

**Кириченко Олексій Геннадійович**, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-3032-1919

**Шайтанов Іван Вікторович**, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-8232-3265

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕЧЕЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ У ФЕРОСПЛАВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Проведено аналіз сучасного стану та конструктивних особливостей сучасних вітчизняних феросплавних печей. Розглянуто перспективні напрямки реконструкції феросплавних печей, що використовуються для переробки відходів феросплавного виробництва. В даний час для цих цілей найбільшого поширення набули печі постійного струму. Однак ця технологія при реконструкції існуючих електропечей вимагає повної заміни електропечі змінного струму і пічного трансформатора і великих капітальних витрат на реконструкцію. Розглянуто та апробовано різні технології переробки відсіву фракціонування феросплавів. Для переробки вторинної сировини розроблені печі постійного струму для переплавлення відходів виробництва феросплавів. Метою реконструкції було встановлення реверсивного 3-фазного випрямляча (тиристорного перетворювача) в ланцюзі живлення між існуючим трансформатором та існуючою руднотермічної електропіччю змінного струму. При цьому потужність і конструкція електропечі залишилися незмінними. В результаті переведення електропечі на живлення від реверсивного 3-х-фазного випрямляча ця електропіч за своїми технологічними показниками наблизилася до електропечі постійного струму, переваги якої були описані вище, за рахунок використання ультранизької частоти. Стабілізація струму в кожній фазі низької частоти дозволяє при однакових струмах електродів утримувати під ними різні напруги, а також не порушувати симетрії струмів електромережі. Крім того, стабілізація струму забезпечує «м'який» режим роботи дуги, що зменшує випаровування металу, а також створює сприятливі умови для спікання електродів, що підвищує їх стабільність і знижує витрату. Результати дослідження показали, що технічне переоснащення феросплавних печей з переходу на постійний струм і використання реверсивного тиристорного 3-х-фазного перетворювача, що працює на наднизькій зворотній частоті, дозволило: знизити питомі витрати електроенергії в порівнянні з до печей змінного струму; значно зменшити втрати під час плавлення через випаровування та вуглекислий газ.

Ключові слова: трьохфазний випрямляч, постійний струм, переробка феросплавних відходів, печі постійного струму

*Вступ.* В умовах ринкової економіки перед промисловими підприємствами гостро стоять проблеми енерго- та ресурсозбереження. Металургійний переплав відходів феросплавного виробництва (відсівів, скрапів, ШМС та ін.) є не тільки економічно вигідним, а й зменшує кількість і площу полігонів промислових відходів, при цьому також сприятливо впливаючи на екологію.

Раніше найбільш ефективним способом утилізації пилових відходів та відсівів вважався процес агломерації, а також обгорткування та брикетування. Окускування відходів не тільки дозволяло забезпечувати додаткові ресурси металів та охорону навколишнього середовища, а й, як правило, стабілізувати роботу феросплавних електропечей.

Існує практика переплаву пилових відходів та відсівів в індукційних електропечах. Однак використовувати звичайну індукційну сталеплавильну електропіч для переплаву відсіву представляється неможливим, так як склад шихти диктує абсолютно інші

електричні параметри, а в залежності від технології переплаву відсіву ця електропіч, можливо, вимагатиме кілька індукторів, що окремо регулюються, по висоті печі, що значно підвищить її вартість. Також слід врахувати дороге та складне обладнання, що супроводжує встановлення індукційних печей, великі експлуатаційні витрати на його обслуговування та необхідність високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. До того ж, відносно холодні шлаки в індукційних електропечах ускладнюють перебіг реакцій між металами та шлаком і, отже, сильно ускладнюють рафінування. Доведення розплаву за складом в індукційних електропечах проблематична.

У сучасній металургії все більшого поширення набувають електропечі постійного струму. На відміну від електропечей змінного струму, завдяки низькому відсотку чаду металу вони дозволяють здійснювати переплав дрібнодисперсних відсівів феросплавних виробництв, а також пилу газоочищення, минаючи етап окускування, що, безсумнівно, дозволяє підприємствам уникнути додаткових витрат і знижує собівартість готової продукції.

*Постановка завдання.* Проаналізувати сучасний стан та конструктивні особливості сучасних вітчизняних феросплавних печей. Розглянуті перспективні напрямки реконструкції феросплавних печей, що використовуються для переробки відходів феросплавного виробництва.

*Головна частина досліджень.* В даний час у світовій практиці для цих цілей найбільшого поширення набули печі постійного струму. Однак ця технологія при реконструкції існуючих електропечей потребує повної заміни електропечі змінного струму та пічного трансформатора та великих капітальних витрат на реконструкцію.

На АТ «Запорізькому Феросплавному Заводі» розглянуто та випробувано різні технології переробки відсівів фракціонування феросплавів. [1; 2].

Феросилікомарганець, що отримується методом сплавлення відсівів, повинен задовольняти вимоги ДСТУ 3548-97 (табл. 1) [3].

Таблиця 1 – Хімічний склад феросилікомарганцю згідно ДСТУ 3548-97

Марки (ДСТУ)	Масова частка, %				
	Si	Mn	C	P	S
		не менше	не більше		
МнС25 (РА)	25,0–35,0	60,0	0,5	0,05	0,03
МнС25 (РБ)	25,0–35,0	60,0	0,5	0,25	0,03
МнС22 (РА)	20,0–25,0	65,0	1,0	0,10	0,03
МнС22 (РБ)	20,0–25,0	65,0	1,0	0,35	0,03
МнС17 (РА)	15,0–20,0	65,0	2,5	0,10	0,03
МнС17 (РБ)	15,0–20,0	65,0	2,5	0,60	0,03
МнС12 (РА)	10,0–15,0	65,0	3,5	0,20	0,03
МнС12 (РБ)	10,0–15,0	65,0	3,5	0,60	0,03

Використовувані на момент завершення реконструкції печі РКВУНЧ-7,4 технології переробки відсівів були засновані на проведенні періодичного процесу розплавлення, нагрівання та випуску розплаву [4].

Як шихтові матеріали використовуються наступні компоненти [5]:

- відсів МнС17 фр. 0–10 мм;
- ВСМ17 фр. 0–100 мм (вторинна сировина металовмісна);
- ШМС МНС фр. 0–100мм (шлако-металева суміш);
- ВСМ ФС фр. 0–100 мм (вторинна сировина металовмісна з високим вмістом кремнію);

- феросплавний король фр. 0–30 мм (вторинна сировина металовмісна);
- лігатура марганцева фр. 0–70 мм (з високим вмістом заліза);
- відсів МнС17 (НФЗ) фр. 0–10мм (Нікопольського феросплавного заводу, з високим вмістом марганцю).

Для переробки відсівів фракціонування на АТ «ЗФЗ» розроблено технології, що враховують особливості печей. У таблиці 2 наведено порівняльні характеристики печей, що використовуються:

- печі постійного струму ДШПТ – 5,0;
- печі змінного струму із частотою 50 Гц РКВ – 7,4;
- піч ультранизької частоти РКВУНЧ – 7,4.

Таблиця 2 – Основні технічні характеристики печей для сплавлення відсівів

№ п/п	Найменування параметру	РКВ-7,4	ДШПТ-5,0	РКВУНЧ-7,4
1	Частота, Гц	50	0	0,1–0,001
2	Кількість електродів	3	2	3
3	Тип електродів	самопалювальн	самопалюючі	самопалюючі
4	Діаметр електродів, мм	600	300	600
5	Повна потужність, споживана з мережі, кВА	7400	5000	6700
6	Максимальна активна потужність печі, кВт	5600	4250	5500
7	Лінійна вторинна напруга, В	139–175	126–161	139–175
8	Струм електрода печі, кА	26,5	15,5	30,0*
9	Діаметр ванни печі, мм			
	- по верху	5800	2650	5800
	- по низу	3200	1450	3200
10	Висота ванни печі, мм	1620	1360	1620
11	Матеріал футерування	періклаз	періклаз	періклаз

В свою чергу, в результаті співпраці АТ «ЗФЗ», ТОВ «УкрНДІелектротерм», ПАТ «Перетворювач» були розроблені печі постійного струму для переплавлення відходів феросплавного виробництва, які можуть бути зроблені в декількох варіантах виконання:

Варіант № 1 – електропіч постійного струму з одним графітованим склепінням і подовим «електродом» у вигляді:

- одного центрально розташованого металевого водоохолоджуваного подового електрода. Застосовується в електропечах з робочим струмом не більше 16кА;
- кількох (до 4 шт.) металевих водоохолоджуваних подових електродів. Застосовується в електропечах із робочим струмом понад 16кА. Наявність кількох подових електродів (більше двох) при введенні в систему керування електропіччю відповідних доповнень дає можливість керувати відхиленням дуги та переміщенням розплаву;
- струмопровідної вугільної чи металізованої подини. Використовується для полегшення запалення дуги та зменшення ймовірності втрати дуги.

Варіант № 2 – електропіч постійного струму з двома графітованими склепіннями електродами без подового «електроду» і без струмопровідної подини;

Варіант № 3 – електропіч постійного струму з двома графітованими склепіннями електродами та подовим «електродом» у вигляді:

- одного центрально розташованого металевого водоохолоджуваного подового електрода;
- кількох (до 4 шт.) металевих водоохолоджуваних подових електродів;
- струмопровідної вугільної чи металізованої подини.

При попередньому порівнянні можливих варіантів виконання електропечей постійного струму, що використовуються для переплаву відсіву, можна відзначити таке:

Варіант № 1 – електропіч з одним склепінням електродом і подовим «електродом».

Експлуатація електропечей за варіантом № 1 порівняно з електропечами змінного струму показала покращені техніко-економічні показники, зокрема:

- велику (у 3...5 раз) економію графітованих електродів;
- поліпшення якості готового продукту;
- збільшення вилучення з шихти основних та легуючих елементів;
- збільшення продуктивності та зменшення питомої витрати електроенергії;
- більш високу стійкість футерування стін, а за наявності футерованого склепіння – і вищу стійкість футерування склепіння;
- зменшення (до 8 разів) пило- та газовикідів, та відповідне зменшення винесення дрібних фракцій;
- безпека та стабільність ведення плавки, покращення керованості процесом тощо.

Однак, при використанні подових електродів слід мати на увазі, що догляд за подиною в цьому випадку повинен бути більш частим (бажано після кожної плавки) і ретельним, що викликано підвищеними вимогами до очищення району подового електрода від шлаку та домішок, необхідністю періодичного дорошування подового електрода, а також активним перемішуванням розплаву не тільки в горизонтальному напрямку по поверхні розплаву, а й у вертикальному напрямку, що охоплює весь об'єм розплаву. Таке перемішування є великою перевагою електропечі, так як завдяки йому досягається висока якість продукту, що виплавляється, рівномірність складу і висока ступінь відновлення з оксидів основних і допоміжних продуктів плавки. Всі процеси в електропечах постійного струму з подовим електродом протікають значно швидше, що дає можливість збільшення продуктивності електропечі. При цьому додатковий догляд за подиною повністю компенсується значним зменшенням витрат праці на дорошування склепіння.

Варіант № 2 – електропіч з двома склепінними електродами без подового «електроду».

Варіант із двома склепінними електродами без подового електрода забезпечує надійне запалювання дуги незалежно від струмопровідності шихти і не вимагає ретельного догляду за подиною.

Варіант № 3 – електропіч з двома склепінними електродами та подовим «електродом».

З погляду маневреності електропечей та комплексного вирішення різноманітних завдань варіант № 3 забезпечує всі переваги варіантів № 1 та № 2.

При цьому передбачається послідовна робота електропечі:

- на початку плавки (у період запалення дуги) – робота тільки на 2-х склепінних електродах (у разі відсутності електричного контакту з подовим електродом). До роботи на двох склепінних електродах можна вдаватися і протягом плавки у разі потреби інтенсифікації горизонтального перемішування розплаву;
- основний час плавки – на одному склепінному та одному подовому електродах;
- протягом плавки за необхідності розширити область впливу дуги на розплав із збереженням глибинного перемішування розплаву та інтенсифікації процесу переплаву можлива робота з одночасним використанням всіх трьох електродів.

У разі використання всіх трьох електродів витрата графітованих електродів у порівнянні з одноелектродною електропіччю збільшується незначно (не більше ніж на 15%).

Варіант № 3 при відповідному веденні плавки є оптимальним з погляду експлуатаційних витрат та з технологічної точки зору. З погляду капітальних витрат варіант № 3 є на 8...10% витратнішим.

З погляду маневреності електропечей та комплексного вирішення різноманітних завдань варіант № 3 забезпечує всі переваги варіантів № 1 та № 2.

При цьому передбачається послідовна робота електропечі:

- на початку плавки (у період запалення дуги) – робота тільки на 2-х склепінних електродах (у разі відсутності електричного контакту з подовим електродом). До роботи на двох склепінних електродах можна вдаватися і протягом плавки у разі потреби інтенсифікації горизонтального перемішування розплаву;

- основний час плавки – на одному склепінному та одному подовому електродах;

- протягом плавки при необхідності розширити область впливу дуги на розплав із збереженням глибинного перемішування розплаву та інтенсифікації процесу переплаву можлива робота з одночасним використанням усіх трьох електродів.

У разі використання всіх трьох електродів витрата графітованих електродів у порівнянні з одноелектродною електропеччю збільшується незначно (не більше ніж на 15%).

Варіант № 3 при відповідному веденні плавки є оптимальним з погляду експлуатаційних витрат та з технологічної точки зору. З погляду капітальних витрат варіант № 3 є на 8...10% витратнішим.

Таким чином, запропонований варіант – найбільш економічно вигідне та безпечне з погляду охорони навколишнього середовища вирішення проблеми раціонального використання сировинних та енергетичних ресурсів, завдяки підвищенню ефективності використання вторинних ресурсів у виробництві.

Ще одним перспективним напрямком, на нашу думку, є реконструкція діючих феросплавних печей з переведенням їх на джерело живлення зниженої частоти. Така модернізація проведена на АТ «ЗЗФ», і зараз ведеться налагодження та відпрацювання технологічних режимів.

У 2014 році виконано реконструкцію печі РКВ-7,4 МВА з переведенням її роботи на ультранизьку частоту (РКВУНЧ-7,4 МВА), з трьома графітовими електродами.

Метою реконструкції була установка реверсивного 3-х фазного випрямляча (тиристорного перетворювача) у ланцюзі живлення між існуючим трансформатором та існуючою руднотермічною електропеччю змінного струму. При цьому потужність та конструкція електропечі залишилися незмінними. В результаті переведення електропечі на живлення від реверсивного 3-х фазного випрямляча дана електропеч за своїми технологічними показниками наблизилася до електропечі постійного струму, переваги яких описувалися вище, за рахунок застосування ультранизької частоти.

При виконанні реконструкції на піч встановлено перетворювач реверсивний трифазний В-ТПЖР-3×10,5–205 УХЛ4 виробництва ПАТ «Перетворювач» [6].

Принципова схема силових кіл печі ультранизької частоти РКВУНЧ-7,4 МВА на рис. 1.

На рис. 2 наведено форму струму тиристорних мостів та електродів печі, що пояснюють суть роботи джерела живлення.

Ефективне значення струму електрода печі визначається виразом:

$$I_{l_{rms}} = \sqrt{2 \cdot I_d}, \quad (1)$$

де  $I_d$  – випрямлений струм кожного моста.

Ефективне значення напруги під електродом обчислюється за такою формулою:

$$U_{l_{rms}} = \sqrt{2 \cdot U_d / 3}, \quad (2)$$

де  $U_d$  – випрямлена напруга кожного мосту з урахуванням комутаційного падіння напруги, кута управління тиристорами та активних втрат.

Звідси активна потужність, що вводиться в піч:

$$P_d = I_{l_{rms}} \cdot U_{l_{rms}} \cdot 3 = 2 \cdot I_d \cdot U_d. \quad (3)$$

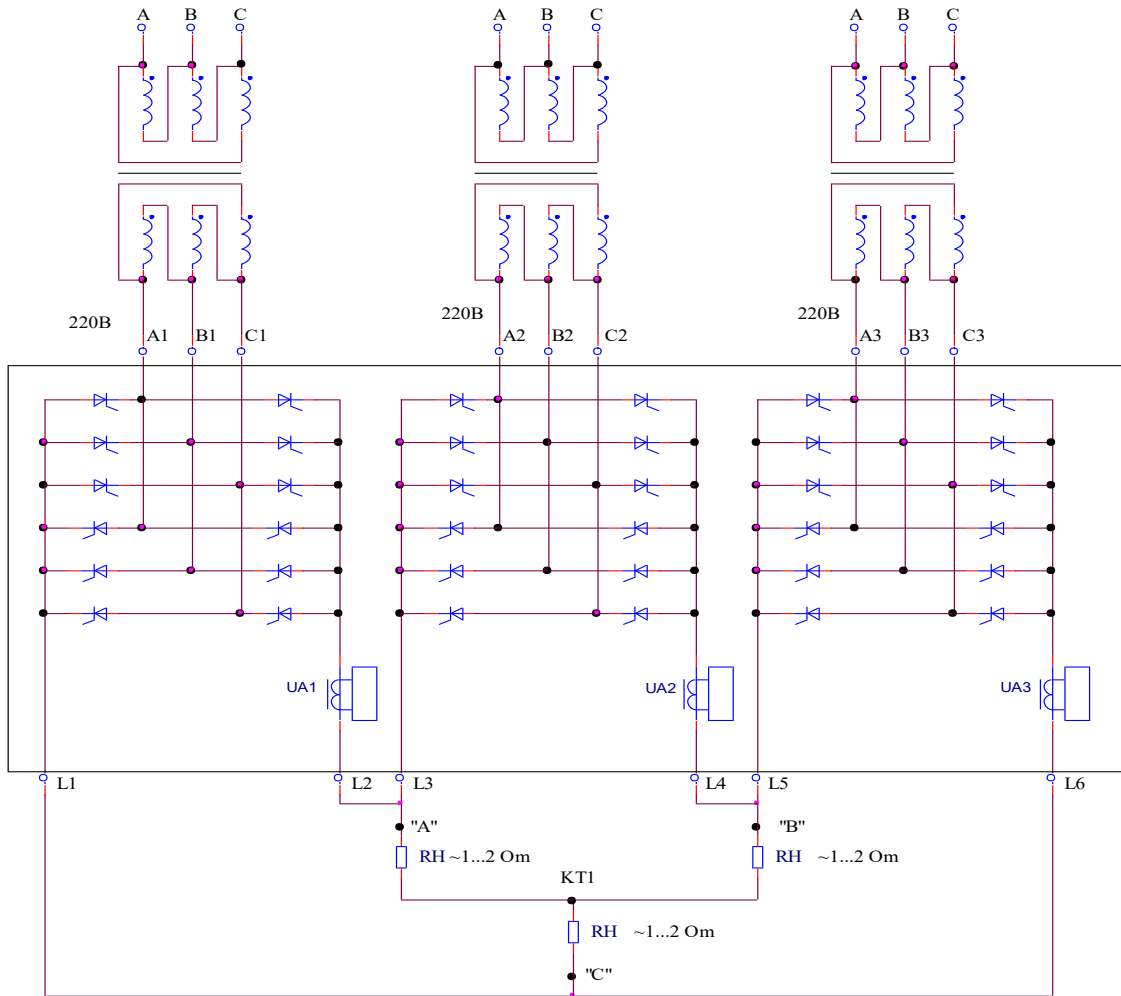


Рисунок 1 – Принципова схема силових ланцюгів феросплавної печі ультразвукової частоти РКВУНЧ-7,4МВА

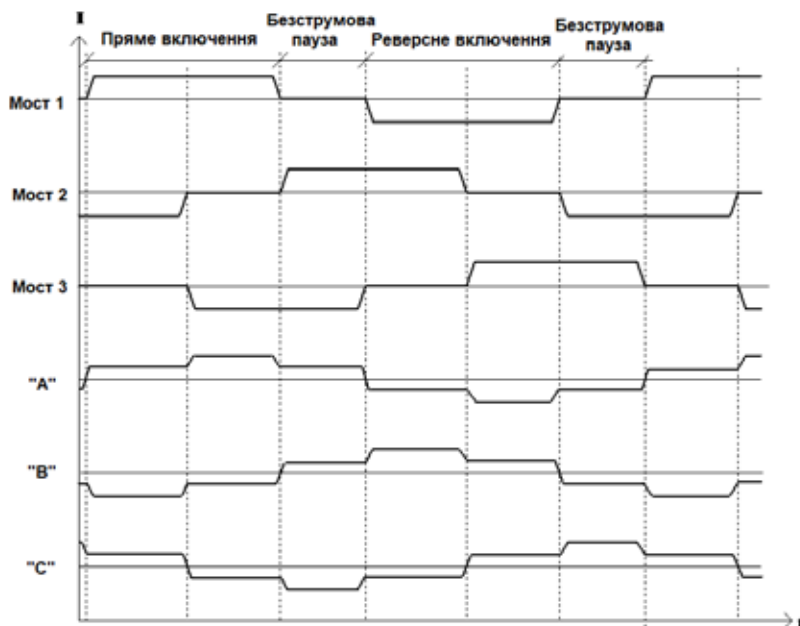


Рисунок 2 – Діаграми струмів мостів та електродів печі

Чергування під електродами печі струмів з амплітудою, що змінюється в 2 рази, при певній частоті реверсу призводить до інтенсивного сходу шихти і перемішування розплаву.

Регулюючи тривалість протікання струму кожного моста випрямляча, можна змінювати струм окремо в кожному електроді, аж до його припинення в одному з них. При цьому забезпечується симетричне завантаження фаз мережі живлення.

Стабілізація струму в кожній фазі низької частоти дозволяє при однакових струмах електродів тримати різну напругу під ними, а також без порушення симетрії струмів мережі живлення. Крім того, стабілізація струму забезпечує «м'який» режим дуги, що скорочує випаровування металу, а також створює сприятливі умови спікання електродів, що збільшують їх стійкість та зменшують витрату.

Поряд із зниженням питомої витрати електроенергії, одночасно досягається симетричне завантаження фаз електромережі та рівномірність потужності на кожному з електродів. При цьому дана електропіч залишилася електропіччю змінного струму, тобто збереглася величина реакційної зони, розташування та діаметр електродів. А зменшення чаду та винесення дрібних фракцій уможливило переплав у таких електропечах дрібнодисперсної шихти, такий як відсіві феросплавів, що раніше переплавляються тільки в електропечах постійного струму. Зокрема, на АТ «ЗФЗ» після технічного переозброєння електропечі та переведення її на джерело живлення зниженої частоти успішно переплавляються відсіві феросилікомарганцю, що дозволяє говорити про високу економічну ефективність та швидку окупність реконструкції при порівняно низьких капітальних витратах, отриманих завдяки збереженню конструкції основних складових частин власне електропечі.

*Висновки.* Технічне переозброєння феросплавних печей з переведення на використання постійного струму та застосування реверсивного тиристорного 3-х фазного перетворювача, що працює на ультранизькій частоті реверсу, дозволило:

- знизити питому витрату електроенергії проти піччю змінного струму;
- значно знизити втрати при переплаві на випаровування та чад;
- збільшити реакційну зону завдяки 3-м електродам у порівнянні з печами постійного струму;
- знизити витрати електродів;
- організувати перемішування розплаву та інтенсивний схід шихти за рахунок регулювання частоти реверсу та зміни форми струму з перерозподілом потужності під електродами;
- забезпечити симетричне завантаження фаз мережі живлення при несиметричному навантаженні електродів;
- стабілізації струму дуги та автоматичної підтримки напруги під електродами електропечі. Порівняно з печами постійного струму реконструкція печі з використанням 3-х фазного випрямляча ультранизької частоти зажадала значно нижчих капітальних витрат (більш ніж у 2 рази).

### Бібліографічний перелік

1. Гасик М.И. Электроды рудовосстановительных электропечей. 2-е изд., перераб.и доп. Москва : Металлургия, 1984. 248 с.
2. Гаврилов В.А., Поляков И.И., Полякова О.И. Оптимизация режимов работы ферросплавных печей. Москва : Металлургия, 1996. 176 с.
3. Гасик М.И., Лякишев М.П. Физикохимия и технология электроферросплавов. Днепропетровск : Системные технологии, 2005. 448 с.
4. Повышение эффективности и качества ферросплавов. Сборник научных трудов. Москва : Металлургия, НИИМ, 1986. 121 с.

5. Гаврилов В.А. Гасик М.И. Силикотермия марганца. Днепропетровск : Системные технологии, 2001. 512 с.

6. Преобразователь реверсивный трехфазный В-ТПЖР-3×10,5-205 УХЛ4. Руководство по эксплуатации АБAM.656464.001 РЭ. Запорожье : Преобразователь, 2013.

### References

1. Gasik M.I. Elektrody rudovosstanovitel'nyh elektropechej. 2-e izd., pererab.i dop. Moskva : Metallurgiya, 1984. 248 p.

2. Gavrilov V.A., Polyakov I.I., Polyakova O.I. Optimizaciya rezhimov raboty ferrosplavnyh pechej. Moskva : Metallurgiya, 1996. 176 p.

3. Gasik M.I., Lyakishev M.P. Fizikohimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov. Dnepropetrovsk : Sistemnye tekhnologii, 2005. 448 p.

4. Povyshenie effektivnosti i kachestva ferrosplavov. Sbornik nauchnyh trudov. Moskva : Metallurgiya, NIIM, 1986. 121 p.

5. Gavrilov V.A. Gasik M.I. Silikotermiya marganca. Dnepropetrovsk : Sistemnye tekhnologii, 2001. 512 p.

6. Preobrazovatel' reversivnyj trekhfaznyj V-TPZHR-3×10,5-205 UHL4. Rukovodstvo po ekspluatacii АBAM.656464.001 RE. Zaporozh'e : Preobrazovatel', 2013.

**Kirichenko Oleksiy**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhia National University, ORCID: 0000-0002-3032-1919

**Shaitanov Ivan**, Graduate Student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0001-8232-3265

### THREE-PHASE RECTIFIER, DIRECT CURRENT, PROCESSING OF FERRO-ALLOY WASTE, FURNACES OF DIRECT CURRENT

An analysis of the current state and structural features of modern domestic ferroalloy furnaces was performed. Prospective directions for the reconstruction of ferroalloy furnaces used for the processing of ferroalloy production waste are considered. Currently, for these purposes, direct current furnaces have become the most common. However, this technology in the reconstruction of existing electric furnaces requires a complete replacement of the alternating current electric furnace and the furnace transformer and large capital costs for reconstruction. Various technologies for processing screenings from fractionation of ferroalloys were considered and tested. For the processing of secondary raw materials, direct current furnaces were developed for the remelting of ferroalloy production waste. The purpose of the reconstruction was to install a reversible 3-phase rectifier (thyristor converter) in the power circuit between the existing transformer and the existing ore-thermal AC electric furnace. At the same time, the power and design of the electric furnace remained unchanged. As a result of transferring the electric furnace to power supply from a reversible 3-phase rectifier, this electric furnace in terms of its technological indicators came close to the direct current electric furnace, the advantages of which were described above, due to the use of ultra-low frequency. Stabilization of the current in each phase of low frequency allows, with the same currents of the electrodes, to keep different voltages under them, as well as without disturbing the symmetry of the currents of the power network. In addition, the stabilization of the current provides a "soft" mode of the arc, which reduces the evaporation of the metal, and also creates favorable conditions for sintering electrodes, which increase their stability and reduce consumption. The results of the study showed that the technical retooling of ferroalloy furnaces from switching to direct current use and the use of a reversible thyristor 3-phase converter operating at an ultra-low reverse frequency made it possible to: reduce the specific consumption of electricity compared to alternating current furnaces; to significantly reduce losses during melting due to evaporation and carbon dioxide.

Keywords: three-phase rectifier, direct current, processing of ferroalloy waste, direct current furnaces

Стаття надійшла до редакції 22.07.2022 р.