги

Форма струму дуги змінюється у меншій мірі. Діюче значення струму за перші 4 зміни параметру зменшується з 63 кА до 54,3 кА й надалі залишається практично незмінним.

Часові діаграми напруг проаналізованих моделей дуг для початку періоду плавлення ($\theta_p=0,05$ мс, $\theta_c=0,1$ мс) показують, що відносна напруга запалювання дуги моделі Пантегова становить 1,26, а моделі Кассі – 1,16. Співставлення цих значень з експериментальними даними показує, що дані моделі Пантегова входять у цей діапазон, а моделі Кассі – ні. Це свідчить, що модель Пантегова адекватніше відтворює форму напруги дуги. Крім того, ця модель має більшу гнучкість за рахунок змінного параметра статичної вольт-амперної характеристики. У подальших розрахунках характеристик печі використовувалась модель Пантегова.

5. 2. Визначення показників якості електроенергії за нелінійного навантаження

Результати розрахунків для схеми ПССН. Визначальним показником негативного впливу ДСП на мережі живлення, як правило, є коливання напруги. Розрахунок коливань напруги у спільній точці енергосистеми й печі виконано за рівномірного завантаження фаз у діапазоні робочих режимів. Прийнято, що навантаження змінювалось від експлуатаційного короткого замикання до значення, за якого напруга дуги на 10 % перевищує номінальну. Розглянуто діапазон відносної потужності короткого замикання енергосистеми S_{sc}^* від 8 до 100 одиниць номінальної потужності пічного трансформатора (відносних одиниць – р). Прийнято, що параметр моделі дуги $n=-0,02$.

Результати, отримані для сукупності квазістатичних режимів на початку періоду розплавлення, тобто зі значенням $\theta_p=0,1$ мс, наведені у табл. 1.

На рівень вищих гармонік у елементах схеми живлення ДСП у найбільшій мірі впливає стала часу горіння дуги θ_p . Вплив цього параметру на коефіцієнт

спотворення (THD) струмів дуги I_a й мережі I_s показаний на рис. 7 для різних значень сталої часу у діапазоні від 0,1 до 5 мс. Дані наведені для номінальної напруги дуги за відносної потужності енергосистеми, рівної 8.

Таблиця 1

Залежність змін напруги у мережі від потужності енергосистеми

S_{sc}^*	pu	8	10	30	50	70	100
dU_s	%	0.37	0.37	0.21	0.14	0.10	0.07

Максимальне значення THD струму системи становить 2,9 % й є приблизно у 2 рази меншим спотворення струму печі. Це обумовлено наявністю у схемі ПССН вітки з індуктивним елементом, струм якої є практично синусоїдним.

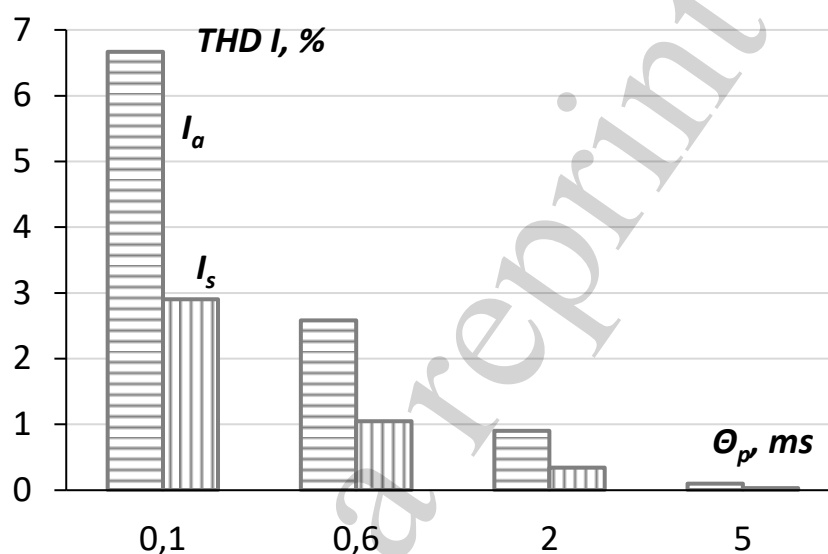


Рис. 7. Залежність коефіцієнту спотворення струмів печі й мережі від сталої часу дуги

Як видно з рис. 7, максимальне значення коефіцієнту несинусоїдності струму печі рівне 6,7 % має місце за сталої часу дуги 0,1 мс. Зі збільшенням значення цієї константи значення THD швидко зменшується й за $\theta_p=5$ мс спотворення струму дуги стає меншими 0,1 %, тобто струм дуги є практично синусоїдним.

Гармонічні складові струму мережі викликають спотворення її напруги. За сталої часу $\theta_p=0,1$ мс та потужності енергосистеми $S_{sc}^* = 8$ значення THD_U системи за номінального навантаження становить 2,1 %. Найбільше значення має п'ята гармоніка, середнє значення якої становить 1,7 %.

За використання ПССН має місце певна нестабільність струму дуги. Чисельне значення цієї нестабільності характеризується коефіцієнтом нестабільності β – відношенням різниці струмів експлуатаційного короткого замикання печі та номінального навантаження до струму номінального навантаження.

У табл. 2 наведені значення коефіцієнту нестабільності діючих значень струму дуги β у функції сталої часу дуги θ_p та відносної потужності короткого замикання енергосистеми S_{SC}^* .

Для можливості порівняння з лінійним навантаженням печі у мережі з $S_{SC}^* = 8$ виконано розрахунок коефіцієнту нестабільності струму дуги, значення якого дорівнює 5,7 %.

Таблиця 2

Значення коефіцієнту нестабільності струму дуги, %

θ_p, ms	Потужність КЗ системи S_{SC}^* , pu					
	8	10	30	50	70	100
0,1	0,84	0,79	0,88	0,93	0,96	0,99
0,6	1,60	1,45	1,30	1,32	1,33	1,34
2	3,69	3,28	2,43	2,32	2,27	2,24
5	5,07	4,50	3,28	3,09	3,01	2,96

З наведених у табл. 2 чисельних даних видно, що нелінійність дуги помітно впливає на ступінь стабілізації струму. Зокрема, для найменшої з проаналізованих потужностей енергосистеми $S_{SC}^* = 8$ нестабільність струму зменшується з 5,7 для лінійного навантаження до 5,07 для найменшого рівня спотворення форми струму, що має місце за $\theta_p = 5$ мс. Зростання вмісту гармонічних складових зі зменшенням θ_p викликає покращення стабілізувальних властивостей схеми й супроводжується зниженням β до значень менших 1 % для $\theta_p = 0,1$ мс.

Для більших значень сталої часу дуги рівних 4 і 10 мс у міру зростання потужності енергосистеми нестабільність струму печі монотонно зменшується.

Для значень θ_p рівних 0,6 та 0,1 мс така залежність є дещо відмінною, що пояснюється зростанням частки гармонічних складових струму. При цьому у всьому діапазоні зміни потужності енергосистеми межі зміни нестабільності струму є доволі вузькими 0,2–0,3 %.

Як видно з даних табл. 2, вищі гармоніки генеровані дугою мають, у даному випадку, позитивний вплив, позаяк зумовлюють покращення однієї з основних характеристик СС-СВ перетворювача – ступеня стабілізації струму дуги.

Результати розрахунків для схеми ТСЕ. Характеристики ТСЕ для печі ДСП-160 розраховані у тих же умовах, тобто за симетричного навантаження для сталої часу дуги Пантегова $\theta_p = 0,1$ мс та відносної потужності мережі $S_{SC}^* = 8$.

В умовах малої потужності енергосистеми у схемі ТСЕ мають місце значні втрати напруги у мережі. За розрахунками зміна режиму від експлуатаційного короткого замикання до номінального струму печі викликає зміну втрат напруги від 19,5 до 9,8 %. При цьому, за незмінних параметрів обладнання схеми в умовах номінального струму дуги її напруга має значення менше номінальної напруги, що приводить до зниження потужності дуги. В умовах зміни навантаження від струму експлуатаційного короткого замикання до номінального коливання напруги у мережі становитимуть 9,7 %.

Нелінійність навантаження викликає спотворення струму печі та мережі. За номінального струму коефіцієнт спотворення цих струмів дорівнює 4,1 %, а напруги мережі – 3,2 %. Відзначимо, що у схемі ПССН коефіцієнт спотворення напруги мережі становить 2,1 %. Ці значення спотворення напруги мережі у обох випадках є меншими гранично допустимих.

5.3. Вплив нелінійності та несиметрії навантаження на енергетичні характеристики печі та якість електроенергії

До основних енергетичних характеристик схем живлення печей відносяться корисна потужність дуги, втрати потужності у елементах схеми та електричний коефіцієнт корисної дії (ККД, EFF). Базові значення цих параметрів доцільно визначити для номінального навантаження за рівномірного завантаження фаз.

Потужність дуги з врахуванням її нелінійності може визначатись за діючими значеннями її струму й напруги або за гармонічними складовими цих параметрів. У схемі ПССН номінальна потужність дуги, розрахована за гармонічними складовими, дорівнює 105,7 МВт. Потужність дуги, розрахована для тих же умов за діючими значеннями, є завищеною на 7 %. Це обумовлено впливом гармонік напруги дуги кратних трьом. Результати, отримані за сталої часу дуги $\theta_p=0,1$ мс, показали, що у режимах зі симетричним навантаженням THD напруги дуги знаходиться у межах 41–44 % зі середнім значенням 42,5 %. Аналіз окремих гармонічних складових цієї напруги показує суттєву частку гармонік кратних трьом, зокрема третьої, що орієнтовно складає 35 %. За відсутності нейтральних точок мережі та зв'язку між ними немає електричного кола проходження струму нульової послідовності. Відповідно, за врахування лише компонентів, що супроводжуються виникненням гармонік струму, усереднений коефіцієнт спотворення напруги дуги становитиме 24,2 %. Тому розрахунок потужності дуги за діючими значеннями дає таку суттєву похибку.

Розрахунок втрат у елементах схеми проводився з врахуванням поверхневого ефекту. Відповідно порядковому номеру гармоніки v прийнято, що коефіцієнт зростання опору провідників струму становить \sqrt{v} .

Виконані розрахунки показали, що збільшення електричних втрат за рахунок поверхневого ефекту для номінального навантаження не перевищує 0,5 %. Такий невисокий рівень додаткових втрат зумовлений відносно невеликими спотворення форми струмів.

Втрати потужності у схемі ПССН мають місце у короткій мережі та пічному трансформаторі, а також у реактивних елементах схеми – реакторі та конденсаторній батареї й становлять для номінального навантаження 9,85 МВт. Розрахунки показали, що втрати у короткій мережі та пічному трансформаторі є визначальними й за номінального навантаження складають 90 % загальних електричних втрат устави.

За отриманими значеннями потужності та втрат потужності може бути розрахований коефіцієнт корисної дії установки (EFF). За рівномірного завантаження фаз й номінального навантаження його значення становить 91,5 %.

Реактивна потужність індуктивних та ємнісних елементів схеми визначалась через діючі значення та гармонічні складові параметрів режиму. Для ре-

жиму номінального навантаження споживання реактивної потужності від мережі за гармонічними складовими становить 45,9 МВАр. Результат, отриманий за діючими значеннями струмів і напруг, є меншим на 6 % внаслідок неврахованих змін реактивного опору. Коефіцієнт потужності установки, визначений за гармонічними складовими компонентів, для номінального навантаження становить $\cos \varphi = 0,93$.

Зауважимо, що за використання ПССН підтримується практично сталий струм дуги, а її напруга є пропорційною еквівалентному опору дуги. Таким чином, змінюючи довжину дуги, можна отримати напругу й вищу від номінальної в умовах малої потужності енергосистеми.

У схемі ТСЕ за номінального струму дуги її активна потужність становить 83,5 МВт, реактивна – 73,7 МВАр, а втрати потужності – 8,8 МВт. Відповідно ККД даного режиму дорівнює 90,5 %, а $\cos \varphi = 0,78$.

Електрична дуга ДСП є стохастичним елементом електричного кола й її параметри змінюються у широких межах. Не зважаючи на використання автоматичних регуляторів, уставки яких для окремих інтервалів плавлення є сталими, ці зміни відбуваються у кожній фазі інакше. Тому, по суті увесь процес виплавлення відбувається за несиметричного навантаження фаз. У таких умовах оцінка усереднених параметрів режиму може бути отримана лише на основі імовірнісних методів.

Процеси, що відбуваються у області горіння дуги, характеризуються впливом багатьох випадкових факторів й тому є стохастичними та мають певний закон розподілу густини імовірності. Відомо, за даними багатьох досліджень, що струмам дуг електричних печей властивий нормальний законом розподілу густини імовірності. Відповідно, опір дуги, що зумовлює зміни струму, та її напруга, теж матимуть нормальний закон розподілу. Оскільки фізичні процеси у робочому просторі печі не залежать від системи живлення печі, то такий закон розподілу густини імовірності змінної координати матиме місце не лише за системи $I = \text{const}$, а й за системи $U = \text{const}$.

У системі $U = \text{const}$ за нормального закону розподілу густина ймовірності напруги дуги $f(U_a)$, як випадкової необмеженої за значеннями функції, має наступний вигляд [24]:

$$f(U_a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U_a - m_U)^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

де U_a – напруга дуги; σ – середнє квадратичне відхилення напруги дуги; m_U – математичне сподівання напруги дуги.

У реальних умовах фактичне значення напруги дуги ДСП має обмежений діапазон зміни від нуля до номінального значення U_{2N} . Оскільки імовірність перебування режиму у цьому діапазоні повинна дорівнювати одиниці, то необхідно нормувати результат уведенням у рівняння (6) коригувального множника h .

З врахуванням цього нормована функція густини ймовірності $f_0(U_a)$ матиме вигляд:

$$f_0(U_{arc}) = \begin{cases} \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U_a - m_U)^2}{2\sigma^2}}, & U_a \in [0, U_{2N}], \\ 0, & U_a \notin [0, U_{2N}]. \end{cases} \quad (7)$$

Значення коригувального множника можна визначити з наступного рівняння (8) за розрахунком значень функції Лапласа у інтервалі $0 \leq U_a \leq U_{2N}$:

$$h = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{U_{2N}} e^{-\frac{(U_a - m_U)^2}{2\sigma^2}} dU_a. \quad (8)$$

Таким чином, використовуючи рівняння (7), може бути визначена ймовірність знаходження значення напруги дуги у певному діапазоні для заданого математичного сподівання та середнього квадратичного відхилення цієї напруги. Таку ж ймовірність матимуть й інші координати режиму, кількісні характеристики яких визначені у цьому ж діапазоні значень напруги дуги. Сума поінтервальних значень розраховуваної координати з врахуванням коригувального множника дозволить отримати очікуване значення цієї координати за даними одного режиму. За сукупністю квазістаціонарних несиметричних режимів можна розрахувати усереднене ймовірнісне значення відповідної координати. Розрахунки проводились для діапазонів значень середнього квадратичного відхилення від 0,1 до 0,7 та математичного сподівання напруги дуги від 0,7 до 1,3 від номінальної.

Результати розрахунків та опрацювання несиметричних режимів ДСП за потужності енергосистеми $S_{SC}^* = 8$ наведені у табл. 3 для традиційної схеми живлення та у табл. 4 – для схеми з ПССН.

Таблиця 3
Ймовірнісні характеристики несиметричних режимів ТСЕ

Параметри	m_U	Середнє квадратичне відхилення, σ						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
U_{2s} , pu	0,8	3,675	3,676	3,690	3,694	3,697	3,702	3,707
	1	3,628	3,663	3,661	3,662	3,668	3,676	3,685
	1,2	3,891	3,746	3,677	3,656	3,654	3,660	3,668
P_a , МВт	0,8	95,1	94,6	93,5	92,4	91,7	91,2	91,0
	1	95,1	93,5	91,9	91,0	90,5	90,3	90,2
	1,2	90,8	89,9	89,3	89,1	89,2	89,3	89,4
dP , МВт	0,8	9,67	10,07	10,49	10,77	10,90	10,95	10,94
	1	10,74	11,13	11,39	11,47	11,45	11,39	11,31
	1,2	12,42	12,42	12,30	12,14	11,97	11,81	11,66
EFF	0,8	0,878	0,874	0,869	0,866	0,863	0,862	0,862
	1	0,869	0,864	0,860	0,857	0,856	0,856	0,857
	1,2	0,854	0,850	0,848	0,848	0,850	0,851	0,852
Q_s , МВАр	0,8	58,2	62,3	65,3	66,6	67,1	67,4	67,5
	1	72,9	73,8	73,2	72,1	71,1	70,4	69,8
	1,2	87,9	83,7	79,8	76,9	74,7	73,1	72,0

Таблиця 4
Імовірнісні характеристики несиметричних режимів ПССН

Параметри	m_U	Середнє квадратичне відхилення, σ						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
U_{2s} , pu	0,8	1,467	1,470	1,485	1,500	1,512	1,520	1,526
	1	1,181	1,250	1,318	1,374	1,417	1,447	1,469
	1,2	1,166	1,185	1,233	1,292	1,345	1,387	1,419
P_a , МВт	0,8	103,4	105,0	106,4	107,0	107,3	107,4	107,5
	1	110,5	110,8	110,3	109,7	109,2	108,9	108,6
	1,2	117,2	115,3	113,5	112,0	111,0	110,2	109,7
dP , МВт	0,8	9,69	9,74	9,78	9,80	9,82	9,82	9,83
	1	9,86	9,88	9,88	9,87	9,86	9,86	9,85
	1,2	10,07	10,68	9,97	9,93	9,90	9,89	9,88
EFF	0,8	0,908	0,909	0,909	0,909	0,909	0,909	0,909
	1	0,913	0,912	0,912	0,911	0,911	0,910	0,910
	1,2	0,916	0,915	0,914	0,913	0,912	0,911	0,911
Q_s , МВАр	0,8	47,09	46,46	45,91	45,64	45,51	45,44	45,40
	1	44,34	44,12	44,29	44,53	44,72	44,85	44,95
	1,2	41,41	42,22	42,97	43,57	44,00	44,31	44,53

У табл. 3, 4 прийняті наступні позначення: P_a – активна потужність дуги; dP – втрати потужності у елементах схеми; Q_s – реактивна потужність енергосистеми; EFF – коефіцієнт корисної дії; U_{2s} – напруга зворотної послідовності енергосистеми.

6. Обговорення результатів дослідження нелінійних несиметричних режимів схем живлення дугової печі

Дослідження нелінійних режимів розглянутих схем проводилось за використання моделі дуги Пантегова. Підставою для її вибору є результати порівняння діаграм напруги, отриманих під час досліджень на моделі, з експериментальними даними. Згідно з опублікованими діаграмами напруг дуги [17, 18], відносне значення напруги запалювання дуги знаходиться у межах 1,24–1,76.

Для моделі Пантегова під час досліджень отримано відносні значення напруги запалювання дуги у межах 1,26–1,68, а для моделі Кассі – 1,16. З цих даних видно, що напруга запалювання моделі дуги Пантегова має значення, що потрапляють у діапазон 1,24–1,76, а модель Кассі – ні. Це значить, що модель Пантегова адекватніше відтворює форму напруги дуги у початковий період плавлення. Тому подальші розрахунки виконані з використанням цієї моделі дуги.

Аналіз впливу нелінійності дуги на коливання напруги у мережі проводився в умовах зміни режиму печі від експлуатаційного короткого замикання до номінального значення струму (напруги) дуги. Отримано (табл. 1), що за використання схеми ПССН розмах зміни напруги є меншим 0,4 %. У схемі з ТСЕ зміна навантаження від струму експлуатаційного короткого замикання до номінального супроводжується недопустимим значенням розмаху зміни напруги у

мережі – 9,7 %. Ці дані підтверджують результати [22] щодо можливості зниження коливань напруги у мережах малої потужності більше чим на порядок.

Оскільки електрична дуга є елементом електричного кола зі стохастичними параметрами, то процесу виплавляння сталі завжди властива пофазна несиметрія параметрів режиму. Реальна сукупність квазістаціонарних несиметричних режимів у полі пофазно змінних координат (напруги чи струму дуги) є дуже великою. Тому отримання узагальнених характеристик таких режимів, є можливим лише за використання імовірнісного підходу (рівняння (6)–(8)). Результати, отримані для математичного сподівання змінного параметру (для схеми ПССН – напруги дуги, а для ТСЕ – її струму) у діапазоні 0,8–1,2 та середнього квадратичного відхилення від у межах значень 0,1–0,7, наведені у табл. 3, 4.

З наведених у табл. 3 даних видно, що в умовах зміни режиму ТСЕ від початку періоду розплавлення ($\sigma=0,7$) до завершення плавлення ($\sigma=0,1$), імовірнісне середнє значення U_{2S}^* дорівнює 3,66 %. Це перевищує допустиме стандартом значення 2 %. Дані отримані за номінальної уставки автоматичного регулятора струму печі $mI_a^* = 1$.

За використання ПССН діапазон зміни U_{2S}^* під час усього періоду плавлення знаходиться у межах від 1,47 до 1,18 % (середнє – 1,35) за номінальної уставки регулятора напруги печі $m_U=1$ і відповідає вимогам стандарту. Таким чином, за використання ПССН напруга зворотної послідовності зменшилась у 2,5 рази.

Аналіз параметрів режиму традиційної схеми живлення печей у мережі малої потужності показав, що в умовах незмінних параметрів обладнання неможливо розвинути номінальну потужність дуги внаслідок великих втрат напруги у мережі. Тому, як за симетричного так і несиметричного навантаження, потужність дуги зменшується. У цих умовах збільшення уставки струму приводить до подальшого зниження потужності, а також зростання втрат оскільки робоча точка знаходиться на спадній ділянці характеристики $P_a=f(I_a)$. У результаті, за період плавлення з уставкою автоматичного регулятора $m_I=1$, середнє очікуване значення потужності дуги становитиме 91,8 МВт, а втрат потужності – 11,3 МВт (табл. 4). Відповідно імовірнісне значення електричного ККД печі матиме значення 0,85–0,86. Відзначимо, що наведені у табл. 3 значення ККД розраховувались як імовірнісні характеристики для сукупності дійсних їх значень у конкретних несиметричних режимах, а не через очікувані значення потужності дуги й втрат потужності.

Використання схеми ПССН, як видно з даних табл. 4, дозволяє отримати за $m_U=1$ імовірнісне значення потужності дуги 109,7 МВт, тобто на 19,5 % більшим ніж у схемі ТСЕ. У схемі ПССН зміна значення m_U викликає пропорційну зміну корисної потужності. Зауважимо, що потужність дуги у обох випадках розраховувалась за гармонічними складовими струмів. У несиметричних режимах враховувалась також частка потужності дуги, обумовлена симетричними складовими струму прямої й зворотної послідовності на частотах 150 і 450 Гц.

Ця частка для обох схем живлення печі становить 0,6–2,8 % від потужності дуги за основою гармонікою у даному режимі.

Очікувані втрати потужності у обладнанні становлять біля 10 МВт й є меншими, ніж у схемі ТСЕ. Відповідно схема ПССН забезпечує вищий ККД печі, середнє значення якого складає 91 % і є більшим майже на 6 %, ніж за використання схеми ТСЕ.

Отримані позитивні результати свідчать про відповідність характеристик пропонованої системи живлення особливостям режиму, притаманного дуговим сталеплавильним печам. Робочим діапазоном режимів таких печей є область від експлуатаційного короткого замикання до максимального робочого навантаження. Відповідно, експлуатаційне коротке замикання повинно бути нормальним робочим режимом печі, значення струму якого має бути близьким до номінального. У діапазоні режимів від максимального робочого навантаження до неробочого ходу схема повинна забезпечувати практично сталі значення напруги живлення. Саме таку характеристику має запропонована схема ПССН.

Варто зауважити, що наведені результати отримані з допомогою дослідження на математичній моделі. Така модель дозволяє відтворити довільну динаміку, нелінійність чи несиметрію режиму, однак математична модель – це не реальна дуга. Тому подальші дослідження необхідно проводити з природною дугою.

Розвиток дослідження полягає у фізичній реалізації схеми. Це може бути пілотна устава на печі малої потужності або діючий макет. У процесі втілення такої пропозиції можуть повставати питання щодо параметрів обладнання, що на даний час не випускається серійно, придбання устаткування, у тому числі для проведення вимірювань і реєстрації параметрів режиму. Крім того, устава повинна бути матеріалізована (фізично реалізована) на конкретному об'єкті. Це є можливим, однак потребує відповідних часових й інших ресурсів.

7. Висновки

1. Використання моделі дуги Пантегова у порівнянні з моделлю Кассі дозволяє адекватніше відобразити вольт-амперну характеристику дуги у початковий період плавлення. Позитивною її особливістю у порівнянні з іншими енергетичними моделями дуг є базування на статичній вольт-амперній характеристиці дуги, що забезпечує краще відтворення реальних параметрів дуг. Для відтворення початкового періоду плавлення константи цієї моделі мають такі значення: показник степені статичної вольт-амперної характеристики $n = -0,02$; теплова стала часу дуги $\theta_p = 0,1$ мс.

2. Нелінійність вольт-амперної характеристики дуги викликає спотворення струму й напруги мережі. За цих же характеристик дуги та мережі у випадку використання схеми ТСЕ коефіцієнт спотворення струму мережі дорівнює 4,1 %, а її напруги – 3,2 %. Як видно з порівняння спотворень струму й напруги, за використання ТСЕ спотворення струму й напруги є більшими, однак значення спотворення напруги не перевищує допустимої межі 6 %.

Оцінка додаткових втрат у елементах схем від струмів вищих гармонік проводилась з врахуванням поверхневого ефекту. Отримано збільшення елект-

ричних втрат за номінального навантаження на 0,5 %, що свідчить про відносно невеликі спотворення форми струмів.

Дослідження показали, що нелінійність дуги суттєво впливає на ступінь стабілізації діючого значення струму дуги у схемі ПССН. Отримано, що зі збільшенням спотворень струму дуги коефіцієнт нестабільності зменшується. Показано, що за лінійного навантаження його значення становить 5,7 %, а за $\theta_p=0,1$ мс зменшується до 0,84 %, тобто стабілізація діючого значення струму дуги зросла у 6,8 разів.

3. Результати дослідження у нелінійних несиметричних режимах, отримані для мережі малої потужності показують, що застосування перетворювача ПССН має істотні переваги у порівнянні зі схемою ТСЕ:

- розмах зміни напруги в умовах зміни режиму від експлуатаційного короткого замикання до номінального навантаження зменшується з 9,7 до 0,4 %;
- коефіцієнт спотворення напруги мережі зменшується з 3,2 до 2,1 %;
- імовірнісне значення коефіцієнта несиметрії напруги мережі зменшується з 3,66 до 1,35 %;
- імовірнісне значення корисної потужності дуги за номінальної уставки регулятора потужності зростає з 91,8 до 109,7 МВт (на 19,5 %);
- імовірнісне значення втрат потужності дуги за номінальної уставки регулятора потужності зменшується з 11,3 до 9,9 МВт (на 12,4 %);
- імовірнісне значення електричного ККД зростає з 86 до 91,1 %;
- імовірнісне значення коефіцієнта потужності зростає з 0,79 до 0,93.

Література

1. Salor, O., Gultekin, B., Buhan, S., Boyrazoglu, B., Inan, T., Atalik, T. et. al. (2010). Electrical Power Quality of Iron and Steel Industry in Turkey. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46 (1), 60–80. doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2009.2036547>
2. Łukasik, Z., Olczykowski, Z. (2020). Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems. *Energies*, 13 (6), 1462. doi: <https://doi.org/10.3390/en13061462>
3. Deaconu, S. I., Popa, G. N., Tihomir, L. (2010). Comparative Study for EAF's Reactive Energy Compensation Methods and Power Factor Improvement. *WSEAS Transactions on Systems*, 9 (9), 979–988. URL: https://www.researchgate.net/publication/228399802_Comparative_study_for_EAF's_reactive_energy_compensation_methods_and_power_factor_improvement
4. Pérez-Donsión, M., Jar Pereira, S., Soares Oliveira, F. T. (2019). Harmonics and Flicker in an Iron and Steel Industry with AC arc furnaces. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 17, 417–422. doi: <https://doi.org/10.24084/repqj17.329>
5. Larsson, T., Poumarede, C. (1999). STATCOM, an efficient means for flicker mitigation. *IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233)*. doi: <https://doi.org/10.1109/pesw.1999.747380>
6. Parniani, M., Mokhtari, H., Hejri, M. (2002). Effects of dynamic reactive compensation in arc furnace operation characteristics and its economic benefits.

IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. doi: <https://doi.org/10.1109/tdc.2002.1177621>

7. Varetsky, Y., Konoval, V., Hanzelka, Z. (2020). A Method of Evaluating FACTS Device Impact on Voltage Flicker in the EAF Supply System. 2020 12th International Conference and Exhibition on Electrical Power Quality and Utilisation- (EPQU). doi: <https://doi.org/10.1109/epqu50182.2020.9220317>

8. Paranchuk, Ya., Paranchuk, R. (2016). Neural network system for continuous voltage monitoring in electric arc furnace. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 74–80. URL: <http://nv.nmu.org.ua/index.php/en/component/jdownloads/finish/60-02/8475-2016-02-paranchuk/0>

9. Ghiormez, L., Panoiu, M., Panoiu, C. (2013). Harmonics Analysis of the 3-Phase Electric Arc Furnace Using Models of the Electric Arc. *AWERProcedia Information Technology & Computer Science*, 3, 424–430.

10. Garcia-Segura, R., Vázquez Castillo, J., Martell-Chavez, F., Longoria-Gandara, O., Ortégón Aguilar, J. (2017). Electric Arc Furnace Modeling with Artificial Neural Networks and Arc Length with Variable Voltage Gradient. *Energies*, 10 (9), 1424. doi: <https://doi.org/10.3390/en10091424>

11. O'Neill-Carrillo, E., Heydt, G. T., Kostelich, E. J., Venkata, S. S., Sundaram, A. (1999). Nonlinear deterministic modeling of highly varying loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14 (2), 537–542. doi: <https://doi.org/10.1109/61.754100>

12. Сидорец, В. Н., Пентегов, И. В. (2013). Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. Киев: Международная ассоциация «Сварка», 272. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3777.4883>

13. Пентегов, И. В. (1976). Математическая модель столба динамической электрической дуги. *Автоматическая сварка*, 6, 8–12. URL: https://www.researchgate.net/profile/Igor-Pentegov/publication/320710346_Mathematical_Model_of_a_Column_of_a_Dynamic_Electric_Arc_Matematiceskaa_model_stolba_dinamiceskoj_elektriceskoj_dugi/links/59f6f7700f7e9b553ebd4753/Mathematical-Model-of-a-Column-of-a-Dynamic-Electric-Arc-Matematiceskaa-model-stolba-dinamiceskoj-elektriceskoj-dugi.pdf

14. Савицки, А., Хальтоф, М. (2016). Проблемы определения параметров математических моделей электрических дуг в цепях с источниками тока. *Электричество*, 1, 25–34.

15. Фомин, А. В. (2009). Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 3, 315–321.

16. Golestani, S., Samet, H. (2016). Generalised Cassie–Mayr electric arc furnace models. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10 (13), 3364–3373. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0405>

17. Kolagar, A. D., Pahlavani, M. R. A. (2021). Identification of Plasma Arc Model Parameters in an Electric Arc Furnace Plant via Measurement at the Secondary Side of the Transformer. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 102 (5), 1079–1089. doi: <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00622-5>

18. Seker, M., Memmedov, A. (2017). An Experimental Approach for Understanding V-I Characteristic of Electric Arc Furnace Load. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 23 (3). doi: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.23.3.18328>

19. Николаев, А. А. (2017). Разработка усовершенствованной методики выбора мощности статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*, 15 (3), 74–94. doi: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-74-94>

20. Волков, И. В. (1974). Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка, 216.

21. Malinovskyi, A. A., Turkovskyi, V. H., Muzychak, A. Z., Turkovskyi, Y. V. (2019). Peculiarities of the reactive power flow in the arc furnace supply circuit with improved electromagnetic compatibility. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 79–86. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-2/10>

22. Turkovskyi, V., Malinovskyi, A., Muzychak, A., Turkovskyi, O. (2020). Using the constant current – constant voltage converters to effectively reduce voltage fluctuations in the power supply systems for electric arc furnaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (108)), 54–63. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219439>

23. Турковский, В. Г., Жовнир, Ю. М. (2001). Обоснование эффективности применения установки стабилизации режима дуговой сталеплавильной печи переменного тока. *Промышленная энергетика*, 5, 40–44.

24. Кибзун, А. И., Горяинова, Е. Р., Наумов, А. В., Сиротин, А. Н. (2002). *Теория вероятностей и математическая статистика*. М.: Физматгиз, 202.