

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання
контрольних робіт з дисципліни
"Електротехнологічні установки"
для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
всіх форм навчання

2018

Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з дисципліни "Електротехнологічні установки" для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» всіх форм навчання /Укл.: Д.С. Яримбаш – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 – 38 с.

Укладачі: Д.С. Яримбаш, доцент, д.т.н.
Рецензент: П.Д. Андрієнко, професор, д.т.н.
Відповідальний за випуск: І.Д. Галушко, зав.лаб.

Затверджено
на засіданні кафедри ЕМ
Протокол № 7
від 01 березня 2018 р

на засіданні кафедри ЕМ
Протокол № 8
від 29 березня 2018 р

ЗМІСТ

	с
Передмова	4
1 Тепловий розрахунок електропечей опору	5
2 Розрахунок та вибір нагрівальних елементів електропечей опору	17
3 Розрахунок дугової сталеплавильної печі	24
Література	32

ПЕРЕДМОВА

Електротехнології відіграють визначальну роль у промисловому виробництві. Від технологічних і електроенергетичних параметрів електроустановок та енергоефективності їх функціонування, як правило, залежить енергоефективність усього технологічного циклу промислового виробництва та рівень якості продукції. Використання електротехнології в першу чергу дозволяє забезпечити високу продуктивність технологічного процесу.

В системі електропостачання промислового підприємства електротехнологічні установки є споживачами електричної енергії. Тому до їх енергетичних показників (потужність, струм, частота струму, гармонійний склад, напруга, коливання напруги, коефіцієнт корисної дії, питомі витрати електричної енергії, тощо) висуваються окремі жорсткі вимоги для забезпечення надійності електропостачання та якості електричної енергії в електромережах промислового підприємства.

Всі способи технологічного застосування електричної енергії в електротехнологічних установках мають єдину основу – перетворення електричної енергії під час технологічного процесу у інші види енергії.

Найбільшого поширення у промисловому виробництві отримали електротехнологічні установки, що використовують перетворення електричної енергії у теплову (електропечі опору, дугові, тощо).

1 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПЕЧЕЙ ОПОРУ (ЕПО)

Метою теплового розрахунку є визначення параметрів (енергетичних, теплових, геометричних), при яких забезпечується проведення заданого технологічного процесу. За результатами розрахунку визначають усталену потужність, виконують вибір матеріалів та товщини футеровки.

Для ЕПО неперервної дії обирають кількість теплових зон ті потужності кожної зони. При підборі розробленої раніше конструкції електропечей для проведення заданого режиму термообробки, а також при зміні номенклатури виробів, що оброблюються, виконують повір очний розрахунок, тобто визначають можливість проведення заданого технологічного режиму із необхідною продуктивністю.

Тривалість циклу термообробки та продуктивність ЕПО є одними з основних показників технологічного режиму електропечі. В загальному випадку тривалість циклу визначається виразом

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{вит}} + \tau_{\text{охол}} + \tau_{\text{з,в}}, \text{ сек}$$

де $\tau_{\text{н}}$ – тривалість нагріву;

$\tau_{\text{вит}}$ – тривалість технологічної витримки;

$\tau_{\text{охол}}$ – тривалість охолодження;

$\tau_{\text{з,в}}$ – тривалість процесу завантаження-вивантаження

Тривалість технологічної витримки при проведенні теплового розрахунку ЕПО розглядається як значення, що задане технологією процесу.

Тривалість процесу завантаження-вивантаження визначають для ЕПО періодичної дії або за даними експлуатації аналогічної конструкції, або на основі таких міркувань, як маса та геометричні розміри виробів, що обробляються, тип ЕПО (камерна, шахтова, ковпакові та ін.), спосіб завантаження, ступінь механізації завантаження і т.д.

Тривалість нагріву теплотехнічних тонких виробів (завантажень) у режимі сталої температури печі визначають за формулою

$$\tau_n = \frac{c \cdot M \cdot v}{C_{3\theta} \cdot F_\theta}, \text{ сек}$$

де c – питома теплоємність матеріалу виробу, Дж/кг·°С;

M – маса виробу, кг;

F_θ – поверхня виробу (завантаження), що отримує тепловий потік випромінюванням, м²;

v – коефіцієнт нагріву випромінюванням теплотехнічних тонких виробів у режимі $q_{кор} = const$.

Зведений коефіцієнт випромінювання визначається за формулою

$$C_{3\theta} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

де C_0 – постійна Стефана-Больцмана, яка дорівнює коефіцієнту випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,7$ Вт/м²·К⁴;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коефіцієнти теплового випромінювання, відповідно, виробу (об'єкту), що нагрівається та випромінювача (робочого простору);

F_1, F_2 – поверхні, відповідно, виробу та робочого простору.

У інженерних розрахунках можна прийняти $\varepsilon_1 = 0,9$, $\varepsilon_2 = 0,3 \div 0,7$. Якщо поверхня виробу значна менша за поверхню робочого просто, тобто $F_1 \ll F_2$, зведений коефіцієнт випромінювання можна визначити як

$$C_{3\theta} = 5,7 \cdot \varepsilon_1.$$

Значення коефіцієнту нагріву випромінюванням V визначається за формулою

$$v = \frac{T_n}{Q} \left[0,575 \lg \frac{\left(1 + \frac{T_n}{T_{no}}\right) \left(1 - \frac{T_n}{T_{no}}\right)}{\left(1 - \frac{T_k}{T_{no}}\right) \left(1 + \frac{T_k}{T_{no}}\right)} + 0,5 \arctg \frac{(T_k - T_n)/T_{no}}{1 + T_k \cdot T_n / T_{no}^2} \right]$$

де T_{no} – температура печі, К;

T_n , T_k – температури виробу, відповідно, на початку та наприкінці процесу нагріву, К.

При конвекційному нагріві теплотехнічних тонких виробів у режимі $q_{кор} = const$ тривалість нагріву визначається за формулою

$$\tau_n = \frac{c \cdot M}{\alpha_k \cdot F_k} \ln \frac{t_{no} - t_n}{t_{no} - t_k}$$

За цією формулою можна визначити температуру ЕПО, за якої забезпечується нагрів виробу до необхідної температури при заданій тривалості нагріву.

Коефіцієнт конвекційної теплопередачі α_k визначається за залежністю від швидкості циркуляційної атмосфери, її теплофізичних властивостей, геометричних розмірів і форми виробів, що обробляються.

Після визначення тривалості нагріву та продуктивності печі визначають споживану паливну потужність, яку можна визначити за кількістю тепла

$$Q_u = Q_{кор} + Q_{дон} + \Sigma Q_{втр}$$

або за

$$P_{спож} = P_{кор} + P_{дон} + \Sigma P_{втр}.$$

де $Q_{кор}$, $P_{кор}$ – кількість тепла та потужність, необхідні для нагріву виробів, що обробляються (корисна), Вт;

$Q_{дон}$, $P_{дон}$ – кількість тепла та потужність, необхідні для

нагріву допоміжного обладнання (корзин, конвеєрних літ, піддонів та ін.), Вт;

$\Sigma Q_{втр}$, $\Sigma P_{втр}$ – сумарна кількість тепла та потужності, необхідних для компенсації теплових втрат, Вт.

Визначення допоміжної потужності виконується за формулою

$$P_{дон} = \frac{C_{дон} \cdot M_{дон} \cdot (t_{к,дон} - t_{н,дон})}{\tau_n} + C_{г,дон} \cdot A_{г,дон} \cdot (t_{но} - t_{н,г,дон})$$

де $M_{дон}$ – маса допоміжного устаткування, кг;

$C_{дон}$ – питома теплоємність матеріалу допоміжного устаткування, Дж/кг·°C;

$t_{н,дон}$, $t_{к,дон}$ – температура допоміжного устаткування на початку та наприкінці нагріву, °C;

$T_{но}$ – температура печі, К;

$A_{г,дон}$ – масова витрата спеціального газу, кг/°C

$C_{г,дон}$ – питома теплоємність спеціального газу, Дж/кг·°C;

$t_{н,г,дон}$ – початкова температура спеціального газу, °C

За умов відсутності вентиляції, тобто $C_{г,дон} A_{г,дон} (t_{но} - t_{н,г,дон}) = 0$ цей вираз можна спростити

$$P_{дон} = \frac{C_{дон} \cdot M_{дон} \cdot (t_{к,дон} - t_{н,дон})}{\tau_n}$$

Теплові витрати через завантажувальний та розвантажувальний пройоми, через різні отвори у футеруванні визначаються складовими теплообміну пінного простору та навколишнього середовища – конвекцією та випромінюванням.

Складова теплообміну випромінюванням $P_{втр,в}$ через відкриті отвори розраховують як

$$P_{втр,в} = 5,7 \cdot \varepsilon_{отв} \cdot \left[\left(\frac{t_{но}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{нс}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{отв} \cdot \varphi,$$

де $\varepsilon_{отв}$ – коефіцієнт теплового випромінювання отвору;

φ – коефіцієнт діафрагмування, що враховує глибину отвору та екрануючу дію його стінок.

Для великих отворів, розміри яких наближені до розмірів пічного простору, приймають $\varepsilon_{отв} = 0,8$, для малих отворів – $\varepsilon_{отв} = 1,0$.

Конвекційну складову можна визначити за формулою

$$P_{втр,к} = 320 \cdot F_{отв} \cdot h^{0,5} \cdot t_{но} / l_{отв}^4,$$

де h , $F_{отв}$, $l_{отв}$ – висота, площа та глибина отвору.

У випадку, коли завантажувальний (розвантажувальний) пройом залишається відкритим впродовж усього часу процесу термообробки (печі непереривної дії), потужність, що необхідна для компенсації теплових втрат через відкриті отвори визначається за формулою

$$P'_{втр,отв} = P_{втр,в} + P_{втр,к}$$

У печах періодичної дії завантажувальні пройоми відкриваються на нетривалий час $\tau_{відкр}$. Для цього випадку

$$P_{втр,отв} = (P_{втр,в} + P_{втр,к}) \cdot \tau_{відкр} / \tau_n$$

де $\tau_{відкр}$, τ_n – тривалість періодів відкритого завантажувального (розвантажувального) пройому та режиму $q_{кор} = const$.

Потужність, необхідна для компенсації теплових втрат печі, в загальному випадку визначається за виразом

$$P_{втр} = k_2 \cdot (P_{\phi} + P'_{втр,отв} \cdot \tau_{відкр} / \tau_n)$$

де k_2 – коефіцієнт запасу на втрати, що не враховані у розрахунку, наприклад на збільшення втрат за рахунок старіння та відхилення властивостей футерування, футерувальні шви, теплові короткі замикання і т.д. На практиці приймають $k_2 = 1,2 \div 1,4$

Втрати через теплові короткі замикання слід враховувати, через оцінку температури на обох кінцях металевго стрижня, що проходить через стінку

$$P_{втр,к.з} = \lambda \cdot \frac{t_{c,вн} - t_{c,зовн}}{l_c} \cdot F_c,$$

де l_c – довжина стрижня, м;

$t_{c,вн}$, $t_{c,зовн}$ – температура відповідно на внутрішньому та зовнішньому кінці стрижня, °С;

F_c – перетин стрижня, м²;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С.

Якщо на протязі технологічного процесу (у період роботи) пройми печі знаходяться у закритому стані до кінця технологічного циклу, потужність для компенсації теплових втрат можна прийняти рівною тепловим втратам через футерування печі із врахуванням збільшення втрат за рахунок старіння та відхилення властивостей футерування, футерувальні шви, теплові короткі замикання і т.д., які, при інженерних розрахунках, можуть бути прийняті на рівні 20% від корисної потужності печі.

Корисна потужність електропечей визначається теплотою, яка сприймається виробом, що треба обробити у процесі нагріву, у режимі $q_{кор} = const$ можна визначити як

$$P_{кор} = q_{кор} \cdot F = C \cdot M \cdot (t_k - t_n) / \tau_n,$$

де $q_{кор}$ – густина теплового потоку,

F – поверхня виробу, що підлягає обробці, м^2 ;
 C – питома теплоємність матеріалу виробу, $\text{Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$;
 M – маса виробу, кг ;
 t_n – початкова температура виробу, $^\circ\text{C}$;
 t_k – кінцева температура виробу, $^\circ\text{C}$;
 τ_n – тривалість нагріву, с .

Усталена потужність електропечі визначається за формулою

$$P_y = k_1 \cdot P_{\text{спож}},$$

де $P_{\text{спож}}$ – потужність, що споживається ЕПО при заданому режимі термообробки, Вт ;

k_1 – коефіцієнт надлишку потужності (коефіцієнт запасу), який враховує поступове збільшення, в наслідок окислення, опору нагрівальних елементів. Зазвичай $k_1 = 1,1 \div 1,2$ для ЕПО неперервної дії.

Питомі витрати електроенергії розраховуються наступним чином

$$A = P_{\text{спож}} / E$$

де E – продуктивність ЕПО, кг/с .

Продуктивність печі опору визначається як

$$E = M / \tau_u$$

де M – маса одночасного завантаження печі, кг .

Для ЕПО неперервної дії

$$E = L \cdot m / \tau_u$$

де L – довжина електропечі, м ;

m – маса завантаження на ділянці печі довжиною 1 м, кг/м .

Тепловий ККД ЕПО дорівнює

$$\eta_T = \frac{Q_{кор}}{Q_{кор} + Q_{дон} + q_{втр} \cdot \tau_u} = \frac{P_{кор}}{P_{спож}}$$

Завдання для теплового розрахунку електропечі опору

За даними, що наведено у табл.1, необхідно визначити:

1. Тривалість циклу, нагріву та зведений коефіцієнт випромінювання.
2. Споживане тепло та потужність печі.
3. Питомі витрати електроенергії та продуктивність печі.
4. Тепловий коефіцієнт корисної дії.

Таблиця 1.1 – Вхідні дані для теплового розрахунку електропечі опору

Найменування вхідних даних	Завдання									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Найменування виробу, що нагрівається	Алюміній	Мідь	Сталь	Чавун	Ніхром	Алюміній	Мідь	Сталь	Чавун	Ніхром
Маса виробу М, кг	325	405	67	96	89	166	155	406	370	330
Довжина електропечі, L, м	3,5	4,5	1,1	1,6	1,3	1,7	2,4	3,8	3,4	2,9
Початкова температура, $t_{\text{п}}$, °C	23	27	34	42	37	30	20	18	26	29
Кінцева температура $t_{\text{к}}$, °C	900	1200	1010	1000	760	790	895	880	660	1010
Теплове випромінювання об'єкту, що нагрівається, ε_1	0,3	0,7	0,8	0,81	0,8	0,3	0,7	0,8	0,81	0,8
Поверхня виробу, що обробляється F, м ²	2,1	2,3	1,5	1,7	1,6	1,3	1,6	2,4	2,6	1,0
Тривалість витримки, $\tau_{\text{втр}}$, сек	$9 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$21 \cdot 10^4$	$22 \cdot 10^4$	$15 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$
Тривалість охолодження, $\tau_{\text{охол}}$, сек	$1,2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$
Тривалість завантаження-вивантаження, $\tau_{\text{з,в}}$, сек	1200	1250	1300	1360	1450	1100	1350	1600	2000	1850

Продовження табл.1.1

Найменування вхідних даних	Завдання									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Найменування виробу, що нагрівається	Алюміній	Мідь	Сталь	Чавун	Ніхром	Алюміній	Мідь	Сталь	Чавун	Ніхром
Маса виробу М, кг	425	305	167	296	489	66	55	206	170	230
Довжина електропечі, L, м	3,7	4,2	1,8	2,6	2,3	3,7	2,1	3,2	2,4	1,9
Початкова температура, $t_{п}$, °С	26	24	31	42	38	20	22	18	27	23
Кінцева температура $t_{к}$, °С	950	1250	1050	1030	790	760	835	870	650	1040
Теплове випромінювання об'єкту, що нагрівається, ϵ_1	0,3	0,7	0,8	0,81	0,8	0,3	0,7	0,8	0,81	0,8
Поверхня виробу, що обробляється F, м ²	2,7	2,9	1,9	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	2,9	3,0
Тривалість витримки, $\tau_{вир}$, сек	$8 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$6,1 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$	$21 \cdot 10^4$	$16 \cdot 10^4$	$14 \cdot 10^4$	$19 \cdot 10^4$
Тривалість охолодження, $\tau_{охол}$, сек	$1,3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$
Тривалість завантаження-вивантаження, $\tau_{з,в}$, сек	1100	1150	1200	1260	1350	1200	1250	1500	2100	1950

Продовження табл.1.1

Найменування вхідних даних	Завдання									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Найменування виробу, що нагрівається	Алюміній	Мідь	Сталь	Чавун	Ніхром	Алюміній	Мідь	Сталь	Чавун	Ніхром
Маса виробу М, кг	420	300	160	280	480	60	50	200	180	220
Довжина електропечі, L, м	3,6	4,1	1,9	2,2	2,4	3,2	2,4	3,3	2,6	2,1
Початкова температура, $t_{п}$, °С	20	21	30	40	35	22	21	19	28	20
Кінцева температура $t_{к}$, °С	960	1270	1080	1010	710	730	830	840	670	1050
Теплове випромінювання об'єкту, що нагрівається, ϵ_1	0,3	0,7	0,8	0,81	0,8	0,3	0,7	0,8	0,81	0,8
Поверхня виробу, що обробляється F, м ²	2,8	2,7	1,8	1,8	1,7	2,1	2,7	2,6	2,8	3,1
Тривалість витримки, $\tau_{вир}$, сек	$8 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$6,1 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$	$21 \cdot 10^4$	$16 \cdot 10^4$	$14 \cdot 10^4$	$19 \cdot 10^4$
Тривалість охолодження, $\tau_{охол}$, сек	$1,2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$
Тривалість завантаження-вивантаження, $\tau_{з,в}$, сек	1000	1050	1250	1290	1250	1270	1200	1570	2200	1900

Продовження табл.1.1

Найменування вхідних даних	Завдання									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Найменування виробу, що нагрівається	Алюміній	Мідь	Сталь	Чавун	Ніхром	Алюміній	Мідь	Сталь	Чавун	Ніхром
Маса виробу М, кг	320	200	260	180	280	160	150	300	280	320
Довжина електропечі, L, м	3,8	4,3	2,2	2,1	2,3	3,1	2,6	3,5	2,7	2,9
Початкова температура, $t_{п}$, °С	28	26	32	41	31	28	25	26	21	24
Кінцева температура $t_{к}$, °С	990	1170	1180	1080	750	790	890	810	650	1090
Теплове випромінювання об'єкту, що нагрівається, ε_1	0,3	0,7	0,8	0,81	0,8	0,3	0,7	0,8	0,81	0,8
Поверхня виробу, що обробляється F, м ²	2,9	2,8	1,9	1,9	1,8	2,2	2,8	2,7	2,6	3,2
Тривалість витримки, $\tau_{вир}$, сек	$7 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$6,2 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$	$21 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$	$15 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	$18 \cdot 10^4$
Тривалість охолодження, $\tau_{охол}$, сек	$1,1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$
Тривалість завантаження-вивантаження, $\tau_{з,в}$, сек	1200	1050	1250	1290	1250	1270	1200	1570	2200	1900

2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР НАГРІВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПЕЧЕЙ ОПОРУ

Нагрівальні елементи виготовляють з жаростійких матеріалів із високим питомим опором. Розрізняють металеві, металокерамічні та карборундові нагрівальні елементи. Металокерамічні та карборундові нагрівальні елементи застосовують у високотемпературних ЕПО. Металеві нагрівальні елементи – у низькотемпературних. За конструкцією нагрівальні елементи поділяються зигзаг стрічковий, дрововий та спіраль (Рис.2.1). Оптимальною конструкцією нагрівального елемента з точки зору терміну служби є зигзаг дрововий. Але зигзаг через низький електричний опір підключають через понижуючі трансформатори, що призводить до додаткових втрат. Перевагою спіральних нагрівальних елементів є можливість його підключення безпосередньо до цехової електромережі, недоліком – відсутність чітко фіксованого кроку, що може призвести до місцевих перегрівів, замикання витків та виходу зі строю. Принцип дії нагрівачів ЕПО базується на явищі нагріву провідника, який підключено до електричного ланцюга.

Кількість тепла, що виділяється при проходженні електричного струму визначається у відповідності до закону Джоуля-Ленца.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau = U \cdot I \cdot \tau = \frac{U^2}{R} \cdot \tau$$

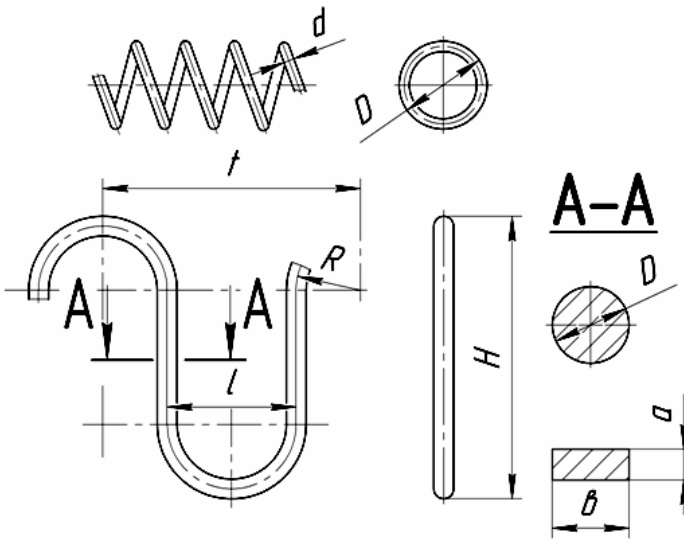
де I – струм, що протікає через нагрівач, А;

R – опір нагрівача, Ом;

U – напруга, яка прикладена до нагрівача, В;

τ – час проходження струму, с.

Теплова енергія з поверхні нагрівача шляхом випромінювання та конвекції передається до виробу, що нагрівається. Потужність, випромінюючого нагрівального елемента з одиниці поверхні називають питомою поверхневою потужністю нагрівача W .



а – дротова спіраль; б – дротовий та стрічковий зигзаг

Рисунок 2.1 – конструкція нагрівальних елементів

Питома поверхнева потужність визначає при заданій температурі нагріву робочу температуру нагрівального елемента, від якою залежить термін їх служби. Під терміном служби розуміють час його роботи при заданій температурі, впродовж якого його струмопровідний перетин зменшується внаслідок окислення на 20%, для металевих – це приблизно 10 тис. годин, для металокерамічних та карборундових – приблизно 2 тис. годин.

Для визначення розмірів та розміщення нагрівальних елементів у камері печі виконують наступний розрахунок.

Розраховують основні електричні величини:

- лінійний струм

$$I_{\text{л}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}},$$

- фазний струм

$$I_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{U_{\phi}},$$

- лінійний електричний опір

$$R_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л}}^2}{P_{\text{н}}},$$

- фазний електричний опір

$$R_{\phi} = \frac{U_{\phi}^2}{P_{\phi}},$$

де $P_{\phi} = P_{\text{н}}/3$.

$P_{\text{н}}$ – номінальна потужність печі, кВт;

$U_{\text{л}}$ – лінійна напруга, В;

U_{ϕ} – фазна напруга, В.

За робочою температурою печі (максимальна температура нагріву виробу) обирається матеріал нагрівального елемента [5]. Робоча температура нагрівача приймається на 50 – 200 °С вищою за температуру виробу

Для обраного матеріалу із врахуванням його робочої температури і температури нагріву виробу розраховують питому поверхневу потужність ідеального нагрівального елемента

$$W_{i\partial} = C_{3\partial} \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{вир}}),$$

де $t_{\text{н}}$, $t_{\text{вир}}$ – відповідно температура нагрівача та виробу, °С;

$C_{3\partial}$ – зведений коефіцієнт випромінювання

$$C_{36} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_H} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{вир}} - 1 \right)}.$$

Розраховують питому поверхневу потужність реального нагрівального елемента

$$W = C_{ef} \cdot W_{id}$$

де $C_{ef} = 0,3 \div 0,8$ – коефіцієнт ефективності випромінювання, що залежить від розмірів нагрівальних елементів, їх розташування в печі та умов теплопередачі.

Діаметр круглого перетину (спіраль чи дрововий зигзаг) розраховується як

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_{\phi}^3 \cdot \rho_{нагр}}{\pi^2 \cdot U_{\phi}^2 \cdot W}}$$

де $\rho_{нагр}$ – питомий електричний опір матеріалу нагрівача у гарячому стані, Ом·м;

$$\rho_{нагр} = \rho_{20} \cdot \alpha$$

де α – коефіцієнт, що враховує зміну електричного опору нагрівального елемента внаслідок зміни температури

Обирається найближчий діаметр із наступної шкали, мм 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,2; 3,6; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20.

Для нагрівачів прямокутного перетину задаються співвідношенням сторін $b/a = m$ та визначають товщину полоси

$$a = \sqrt{\frac{P_{\phi}^2 \cdot \rho_{нагр}}{2m(m+1)U_{\phi}^2 \cdot W_{\phi}}}$$

Обирається найближчий стандартний перетин нагрівального елемента з наступної шкали, мм 2×10; 1,5×15; 2×15; 2,2×20; 2,5×20; 3×20; 2,2×25; 2,5×25; 3×25; 2,2×30; 2,5×30; 3×30; 2,2×36; 2,5×36; 3×36; 2,2×40; 2,5×40; 3×40.

Визначається довжина нагрівального елемента

$$L_{\phi} = \frac{R \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho_{нагр}} = \frac{\pi \cdot U_{ср}^2 \cdot d^2}{4 \cdot P_{\phi} \cdot \rho_{нагр}}$$

Чи довжина стрічки (або стрижня) на фазо гілку

$$L_{\phi} = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{U_{ср}^2 \cdot m \cdot a^2}{P_{\phi} \cdot \rho_{нагр}}$$

Визначається опір нагрівального елемента

$$R_{\phi} = \frac{\rho \cdot L_{\phi}}{S},$$

та його маса

$$G = S \cdot L_{\phi} \cdot \gamma$$

де γ – густина матеріалу нагрівача, кг/м³.

Завдання для розрахунку нагрівальних елементів електропечей опору

За даними, що наведено у табл.2, необхідно визначити:

1. Основні електричні величини.
2. Параметри нагрівального елемента.
3. Масу.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані для розрахунку нагрівальних елементів печі опору

Найменування вхідних даних	Завдання									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Потужність печі, P_n , кВт	21,6	1,8	1,65	1,55	1,7	5,5	9,3	13,1	10,9	8,6
Конструкція нагрівача	*	**	***	*	**	***	*	**	***	*
Напруга мережі, U_n , В	380									
Робоча температура в печі T_n , °С	450	150	560	620	750	920	1110	1200	700	900
Схема з'єднання нагрівачів	Y	D	Y	D	Y	D	Y	D	Y	D
$m=a/b$	6	6	7	5	5	6	8	12	11	8
Найменування вхідних даних	Завдання									
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Потужність печі, P_n , кВт	23,6	5,8	6,65	3,55	2,7	7,5	9,8	15,1	12,9	9,6
Конструкція нагрівача	*	**	***	*	**	***	*	**	***	*
Напруга мережі, U_n , В	380									
Робоча температура в печі T_n , °С	470	180	660	610	780	900	1210	1100	800	700
Схема з'єднання нагрівачів	Y	D	Y	D	Y	D	Y	D	Y	D
$m=a/b$	6	6	7	5	5	6	8	12	11	8

Продовження табл. 2.1.

Найменування вхідних даних	Завдання									
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Потужність печі, P_n , кВт	20,6	6,8	4,65	8,55	3,7	7,5	11,3	12,1	13,9	18,6
Конструкція нагрівача	*	**	***	*	**	***	*	**	***	*
Напруга мережі, U_n , В	380									
Робоча температура в печі T_n , °С	450	190	510	680	710	950	1050	1000	600	1300
Схема з'єднання нагрівачів	Y	D	Y	D	Y	D	Y	D	Y	D
$m=a/b$	5	7	8	6	6	7	9	10	12	7
Найменування вхідних даних	Завдання									
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Потужність печі, P_n , кВт	13,6	15,8	7,65	8,55	2,7	8,5	8,8	14,1	11,9	12,6
Конструкція нагрівача	*	**	***	*	**	***	*	**	***	*
Напруга мережі, U_n , В	380									
Робоча температура в печі T_n , °С	550	250	700	600	820	950	1250	1000	900	1000
Схема з'єднання нагрівачів	Y	D	Y	D	Y	D	Y	D	Y	D
$m=a/b$	5	5	6	7	7	8	7	11	12	7

3 РОЗРАХУНОК ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Основним параметром, що характеризує ДСП, прийнято вважати її номінальну ємність. За кордоном іноді як такого параметра приймають діаметр кожуха печі, вважаючи, що в залежності від місцевих умов фактичне завантаження змінюється в широких межах у порівнянні з номінальною. Однак при проектуванні печей не можна виходити з місцевих умов, і тому, як правило, встановлюють залежність між ємністю печі та її електричними параметрами. При заданій ємності печі ці параметри - потужність і ступені напруги пічного трансформатора, реактивність контуру, а також геометричні параметри визначають її режим і основні показники роботи.

Вибір основних електричних параметрів дугових печей складний і неоднозначний. Печі працюють в самих різних умовах, що проводяться в них технологічні процеси також можуть бути різними. Основні показники роботи - продуктивність (добова або річна) та питома витрата електроенергії - залежать від багатьох факторів, і дати аналітичний вираз для оптимальних значень цих показників, придатне для інженерних розрахунків, не представляється можливим. Тому визначення основних параметрів дугових печей доводиться засновувати на даних практики роботи діючих печей і експериментальних формулах, виведених на основі обробки статистичних даних.

При проектуванні в першу чергу необхідно вибрати номінальну потужність пічного трансформатора. Вибір потужності електропічного трансформатора виконується на підставі енергетичного балансу печі у період розплавлення

$$W_{el} = G' \cdot W ,$$

де G' – маса необхідного для завантаження скрапу

$$G' = 1,05 \cdot G$$

За відомою необхідною витратою електроенергії на розплавлення W_{el} та прийнятою за технічними вимогами до печі

тривалістю розплавлення під струмом $\tau_{p,m}$ визначається середня потужність в період розплавлення:

$$P_{сер} = W_{ел} / \tau_{p,m}$$

Для прийнятого коефіцієнту використання потужності в період розплавлення K_g визначається необхідна максимальна потужність періоду розплавлення:

$$P_{max} = P_{сер} / K_g$$

де $K_g = 0,75 \div 0,9$

Задаючись середньозваженим коефіцієнтом потужності $\cos\varphi$ в період розплавлення визначають повну потужність пічного трансформатору

$$S_{mp} = P_{max} / \cos\varphi_e$$

де $\cos\varphi_e = 0,7 \div 0,8$

За отриманим значенням повної потужності пічного трансформатора обирають найбільш підходящий трансформатор [1, 5]

Попереднє значення максимальної вторинної напруги визначається за формулою

$$U'_{2\phi} = U_{2max} \sqrt{S_{max.mp} / S_{н.mp}}$$

та відповідно вторинний струм

$$I'_{2\phi} = S_{max.mp} / \sqrt{3} U'_{2\phi}$$

Виходячи із величини напруги короткого замикання U_k визначають попереднє розрахункове значення індуктивного опору X_m електропічного трансформатору

$$X_T = (U_{2\phi} \cdot U_{\kappa}) / (\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{2\phi})$$

Індуктивність трансформатору розраховується за формулою

$$L_T = X_T / \omega$$

де ω – кутова частота

Відповідно до значення вторинного струму трансформатору обираються матеріали та перетин прямолінійної та вигнутої ділянки [6].

Визначення індуктивності короткої мережі за її окремими ділянками із врахуванням форми та розмірів поперечного перетину провідників, взаємного розташування, а також співвідношення значень та фаз протікаючи у них струмів виконують за [6, 7].

Власна індуктивність провідника по дузі окружності та індуктивний опір визначаються відповідно

$$L_B = 2 \cdot 10^{-9} \{ R [(\ln 8 \cdot R - 2) \Theta + 4 \cdot \sin 0,5 \Theta - 4J] - l \cdot \ln g \}$$

$$X_B = L_B \cdot \omega$$

Власна індуктивність та індуктивний опір прямолінійного провідника визначаються відповідно

$$L_{PP} = 2 \cdot l \cdot (\ln 2l/g - 1) \cdot 10^{-9}; \quad X_{PP} = L_{PP} \cdot \omega$$

де l – довжина провідника, см;

g – середньо геометрична відстань площі поперечного перерізу провідника від самої себе, см

Відповідно до розрахункових значень струмів пічного трансформатору, згідно з [5, 6] визначають діаметр електроду d_{el} , середню довжину від нижнього кінця електроду до середини корпусу електротримача l_p та діаметр розпаду електроду d_p .

Фактичне зменшення діаметру електроду в результаті обсмоктування визначається як

$$d'_{el} = 0,9 \cdot d_{el}$$

Визначається власна індуктивність електроду

$$L_{el} = F \cdot l_p$$

де F – функція, що залежить від середньо геометричної відстані площі поперечного перерізу електроду від самої себе [6]

$$q_n = 0,779 \cdot d'_{el} / 2$$

Взаємна індуктивність пари електродів

$$M_{12} = M_{13} = -0,5 \cdot F \cdot l_p$$

де F – функція, що залежить від середньо геометричної відстані площ двох електродів [6]

$$q_{12} = q_{13} = 0,866 \cdot d_p$$

Відповідно сумарна індуктивність електроду дорівнює

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_{II} + (M_{12} + M_{13})$$

Індуктивність пічного контуру та індуктивний опір розраховуються відповідно як

$$L_{\text{конт}} = L_T + L_{PP} + L_B + L_1; \quad X_{\text{конт}} = L_{\text{конт}} \cdot \omega$$

Індуктивний опір пічного контуру в експлуатаційному режимі розраховується за наступним виразом

$$X_e = K_e X_{кз}$$

де K_e – коефіцієнт, що залежить від величини $\cos \varphi_e$ [2]

Напруга пічного трансформатору, що необхідна для забезпечення відповідного режиму роботи печі у період розплавлення

$$U_2 = \sqrt{S_{n,mp} \cdot X_e / \sin \varphi_e}$$

$$\text{де } \sin \varphi_e = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_e}$$

та відповідно вторинний струм трансформатору

$$I_2 = S_{n,mp} \cdot 10^3 / \sqrt{3} \cdot U_2$$

За отриманими значеннями струму та напруги уточнюються величина індуктивного опору трансформатору та індуктивність

$$X_T = \frac{U_{2\phi} \cdot U_K \%}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_2}; L_T = X_T / \omega$$

Індуктивний опір короткого замикання пічної петлі та струм короткого замикання установки дорівнюють

$$X_\kappa = X_e / \cos \varphi_e; I_\kappa = U_{2\phi} / Z_\kappa = U_{2\phi} / X_\kappa$$

Завдання для розрахунку дугової сталеплавильної печі

За даними, що наведено у табл.3, необхідно визначити:

1. Завантажувальну здатність печі.
2. Потужність електропічного трансформатору.
3. Середню потужність в період розплавлення.
4. Повну потужність пічного трансформатора.
5. Вибрати стандартну потужність трансформатору за довідником.
6. Визначити попередні вторинну напругу і струм
7. Визначити попередні значення індуктивності та індуктивного опору трансформатору.
8. Виконати розрахунок електричних параметрів короткої мережі.
9. Вибрати електрод та виконати розрахунок його параметрів.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані для розрахунку сталеплавильної печі

Найменування вхідних даних	Завдання									
	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Ємність печі G, т	190	6	175	10	200	15	160	25	150	180
Тривалість періоду $\tau_{p,t}$, год	4,6	2,5	3,3	2,7	5,0	3,1	4,4	3,4	4,2	4,6
Норма витрати енергії ω , кВт · ч/т	490	200	460	210	500	215	450	230	430	470
Коефіцієнт потужності в експлуатаційному режимі $\cos\varphi_e$	0,87	0,7	0,84	0,71	0,9	0,75	0,78	0,77	0,8	0,83
Найменування вхідних даних	Завдання									
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Ємність печі G, т	14	145	17	155	18	165	22	170	26	170
Тривалість періоду $\tau_{p,t}$, год	3,7	3,6	2,5	4,0	3,2	3,8	2,4	3,8	2,9	4,7
Норма витрати енергії ω , кВт · ч/т	235	390	240	405	250	415	260	425	270	455
Коефіцієнт потужності в експлуатаційному режимі $\cos\varphi_e$	0,76	0,74	0,8	0,86	0,82	0,84	0,85	0,89	0,87	0,81

Продовження табл.3.1

Найменування вхідних даних	Завдання									
	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
Ємність печі G, т	195	8	185	12	190	18	170	30	155	185
Тривалість періоду $\tau_{p,t}$, год	4,5	2,9	3,5	2,8	5,2	3,3	4,6	3,8	4,3	4,7
Норма витрати енергії ω , кВт · ч/т	480	220	470	220	470	235	480	240	440	480
Коефіцієнт потужності в експлуатаційному режимі $\cos\varphi_e$	0,86	0,73	0,84	0,74	0,87	0,77	0,8	0,79	0,82	0,84
Найменування вхідних даних	Завдання									
	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
Ємність печі G, т	16	155	20	145	28	175	26	180	24	160
Тривалість періоду $\tau_{p,t}$, год	3,8	3,8	2,8	4,0	3,2	4,2	2,8	3,9	2,9	4,3
Норма витрати енергії ω , кВт · ч/т	245	400	250	385	290	445	240	405	280	425
Коефіцієнт потужності в експлуатаційному режимі $\cos\varphi_e$	0,78	0,76	0,78	0,83	0,84	0,86	0,82	0,86	0,83	0,82

Таблиця 3.2 – Вибір варіантів та завдань

Вар	Завдання	Вар	Завдання	Вар	Завдання	Вар	Завдання
00	1,41,81	25	26,66,106	50	11,61,111	75	36,46,96
01	2,42,82	26	27,67,107	51	12,62,112	76	37,47,97
02	3,43,83	27	28,68,108	52	13,63,113	77	38,48,98
03	4,44,84	28	29,69,109	53	14,64,114	78	39,49,99
04	5,45,85	29	30,70,110	54	15,65,115	79	40,50,100
05	6,46,86	30	31,71,111	55	16,66,116	80	1,61,91
06	7,47,87	31	32,72,112	56	17,67,117	81	2,62,92
07	8,48,88	32	33,73,113	57	18,68,118	82	3,63,93
08	9,49,89	33	34,74,114	58	19,69,119	83	4,64,94
09	10,50,90	34	35,75,115	59	20,70,120	84	5,65,95
10	11,51,91	35	36,76,116	60	21,71,81	85	6,66,96
11	12,52,92	36	37,77,117	61	22,72,82	86	7,67,97
12	13,53,93	37	38,78,118	62	23,73,83	87	8,68,98
13	14,54,94	38	39,79,119	63	24,74,84	88	9,69,99
14	15,55,95	39	40,80,120	64	25,75,85	89	10,70,100
15	16,56,96	40	1,51,101	65	26,76,86	90	11,71,101
16	17,57,97	41	2,52,102	66	27,77,87	91	12,72,102
17	18,58,98	42	3,53,103	67	28,78,88	92	13,73,103
18	19,59,99	43	4,54,104	68	29,79,89	93	14,74,104
19	20,60,100	44	5,55,105	69	30,80,90	94	15,75,105
20	21,61,101	45	6,56,106	70	31,41,91	95	16,76,106
21	22,62,102	46	7,57,107	71	32,42,92	96	17,77,107
22	23,63,103	47	8,58,108	72	33,43,93	97	18,78,108
23	24,64,104	48	9,59,109	73	34,44,94	98	19,79,109
24	25,65,105	49	10,60,110	74	35,45,95	99	20,80,110

Примітка: приклад визначення варіанту: номер з/кн №234652 за варіантом 52 розв'язати завдання під номером под номером 13, 63, 113 за табл.1 – 3.

ЛІТЕРАТУРА (ОСНОВНА)

1. «Электротехнический справочник» т.1, под ред. П.Г. Грудинского и др., М.: Энергия, 1974.
2. «Электрические печи сопротивления и дуговые печи», под ред. М.Б.Гутмана. М.: Энергоатомиздат, 1983
3. Болотов А.В., Шепель Г.А «Электротехнологические установки» (учебник для вузов). М.: «Высшая школа», 1988
4. Фомичев Е.П. «Электротехнологические промышленные установки» (учебное пособие для вузов) Киев, «Высшая школа», 1979
5. Электротехнологические промышленные установки / Под ред. А. Д. Свенчанского. – М. : Энергоиздат, 1982. – 400 с.
6. Данцис Я.Б., Жиллов Г.М. Короткие сети и электрические параметры дуговых сталеплавильных печей. – М. Металлургия, 1987 – 320 с.
7. Ярымбаш Д. С. Розрахунок параметрів головних шинних пакетів секцій печей графітації змінного струму [Електронний ресурс]: навчальний посібник / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш – Електрон. дані. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. ISBN 978-617-529-171-9 Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/2682>

(ДОДАТКОВА)

8. Ярымбаш Д. С. Анализ энергоэффективности конструкции торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации / Д. С. Ярымбаш, А. М. Олейников // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 26-34.
9. Зиновкин В.В. Моделирование автоматизированного электропривода дозатора технологической линии приготовления газобетона / Зиновкин В.В., Кулинич Э.М. // Електротехніка та електроенергетика.- 2009. - №2.- С. 49-53
10. Безотосный, В. Ф. Учет энергетических факторов при расчете намагнитченности ферромагнитных материалов / В.Ф.Безотосный, Э.В.Власенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2004. – № 1. – С.13–17.
11. Андриенко П. Д. Преобразователи частоты для электропередачи железнодорожного электротранспорта / П. Д. Андриенко, В. Д. Лобода, А. В. Мищенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2001. – № 1. –

С. 55–58.

12. Міщенко Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів / Т. М. Міщенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 19-28

13. Yarymbash D.S. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads / D. S. Yarymbash, A. M. Oleinikov // Russian Electrical Engineering. 2015. Т. 86. № 2. С. 86–92.

14. Андриенко П.Д. Применение методов математического моделирования для определения параметров индуктора / П.Д. Андриенко, И.М. Коцур, Д.С. Ярымбаш // Вестник СевНТУ – Севастополь, 2008. – Вып. 88. – С. 117 – 120.

15. Андриенко П.Д. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве мундштука пресса / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог, 2008. – Вып. 92. – С. 163 – 167.

16. Андриенко П.Д. Особенности моделирования температурного состояния технологической системы как объекта управления / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Электромашинобудування та електрообладнання, 2006. №66 – С. 291–293.

17. Андриенко П.Д. Повышение энергоэффективности индуктора калибра мундштука пресса / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність. – 2007. – Ч. 5. – С. 85 – 88.

18. Андриенко П.Д. Повышение энергоэффективности при автоматизированном управлении индукторами пресса / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). 2007. – С. 212 – 213.

19. Андриенко П.Д. Усовершенствование и оптимизация режимов электрообогрева мундштука пресса для производства заготовок подовых и доменных блоков / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Харків, 2008. – № 30. – С. 497 – 499.

20. Килимник И.М. Повышение эффективности обработки информации при регистрации контролируемых параметров в системах автоматического управления / И.М. Килимник, Д.С. Ярымбаш //

Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2007. – № 1. – С. 68 – 73.

21. Килимник И.М. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука прессы / И.М.Килимник, Д.С. Ярымбаш // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – №4(45). – Ч. 1. – С. 53 – 55.

22. Ярымбаш Д.С. Повышение эффективности управления режимами электрического обогрева при прессовании заготовок подовых блоков / Д.С. Ярымбаш, А.В. Тютюнник, О.Л. Загрудный // Электротехника и электроэнергетика. – Запорожье: ЗНТУ, 2006. – № 2. – С. 56 – 60.

23. Ярымбаш Д.С. Моделирование температурных режимов электротехнологической системы «индукторы - мундштук» на подготовительном этапе тура прессования / Д.С. Ярымбаш, А.В. Тютюнник, О.Л. Загрудный // Электротехника и электроэнергетика. – Запорожье: ЗНТУ, 2006. – № 1. – С. 56 – 60.

24. Ярымбаш Д. С. Повышение эффективности обработки данных регистрации активной мощности электротехнических комплексов графитации / Д. С. Ярымбаш // Сборник научных трудов SWorld Выпуск 3. Том 7. Иваново: МАРКОВА АД, 2013. – С. 87 – 93.

25. Ярымбаш Д. С. Анализ электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах Ачесона / Д. С. Ярымбаш // Энергоэкономия. Энергетика. Энергоаудит, 2014. №6 – С. 11 – 21.

26. Ярымбаш Д.С. Анализ энергоэффективности торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – № 2. – С. 23 – 30.

27. Ярымбаш Д.С. Влияние расположения заготовок электродов на распределение электрической мощности нагрева в керне печи ачесона / Д.С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. №2. – С. 36 – 43.

28. Ярымбаш Д.С. Выбор критерия энергоэффективности боковых шинных пакетов мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність – 2012. С.

29. Ярымбаш Д.С. Идентификация параметров электродинамической стойкости короткой сети мощных электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д.С.

Ярымбаш // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. Вип. 3/2012 (19). – С. 487 – 490.

30. Ярымбаш Д.С. Идентификация температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений керна в процессе графитации / Д.С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2014. №2. – С. 66 – 70.

31. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2012. №1. – С. 49 – 54.

32. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров шихтованных шинных пакетов мощных коротких сетей / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 55 – 61.

33. Ярымбаш Д.С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока / Д.С. Ярымбаш, // Науковий вісник НГУ – 2015. – №3. – С.95–102.

34. Ярымбаш Д.С. Исследование электромагнитных и электротепловых процессов в области торцевых шинных пакетов печей графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. №11. – С. 60–68.

35. Ярымбаш Д.С. Кинестатика и динамика сенсорно-информационной подсистемы регулируемого электротехнического комплекса печи графитации / Д.С. Ярымбаш, И.Д. Труфанов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2005. - №3. – С. 81 –83.

36. Ярымбаш Д.С. Метод частотной адаптации уравнений Максвелла для переменного тока к рекуррентным уравнениям в формулировках для постоянного тока / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Автоматизація процесів та управління. – Севастороль. 2014. – С. 203 – 206.

37. Ярымбаш Д.С. Особенности идентификации электрических параметров контура печи графитации переменного тока методами полевого моделирования и оптимизации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр. Вип. 15/2014. – Севастороль. 2014. – С. 108 – 112.

38. Ярымбаш Д.С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика. – 2005. - №1. – с. 74 – 76.

39. Ярымбаш Д.С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник О.В. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006, Вип. 3/2006(38), – С. 53 – 55.

40. Ярымбаш Д.С. Особенности моделирования электромагнитного поля в зоне подключения боковых шинных пакетов к токоподводам печи графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Электротехника. – М.: Знак. – №2. 2015. – С. 44 – 50.

41. Ярымбаш Д.С. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука прессы / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету – 2007. – №4(45) Частина 1. – С. 53 – 55.

42. Ярымбаш Д.С. Особенности обработки данных регистрации электрических параметров электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2014. №2 – С. 59 – 65.

43. Ярымбаш Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. №2. – С. 36 – 43.

44. Ярымбаш Д.С. Особенности оптимизации электрических режимов графитации / Д.С. Ярымбаш // Электротехнические и компьютерные системы. – Одесса, 2014. – №15 (91). – С. 215 – 219.

45. Ярымбаш Д.С. Особенности распределения электрической мощности нагрева в кернах печи графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2013. – вип.. 37. – С. 94 – 100.

46. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета токов короткого замыкания мощных электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. - 2012. - № 1. - С. 23-30.

47. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи

графитации / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Механіка. Енергетика. Екологія. 2014. – С. 131 – 136.

48. Ярымбаш Д. С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Електротехніка і електроенергетика. – 2011. – №1. – С. 64–69.

49. Ярымбаш Д. С. Оценка погрешности сенсоров тока автоматизированной системы управления технологическим процессом графитации / Д.С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – № 03(79) – 2011

50. Ярымбаш Д.С. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність. – 2011, С. 229–233.

51. Ярымбаш Д. С. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса графитации при модернизации боковых шинных пакетов мощных печей графитации / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 132/2012. Серія: Механіка, енергетика, екологія. 2012. С. 93–100.

52. Ярымбаш Д. С. Применение адаптированных схемных моделей для расчета токов короткой сети мощных электротехнических комплексов / Д. С. Ярымбаш // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. №2. – С. 72–76.

53. Ярымбаш Д. С. Применение адаптированных схемных моделей для расчета токов короткой сети мощных электротехнических комплексов / Д. С. Ярымбаш // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2012. №2 – С. 59–65.

54. Ярымбаш Д. С. Численно-полевой анализ электромагнитных и электротепловых процессов в шинных пакетах печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Ползуновский вестник. – 2013. – №4–2. – С. 216–222.

55. Ярымбаш С. Т. Идентификация характеристик системы резистивно-индукционного нагрева для транспортировки хлора методами математического моделирования / С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш, Д. А. Литвинов // Матеріали МНТК «ПАЭП. Теорія і практика». – Харьков, 2010. – С. 320–324.

56. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров торцевых ошинок печей сопротивления прямого действия / Д.С.

Ярымбаш, А. М. Олейников, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Вестник НТУ «ХПИ», 2013. №36. – С. 466–470.

57. Андриенко П.Д. Преобразователи частоты для электропередачи железнодорожного электротранспорта / П.Д. Андриенко, В.Д. Лобода, А.В. Мищенко // Электротехника та електроенергетика. – 2001. - №1. – С. 55-58.

58. Ярымбаш Д. С. Особливості розподілення магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Электротехника та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 5-12

59. Ярымбаш Д. С. Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Электротехника та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 12-17.

60. Ярымбаш Д. С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика. – 2015. – N 2. - С. 65-70.

61. Верещаго Е.Н. Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко // Электротехника та електроенергетика. – 2013. - №2. – С. 40-46.

62. Малюшевская А.П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах / АП Малюшевская, АЯ Дмитришин, СО Топоров // Электротехника та електроенергетика – 2015. - №1. – С. 21-25.

63. Коцур М.И. Оценка теплового состояния изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором с модифицированной системой импульсного регулирования / М.И. Коцур, // Электротехника та електроенергетика. – 2013 – №1 – С.31-36.

64. Коцур М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков / М. И. Коцур, // Электротехника та електроенергетика. – 2014 – №1 – С. 32 – 36.

65. Ярымбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43 – 50.