

## *Розділ 1*

# УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАГРІВАННЯ

### **1.1. Визначення та основи теорії електричної дуги**

Установками електродугового нагрівання називають такі, в яких електрична енергія перетворюється у теплову в основному в електричній дузі, яка вільно горить в атмосфері повітря, газовому середовищі, середовищі парів металу або у вакуумі.

У 1802 р. російський вчений Петров В.В. (рис.1.1) відкрив і описав явище електричної дуги. Використавши як джерело електричної енергії батарею гальванічних елементів, він вперше експериментально підтвердив, що з допомогою електричної дуги можливе не лише розплавлення металів, але й відновлення їх із окислів.



*Рисунок 1.1 – В.В.Петров*

Електричною дугою називають самостійний електричний розряд, який характеризується високими густиною струму і температурою, а також великою швидкістю перетворення електричної енергії в теплову. Напруга, при якій виникає самостій-

ний розряд, називається напругою запалення, або потенціалом запалення. У повітрі електрична дуга має місце при струмі більше 0,5 А та напрузі більше 15 В. Для електричної дуги характерним є чітко окреслений дуговий стовп із високою густиною струму (до 1000 А/мм<sup>2</sup>) і з високою температурою (5 000 - 10000 К).

Розрізняють електричні дуги у газах і в парах металу. Перші мають місце у тих випадках, коли електроди виготовлені із тугоплавких матеріалів або інтенсивно охолоджуються, а тому їх матеріал практично не бере участі у створенні середовища, в якому відбувається електричний розряд. Прикладом такої дуги може бути дуга, що горить між вугільними електродами. Якщо ж у процесі горіння дуги матеріал електрода інтенсивно плавиться, то його пари визначають склад середовища, у якому відбувається електричний розряд. Прикладом може бути електрична дуга у ртутних вентилях, дуги у сталеплавильних та рудно-термічних печах, де вони горять в парах тих металів, плавлення яких відбувається.

Залежно від джерела живлення електрична дуга буває постійного і змінного струму.

Для електричної дуги постійного струму характерними є такі основні ознаки:

- Спадний характер статичної вольт-амперної характеристики (рис.1.2). Статична вольт-амперна характеристика дуги визначає зв'язок спаду напруги на дузі  $U_d$  зі струмом  $I_d$  при постійній довжині дуги  $l_d$  ( $U_d=f(I_d)$  при  $l_d=\text{const}$ ). Цей зв'язок описується формулою, В:

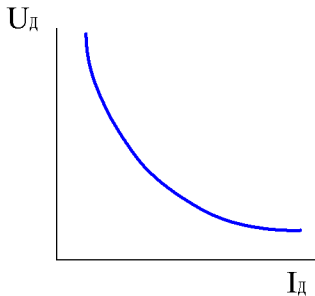
$$U_d = \alpha + \beta I_d + \frac{\gamma + \delta I_d}{I_d}, \quad (1.1)$$

де  $U_d$  – спад напруги на дузі, В;

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  – коефіцієнти, величини яких залежать від матеріалу електродів і складу середовища, в якому горить дуга (наприклад,  $\alpha=38$ ,  $\beta=1,8$ ,  $\gamma=19$ ,  $\delta=12,6$  – для дуги, що горить у повітрі між вугільними електродами,  $\alpha=12,8$ ,  $\beta=2,0$ ,  $\gamma=24,3$ ,  $\delta=1$  – для дуги, що горить у повітрі між вугільним катодом і залізним анодом);

$l_d$  – довжина дуги, мм;

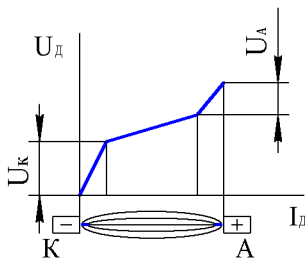
$I_d$  – сила струму, А.



*Рисунок 1.2 – Статична вольт-амперна характеристика дуги*

Згідно з (1.1) і рис.1.2 напруга на дузі при малих значеннях струму різко спадає зі збільшенням сили струму, а при великих значеннях струму залишається практично незмінною.

• Порівняно низьке спадання напруги на дуговому проміжку. Стовп дуги по довжині і за характером процесів, що там відбуваються, поділяють на три частини: катодну і анодну області та власне сам стовп дуги. Характер розподілу напруги по довжині дуги  $I_d$  наведений на рис.1.3.



*Рисунок 1.3 – Графік розподілу напруги по довжині дуги*

Катодне спадання напруги  $U_k$  відповідає дуже невеликому шару, що при атмосферному тиску становить близько  $10^{-6}$  м. Завдяки цьому напруженість електричного поля біля катода досягає  $10^7$  В/м. Білякатода область іонізується головним чином за рахунок нагрівання катода до високої температури (термоелектронна емісія) або/та створення сильного електричного поля (автоелектронна емісія). Термоелектронна емісія в основ-

ному має місце, коли катод виготовляється з тугоплавкого матеріалу (вольфрам, молібден, вугіль, графіт) і температура на його поверхні досягає значень  $2500^{\circ}\text{C}$  і вище. Автоелектронна емісія виникає, якщо катод виготовляється з матеріалу з відносно низькою температурою кипіння (титан, ртуть, мідь).

Анодне спадання напруги  $U_A$  пояснюється виникненням біля анода негативного об'ємного заряду і залежить від температури анода, величини струму і роду матеріалу анода. Товщина біляанодного шару становить близько  $10^{-4} - 10^{-5}$  м.

• Напруга на дузі великою мірою залежить від довжини дуги (відстані між електродами), що впливає із (1.1) та ілюструється графіками залежностей  $U_D=f(I_D)$  (рис.1.4).

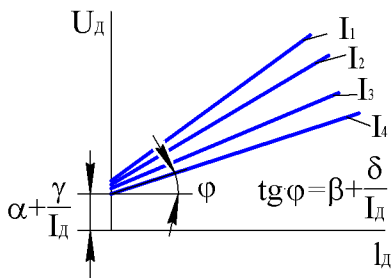


Рисунок 1.4 – Графіки залежності напруги на дузі від довжини дуги ( $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$ )

В електричній дузі постійного струму відбуваються наступні процеси. Із катода в результаті його розігрівання (термоелектронна емісія) або/та наявності біля його поверхні великої напруженості електричного поля (автоелектронна емісія) виривається потік електронів. У білякатодній області електрони розганяються до такої швидкості, що за її межами в дуговому проміжку відбувається інтенсивна іонізація частин газу. Іони, що утворилися внаслідок цього, спрямовуються до катода і розігрівають його. Первинні й вторинні електрони через весь стовп дуги спрямовуються до анода. На аноді відбувається нейтралізація електронів, при якій відбувається вибивання певної частини іонів, які спрямовуються до катода.

Баланс напруг електричного кола, що включає дугу постійного струму, індуктивність  $L$  і активний опір  $R$  (рис.1.5), описується рівнянням

$$U_C = U_d + I_d R + L(dI_d / dt), \quad (1.2)$$

де  $U_C$  – напруга джерела живлення, В.

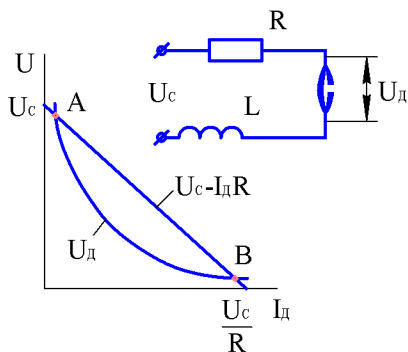


Рисунок 1.5 – До пояснення умов запалення та гасіння дуги постійного струму

Як впливає з (1.2) та рис.1.5, сталим режимам горіння дуги ( $dI_d/dt=0$ ) відповідають точки А і В перетину статичної вольт-амперної характеристики дуги і прямої ( $U_C - I_d R$ ), причому усталена робота можлива тільки у точці В.

Умовою горіння дуги постійного струму є виконання нерівності

$$U_d < (U_C - I_d R). \quad (1.3)$$

Такі умови можливі для тієї частини вольт-амперної характеристики, точки якої лежать нижче прямої ( $U_C - I_d R$ ).

Умовами, за яких покращується горіння дуги постійного струму, є такі:

- зменшення активної складової опору електричного кола дуги;
- підвищення напруги джерела живлення;
- зменшення спаду напруги на дузі.

Для електричної дуги змінного струму умови горіння та її характеристики є принципово відмінними від дуги постійного струму. Враховуючи те, що напруга джерела живлення безперервно змінюється у часі, напруга на дузі, струм і тепловий

стан дугового проміжку також безперервно змінюються. Дуга змінного струму гасне кожен півперіод при переході струму через нуль і запалюється знову за певних умов. Час  $T_{\text{БП}}$  від погашення дуги до її запалювання, протягом якого струм дуги дорівнює нулю ( $I_{\text{д}} = 0$ ), називається безструмовою паузою. За час безструмової паузи відбуваються такі явища:

- інтенсивна деіонізація дугового проміжку й збільшення пробивної напруги  $U_{\text{ПР}}$ , необхідної для повторного запалювання дуги;

- зростає напруга між електродами  $U_{\text{Е}}$  до відповідного миттєвого значення ЕРС джерела струму. Процес відновлення напруги відбувається за дуже короткий проміжок часу (наприклад, при  $\cos \varphi = 0$ ,  $t = 10 - 100$  мкс);

- якщо пробивна напруга  $U_{\text{ПР}}$  зростає швидше і залишається вище напруги між електродами  $U_{\text{Е}}$  (рис. 1.6а), то дуга більше не запалюється. Якщо ж за час безструмової паузи  $T_{\text{БП}}$  ці напруги зрівнюються і в подальшому буде виконуватись умова  $U_{\text{Е}} \geq U_{\text{ПР}}$ , то відбудеться повторне запалювання дуги (рис. 1.6б) та її горіння до кінця півперіоду.

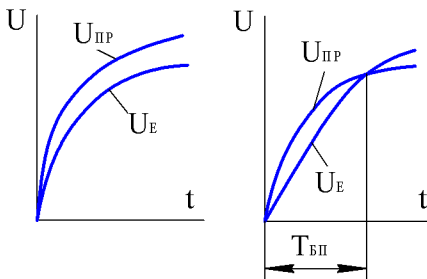
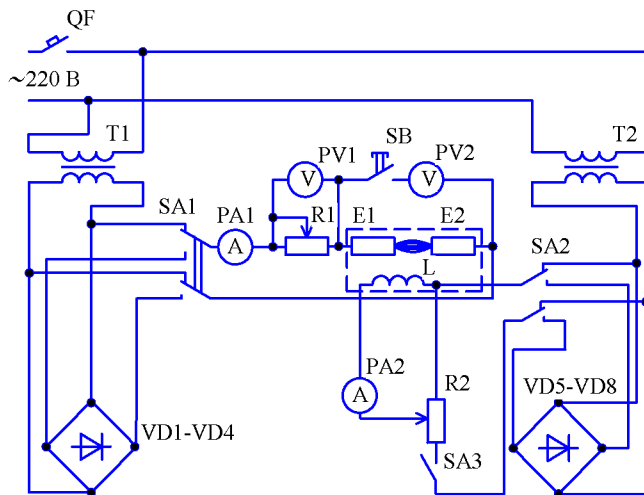


Рисунок 1.6 – До пояснення умов запалення та гасіння дуги змінного струму

В умовах навчальної лабораторії студенти можуть проводити дослідження електричної дуги з допомогою лабораторного стенда, принципова електрична схема якого наведена на рис. 1.7. Живлення стенда здійснюється від мережі змінного синусоїдального струму 220 В, 50 Гц. Автоматичний вимикач QF забезпечує робоче включення/відключення стенда, а також захист від довготривалих перевантажень по струму. З допомогою перемикача SA1 можлива подача на електроди E1, E2 як напру-

ги змінного синусоїдального (рухомі контакти Q знаходяться в положенні, вказаному на схемі; напруга до електродів підводиться від вторинної обмотки трансформатора T1), так і постійного струму (рухомі контакти SA1 знаходяться в нижньому положенні, а напруга до електродів підводиться від випрямляча, зібраного на діодах VD1-VD4 за мостовою схемою). З допомогою реостата R1 змінюється сила струму дуги, яка вимірюється за допомогою амперметра PA1. Для забезпечення кращих умов запалення і горіння дуги вольтметр PV2 з допомогою кнопки SB підключається лише на час, необхідний для вимірювання напруги на дузі.



*Рисунок 1.7 – Принципова електрична схема для дослідження електричної дуги постійного та змінного струму*

Трансформатор T2, випрямляч VD5-VD8, резистор R2, котушка індуктивності L та перемикачі SA2, SA3 дозволяють дослідити умови гасіння дуги за допомогою магнітного дуття.

У процесі виконання лабораторної роботи студенти отримують дані для побудови:

- вольт-амперних характеристик дуги постійного та змінного струму;

- залежності спадання напруги на дузі від довжини дуги при незмінному постійному та змінному струмі.

## 1.2. Призначення та класифікація

Установки електродугового нагрівання широко використовуються для плавлення матеріалів (зокрема, металів), а також для проведення високотемпературних хімічних реакцій в рідинній або газовій фазі, нагріванні газів тощо. У таких установках відбувається плавлення тугоплавких металів, високоякісних сталей, кольорових та реакційно-активних металів, виробництво феросплавів і плавлених вогнетривів, жовтого фосфору та інших продуктів хімічного виробництва.

Установки електродугового нагрівання класифікуються за такими ознаками:

- **за родом струму:** постійного та змінного струму;
- **за призначенням:** сталеплавильні, рудно-термічні, для електрошлакового переплавлення;
- **за способом нагрівання:** прямої, непрямої та змішаної дії.

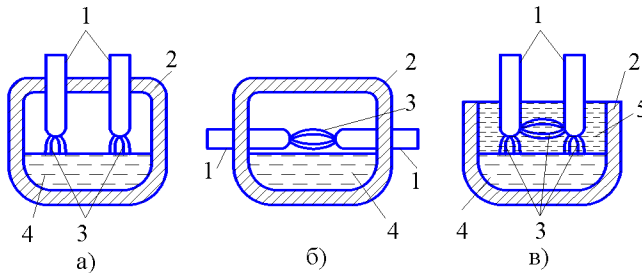
В установках прямої дії (рис.1.8а) електрична дуга 3 горить між електродами 1 і металом 4, який необхідно розплавити. У цих установках тепло, яке виділяється в електричній дузі, безпосередньо передається металу, що забезпечує велику густину передачі енергії. Прикладами установок прямої дії є сталеплавильні та вакуумні печі.

В установках непрямої дії (рис.1.8б) електрична дуга 3 горить між електродами 1, і тепло до металу 4, що плавиться, передається в основному випромінюванням, а частково – конвекцією та теплопровідністю. Прикладами установок непрямої дії є печі для плавлення кольорових металів та їх сплавів, а також для лиття чавуну, нагрівачі газів тощо.

В установках змішаної дії (рис.1.8в) електрична дуга 3 горить у середовищі розплавленої шихти 5. Опір розплавленої шихти доволі великий, але через неї проходять електричні струми послідовно і паралельно струму електричної дуги та ви-



діляється відносно велика кількість джоулевого тепла. У таких установках центр виділення тепла знаходиться всередині шихти, що дозволяє досягти високих значень температури і використовувати такі установки для плавлення матеріалів з високою температурою випаровування. Прикладами установок змішаної дії є потужні рудоплавильні печі для отримання феросплавів, карбїду кальцію, чавуну, нікелевого штейну, абразивів, фосфору тощо.



*Рисунок 1.8 – Схема установок електродугового нагрівання: а) прямої дії; б) непрямой дії; в) змішаної дії*

### 1.3. Дугові сталеплавильні печі

#### 1.3.1. Призначення, основні параметри та складові частини

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) є електродуговими установками прямої дії і призначені для плавлення сталі із металевго брухту (скрапу). У таких печах в основному отримують високолеговані сорти сталі, які потребують старанного очищення металу від шкідливих домішок, видалення неметалевих домішок та знегажування і які не можуть бути отриманими в конверторах або мартенівських печах.

ДСП характеризують такими основними параметрами:

- номінальною місткістю (ємністю), що вимірюється в тонах. За цим параметром вони класифікуються на малі (0,5; 1,5; 3,0; 6,0; 12,0 т), середні (25 та 50 т) і великі (100 та 200 т);
- номінальною електричною потужністю, що вимірюється у МВА або кВА і досягає в деяких сучасних зразка 125 МВА ;
- питомими витратами електроенергії, які становлять 450 – 1000 кВА·год на тону готового продукту.

Сучасні великомісткі та великопотужні ДСП являють собою доволі складну електротехнологічну установку, до складу якої входять пристрої з електропостачання, водоохолодження, механічного переміщення печі, автоматичного програмного керування тощо.

Основні складові частини ДСП місткістю 200 т показані на рис.1.9.

Кожух 5 є основною частиною каркаса ДСП, виготовляється із котельної сталі, має циліндричну або трішки конічну форму. Він несе все навантаження від внутрішньої футерівки, розплавленого металу та зусиль, пов'язаних з термічними процесами. Зверху знаходиться склепіння 3, яке на час завантаження шихти піднімається. Знизу до кожуха приварюється днище. Привод нахилу печі 8 забезпечує зливання з печі по закінченні плавки через носок 9 всього її вмісту і забезпечення нахилу печі для скачування шлаку. Електропривод штока 11 забезпечує переміщення вверх і вниз електрода як при включенні/відключенні печі, так і безперервно під час роботи. Всередину робочого простору печі струм надходить через графітований електрод 1. У сучасних конструкціях ДСП використовують електроди, які у міру їх згорання нарашуються.

ДСП змінного струму широко використовуються у ливарному та металургійному виробництві. Технічні характеристики деяких сучасних зразків ДСП змінного струму наведені у табл.1.1.

Поряд з ДСП змінного струму все ширше у промисловості використовуються дугові печі постійного струму плавлення сталі (ДСПТ) і чавуну (ДЧПТ) завдяки таким перевагам перед ДСП змінного струму:

- зменшення на 15-20% питомих витрат електроенергії;

- зменшення на 15-20 дБА рівня шуму;
- у 5-10 разів зменшуються викиди пилу і газу;
- на 1,5-2% зменшується угар шихти;
- втрати феросплаву зменшуються на 70-95 %;
- угар графітованих електродів не перевищує 1,5 кг на 1

тонну.

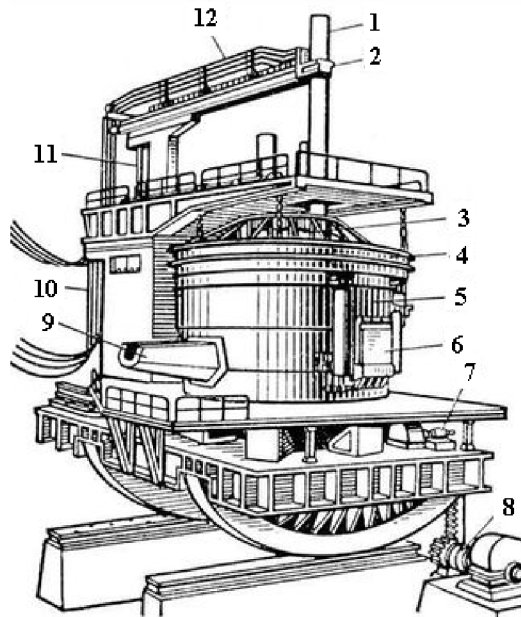


Рисунок 1.9 – Дугова сталеплавильна піч ДСП-200 [13]: 1 – графітований електрод; 2 – електродотримач; 3 – склепіння; 4 – кільце для водяного охолодження склепіння; 5 – кожух; 6 – допоміжні двері; 7 – привод повороту печі навколо вертикальної осі; 8 – привод нахилу печі; 9 – носок для зливання металу; 10 – рухомий струмопровід; 11 – шток для вертикального переміщення системи стійка – рукав – електродотримач – електрод; 12 – струмопровід із мідних труб

## Розділ 1. Установки електродугового нагрівання

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики дугових сталеплавильних печей змінного струму [24]

	ДСП-0,5	ДСП-1,5	ДСП-3
Номінальна місткість, т	0,5	1,5	3
Потужність пічного трансформатора, кВА	630	1250	2000
Первинна напруга пічного трансформатора, кВ	6 або 10	6 або 10	6 або 10
Границі вторинної напруги пічного трансформатора, В	216-98	225-103	243-116
Максимальний струм електрода, кА	4,8	3,21	1,685
Число фаз	3	3	3
Частота струму, Гц	50	50	50
Діаметр електрода, мм	150	200	200
Діаметр розпаду електрода, мм	500	600	750
Хід електрода, мм	800	1400	1400
Діаметр ванни на рівні укосів, мм	1050	1500	1800
Глибина ванни на рівні порога, мм	230	360	400
Висота плавильного простору від порога до верху стінки, мм	575	900	1050
Розміри робочого вікна, мм:			
- ширина	350	520	650
- висота	280	400	500
Діаметр кожуха (внутрішній) на рівні укосів, мм	1660	2130	2900
Питомі витрати електроенергії на розплавлення твердого завалення, кВт.год/т	558	479	465
Витрата охолоджувальної води (без урахування охолодження пічного трансформатора), м <sup>3</sup> /год	3	10	12
Маса металоконструкцій, т	8,9	21,5	26,5
Габаритні розміри, мм:			
- довжина	4280	4045	5015
- ширина	3040	4470	5380
- висота	3760	4860	5000

Технічні характеристики деяких сучасних зразків ДСПТ і ДЧПТ наведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики дугових сталеплавильних печей постійного струму [24]

	ДСПТ-0,6	ДСПТ-6	ДСПТ-12, ДЧПТ-12	ДСПТ-12, ДЧПТ-12
Номінальна місткість, т	0,6	6,0	12,0	25,0
Максимальна активна потужність, кВт	600	4000	8000	16000
Час розплавлення, год	1,0	0,9	0,9	1,0
Питомі витрати електроенергії, кВт·год/т	635	490-510	470-490	430-470

### 1.3.2. Електричні схеми та основне електрообладнання

ДСП, ДСПТ та ДЧПТ є потужними електроприймачами, а тому живлення їх, як правило, відбувається від окремої трансформаторної підстанції. Електропостачання печей малої місткості, як правило, здійснюється на напрузі 6-10 кВ, середньої – 35 кВ, а великої – 110-220 кВ.

Основне електрообладнання ДСП наведене на рис. 1.10 [10], а типова принципова електрична схема ДСП малої потужності – на рис. 1.11.

Головною складовою частиною таких електротехнічних установок є **пічний трансформатор**. Спеціальні вимоги до конструкції і характеристик пічних трансформаторів зумовлені великими значеннями струмів у вторинній обмотці, що можуть досягати тисяч і десятків тисяч ампер; великими динамічними зусиллями, що діють на витки обмотки внаслідок частих стрибків струму в нормальному режимі роботи; необхідністю регулювання напруги в широкому діапазоні, що є обов'язковою умовою технологічного процесу.

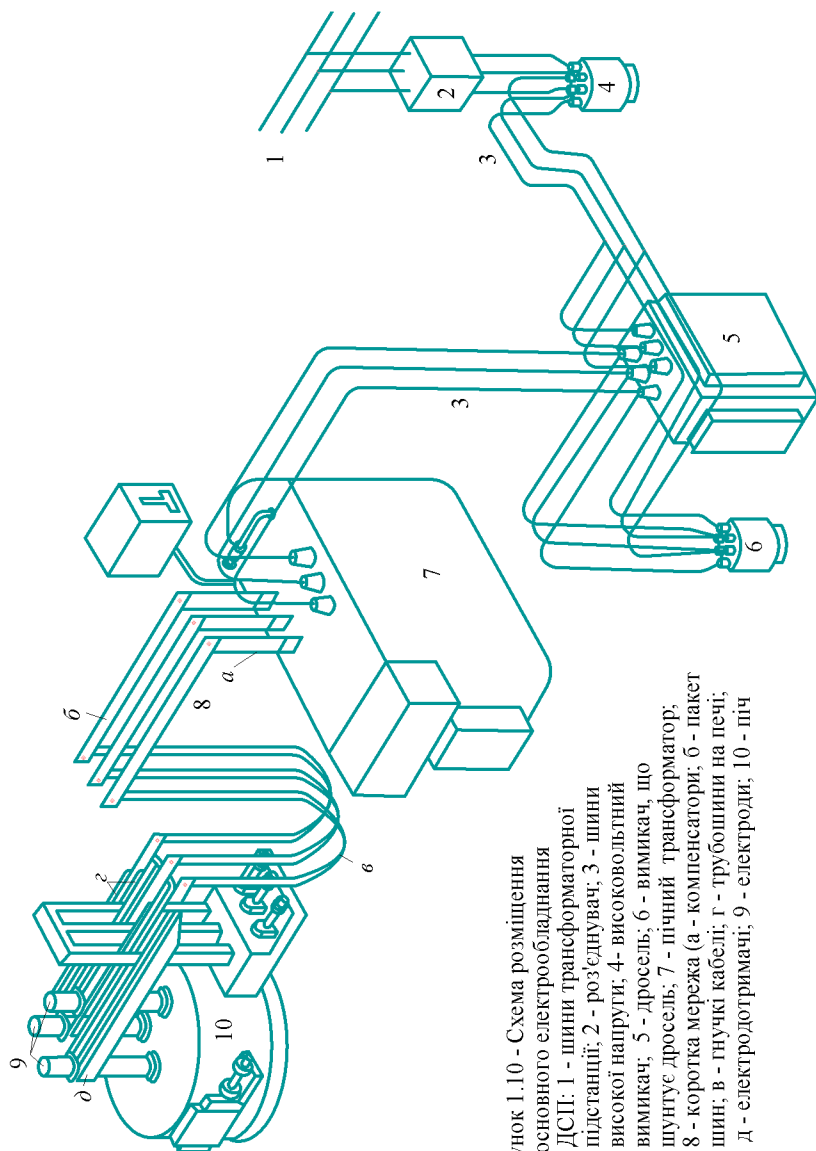
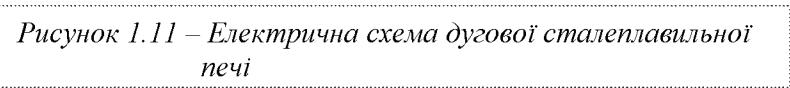


Рисунок 1.10 - Схема розміщення основного електрообладнання ДСП: 1 - шини трансформаторної підстанції; 2 - роз'єднуювач; 3 - шини високої напруги; 4 - високовольтний вимикач; 5 - дросель; 6 - вимикач, що шунтує дросель; 7 - п'ятинний трансформатор; 8 - коротка мережа (а - компенсатори; б - пакет шин; в - гнучкі кабелі; г - трубошини на печі; д - електродотримачі; 9 - електрооди; 10 - піч



32

потужності відбувається, як правило, без навантаження (ПБВ), а в трансформаторах великої потужності – під навантаженням (РПН) з боку вторинної напруги за допомогою перемикачів витків.

Для ДСП малої і середньої місткості використовують, як правило, один трифазний понижувальний трансформатор, а для великої потужності – три однофазних. Первинні обмотки трифазних трансформаторів можуть з'єднуватись як за схемою „зірка“, так і „трикутник“. Вторинні обмотки з'єднуються, як правило, за схемою „трикутник“, що дає можливість розділити струм короткого замикання на дві фази трансформатора і тим самим зменшити динамічні зусилля на обмотки трансформатора і нагрівання обмоток.

Для пічних масляних трансформаторів малої потужності використовують природне охолодження масла, а для трансформаторів середньої і великої потужності – примусову циркуляцію масла, а іноді й обдування масляних радіаторів повітрям.

Пічні трансформатори мають підвищену стійкість проти експлуатаційних коротких замикань, а також підвищену електродинамічну стійкість.

При потужності пічних трансформаторів до 9 МВА індуктивна складова опору недостатня для надійного запалення і горіння електричної дуги, а тому в схему включається реактор 8. Наявність реактора забезпечує також зниження експлуатаційних струмів короткого замикання. У сталому режимі горіння електричної дуги реактор може бути виведеним з роботи шляхом шунтування його за допомогою вимикача 9.

У ДСП використовують трансформатори і реактори, що виготовлені у вигляді окремих пристроїв, а також пічні агрегати - трансформатори з вмонтованими реакторами й іншими електротехнічними пристроями. Прикладами окремих пічних трансформаторів є трансформатори типів ЕТЦП, ЕТЦН, ЕТЦНК, ЕТЦНВМ, ЕТЦНМ та ін. У пічних агрегатах типів ЕТМПК, ЕТЦПК, ЕТЦНК, ЕТЦНКВ в загальному корпусі з пічним трансформатором можуть знаходитися також: реактор, регульований автотрансформатор, трансформатор тонкого регулювання, трансформатори струму, пристрій переключення ступенів під наван-



таженням тощо. Технічні характеристики деяких пічних трансформаторів наведені у табл.1.3.

Таблиця 1.3 - Технічні характеристики пічних трансформаторів для дугових сталеплавильних печей [16]

Тип	Номінальна потужність, кВА	Номінальна напруга обмоток, В		Схема і група з'єднання обмоток	Пере- ключення напруги
		ВН	НН		
1	2	3	4	5	6
ЕТЦП-12000/35-УХЛ4	8000-3557	31500 35000	270-120	Д-У/Д-0-11	ПБВ
ЕТЦП-16700/10-У3	15150-10653	10000	151-103	Д/Д-0	ПБВ
ЕТЦНВ-18000/10-УХЛ4	10000-4323 10000-4374	6000 10000	260,9- 160	Д/Д-2	РПН
ЕТЦНК-20000/10-76У3	15000-3665	10000	370,5- 90,5	Д/Д-6	-«-
ЕТЦНК-20000/10-76Т3	15000-4829	11000	369-119	-«-	-«-
ЕТЦНВ-20000/10-У3	13000-8450	6000	288,5- 187,5	Д/Д-0	-«-
ЕТЦНК-20000/20-76У3	15000-4723	22000	371-117	-«-	-«-
ЕТЦНК-20000/35-76У3	15000-5188	35000	370-128	Уавто+Д/Д-6	-«-
ЕТЦНК-20000/35-76Т3	15000-5188	35000	370-128	-«-	-«-
ЕТЦП-22000/10-У3	16500-14051	10000	301,5- 212	Д/Д-0	ПБВ
ЕТЦНКВ-25000/10-У3	18000-4397	10000	318,5- 77,8	Давто+Д/Д-6	РПН
ЕТЦНК-25000/35-У3	18000-6226	35000	320-111	Уавто+Д/Д-0	-«-
ЕТЦНКВ-25000/35-У3	13000-5101	35000	320-111	-«-	-«-
ЕТЦНВ-25000/35-83УХЛ	16000-5619	35000	280- 98,33	Д-У/Д-0-11	-«-
ЕТЦНВМ-25000/35-УХЛ4	18000-14424	35000	340,5- 232,1	Д/Д-0	-«-

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6
ЭТЦНКВМ-25000/10-УХЛ4	18000-7489	10000	318,5-132,5	Давто+Д/Д-0	-«-
ЭТЦНКВ-30000/35-УХЛ4	22000-15161	35000	407-240	Уавто+Д/Д-0	-«-

У позначеннях типу пічного трансформатора літери означають: Э – електропічний (*рос. электропечной*); Т – трифазний; М – масляне природне охолодження; Ц – масляно-повітряне примусове охолодження; В – водяне охолодження; П – пристрій переключення напруги без навантаження (ПБВ); Н – пристрій переключення напруги під навантаженням (РПН); К – комплектний (агрегат).

Для забезпечення операцій вмикання/вимикання пічного трансформатора у нормальних режимах роботи, а також автоматичного відключення у випадках довготривалих недопустимих перевантаженнях та аварійних коротких замиканнях використовують **високовольтні вимикачі**. Основною вимогою до цих електричних апаратів у складі ДСП є можливість забезпечення частих комутацій електричних кіл під навантаженням. У ДСП використовуються високовольтні вимикачі як загального призначення (електромагнітні, масляні, повітряні, вакуумні), так і спеціальні, наприклад, електропічні повітряні типів ВВЭ-35, ВВЭ-110Б, ВВЭ-220Б [17].

Для комутації силових електричних кіл під напругою, але без навантаження використовуються **роз'єднувачі**. Вони також створюють видимий розрив між контактами, що необхідно для безпечного обслуговування та ремонту високовольтного обладнання і у першу чергу – високовольтних вимикачів.

Однією із головних складових частин в електричній схемі є **коротка мережа**. До складу короткої мережі належать елементи струмопроводу, що з'єднують вторинну обмотку пічного трансформатора з електродами (компенсатори, пакети шин, гнучкі кабелі, трубошини, електродотримачі). Основними вимогами до короткої мережі є: забезпечення як можна менших електричних втрат, рівномірний розподіл потужності між фазами, відносно мала реактивна індуктивна складова опору. Складові короткої мережі виготовляють із міді у вигляді пакетів плоских шин,

труб та гнучких кабелів, по яких протікають великі струми. Складна конфігурація окремих ділянок короткої мережі та великі перерізи зумовлюють появу поверхневого ефекту та ефекту близькості.

Для розширення границі виміру амперметрів і ватметрів, живлення струмових обмоток лічильників електричної енергії і котушок реле струму в схемах використовуються **вимірювальні трансформатори струму і напруги**. Найбільш поширеними серед трансформаторів струму є шинні трансформатори струму (наприклад, типів ТЛШ-10, ТНШ-0,66, ТШП-0,66).

Обов'язковою складовою частиною електричної схеми ДСП є **автоматичні регулятори потужності**, які у сучасних зразках ДСП входять до складу автоматизованих систем керування технологічним процесом (АСК ТП) плавлення сталі. До основних функцій, які покладаються на АСК ТП, належать:

- розрахунок оптимального складу шихти, виходячи із запланованого завдання і наявності вихідних сировинних матеріалів;
- розрахунок кількості електроенергії, кисню, легуючих та шлакоутворюючих матеріалів;
- вибір оптимального процесу плавлення сталі і видача керуючих сигналів у локальні системи автоматичного керування;
- видача оперативної технологічної інформації оператору печі і на друк;
- контроль за роботою обладнання, сигналізація і реєстрація несправностей;
- автоматизований централізований контроль основних техніко-економічних показників роботи печі.

### **1.3.3. Основні режими роботи, електричні параметри та характеристики**

Режими роботи ДСП як приймача електричної енергії залежать від головних операцій, пов'язаних з плавленням сталі.

До таких операцій відносять: розплавлення скрапу, розкислення металу, поновлення (введення до складу необхідних легуючих домішок).

За час **операції розплавлення** металу в ДСП споживається 60-80% всієї електроенергії. Ця операція вимагає швидко-го її проведення, а тому електрообладнання (у першу чергу пічний трансформатор) працює з максимальною потужністю. Дуга, що горить між електродами і холодним металом, є нестабільною, а тому процес розплавлення супроводжується частими короткими замиканнями, згасаннями і повторними запаленнями дуги. У цьому режимі довжина дуги є найменшою.

На час **операції розкислення** потужність знижується до 70-80% порівняно з попередньою операцією, зменшується і напруга на дузі. Електрична енергія витрачається в основному на поновлення частини теплових втрат. У цьому режимі можливі короткі замикання, пов'язані з кипінням і розбризкуванням металу, довжина дуги збільшується у декілька разів, але умови її горіння є значно кращими, ніж під час попередньої операції.

Під час **операції поновлення** споживання електричної енергії становить близько 40-50% тієї, що споживалася під час першої операції. Напруга знижується до мінімальних значень, довжина дуги значно більша, ніж у попередніх операціях, горіння дуги є найбільш спокійним і сталим.

Графічно описані режими роботи подані на рис. 1.12.



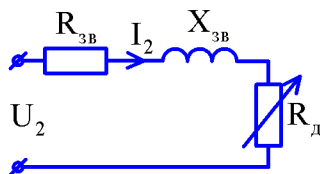
Рисунок 1.12 – Графіки зміни потужності і напруги під час основних операцій у ДСП

Описані вище операції пов'язані з безперервним регулюванням режиму роботи печі за струмом. Всі основні електричні параметри ДСП залежать від сили робочого струму дуги  $I_d$ . За їх значеннями можна робити висновки про ефективність роботи печі.

Для розрахунків і побудови електричних характеристик ДСП використовують електричні схеми заміщення, у яких всі опори (пічного трансформатора, реактора та короткої мережі) зводяться до напруги вторинної обмотки трансформатора. При цьому користуються такими припущеннями;

- навантаження за трьома фазами є симетричним;
- втрати у сталі пічного трансформатора є несуттєвими і ними нехтують;
- окрім активного опору дуги  $R_d$ , всі опори системи живлення є сталими.

При таких припущеннях схему заміщення беруть однофазною (рис. 1.13).



*Рисунок 1.13 – Спрощена  
схема заміщення ДСП*

Значення сумарного зведеного активного  $R_{зв}$  і реактивного  $X_{зв}$  опорів, Ом, визначають за формулами:

$$R_{зв} = R_{тр} + R_{км}, \quad (1.4)$$

$$X_{зв} = X_{зв} + X_p + X_{км}, \quad (1.5)$$

де  $R_{тр}$ ,  $X_{тр}$  – опори обмоток пічного трансформатора, відповідно активний і реактивний, Ом;

$R_{км}$ ,  $X_{км}$  – опори короткої мережі, відповідно активний і реактивний, Ом;

$X_p$  – реактивний опір реактора, Ом.

Струм короткого замикання  $I_{2кз}$ , А, розраховують для випадку, коли опір дуги дорівнює нулю, за формулою

$$I_{2кз} = \frac{U_2}{\sqrt{R_{36}^2 + X_{36}^2}} = \frac{U_2}{Z_{36}}, \quad (1.6)$$

де  $U_2$  – номінальне значення напруги вторинної обмотки пічного трансформатора, В.

Основні електричні параметри розраховують за формулами:

- повна потужність, ВА:

$$S = U_2 I_{2з}; \quad (1.7)$$

- активна потужність дуги (корисна потужність), Вт:

$$P_d = I_2^2 R_d; \quad (1.8)$$

- втрати активної потужності, Вт:

$$\Delta P = I_2^2 R_{36}; \quad (1.9)$$

- сумарна активна потужність, Вт:

$$P = I_2^2 (R_d + R_{36}) = P_d + \Delta P; \quad (1.10)$$

- сумарна реактивна потужність, ВАр:

$$Q = P \tan \varphi = Q_{TP} + Q_P + Q_{KM}, \quad (1.11)$$

де  $Q_{TP}$  – реактивна потужність пічного трансформатора, ВАр;

$Q_P$  – реактивна потужність реактора, ВАр;

$Q_{KM}$  – реактивна потужність короткої мережі, ВАр;

- напруга на дузі, В:

$$U_d = I_d R_d; \quad (1.12)$$

- коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad (1.13)$$

- електричний ККД:

$$\eta = \frac{P_d}{P}. \quad (1.14)$$

Графіки залежності основних електричних параметрів від струму для ДСП місткістю 6 т і потужністю трансформатора 2,25 МВА при роботі з реактором наведені на рис. 1.14.

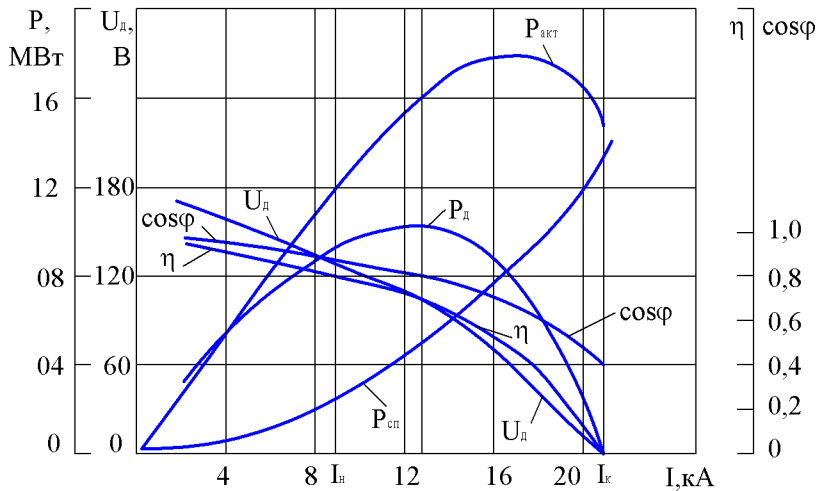


Рисунок 1.14 – Графіки залежностей основних електричних параметрів ДСП від сили струму [10]

### Задача [3].

Для дугової сталеплавильної печі розрахувати і побудувати графіки залежностей основних електричних параметрів від сили струму у вторинних обмотках трансформатора:  $P = f(I_2)$ ,  $P_{\text{д}} = f(I_2)$ ,  $\Delta P = f(I_2)$ ,  $\eta = f(I_2)$ ,  $\cos\phi = f(I_2)$ .

Вихідні дані для розрахунку наведені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Вихідні дані для розрахунку

Пічний трансформатор					Реактор	Коротка мережа	
$S$ , кВ·А	$U_1$ , кВ	$U_2$ , В	$R_{\text{тр}}$ , Ом·10 <sup>-4</sup>	$R_{\text{тр}}$ , Ом·10 <sup>-4</sup>	$X_{\text{р}}$ , Ом·10 <sup>-4</sup>	$R_{\text{км}}$ , Ом·10 <sup>-4</sup>	$X_{\text{км}}$ , Ом·10 <sup>-4</sup>
2600	6	160	5	20	75	9	20

Розв'язання:

1. Розраховуємо сумарний зведений активний опір згідно з (1.4):

$$R_{\Sigma B} = R_{TP} + R_{KM} = (5+9) \cdot 10^{-4} = 14 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

2. Розраховуємо сумарний зведений індуктивний опір згідно з (1.5):

$$X_{TP} = X_{TP} + X_P + X_{KM} = (20+75+20) \cdot 10^{-4} = 115 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

3. Розраховуємо повний зведений опір:

$$Z_{\Sigma B} = \sqrt{R_{\Sigma B}^2 + X_{\Sigma B}^2} = \sqrt{(14 \cdot 10^{-4})^2 + (115 \cdot 10^{-4})^2} = 116 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

4. Розраховуємо струм короткого замикання згідно з (1.6):

$$I_{2K3} = \frac{U_2}{Z_{\Sigma B}} = \frac{160}{116 \cdot 10^{-4}} = 13,8 \cdot 10^3 \text{ А} = 13,8 \text{ кА.}$$

5. Розраховуємо кут зсуву  $\varphi_{2K}$  між векторами напруги  $U_2$  і струму  $I_{2K3}$  у такій послідовності:

- обчислимо тангенс кута:

$$\operatorname{tg} \varphi_{2K} = \frac{X_{\Sigma B}}{R_{\Sigma B}} = \frac{115 \cdot 10^{-4}}{14 \cdot 10^{-4}} = 8,2;$$

- знаходимо числове значення кута:

$$\varphi_{2K} = \operatorname{arctg} 8,2 = 83^\circ.$$

6. Розраховуємо повну потужність для режиму короткого замикання:

$$S_{K3} = U_2 \cdot I_{2K3} = 160 \cdot 13,8 = 2208 \text{ кВА.}$$

7. Розраховуємо потужність втрат у режимі короткого замикання:

$$\Delta P = I_{2K3}^2 \cdot R_{\Sigma B} = (13,8 \cdot 10^3)^2 \cdot 14 \cdot 10^{-4} = 267 \text{ кВт.}$$

8. Будуємо кругову діаграму потужностей (рис.1.15) у такій послідовності:

- проводимо дві перпендикулярні осі;
- від вертикальної осі проводимо лінію під кутом  $\varphi_{2K}=83^\circ$ ;
- на цій лінії довільно вибираємо довжину відрізка ОА.

При побудові кругової діаграми на аркуші паперу формату А4 доцільно вибрати ОА=120 мм;

- із точки А опускаємо на горизонтальну вісь перпендикуляр, а точку перетину позначаємо літерою С;

- трикутник ОАС є трикутником потужностей у режимі короткого замикання, вертикальний катет якого в масштабі



дорівнює величині активних ( $AC = \Delta P_k$ ), горизонтальний – реактивних ( $OC = \Delta Q_k$ ), а гіпотенуза – повних ( $OA = \Delta S_k$ ) втрат;

- вимірюємо довжину відрізка AC ( $AC = 14,6$  мм);
- з точки A проводимо перпендикулярну лінію до перетинання з горизонтальною віссю, а точку перетину позначимо літерою E;
- визначаємо середину відрізка OE і позначаємо його літерою D;
- радіусом DO креслимо півколо з центром у точці D;

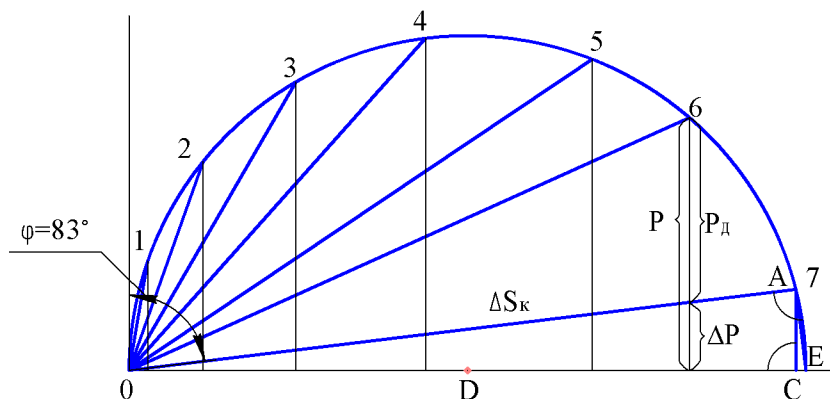


Рисунок 1.15 – Кругова діаграма потужностей ДСП

9. По круговій діаграмі потужностей визначаємо числові значення основних електричних параметрів від сили струму у вторинних обмотках трансформатора у такій послідовності:

- за отриманими значеннями довжин відрізків ( $OA = 120$  мм,  $AC = 14,6$  мм) визначаємо масштаби повної  $\mu_s$  й активної  $\mu_p$  потужностей за формулами:

$$\mu_s = \frac{\Delta S_k}{OA} = \frac{2208}{120} = 18,4 \frac{\text{кВА}}{\text{мм}},$$

$$\mu_P = \frac{\Delta P_{\kappa}}{AC} = \frac{267}{14,6} = 18,3 \frac{\kappa Bm}{mm};$$

- на півколі кругової діаграми, окрім точки А(7), довільно позначаємо ще шість точок (1-6), з'єднуємо їх з точкою О лініями і опускаємо перпендикуляри на горизонтальну вісь;
- тепер маємо ще шість трикутників потужностей, гіпотенузи яких у масштабі дорівнюють величині повних S, вертикальні катети – активних Р, а горизонтальні катети – реактивних Q потужностей;
- вимірюємо довжини відповідних відрізків і заносимо цифрові значення до табл. 1.5;
- використовуючи розраховані значення масштабів  $\mu_S$  і  $\mu_P$ , визначаємо числові значення повної S, сумарної активної Р і активної корисної  $P_d$  потужностей та втрати потужності  $\Delta P$ ;
- розраховуємо значення ККД згідно з (1.14);
- розраховуємо значення струму  $I_2$  за формулою

$$I_2 = \frac{S}{U_2};$$

- розраховуємо значення  $\cos\phi$  згідно з (1.13).

10. Будуємо графіки залежностей основних електричних параметрів ДСП від сили струму  $I_2$  (рис.1.16).

Таблиця 1.5 – Результати розрахунків

Номер точки	S		$\Delta P$		$P_d$		P		$\eta$	$I_2$	$\cos\phi$
	мм	кВА	мм	кВт	мм	кВт	мм	кВт		кА	
1	20	368	0,4	7,3	19,3	353,2	19,7	360,5	0,98	2,3	0,98
2	40	736	1,7	31,1	36,1	660,6	37,8	697,1	0,95	4,6	0,95
3	60	1104	3,7	67,7	48,4	885,7	52,1	953,4	0,93	6,9	0,86
4	80	1472	6,5	119,0	53,5	979,0	60,0	1098	0,89	9,2	0,75
5	100	1840	10,1	184,8	46,1	843,6	56,2	1028,4	0,82	11,5	0,56
6	110	2024	12,3	225,1	33,4	611,2	45,7	836,3	0,73	12,7	0,41
7	120	2208	14,6	267,2	0	0	14,6	267,2	0	13,8	0,12

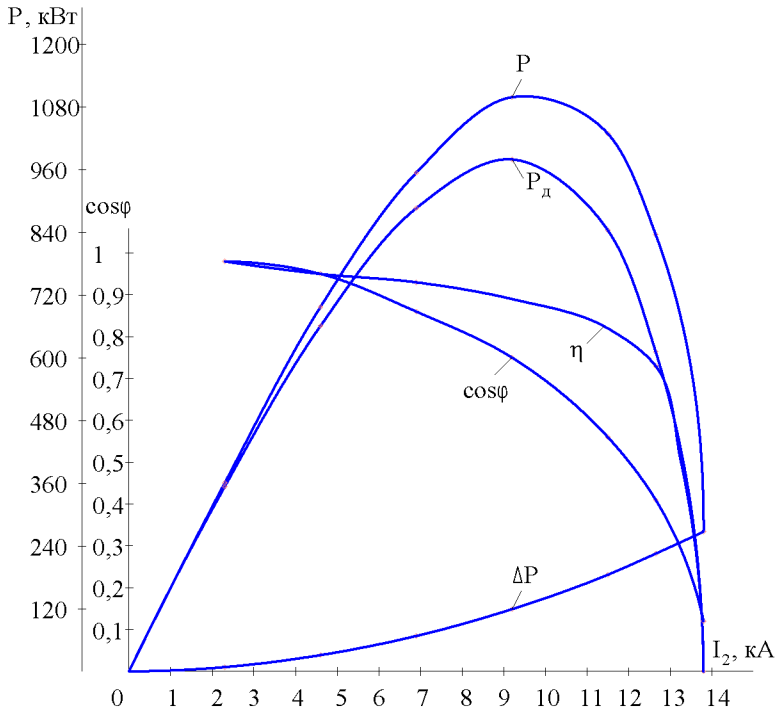


Рисунок 1.16 – Графіки залежностей основних електричних параметрів ДСП від сили струму згідно з вихідними даними

## 1.4. Рудно-термічні печі

До рудно-термічних печей відносять велику кількість установок електродугового нагрівання, різних за призначенням, конструктивним виконанням, особливостями технологічного процесу, виду джерела живлення тощо. Ці установки залежно від виду процесів, що в них відбуваються, поділяються на дві великі групи – рудоплавильні та рудовідновлювальні печі.

**У рудоплавильних печах** відбувається нагрівання руди, яке супроводжується лише її розплавленням без проведення хімічних реакцій. Метою такого розплавлення може бути:

- гомогенізація декількох окислів для отримання синтетичних шлаків з подальшою обробкою сталі у ковші;
- отримання розплавлених електрошлакових флюсів з подальшим заливанням їх у кристалізатор установки для електрошлакового переплавлення;
- отримання розплавлених окислів, що створюють при охолодженні після розливання формовані вогнетривкі вироби (скло, муліт, бакор тощо);
- отримання розтоплених окислів або шлаків з подальшим розливанням через фільтри з отриманням ниток, що створюють вату;
- перегін одного із елементів сировини – олова, цинку, свинцю – для відділення їх від шлаків;
- розділення (сегрегація) складових руд і отримання окремих складових або більш чистих продуктів.

**У рудовідновлювальних печах** одночасно з нагріванням руди відбувається відновлення одного або декількох окислів за рахунок відновлювача, який завантажується до печі разом з рудою. При цьому створюється продукт, який у своєму складі має один або декілька хімічних елементів із відновлювальних окислів руди. Функції відновлювача виконують вуглець, кристалічний кремній, феросиліцій, силікохром, силікомарганець, алюміній, водень тощо.

Залежно від виду електричного режиму роботи рудно-термічні печі класифікують:

- з дуговим режимом роботи (із відкритою дугою). У таких печах в сталому режимі роботи дуга горить відкрито, процеси плавлення потребують великої кількості тепла і проводяться з повним розплавленням шихти. Такий режим роботи використовується для рафінованих процесів, пов'язаних з плавленням без вуглецевого і середньовуглецевого ферохрому, металевого марганцю, силікокальцію, феровольфраму, ферованадію тощо;

- **з бездуговим режимом роботи (із закритою дугою).**

Такі печі використовують для багатошлакових і шлакових процесів, пов'язаних, наприклад, з виробництвом фосфору, штейнів тощо. У них відкритого горіння електричної дуги не відбувається;

- **зі змішаним режимом роботи.** У таких печах отримують різні феросплави – ферохром, феросиліцій, силікокальцій тощо.

Залежно від роду струму рудно-термічні печі бувають змінного і постійного струму. До цього часу на практиці більш широко використовуються рудно-термічні печі змінного струму, який має певні переваги при його передачі та перетворенні. Але поряд з перевагами у цих електротехнологічних установках мають місце і специфічні явища, які погіршують їх техніко-економічні показники. До цих специфічних явищ відносять:

- поверхневий ефект і ефект близькості, які знижують ефективність використання провідників і призводять до додаткових втрат енергії, що можуть досягати 30-40 % від загальних втрат у короткій мережі;

- електромагнітні втрати в металоконструкціях, що можуть становити декілька відсотків від їх потужності;

- суттєва складова реактивної потужності, що зумовлена великими значеннями власного і взаємного індуктивного опору як окремих провідників, так і всього електропічного контура;

- значно гірші умови горіння електричної дуги змінного струму зумовлюють зменшення довжини дуги, що призводить до коливань електричної і теплової потужності, підвищення пилловинесення, зменшення ефективності використання дуги для цільового технологічного процесу.

Вищеперелічене зумовило впровадження і все ширше використання **рудно-термічних печей постійного струму**. У таких електротехнологічних установках напруга до електродів підводиться від випрямного агрегату, який складається із трансформаторного і випрямного блоків, які, як правило, розміщуються в одному корпусі. Головними перевагами рудно-термічних печей постійного струму є:

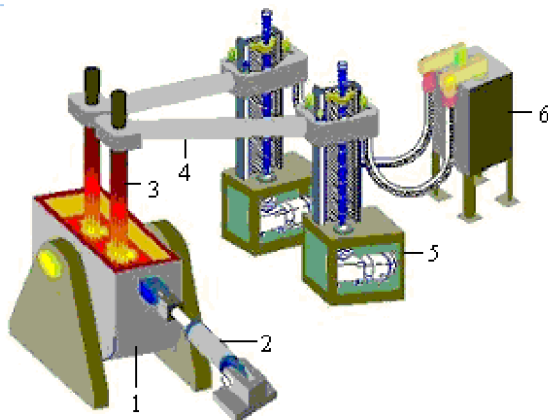
- підвищення ефективності використання печі, оскільки поряд з протіканням електрохімічних реакцій інтенсифікуються процеси відновлення цільового продукту і знижується вміст у ньому домішок, а відповідно, і покращується якість;
- суттєве (на 35-40%) зменшення споживання реактивної енергії;
- на 15-20 % зменшення витрат електродів;
- значне зниження шуму під час роботи печі, чим покращуються умови роботи обслуговуючого персоналу.

Як приклад, на рис.1.17 наведені основні складові частини багатоцільової рудно-термічної печі змінного струму малої потужності (250-500 кВА), що призначена для виробництва феросплавів і плавлених вогнетривів. До складу електротехнологічної установки входить пічний трансформатор 6, який виготовляється сухим і має 10 ступенів регулювання напруги, які забезпечують відповідно до вимог технологічного процесу послідовне або паралельне підключення до них електродів 3. Вихідна шихта завантажується у ванну 1, що футерована із середини вогнетривами і/або вугільними блоками. Процес плавлення вихідної шихти відбувається з допомогою двох графітованих електродів 3 за рахунок тепла, яке виділяється під час горіння електричної дуги і частково при проходженні струму через шихту, а також тепла екзотермічних процесів. Електроди закріплюються в електродотримачах 4 і їх положення у процесі роботи визначається за допомогою частотно-регульованого електромеханічного привода 5, який забезпечує автоматичне регулювання переміщенням електродів у функції електричних параметрів дугового проміжку.

Рудно-термічні печі як приймачі електричної енергії є аналогічними дуговим сталеплавильним печам. Принципових відмінностей в електричних схемах і основному електрообладнанні немає. За аналогією до ДСП в електричних колах рудно-термічних печей виділяють головні, проміжні й допоміжні електричні кола.

До головних кіл відносять первинні та вторинні кола пічних трансформаторів, що створюють електричний контур пічної установки. При потужностях 10-15 МВА ці електротехноло-

гічні установки підключаються до високовольтної мережі через трифазні пічні трансформатори, а при більших потужностях, як правило, використовуються три однофазні трансформатори. Враховуючи, що режим роботи більшості рудно-термічних печей порівняно з ДСП є значно спокійніший, надійне запалення і горіння електричної дуги в таких електроустановках доволі часто досягається без використання спеціальних реакторів.



*Рисунок 1.17 – Рудно-термічна піч малої потужності [15]: 1 – ванна; 2 – привод ванни; 3 – електроди; 4 – електродотримачі; 5 – привод електродів; 6 – пічний трансформатор*

До проміжних електричних кіл відносять спеціальні обмотки пічного трансформатора, що з'єднуються, наприклад, з пристроями для компенсації реактивної енергії. Використовується також підключення пристроїв компенсації реактивної енергії як з боку первинної, так і вторинної обмоток пічного трансформатора.

До допоміжних електричних кіл відносять електричні кола керування, вимірювання, захисту, автоматики і контролю. Невід'ємною складовою частиною більшості сучасних рудно-термічних печей є автоматизована система керування технологічним процесом (АСК ТП). АСК ТП призначена для забезпечен-

ня ефективного функціонування рудно-термічних печей шляхом автоматизованого виконання контролю, аналізу, координації і регулювання основних параметрів шихтового і електричного режимів, спікання і перепуску електродів тощо.

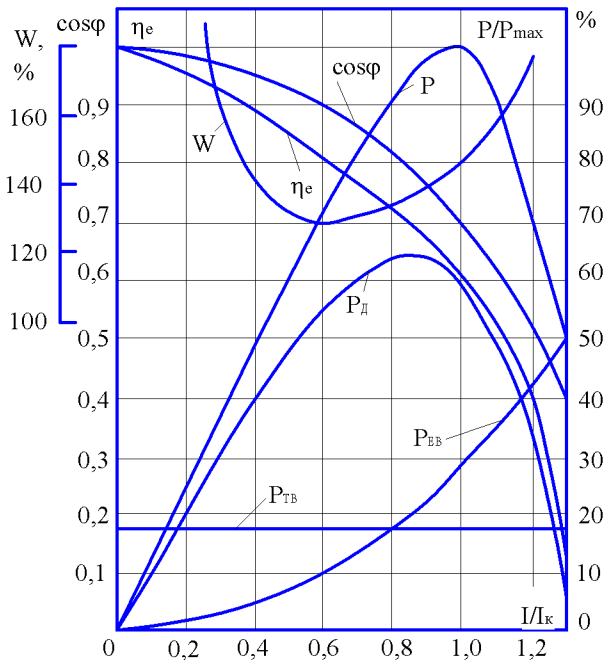


Рисунок 1.18 – Типові робочі характеристики рудовідновлювальної печі [10]:  $P$  – активна потужність електротехнологічної установки;  $P_{EB}$  – потужність електричних втрат;  $P_{TB}$  – потужність теплових втрат;  $P_d$  – потужність дуги;  $W$  – питомі витрати електроенергії;  $\eta_e$  – електричний коефіцієнт корисної дії;  $\cos\phi$  – коефіцієнт потужності установки

До головних органів керування, що підлягають автоматизації з допомогою АСК ТП, належать:

- механізми переміщення електродотримачів;
- механізми перепускання електродів;



- перемикачі ступенів напруги пічних трансформаторів;
- механізми повороту повітряних засувки обдування електродів тощо.

До головних функцій АСК ТП рудно-термічних печей відносять:

- збір, підготовку і видачу технологічному персоналу оперативної інформації про хід технологічного процесу, включаючи порушення і відмову засобів контролю і обладнання;
- стабілізацію активної потужності печі при рівномірному її розподілі по електродах;
- керування режимом спікання і перепуску електродів, а також оцінку положення реакційної зони у ванні печі;
- контроль балансу домішок у ванні печі і видачу рекомендацій за складом шихти і корекцією складу домішок;
- обмін інформацією з АСК ТП підприємства тощо.

На рис.1.18 наведені робочі характеристики, а в табл. 1.6 – технічні характеристики сучасних зразків рудно-термічних печей.

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики рудно-термічних печей

Тип печі	Потужність, кВт	Діаметр ванни, мм	Глибина ванни, мм	Напруга мережі живлення, кВ	Призначення
1	2	3	4	5	6
Отримання феросплавів для чорної металургії					
РКО-2,5	2500	2700	1200	6 і 10	Отримання різноманітних феросплавів
РКО-3,5	3500	2500	1100	10	Отримання рафінованого ферохрому
РКО-3,5	3500	2500	1230	10	Отримання безуглецевого ферохрому
РКО-4,5	4500	3500	1340	6 і 10	Отримання рудованного розплаву, що використовується для отримання рафінованого ферохрому методом змішування його з рідким силікохромом
РКЗ-4,5	4500	5380	3350	6 і 10	Отримання синтетичних шлаків

## Розділ 1. Установки електродугового нагрівання

Продовження табл. 1.6

1	2	3	4	5	6
РКЗ-9	10500	5380	3350	6 і 10	Отримання 75 і 90% феросиліцію, силікомарганцю, вуглецевого і переробного ферохрому
РКЗ-16,5	16500	6630	2800	6 і 10	Отримання 45% феросиліцію і силікомарганцю
РК-33	33000	8400	3500	110	Отримання 45% феросиліцію, силікохрому, силікомарганцю, вуглецевого і переробного ферохрому
РПЗ-48	63000	Габаритні розміри 24000хх7100хх4500	Габаритні розміри 24000хх7100хх4500	35	Отримання марганцевих сплавів
Отримання сплавів для кольорової металургії					
РКО-16,5	16500	6100	2300	10	Отримання кремнієво-алюмінієвих сплавів, плавлення мідних руд і концентратів
Отримання сполук для хімічної промисловості					
РКО-16,5	16500	6100	2300	10	Отримання карбиду кальцію
РКЗ-48	48000	8500	4350	35	Перегін жовтого фосфору
РКЗ-80	80000	16860	6760	10	Перегін жовтого фосфору
Отримання абразивів для металообробної промисловості					
РКЗ-16,5	16500	7340	3000	6 і 10	Отримання нормального електрокорунду «на випуск»

### 1.5. Вакуумні дугові печі

Вакуумні дугові печі (ВДП) призначені для отримання чистих металів та їх сплавів з певними високими властивостями. Прикладами їх використання є:

- отримання зливоків із хімічно-активних і тугоплавких матеріалів (вольфрам, титан, цирконій, тантал, ніобій, молібден тощо) та сплавів на їх основі;
- отримання сталей і сплавів спеціального призначення (нержавіючих, жаростійких, підшипникових тощо);
- вторинне переплавлення металу з метою кращого очищення від домішок і газів.

Принцип дії ВДП базується на перетворенні електричної енергії у теплову в електричній дузі, яка горить при зниженому тиску у вакуумній камері. При переплавленні більшості марок сталей, а також при вторинному переплавленні титану і цирконію тиск у вакуумній камері становить близько 1 Па. При переплавленні жаростійких сталей тиск у вакуумній камері повинен бути близько 0,1 Па, а для переплавлення таких металів, як вольфрам, ніобій, молібден, тантал та ін. -  $10^{-2}$  –  $10^{-1}$  Па.

На практиці отримали використання два види ВДП – з електродом, що не витрачається (рис. 1.19а), та з електродом, що витрачається (рис. 1.19б).

У ВДП з електродом, що не витрачається, електрична дуга горить між електродом 5 і зливком металу 7, що наплавлюється під час роботи. Електрод виготовляється графітовим або мідним з вольфрамовим наконечником. Метал, який треба розплавити, засипається зі спеціального бункера-дозатора 3. Такі печі не можуть забезпечити високої якості металів і сплавів, оскільки зливки, що отримують, забруднюються матеріалами електрода. Тому ВДП з електродом, що не витрачається, отримали на практиці обмежене використання.

У ВДП з електродом, що витрачається, електрод 5 виготовляється із матеріалу заданого хімічного складу, який треба переплавити. Електрод формується із заготовок, прутків або брикетів, що закріплюються до штока 1. Вакуумне ущільнення 2, по-перше, забезпечує герметизацію вакуумної камери 4, а по-друге, – легке переміщення штока з допомогою керованого привода, що знаходиться зовні печі. Знизу вакуумної камери розміщений каталізатор 9, в якому формується зливки 7 готового металу або сплаву. Каталізатор закріплюється на піддоні 8. Біль-

шість складових частин ВДП (шток, вакуумне ущільнення, вакуумна камера і піддон) мають водне охолодження.

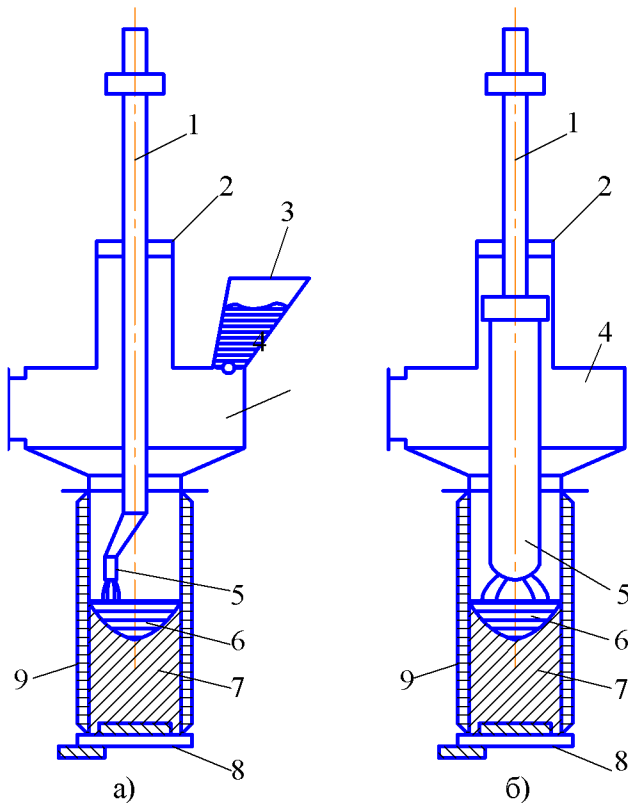


Рисунок 1.19 – Схеми будови дугової вакуумної печі з електродом: а) що не витрачається; б) що витрачається: 1 – шток; 2 – вакуумне ущільнення; 3 – бункер-дозатор; 4 – вакуумна камера; 5 – електро.; 6 – ванна розтопленого металу; 7 – зливоч готового металу; 8 – піддон; 9 – каталізатор

У ВДП з електродом, що витрачається, під дією високої температури електричної дуги відбувається розплавлення мате-

ріалу електрода на його торці. Під дією сили тяжіння і електродинамічних зусиль з'являються краплі розплавленого металу, що відриваються від електрода і падають в каталізатор, створюючи ванну з розплавленого металу.

Якщо ВДП використовуються як ливарні електротехнологічні установки, то тоді забезпечується отримання доволі великих об'ємів рідкого металу в спеціальних тиглях для подальшого розливання його у форми. Такі ВДП на практиці використовуються обмежено.

Широко використовуються на практиці ВДП для отримання зливків. У них одним із головних складових елементів є водоохолоджувальний кристалізатор з піддоном. У таких електротехнологічних установках поряд з плавленням відбувається одночасно і процес затвердіння металу в каталізаторі завдяки інтенсивному відбиранню тепла з допомогою системи охолодження. Завдяки спрямованій кристалізації, впливу високих температур і вакуумній обробці метал зливка, що формується у кристалізаторі, має низький вміст неметалевих вкраплень, шкідливих домішок і газів. Такий процес забезпечує умови для отримання зливків заданої структури без дефектів усадкового характеру і з певними геометричними формою і розмірами, які визначаються внутрішніми формою і розмірами каталізатора. Найчастіше у ВДП отримують зливки круглої форми, але іноді з метою спрощення подальшої переробки зливків їх форма може бути квадратною або прямокутною.

Зовнішній вигляд сучасної ВДП типу ДКВ-5,0 для виробництва цирконієвих зливків масою до 3,5 т наведений на рис. 1.20.

У ВДП, як правило, використовують дугу постійного струму, що зумовлено специфічними умовами її горіння, які полягають у такому:

- горіння дуги відбувається в основному в парах металу в герметичному просторі з низьким тиском. Атоми залишкових газів майже не впливають на процес горіння, оскільки потенціали іонізації атомів металу значно менші, ніж атомів газу;
- довжина дуги мала (10-20 мм), а тому теплова взаємодія між катодом і анодом дуже тісна. Поряд з безперервним масо-

теплоперенесенням металу з електрода в каталізатор відбувається специфічний розподіл потужності дуги між катодом і анодом;



*Рисунок 1.20 – Дугова вакуумна піч ДКВ-5,0 [15]*

- залежно від фізичних властивостей переплавленого металу використовується як «пряма» (катодом є електрод), так і «зворотна» полярність підключення;
- на умови і характер горіння дуги суттєвий вплив має тиск в розрядній зоні. При тисках 0,1-10 Па має місце дифузний розряд, для якого характерним є великий переріз стовпа дуги, загальна для всіх каналів розряду анодна пляма великої площі, наявність декількох катодних плям на електроді, стійке горіння дуги, низький градієнт напруги на стовпі дуги. При підвищенні тиску стовп дуги звужується, і при тиску понад 130 Па з'являється декілька паралельних дуг, єдина анодна пляма розділяється на декілька плям, зростає напруженість на дузі, і дуга горить нестійко;
- при горінні дуги мають місце струми витоку, які зумовлені коаксіальною системою електродів – електрод (катод) у вигляді стрижня оточений анодом (кристалізатором і поверхнею

ванни розтопленого металу). Тому електрони від катода спрямовуються не лише у бік ванни рідкого металу, а й на стінки каталізатора. Величина струму витoku залежить від багатьох факторів, головними серед яких є: кількість катодних плям, що виходять на крайку і бокову поверхню електрода; співвідношення зазорів «електрод-кристалізатор», «електрод-поверхня ванни розплавленого металу»; тиск; напруженість магнітного поля соленоїда тощо.

ВДП є потужними електротехнологічними установками, які живляться від мереж 6-10 кВ при загальноприйнятих схемах електропостачання для електроприймачів I категорії. На рис.1.21 наведена спрощена схема силових кіл ВДП.

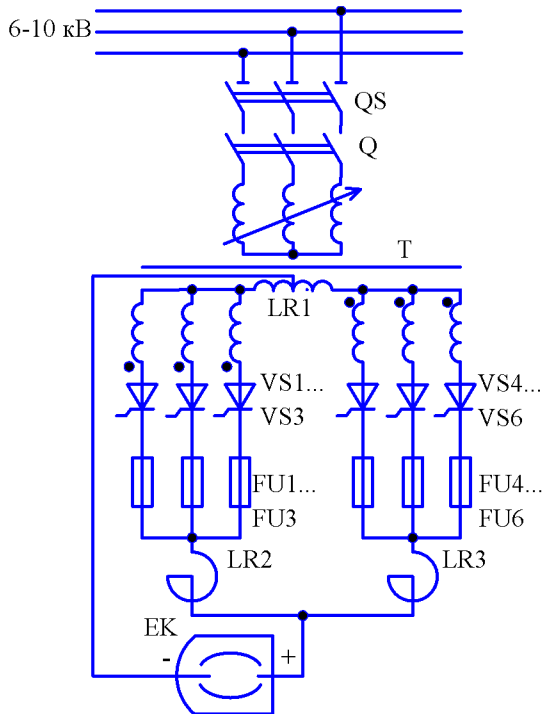


Рисунок 1.21 – Електрична схема силових кіл вакуумної дугової печі

Прикладом трансформатора, що використовується для ВДП, є трансформатор типу ТМНПВ – 4000...12 500/6...10. Первинна обмотка трансформатора Т може бути з'єднаною за схемою «трикутник» або «зірка» і відповідно підключеною до мережі 6 або 10 кВ. Вона має пристрій регулювання напруги під навантаженням. Вторинна обмотка трансформатора може складатися із груп (від однієї до чотирьох) двох зворотних «зірок» зі зрівнювальним реактором LR1.

Для керування роботою тиристорів випрямних блоків, як правило, використовують принцип вертикального імпульсного керування тиристорами, що базується на формуванні лінійної або косинусної опорної напруги і порівняння її з напругою керування. У результаті порівняння цих напруг формуються прямокутні імпульси з відповідним положенням в часі їх фронту. Такі системи дозволяють керувати роботою різною кількістю тиристорів шляхом нарощування потужності вихідних каскадів при використанні лише одного фазозсувного пристрою для декількох випрямних блоків.

Для згладжування пульсацій випрямленого струму, а також для обмежень швидкості зростання струму навантаження при виникненні технологічних коротких замикань у схемі передбачені реактори LR2, LR3.

У сучасних зразках ВДП для візуального контролю за процесами, що відбуваються в середині печі, використовують телевізійні системи спостереження, а для автоматичного керування роботою цих електротехнологічних установок використовують АСК ТП, які забезпечують підтримання заданих значень довжини дуги і вагової швидкості плавлення.

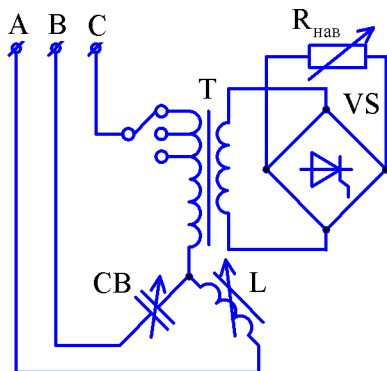
Враховуючи специфічні умови горіння електричної дуги у таких електротехнологічних установках, до джерела живлення ставляться такі вимоги:

- зовнішня характеристика повинна бути крутопадаючою або вертикальною;
- можливість регулювання сили струму дуги в діапазоні  $(0,1-1) I_{\text{ном}}$ ;
- стабілізація заданої сили струму в діапазоні  $(0,5-1) I_{\text{ном}}$  з точністю не нижче  $\pm 2\%$ ;



- коефіцієнт корисної дії повинен бути не нижче 0,9;
- коефіцієнт потужності  $\cos\phi$  повинен бути не нижче 0,8;
- повинен бути забезпечений високий ступінь надійності роботи як в нормальних, так і в аварійних режимах роботи;
- бажано, щоб при зміні опору навантаження змінювалася лише напруга на виході, а сила струму залишалася незмінною.

Для забезпечення останньої вимоги у ВДП як джерела живлення використовуються параметричні джерела струму, головною особливістю яких є висока точність стабілізації струму навантаження. На рис.1.22 наведена спрощена схема параметричного джерела струму. На цій схемі опором  $R_{\text{нав}}$  представлений опір, що створює ВДП у процесі роботи. Він підключений до фази С через понижувальний пічний трансформатор Т і тиристорний випрямляч VS. У дві інші фази В і А підключені відповідно дросель L і батарея конденсаторів CB, опори яких рівні між собою ( $x_L = x_C$ ).



*Рисунок 1.22 – Електрична схема параметричного джерела струму для вакуумної дугової печі*

Силу струму, яку необхідно підтримувати постійною при зміні опору навантаження, можна задавати зміною кількості витків первинної обмотки трансформатора, силою струму підмагнічування дроселя та ємністю батареї конденсаторів. Схема за-

безпечує високу чутливість до зміни навантаження, оскільки час відпрацювання збурення у схемі становить 0,02-0,03 с, що дозволяє вибирати керовані вентилі без запасу за струмом і тим самим значно зменшувати габарити і вартість електротехнічної установки. Ще однією суттєвою перевагою такої схеми є випереджувальний коефіцієнт потужності, що становить близько 0,9. Розроблені і використовуються на практиці параметричні джерела струму для ВДП на струми 12,5; 25; 37,5; 50 кА і номінальну напругу 75 В.

Технічні характеристики ( $U_{2\text{ном}}$  – номінальна напруга вторинної обмотки;  $I_{2\text{max}}$  – максимальний струм вторинної обмотки;  $m_{\text{max}}$  максимальна вага зливка;  $V$  – швидкість плавлення) деяких ВДП наведені у табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики вакуумних дугових печей

Тип	U, В	I <sub>max</sub> , А	Максимальні розміри, мм				m <sub>max</sub> , кг	V, кг/хв
			електрода		зливка			
			діа- метр	дов- жина	діа- метр	дов- жина		
ДСВ-3,2-Г-1	75	12500	220	3550	320	1750	1000	2,5-5,4
ДСВ-4,5-Г-2	75	12500	360	2750	450	1900	2000	3,1-3,8
ДСВ-6,3-Г-6	75	25000	500	4550	630	2700	6300	3,3-11
ДСВ-8-Г-10	75	25000	700	3550	800	2900	10000	4-12
ДСВ-8-Г-16	75	25000	660	6400	820	4000	17000	6-14
ДСВ-11,2-Г-37	75	37500	900	7600	1120	5000	37000	6,3-19,2
ДТВ-6,5-Г-6	75	25000	550	5400	650	4000	5500	9-22
ДТВ-8,7-Г-10	75	37500	750	5100	870	4000	10300	11,5-31
ДТВ-14-Г-26	75	50000	1225	5100	1400	4000	26500	23-45
ДДВ-1,4-В-0,1	75	12500	90	1000	140	420	110	2-6,5
ДДВ-2,5-В-0,6	75	12500	160	1715	250	835	570	2-6,5
ДНВ-2,5-В-0,6	75	12500	200	3000	250	1100	530	2-3,5
ДТВГ-0,6ПЦ	75	37000	600	1000	1850	1600	2	10-20
ДРВГ-0,025ПЦ	75	12500	50x50	1000	1500	1000	1	3-5
ДРВГ-0,06П	75	37500	100	1800	300	250	1	1-2
ДХВГ-0,25ПЦ	75	75000	600	1500	1500	900	1	4
ДКВ-5,0	75	25000	-	-	100-800	-	10000	-

## **1.6. Установки електродугового нагрівання як приймачі електричної енергії**

Виходячи з вищерозглянутого, можна дійти висновку, що на цей час використовується велика кількість різноманітних за призначенням і конструктивним виконанням установок електродугового нагрівання. Ці установки мають ознаки, які є загальними для усіх видів або для переважної їх більшості, але є і такі, які суттєво відрізняють один вид від іншого як приймачів електричної енергії.

**Загальними ознаками** установок електродугового нагрівання як приймачів електричної енергії є такі:

- наявність суттєвої реактивної складової потужності, тому, як правило, для її компенсації необхідно передбачувати індивідуальні засоби у вигляді, наприклад, конденсаторних установок, що підключаються з боку високої напруги;

- установки є генераторами високих гармонік, серед яких переважають третя, п'ята, сьома та дев'ята. Діючі значення високих гармонік, якщо не застосовувати засобів для їх гашення, можуть досягати в деяких установках 20-25%. Тому, як правило, до складу установки входять фільтрокомпенсуючі установки для компенсації вищих гармонік ;

- наявність високочастотних коливань від сотень герц до десятків кілогерц і амплітудою до 40-50% від номінального значення лінійної напруги зумовлює появу несинусоїдальності, яка проявляється в додатковому нагріванні та старінні ізоляції, скороченні терміну служби як самої установки, так і елементів електростачальної системи;

- оскільки установки є потужними приймачами електричної енергії, то вони є хорошими регуляторами величини навантаження як для підприємства, так і для енергосистеми. При використанні цих електротехнологічних установок як сезонних регуляторів навантаження доцільне їх розміщення поблизу електростанцій з нерівномірним виробництвом електроенергії (на-

приклад, поблизу гідроелектростанції), що дає можливість використання дешевої електроенергії паводкової води. За необхідності добового регулювання навантаження значна частина цих установок допускає вимикання їх на декілька годин;

- установки є джерелами різних видів електромагнітних перешкод, пов'язаних із запалюванням, горінням та згасанням електричної дуги.

**Специфічними ознаками установок електродугового нагрівання як приймачів електричної енергії є такі:**

**Для дугових сталеплавильних печей:**

- з точки зору надійності електропостачання ДСП відносять до II категорії приймачів електричної енергії;

- ці установки є потужними приймачами електричної енергії, номінальна потужність яких становить від одиниць до десятків МВА, питомі витрати електроенергії становлять  $W = 450-1000$  кВт·год на 1 тону готового продукту, а електричний коефіцієнт корисної дії яких дорівнює  $\eta = 0,9-0,95$ . Причому потужність і напруга суттєво відрізняються в різні періоди плавлення, а крім того, залежать від марки сталі, яку виплавляють під час певного технологічного процесу;

- характерними є часті відключення печі від мережі, що пов'язані з технологічними і аварійними зупинками. Такі відключення зумовлюють провали напруги та перенапруги на шинах підстанцій і можуть суттєво впливати на роботу інших приймачів, що підключені до шин цієї підстанції. Для зменшення цього впливу частка пічного навантаження не повинна перевищувати 40% потужності понижувальної підстанції;
- часті експлуатаційні короткі замикання, які зумовлюють коливання напруги на шинах підстанції, що можуть досягати 15% від номінального значення;

- під час роботи трифазних ДСП навіть у нормальних режимах роботи має місце суттєва асиметрія струмів і потужностей за фазами;

- ДСП є потужними приймачами реактивної енергії, частка якої зростає зі збільшенням потужності печі, а коефіцієнт по-

тужності дорівнює: для печей до 5 т –  $\cos\varphi=0,85-0,89$ ; 10-20 т –  $\cos\varphi=0,83-0,87$ ; 100 т –  $\cos\varphi=0,72-0,78$ ; 200 т –  $\cos\varphi=0,7-0,74$ ;

- найбільш важким з точки зору електричного навантаження є період розплавлення металу. З метою полегшення роботи електропостачальної системи підприємства планують так, щоб ці періоди для групи печей не збігалися у часі, а також, по можливості, не збігалися з годинами максимуму навантаження енергосистеми.

### **Для рудно-термічних печей:**

- з точки зору надійності електропостачання ці установки відносять до II категорії приймачів електричної енергії;
- ці установки є потужними приймачами електричної енергії, номінальна потужність яких може становити 63 МВА, а питомі витрати електроенергії досягають  $W=10\,000$  кВт/год на 1 тону готового продукту;
- режим роботи є тривалим зі значно спокійнішим, порівняно з ДСП, навантаженням. Стрибки струму і експлуатаційні короткі замикання в цих установках є скоріше винятком, ніж правилом;

### **Для вакуумних печей:**

- з точки зору надійності електропостачання ці установки відносять до I і II категорій приймачів електричної енергії;
- ці установки є менш потужними приймачами електричної енергії, ніж попередні, потужність яких, як правило, не перевищує 10 МВА;
- для них є характерним спокійний тривалий режим роботи з рівномірним навантаженням;
- установки дуже чутливі до коливань напруги мережі живлення, які суттєво впливають на якість зливків у каталізаторі;
- у зв'язку з тим, що більшість з них до свого складу включає тиристорні випрямлячі, ці електротехнологічні установки є генераторами високих гармонік;
- значна частина цих установок є однофазними приймачами електричної енергії, що підключаються на лінійну або фазну напругу, що зумовлює суттєву несиметрію навантаження за фа-

зами. Тому за наявності декількох вакуумних печей на підприємстві доцільно підключати їх до різних фаз мережі.

*Контрольні запитання та завдання*

1. Які електротехнологічні установки називають установками електродугового нагрівання, та у чому полягає принцип їх дії?
2. Чим подібні та чим відрізняються електричні дуги постійного та змінного струму?
3. Яке призначення та за якими ознаками класифікують установками електродугового нагрівання?
4. Назвіть основні параметри та складові частини дугових сталеплавильних печей.
5. Назвіть основне електрообладнання дугових сталеплавильних печей.
6. Які основні режими роботи дугових сталеплавильних печей ви знаєте? У чому полягають особливості роботи при кожному із режимів?
7. Дайте аналіз спрощеної схеми заміщення дугової сталеплавильної печі та наведіть формули для визначення її головних складових.
8. Дайте визначення та класифікацію рудно-термічних установок.
9. Які основні складові частини має багатоцільова рудно-термічна піч змінного струму?
10. Яке призначення вакуумних дугових печей? Наведіть приклади їх використання.
11. У чому полягають особливості принципу дії вакуумних дугових печей?
12. Які два види вакуумних дугових печей отримали використання на практиці, та у чому полягають особливості їх конструктивного виконання та роботи?
13. У чому полягають специфічні умови горіння дуги у вакуумних дугових печах?
14. Які основні вимоги ставлять до джерел живлення електричної дуги вакуумних дугових печей?
15. Дайте характеристику дуговим сталеплавильним пе-

чам як приймачам електричної енергії.

16. Дайте характеристику рудно-термічним печам як приймачам електричної енергії.

17. Дайте характеристику вакуумним дуговим печам як приймачам електричної енергії.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ТА ЕЛЕКТРОННИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Борисов Б.П. Электроснабжение электротехнологических установок / Б.П. Борисов, Г.Я.Вагин. – К.: Наукова думка, 1985. – 244 с.

2. Зимин Е.Н. Электрооборудование промышленных предприятий и установок: учебник для техникумов / Е.Н. Зимин, В.И. Преображенский, И.И.Чувазов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 552 с.

3. Милосердов В.О. Електротехнологічні установки та пристрої: навчальний посібник / В.О. Милосердов. – Вінниця: ВНТУ, 2007. –135 с.

4. Попов А.Н. Руднотермические печи выпрямленного тока как ресурсосберегающие агрегаты / А.Н. Попов, С.М. Немахин и др. //Электрометаллургия//. –1998 –№ 36 –С. 39-47.

5. Свенчанский А.Д. Автоматическое регулирование электрических печей / А.Д. Свенчанский, К.Д. Гуттерман. – М.;Л.: Энергия, 1965. – 480 с.

6. Свенчанский А.Д. Электроснабжение и автоматизация электротермических установок: учебник для техникумов / А.Д. Свенчанский, З.Л. Трейзон, Л.А. Мнухин Л.А. – М.: Энергия, 1980. – 320 с.

7. Соловей А.И. Потребители электрической энергии: учебное пособие для самостоятельной работы студентов / А.И. Соловей. – Киев: Поліграфічна дільниця інституту електродинаміки АН України, 1996. – 65 с.

8. Фомичев Е.П. Электротехнологические промышленные установки: учеб. пособ. для вузов / Е.П. Фомичев. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 264 с.

9. Электротехнический справочник: в 3 т. /под общ. ред. проф. МЭИ И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. – 7-е изд., испр. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3, Кн. 2. Использование электрической энергии. – 616 с.

10. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: учебник для вузов /А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; под ред. А.Д. Свенчанского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.

11. Электротехнологические промышленные установки /под ред. А.Д. Свенчанского. –М.: Энергия, 1982. – 400с.

12. Эффективные режимы работы электротехнологических установок /И.В. Жежеленко, В.М. Божко, Г.Я. Вагин, М.Л. Рабинович – К.: Техніка, 1987. – 183 с.

13. [www.bse.sci-lib.com](http://www.bse.sci-lib.com)

14. [www.courses.edu.nstu.ru](http://www.courses.edu.nstu.ru)

15. [www.electropech.ru](http://www.electropech.ru)

16. [www.elektrozavod.ru](http://www.elektrozavod.ru)

17. [www.garmony.com.ua](http://www.garmony.com.ua)

18. [www.lac.cz/ru](http://www.lac.cz/ru)

19. [www.ma.dp.ua](http://www.ma.dp.ua)

20. [www.old.comterm.ru](http://www.old.comterm.ru)

21. [www.old.rts.ua](http://www.old.rts.ua)

22. [www.risp.ru](http://www.risp.ru)

23. [www.therm.ru](http://www.therm.ru)

24. [www.vniieto.su](http://www.vniieto.su)