

DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-03>

УДК 621.316.7:621.365.2

¹**В. М. КОВАЛЬОВ**, кандидат технічних наук, доцент

доцент кафедри мехатроніки та електротехніки

e-mail: v.kovalov@khai.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5817-8790>

¹**Е. А. ХОМ'ЯК**, Ph.D.,

старший викладач кафедри мехатроніки та електротехніки

e-mail: e.khomiak@khai.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-2986>

¹**Є. І. МІРОШНИК**,

аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки

e-mail: y.i.miroshnyk@khai.edu

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5391-1066>

¹**О. П. ТИМОФЄЄВ**,

аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки

e-mail: o.p.tymofieiev@khai.edu

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1564-0981>

¹**В. О. КРУТЬКО**,

аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки

e-mail: v.o.krutko@khai.edu

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5093-3566>

¹**В. П. ШЕВЧЕНКО**,

аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки

e-mail: vyatcheslav.shevchenko@khai.edu

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2044-2909>

¹*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»*

вулиця Вадима Манька, 17, м. Харків, 61070, Україна.

ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТИРИСТОРНИМ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПЕЧЕЙ

Електродугові печі (ЕДП) містять пічні трансформатори з коефіцієнтом потужності 0,3, які при несинусоїдних струмах стрибками випадковим чином споживають реактивну потужність. Для компенсації останньої використовують тиристорні компенсатори реактивної потужності (ТКРП). При стрибках реактивної потужності відома система керування ТКРП забезпечує час регулювання 0,02 с, оскільки визначає кут керування тиристорів за останній період мережної напруги. При цьому впродовж перехідних процесів регулювання ТКРП реактивна потужність ЕДП не компенсується.

Метою роботи є підвищення швидкодії системи керування ТКРП для зменшення некомпенсованої реактивної потужності в перехідних процесах регулювання. Поставлена мета досягається тим, що, на відміну від відомої системи керування, кут керування визначається кожний півперіод вирішенням рівняння мінімізації функціонала середньоквадратичної похибки рівності струму реактора і струму трансформатора з конденсатором в моменти амплітудного значення мережної напруги. В результаті швидкодія системи керування підвищується до 0,01 с.

Наукова новизна роботи полягає в подальшому розвитку виразу функціонала для визначення кута керування ТКРП на кожному півперіоді напруги. Практична значимість: підвищення швидкодії системи керування ТКРП в два рази зменшує в два рази споживання реактивної потужності в перехідних процесах регулювання і підвищує результуючий коефіцієнт потужності до одиниці. Роботоздатність запропонованої системи керування ТКРП перевірена на математичній моделі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *електродугова піч, реактивна потужність, компенсація, спосіб керування, мінімізація функціоналу.*

Як цитувати: Ковальов В. М., Хом'як Е. А., Мірошник Є. І., Тимофєєв О. П., Крутько В. О., Шевченко В. П. Статистичні методи управління якістю механічної обробки малих партій. *Машинобудування*. 2025. Вип. 35. С. 26-35. DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-03>



Вступ

Електродугові печі (ЕДП) є ключовими технологічними об'єктами в металургійній промисловості, які забезпечують виплавку до 11% світового обсягу сталі. Однак їх експлуатація супроводжується значними викликами, зокрема низьким коефіцієнтом потужності ($\cos\phi \approx 0,3$) через високу індуктивність розсіювання пічних трансформаторів, що спричиняє стрибкоподібне споживання реактивної потужності при несинусоїдних струмах. Ці процеси призводять до нестабільності напруги в електромережі, зокрема до явища флікера, що негативно впливає на якість електропостачання та ефективність енергоспоживання. Для вирішення цієї проблеми широко застосовуються тиристорні компенсатори реактивної потужності (ТКРП), які забезпечують швидке регулювання реактивної потужності за допомогою фазокерованих реакторів. Проте сучасні системи керування ТКРП мають обмежену швидкодію (час регулювання становить 0,02 с), що не дозволяє повністю компенсувати реактивну потужність у перехідних процесах, особливо під час динамічних режимів

запалювання електричної дуги.

Метою даної роботи є розробка та обґрунтування способу керування ТКРП із підвищеною швидкодією для забезпечення миттєвої компенсації реактивної потужності ЕДП у перехідних режимах. Запропонований підхід базується на визначенні кута керування тиристорами кожні півперіоди напруги шляхом мінімізації функціонала середньоквадратичної похибки між струмом фазокерованого реактора та сумарним струмом пічного трансформатора й конденсатора. Це дозволяє скоротити час регулювання до 0,01 с, що вдвічі підвищує ефективність компенсації та сприяє зниженню некомпенсованої реактивної потужності. Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні виразу функціонала для півперіодичного керування, а практична цінність – у підвищенні коефіцієнта потужності ЕДП до одиниці та зменшенні впливу флікера на електромережу. Ефективність запропонованого методу підтверджена математичним моделюванням у програмному середовищі MATLAB.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Згідно з [1] у світі близько 11% сталі виплавляється з використанням електродугових печей (ЕДП) потужністю до 50 кВт. При цьому коефіцієнт потужності ЕДП приблизно складає $\cos\phi=0,3$, оскільки пічні трансформатори мають значні величини індуктивності розсіювання для зменшення кидків струму в моменти запалювання електричної дуги.

Динамічні режими запалювання електричної дуги займають в технологічному циклі плавки металів близько 14%. При цьому внаслідок нелінійності вольт-амперної характеристики (ВАХ) електричної дуги споживаний струм стає несинусоїдним [2].

З аналізу літератури [3] відомо, що ВАХ електричної дуги моделюється або емпіричним рівнянням.

$$U_a = A + B I + \frac{C}{D + I_a} \quad (1)$$

де A, B, C, D – емпіричні коефіцієнти; l – довжина дуги; I_a – струм дуги; U_a – напруга дуги;

або шляхом розв'язання диференційного рівняння отриманого в [4].

$$k_1 r^n + k_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (2)$$

де m, n, k_1, k_2, k_3 – емпіричні коефіцієнти; r – радіус дуги; i – струм дуги.

З метою компенсації реактивної потужності ЕДП широко застосовуються тиристорні компенсатори реактивної потужності (ТКРП), які забезпечують швидку компенсацію реактивної потужності. Елементом, що забезпечує швидке і плавне регулювання реактивної потужності ЕДП, є, так званий, фазокерований реактор (ФР), схема якого являє собою послідовне з'єднання реактора та тиристорного регулятора напруги (рис. 1).

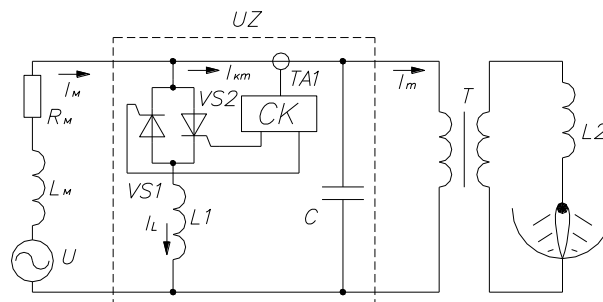


Рис. 1 – Силова схема ЕДП з ТКРП
Fig. 1 – Power diagram of EDP with TCRP

В моменти запалювання електричної дуги відбуваються миттєві короткі замикання, які створюють провали напруги (флікери) в електромережі [5-10]. Необхідно зазначити, що за рахунок компенсації реактивної потужності відбувається зниження рівня флікера, як додатковий позитивний фактор.

Регулювання реактивної потужності ФР здійснюється шляхом зміни кута керування тиристорів системою керування (СК). При цьому виникає актуальна задача підвищення швидкодії системи керування ТКРП для компенсації реактивної потужності ЕДП в перехідних процесах регулювання при стрибках споживання реактивної потужності, у тому числі, в динамічних режимах запалювання електричної дуги.

Отже, набуває високої актуальності задача підвищення динамічних характеристик ТКРП при несинусоїдних режимах споживання електроенергії. Основою розвитку ТКРП в даному напрямі слід визнати удосконалення способів їх керування.

Метою роботи є синтез способу керування ТКРП з підвищеною швидкістю для компенсації швидкозмінної реактивної потужності ЕДП.

Загальний аналіз способів керування ТКРП для реактивних навантажень промислових підприємств наведених в [11-14]. Способи керування ТКРП для електротранспорту наведених в [15-16], для реактивних навантажень міських електромереж наведених в [17-19]. Усі розглянуті способи керування засновані на ступінчастому регулюванні ємності конденсаторних батарей і на забезпечують миттєвої компенсації реактивної

потужності навантаження при її випадковій короточасній зміні.

Для електричного кола ЕДП характерним є швидко зміна реактивного опору розсіювання пічного трансформатора з причини нелінійності ВАХ електричної дуги. Вплив зміни індуктивного опору на характеристики та параметри ТКРП досліджено в [20]. З'ясовано, що при збільшенні реактивного опору розсіювання максимальне значення реактивної потужності, що може генерувати у мережу ТКРП, теж збільшується, але при цьому глибина регулювання реактивної потужності зменшується. Для покращення якості вхідного струму ТКРП, тобто зменшення його коефіцієнта гармонік до значень менших 5%, пропонується в процесі регулювання під навантаженням змінювати індуктивність реактора у колі горіння електричної дуги. Таке регулювання відбувається стрибкоподібно шляхом перемикавання відпайок від обмотки реактора за допомогою симисторів.

В [21] розглянутий спосіб керування ТКРП з використанням додаткового фільтрокомпенсуючого пристрою. В [22] досліджено ТКРП з примусовою комутацією тиристорів за наявності вольтододавання й визначено інтегральні показники його енергетичного процесу. В [23] досліджено вплив параметричної модуляції індуктивності ФР на інтегральні показники енергетичного процесу ТКРП із заземленою нейтраллю. В [24,25] досліджено вплив способів широтно-імпульсної модуляції ТКРП із примусовою комутацією тиристорів.

Робота [26] присвячена розробці способу керування ТКРП на основі виділення сигналу першої гармоніки

струму з подальшим визначенням кута керування тиристорами на основі формули, що пов'язує амплітуду реактивного струму першої гармоніки ФР з кутом керування тиристорів, тобто

$$I_1 = I_{\max} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right) \quad (3)$$

де $I_{\max} = U/(\omega L)$ – амплітуда струму, що протікає в реакторі з індуктивністю L під дією напруги мережі з амплітудою U і з кутовою частотою ω ; α – кут відкриття тиристорів в радіанах.

Основна складність способу полягає у необхідності виділення сигналу реактивної складової першої гармоніки струму. З цією метою пропонують використовувати фільтрацію струму або інтегрування добутку миттєвих значень струму на опорний сигнал, проте такий підхід не дозволяє досягти граничної швидкодії та високої точності компенсації, що обумовлено неідеальністю характеристик фільтра. Окрім цього, з виразу (3) слідує, що кут керування тиристорів може бути заданий не частіше одного раз на період.

В роботі [27] запропонований спосіб керування ТКРП, який ґрунтується на вирішенні задачі мінімізації функціоналу

діючого значення споживаного з мережі струму, який дорівнює сумі струмів конденсатора ТКРП, первинної обмотки пічного трансформатора $i_{kt}(t)$ та струму фазокерованого ФР реактора i_L .

$$J_1 = \int_0^T i_M^2(t) dt = \int_0^T (i_{km}(t) + i_L(\alpha, t))^2 dt \quad (4)$$

де i_M – струм споживаний з мережі; $i_{kt}(t)$ – струм первинної обмотки та конденсатора; T – період першої гармоніки струму. $i_L(\alpha, t)$ – струм через ФР, що виражається формулою

$$i_L(\alpha, t) = \begin{cases} \frac{U}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \text{ при } \alpha < \omega t < \pi - \alpha \\ \frac{U}{\omega L} (\sin \omega t + \sin \alpha) \text{ при } \pi + \alpha < \omega t < 2\pi - \alpha \end{cases} \quad (5)$$

Проте, побудова СК ТКРП на основі принципу мінімізації функціоналу (4) не дозволяє досягти максимальної швидкодії та використати всі переваги методу, оскільки кут керування змінюється один раз за період, а треба один раз за півперіод.

Таким чином, в розглянутій літературі не вирішена задача підвищення швидкодії системи керування ТКРП.

Виклад основного матеріалу

Для побудови швидкодіючої СК для ТКРП необхідно вимірювати миттєве значення струму ФР при $t=0,01\text{с}$, коли напруга мережі набуває мінімального значення. В цей момент необхідно визначати кут керування тиристорами ФР для другого півперіоду напруги живлення.

Миттєве значення струму, споживаного з мережі, буде мінімальним, коли миттєвий струм ФР буде рівними за модулем і протилежними за знаком сумі струмів конденсатора і пічного трансформатора, тобто $i_L(t) = -i_{kt}(t)$. Оскільки в момент $t=0,01\text{с}$ значення струму i_{kt} заздалегідь невідомі, то кут керування ФР можливо визначати за минулою напівхвилею струму трансформатора, виходячи з допущення, що струм i_t має півхвильову симетрію, тобто $i_t(t) = i_t(t+T/2)$. Тоді задачею СК в момент $t=0,01\text{с}$ є визначення кута керування тиристором на другому півперіоді, при якому струм ФР мінімально відхилявся від значень, що їх

набував струм трансформатора на першому півперіоді.

Оскільки метою компенсації реактивної потужності є зменшення діючого значення струму, що споживається з мережі, а мінімум діючого значення струму відповідає мінімуму інтегралу квадрата миттєвого струму мережі, то для оцінки близькості струму ФР i_L до струму i_t доцільно застосовувати інтегральний квадратичний критерій.

Тоді для забезпечення миттєвої компенсації реактивної потужності ЕДП з максимальною швидкодією, на відміну від (4), складемо функціонал середньоквадратичної похибки рівності струмів i_L ФР і струму трансформатора з конденсатором i_{kt} за півперіод.

$$J_2 = \int_0^{T/2} (i_{km}(t) - i_L(\alpha, t))^2 dt \quad (6)$$

Для визначення кута керування тиристорів з метою забезпечення

мінімального діючого значення суми струмів навантаження та ТКРП використаємо методику теорії варіаційного обчислення. Для чого складемо рівняння Ейлера, взявши часткову похідну від (6) і прирівнявши її до нуля.

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\int_0^{T/2} (i_{km}(t) - i_L(\alpha, t))^2 dt \right) = 0 \quad (7)$$

Після виконання ряду математичних перетворень отримаємо рівняння зробивши підстановку (5) в (7),

$$-\frac{U \cos \alpha}{\omega L} \int_0^{T/2} (i_{km}(t) - i_L(\alpha, t)) dt = 0 \quad (8)$$

Відкинувши корінь рівняння $\alpha = \pi/2$, як такий, що не має фізичного сенсу, проінтегрувавши та спростивши вираз, отримаємо.

$$\int_0^{T/2} i_{km}(t) dt - \frac{2U}{\omega^2 L} \left[\cos \alpha + \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha \right] = 0 \quad (9)$$

На основі рівняння (9) пропонується спосіб керування ТКРП, алгоритм якого полягає в наступному:

1) розраховувати інтеграл струму $i(t)$ за минулий півперіод в моменти досягнення напругою мережі амплітуди; 2) вирішити рівняння (9), коренем якого є кут керування, що має бути заданий для відповідного тиристора у наступному півперіоді.

Оскільки рівняння (9) є трансцендентним, то пошук кореня має вестись одним з чисельних методів або з використанням пошукової таблиці.

Експериментальну перевірку запропонованої мікропроцесорної системи керування з відповідним програмним забезпеченням та друкованими платами на

теперішній час провести неможливо, оскільки її створення потребує значних фінансових ресурсів. Тому доцільно провести математичне моделювання.

Моделювання процесів миттєвої компенсації реактивної потужності проводилося в програмному середовищі MATLAB на основі метода сигнальних графів [28]. Кожні півперіоду в моменти досягнення напругою мережі амплітудного значення на основі розрахованих значень струму ікт СК здійснює обчислення кута керування відповідним тиристором шляхом знаходження кореня рівняння (9) методом ділення навпіл. Результати моделювання представлені на рис. 2.

а – струм первинної обмотки пічного трансформатора; б) – струм первинної обмотки пічного трансформатора і конденсатора; в) – струм фазокерованого реактора; г) – струм споживання з мережі.

Величини струмів представлені відносно синусоїдного струму при повністю відкритих тиристорах. Одиниці на осі ординат відповідає амплітудне значення струму первинної обмотки пічного трансформатора. В момент часу $t_1 = 0,07$ с відбувається зменшення струму дуги. При $t = t_2 = 0,15$ с збільшення струму дуги. Відповідно в моменти часу t_1 та t_2 змінюється струм первинної обмотки пічного трансформатора (рис.2а) та сумарний струм первинної обмотки трансформатора і конденсатора ТКРП (рис.2б). З рисунку 2в видно, як СК на зміну струму первинної обмотки відповідає зміною кута керування тиристорів ФР. На рисунку 2г показаний струм споживаний від джерела живлення.

Висновки

Розроблений теоретичний метод керування ТКРП, валідований математичним моделюванням, забезпечує із швидкістю 0,01 с, який визначає кут керування тиристорами кожні півперіоду шляхом мінімізації функціонала середньоквадратичної похибки між струмом фазокерованого реактора та сумарним струмом пічного трансформатора й конденсатора. Наукова новизна полягає у формулюванні функціо-

нала для півперіодичного оновлення кута керування, що вдвічі підвищує швидкодію порівняно з періодичними методами. Практична цінність: метод зменшує некомпенсовану реактивну потужність удвічі в перехідних процесах і підвищує коефіцієнт потужності ЕДП до 1,0. Ефективність підтверджено математичним моделюванням у MATLAB.

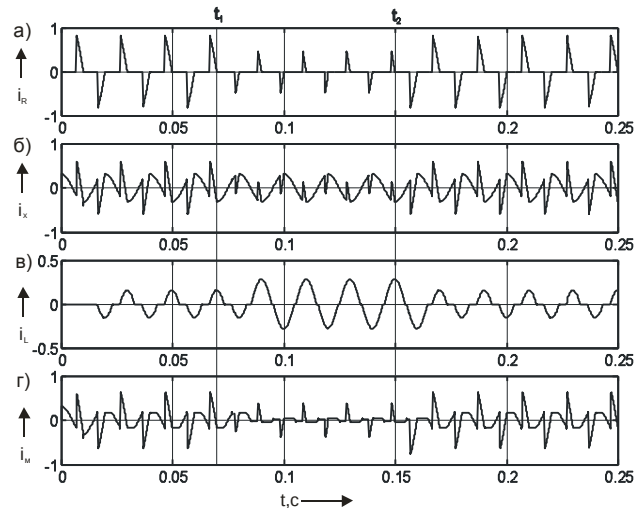


Рис. 2 – Результати моделювання запропонованого способу керування ТКРП

Fig. 2 – Results of modeling the proposed method of controlling TCRP

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Данильченко Д. О., Кузнецов Д. С. Використання пристроїв компенсації реактивної потужності при впровадженні розподіленої генерації. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2024. № 1(8). С. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.08>.
2. Чиженко О. І., Трач І. В. Аналіз впливу параметрів мережі на ефективність тиристорного компенсатора реактивної потужності. *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. Вип. 6. С. 45–50. doi: 10.20998/2074-272X.2020.6.07.
3. Говоров Ф. П., Перепечений В. А. Питання компенсації реактивної потужності в міських електромережах. *Енергетика та електрифікація*. 2022. № 3(47). С. 50–56. doi: 10.31548/energiya2022.03.050.
4. Доманський І. В. Режим роботи систем електроживлення з пристроями компенсації реактивної потужності. *Електротехніка і електромеханіка*. 2021. № 3. С. 59–66. doi: 10.20998/2074-272X.2021.3.09.
5. Калінчик В. В., Побігало В. А. Управління режимом реактивної потужності в системах електропостачання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2021. № 2(6). С. 36–39. doi: 10.20998/2079-3944.2021.2.07.
6. Пилипенко О. В., Шевченко В. В. Аналіз ефективності тиристорних регуляторів у системах електродугових печей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2022. № 4. С. 38–44. doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.06.
7. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії : наказ Міністерства України від 30.11.2020 № 764. 2021. 18 р. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text> (дата звернення: 23 червня 2025)
8. Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management / Takata S. Kirmura F., F.J.A.M. van Houten, Westkamper, E., Shpitalni M., Ceglarek D., Lee J. *CIRP Annals*. 2004. № 53 (2). P. 643–655. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60033-x](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60033-x).
9. Mathematic Model of the General Approach to Tolerance Control in Quality Assessment / Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Bondarenko T. *Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner*

2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2022. P. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_41

10. Accuracy evaluation of flat surfaces measurements in conditions of external influences / Dichev D., Diakov D., Zhelezarov Y., Nikolova H., Kupriyanov O., Dicheva, R. *Proceedings of 2022 XXXII international scientific symposium "Metrology and Metrology assurance" (MMA). (September 2022)*. 2022. P. 1-7. DOI: 10.1109/MMA55579.2022.9992334

11. Oztemel E., Gursev S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. № 31. P. 127–182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>

12. Supervision of Milling Tool Inserts using Conventional and Artificial Intelligence Approach: A Review / Dhobale N., Mulik S., Jegadeeshwaran R., Patange A. *Sound & Vibration*. 2021. № 55(2). P. 87–116. DOI: <https://doi.org/10.32604/sv.2021.014224>

13. Nasir V., Sassani F. A review on deep learning in machining and tool monitoring: Methods, opportunities, and challenges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. № 115, P. 2683–2709. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07325-7>

14. Ko J. H., Yin C. A review of artificial intelligence application for machining surface quality prediction: From key factors to model development. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02571-y>

15. Machine-Learning- and Internet- of-Things-Driven Techniques for Monitoring Tool Wear in Machining Process: A Comprehensive Review / Kasiviswanathan S., Gnanasekaran S., Thangamuthu M., Rakkiyannan J. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2024. № 13(5):53. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan13050053>.

16. Tool condition monitoring techniques in milling process-a review / Mohanraj T., Shankar S., Rajasekar R., Sakthivel N. R., Pramanik A. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. № 9(1). P. 1032–1042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.031>

17. Digital twin modeling for loaded contact pattern-based grinding of spiral bevel gears / Rong K., Ding H., Kong X., Huang R., Tang J. *Advanced Engineering Informatics*. 2021. № 49. 101305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101305>

18. Топчий Н. В. Методи та сучасні засоби контролю механічних деталей на виробництві. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74). № 6. С. 30-34. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/06>

19. Підвищення якості контролю параметрів деталей при виготовленні та ремонті автомобілів / Кальченко В., Венжега В., Пасов Г., Кологойда А., Кужельний Я., Богославський В. *Технічні науки та технології*. 2024. № 1(35). С. 9-17. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-9-17](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-9-17)

20. Vasilevskyi O. Assessing the level of confidence for expressing extended uncertainty through control errors on the example of a model of a means of measuring ion activity. *Acta IMEKO*. 2021. № 10 (2). P.199-203. DOI: https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v10i2.810

21. Імплементація вимог міжнародних стандартів щодо невизначеності вимірювань в метрологічну діяльність підприємств / Триш Р. М., Черняк О. М., Артюх С. М., Бурдейна В. М., Грінченко Г. С. *Машинобудування*. 2021. № 27. С. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2021-27-117-124>

22. Sankhye S., Hu G. Machine Learning Methods for Quality Prediction in Production. *Logistics*. 2020. № 4(4). Pp. 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics4040035>

23. Haq A., Munir W. Improved CUSUM charts for monitoring process mean. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 2018. № 88 (9). P. 1684–1701. DOI: <https://doi.org/10.1080/00949655.2018.1444040>

24. Multivariate cumulative sum control chart for compositional data with known and estimated process parameters / Imran M., Sun J., Zaidi F. S., Abbas Z, Nazir H. Z. URL :

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qre.3099> (Last accessed: 23 June 2025)

25. Arc-Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks / G. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini and others. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1994. Vol.9, № 4. P. 2026-2033.

26. Чиженко О. И., Трач И. В. Способ повышения качества тока всистеме «сеть – управляемый мостовой тиристорный компенсатор реактивной мощности». *Праці ІЕД НАНУ*. 2017. Вип. 46. С. 22-30.

27. Літковець С. П., Петухов М. В. Спосіб підвищення енергетичної ефективності статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2014. Вип. 2. С. 56-62.

28. Fusco G., Losi A., Russo M. Adaptive Voltage Regulator Design for Static VAR Systems. *Control Engineering practice*. 2001. No. 9.

Стаття надійшла для редакції 14.05.2025

Стаття рекомендована до друку 16.06.2025

¹ KOVALOV V., Ph.D.,

Associate Professor of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: v.kovalov@khai.edu ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5817-8790>

¹ KHOMIAK E., Ph.D.,

Senior lecturer of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: e.khomiak@khai.edu ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-2986>

¹ MIROSHNYK YE.,

Postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: y.i.miroshnyk@khai.edu ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5391-1066>

¹ TYMOFIEIEV O.,

Postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: o.p.tymofieiev@khai.edu ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1564-0981>

¹ KRUTKO V.,

Postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: v.o.krutko@khai.edu ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5093-3566>

¹ SHEVCHENKO V.,

Postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: vyatcheslav.shevchenko@khai.edu ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2044-2909>

¹ National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
Vadym Manko str. 17, Kharkiv, 61070, Ukraine

INCREASING THE SPEED OF THE CONTROL SYSTEM OF THE THYRISTOR COMPENSATOR OF REACTIVE POWER OF ELECTRIC ARC FURNACES

Electric arc furnaces (EDP) contain furnace transformers with a power factor of 0.3, which randomly consume reactive power in the form of jumps when non-sinusoidal currents are present. Thyristor reactive power compensators (TRPC) are used to compensate for the latter. When reactive power jumps occur, the known TCRP control system provides a regulation time of 0.02 s, since it determines the control angle of the thyristors for the last period of the mains voltage. At the same time, during the transient processes of TCRP regulation, the reactive power of the EAF is not compensated.

The aim of the work is to increase the speed of the TPRC control system in order to reduce uncompensated reactive power in transient control processes. The goal is achieved by the fact that, unlike the known control system, the control angle is determined every half-period by solving the equation of minimizing the functional of the root mean square error of the equality of the reactor current and the transformer current with a capacitor at the moments of the amplitude value of the mains voltage. As a result, the speed of the control system increases to 0.01 s.

The scientific novelty of the work lies in the further development of the expression of the functional for determining the control angle of the TCRP at each half-period of voltage. Practical significance: doubling the speed of the TCRP control system reduces reactive power consumption in transient control processes by half and increases the resulting power factor to unity. The performance of the proposed TCRP control system has been verified on a mathematical model.

KEYWORDS: *electric arc furnace, reactive power, compensation, control method, functional minimization.*

In cites: Kovalov V., Khomiak E., Miroshnyk Ye., Tymofieiev O., Krutko V., Shevchenko V., (2025). Statistical methods for quality control of small-batch machining. *Engineering*, (35), 26-35.
<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-03> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

- Danylchenko, DO & Kuznetsov, DS 2024, 'Vykorystannia prystroiv kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti pry vprovadzhenni rozpodilenoї heneratsii' [Use of reactive power compensation devices when implementing distributed generation.], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist*, no 1(8), Pp. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.08>. (in Ukraine)
2. Chyzhenko, OI & Trach, IV 2020, 'Analiz vplyvu parametriv merezhi na efektyvnist tyrstornoho kompensatora reaktyvnoi potuzhnosti' [Analysis of the influence of network parameters on the efficiency of the thyristor reactive power compensator.], *Elektrotehnika i elektromekhanika*, Iss. 6, Pp. 45–50. doi: 10.20998/2074-272X.2020.6.07. (in Ukraine)
3. Hovorov, FP & Perepechenyi, VA 2022, 'Pytannia kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti v miskykh elektromerezhakh' [The issue of reactive power compensation in urban power grids.], *Enerhetyka ta elektryfikatsiia*, № 3(47), Pp. 50–56. doi: 10.31548/energiya2022.03.050. (in Ukraine)
4. Domanskyi, IV 2021, 'Rezhymy roboty system elektrozhylvennia z prystroiamy kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti [Operating modes of the power supply system with reactive power compensation devices.], *Elektrotehnika i elektromekhanika*, № 3, Pp. 59–66. doi: 10.20998/2074-272X.2021.3.09. (in Ukraine)
5. Kalinchyk, VV & Pobihailo, VA 2021, 'Upravlinnia rezhymom reaktyvnoi potuzhnosti v systemakh elektropostachannia' [Reactive power control in power supply systems.], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Problemy udoskonaluvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*, № 2(6), Pp. 36–39. doi: 10.20998/2079-3944.2021.2.07. (in Ukraine)
6. Pylypenko, OV & Shevchenko, VV 2022, 'Analiz efektyvnosti tyrstornykh rehulatoriv u systemakh elektroduhovykh pechei' [Analysis of the efficiency of thyristor regulators in electric oven systems.], *Elektrotehnika i elektromekhanika*, № 4, Pp. 38–44. doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.06. (in Ukraine)
7. Minenerho Ukrainy 2020, Metodyka obchmsdennia platy za peretikannia reaktyvnoi elektroenerhii : nakaz Minenerho Ukrainy vid 30.11.2020 № 764 [Methodology for limiting the payment for the flow of reactive electricity: Order of the Ministry of Energy of Ukraine dated 11/30/2020 No. 764], viewed June 23, 2025, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text> (in Ukraine)
8. Takata, S, Kirnura, F, F.J.A.M. van Houten, Westkamper, E, Shpitalni, M, Ceglarek, D & Lee, J 2004, 'Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management', *CIRP Annals*, № 53 (2), P. 643–655. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60033-x](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60033-x).
9. Kupriyanov, O, Trishch, R, Dichev, D & Bondarenko, T 2022, 'Mathematic Model of the General Approach to Tolerance Control in Quality Assessment', *Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, P. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_41
10. Dichev, D, Diakov, D, Zhelezarov, Y, Nikolova, H, Kupriyanov, O & Dicheva, R 2022, 'Accuracy evaluation of flat surfaces measurements in conditions of external influences', *Proceedings of 2022 XXXII international scientific symposium "Metrology and Metrology assurance" (MMA). (September 2022)*, P. 1-7. DOI: 10.1109/MMA55579.2022.9992334
11. Oztemel, E & Gursev, S 2020, 'Literature review of Industry 4.0 and related technologies', *Journal of Intelligent Manufacturing*, № 31, P. 127–182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
12. Dhobale, N, Mulik, S, Jegadeeshwaran, R & Patange, A 2021, 'Supervision of Milling Tool Inserts using Conventional and Artificial Intelligence Approach: A Review', *Sound & Vibration*, № 55(2), P. 87–116. DOI: <https://doi.org/10.32604/sv.2021.014224>
13. Nasir, V & Sassani, F 2021, 'A review on deep learning in machining and tool monitoring: Methods, opportunities, and challenges', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, № 115, P. 2683–2709. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07325-7>
14. Ko, JH & Yin, C 2025, 'A review of artificial intelligence application for machining surface quality prediction: From key factors to model development', *Journal of Intelligent Manufacturing*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02571-y>
15. Kasiviswanathan, S, Gnanasekaran, S, Thangamuthu, M & Rakkiyannan, J 2024, 'Machine-Learning- and Internet- of-Things-Driven Techniques for Monitoring Tool Wear in Machining Process: A Comprehensive Review', *Journal of Sensor and Actuator Networks*, № 13(5):53. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan13050053>.
16. Mohanraj, T, Shankar, S, Rajasekar, R, Sakthivel, NR & Pramanik, A 2020, 'Tool condition monitoring techniques in milling process-a review', *Journal of Materials Research and Technology*, № 9(1), P. 1032–1042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.031>
17. Rong, K, Ding, H, Kong, X, Huang, R & Tang, J 2021, 'Digital twin modeling for loaded contact pattern-based grinding of spiral bevel gears', *Advanced Engineering Informatics*, № 49. 101305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101305>

18. Topchii, NV 2024, 'Metody ta suchasni zasoby kontroliu mekhanichnykh detalei na vyrobnytstvi', *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, Vol. 35 (74), № 6, Pp. 30-34. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/06> (in Ukraine)
19. Kalchenko, V, Venzheha, V, Pasov, H, Kolohoida, A, Kuzhelnyi, Ya & Bohoslavskiy, V 2024, 'Pidvyshchennia yakosti kontroliu parametriv detalei pry vyhotovlenni ta remonti avtomobiliv', *Tekhnichni nauky ta tekhnologii*, № 1(35), Pp. 9-17. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-9-17](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-9-17) (in Ukraine)
20. Vasilevskiy, O 2021, 'Assessing the level of confidence for expressing extended uncertainty through control errors on the example of a model of a means of measuring ion activity', *Acta IMEKO*, № 10 (2), P. 199-203. DOI: https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v10i2.810
21. Trishch, RM, Cherniak, OM, Artiukh, SM, Burdeina, VM & Hrinchenko, HS 2021, 'Implementatsiia vymoh mizhnarodnykh standartiv shchodo nevyznachenosti vymiriuvan v metrolohichnu diialnist pidpriemstv' [Implementation of the requirements of international standards regarding measurement uncertainty in the metrological activities of enterprises.], *Mashynobuduvannia*, № 27, Pp. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2021-27-117-124> (in Ukraine)
22. Sankhye, S & Hu, G 2020, 'Machine Learning Methods for Quality Prediction in Production', *Logistics*, № 4(4), Rr. 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics4040035>
23. Haq, A & Munir, W 2018, 'Improved CUSUM charts for monitoring process mean', *Journal of Statistical Computation and Simulation*, № 88 (9), P. 1684–1701. DOI: <https://doi.org/10.1080/00949655.2018.1444040>
24. Imran, M, Sun, J, Zaidi, FS, Abbas, Z & Nazir, HZ n.d., *Multivariate cumulative sum control chart for compositional data with known and estimated process parameters*, viewed June 23, 2025, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qre.3099> (in Ukraine)
26. Montanari, G, & Loggini, M, Cavallini, A et al 1994, 'Arc-Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks', *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, № 4, P. 2026-2033.
27. Chyzhenko, OY & Trach, YV 2017, 'Sposob povisheniya kachestva toka vsysteme «set – upravliaemii mostovoi tyristornyi kompensator reaktivnoi moshchnosti» [A method for improving current quality in the system "set - control of a bridge thyristor reactive power compensator".], *Pratsi IED NANU*, Iss. 46, Pp. 22-30. (in Ukraine)
28. Litkovets, SP & Pietukhov, MV 2014, 'Sposib pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti statychnykh tyristornykh kompensatoriv reaktivnoi potuzhnosti z prymusovoiu komutatsiieiu' [Method for increasing the energy efficiency of static thyristor reactive power compensators with forced switching.], *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, Iss. 2, Pp. 56-62.
29. Fusco, G, Losi, A & Russo, M 2001, 'Adaptive Voltage Regulator Design for Static VAR Systems', *Control Engineering practice*, No. 9.

The article was received by the editors 05/14/2025

The article is recommended for printing 06/16/2025