

## Wpływ parametrów instalacji zasilania pieca łukowego na wskaźniki elektroenergetyczne procesu wytopu stali

**Streszczenie.** W artykule porównano parametry elektryczne modernizowanej instalacji pieca łukowego AC dla dwóch różnych mocy transformatora piecowego oraz zmniejszonej reaktancji dławika szeregowego w torze zasilania średniego napięcia. Wyznaczono parametry oraz charakterystyki systemu zasilania pieca. Po modernizacji przeprowadzono racjonalizację stanów pracy pieca łukowego. Celem było uzyskanie maksymalnej mocy czynnej pobieranej przez piec w warunkach istniejących ograniczeń prądowych, przy zachowaniu stabilnej pracy w stanach dynamicznych. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono wskaźniki elektroenergetyczne charakteryzujące efektywność procesu wytopu.

**Abstract.** Electric indices of a the modernized AC arc furnace system are compared for two furnace transformers of different power and reduced reactance of the serial reactor in medium voltage power line. Parameters and characteristics of the power system of the arc furnace are determined. Improvement of the arc furnace operating conditions after the modernization has been performed. The aim was to obtain the maximum active power consumed by the furnace and preserve its stable operation in dynamic states taking into account existing current limitations. The electric power indices that characterize efficiency of the melting process were determined on the basis of experiments. (The influence of parameters of the arc furnace supply system on electrical power indices of steel melting process).

**Keywords:** AC arc furnace, furnace transformer, nonlinear load, electric power indices

**Słowa kluczowe:** piec łukowy AC, transformator piecowy, nieliniowe obciążenie, wskaźniki elektroenergetyczne

### Wstęp - wskaźniki elektroenergetyczne procesu wytopu stali

Przemysł stalowy należy do tych sektorów gospodarki, które zużywają największe ilości energii elektrycznej. Współcześnie w procesach metalurgicznych wytopu stali pochodzącej ze złomu powszechnie wykorzystuje się elektryczne piece łukowe AC. Istotne wskaźniki charakteryzujące proces wytopu stali i wpływające na jego efektywność z punktu widzenia elektroenergetycznego to:

- 1) wskaźnik zużycia energii elektrycznej na tonę stali  $W_{EE}$ ;
- 2) czas wytopu dla określonej masy wsadu liczony od spustu do spustu (TAP to TAP)  $t_{TAP-TAP}$ ;
- 3) efektywny czas wytopu  $t_e$  tzn. czas pracy z prądem łuku;
- 4) zależność pobieranej mocy czynnej  $P$  od prądu pieca  $I$ ;
- 5) wskaźnik  $Q/P$  - mocy biernej w relacji do mocy czynnej.

Przy projektowaniu instalacji zasilającej piec łukowy istotny jest dobór mocy urządzeń układu zasilania w relacji do znamionowej masy wsadu i sposób przyłączenia do systemu elektroenergetycznego. Rozwiązanie konstrukcyjne instalacji zasilania pieca łukowego prądu przemiennego zależy od następujących parametrów [1]:

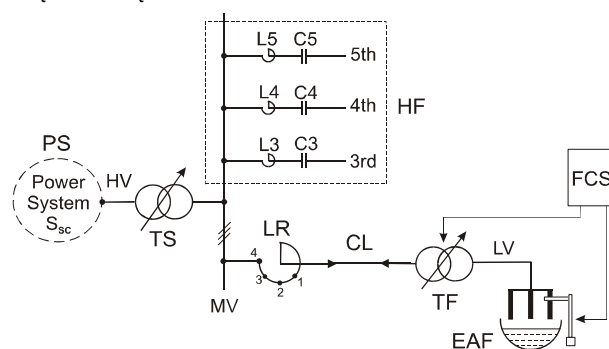
- pojemności pieca determinującej moce pozorne transformatorów piecowego i sieciowego,
- mocy zwarcia  $S_{sc}$  w miejscu przyłączenia instalacji do systemu elektroenergetycznego,
- założonego czasu i technologii wytopu,
- stopnia i rodzaju kompensacji mocy biernej,
- dopuszczalnej zawartości wyższych harmonicznych.

Właściwy dobór parametrów elektrycznych instalacji zasilania pieca ma wpływ na stopień jego oddziaływania na sieć elektroenergetyczną oraz charakterystyki eksploatacyjne: wskaźnik zużycia energii elektrycznej na tonę stali i efektywny czas topienia złomu. Istotne znaczenie dla efektywności procesu wytopu ma również układ regulacji długości i prądu łuku realizowany poprzez jednoczesne sterowanie ruchem elektrod i wyborem zaczepu uzwojenia transformatora piecowego [2].

### Układ zasilania modernizowanego pieca łukowego

Na rysunku 1 przedstawiono schemat systemu zasilania pieca łukowego prądu przemiennego EAF zainstalowanego w hucie stali. Doprowadzenie energii elektrycznej do instalacji pieca następuje z systemu elektroenergetycznego o mocy zwarciowej  $S_{sc}$  za pośrednictwem transformatora sieciowego TS zasilającego rozdzielnię średniego napięcia.

Transformator piecowy TF konwertora elektrycznego podłączony jest do szyn rozdzielni poprzez dławik liniowy LR i linię kablową CL.



Rys. 1. Układ zasilania pieca łukowego prądu przemiennego

Piec łukowy AC ze względu na charakterystykę napięciowo-prądową łuku jest nieliniowym niespokojnym odbiorem elektroenergetycznym dużej mocy [3,4,5]. Generuje on widmo ciągłe harmonicznych prądu [6], przy czym największy wpływ mają harmoniczne rzędu 2, 3, 5 i 7 względem częstotliwości sieci zasilającej [3,5,7]. Relatywnie niski jest wskaźnik  $PF$  (ang. Power Factor), co ma miejsce szczególnie na początku procesu wytopu stali, przy jednoczesnym występowaniu gwałtownych zmian poboru mocy czynnej i biernej [4,5,7]. Dlatego w rozdzielni średniego napięcia umieszczono pasywne filtry wyższych harmonicznych HF ograniczające zawartości wyższych harmonicznych prądu, a dla częstotliwości sieci zasilającej  $f_s = 50$  Hz stanowiące układ kompensacji mocy biernej.

### Optymalizacja parametryczna toru średniego napięcia instalacji zasilania pieca łukowego

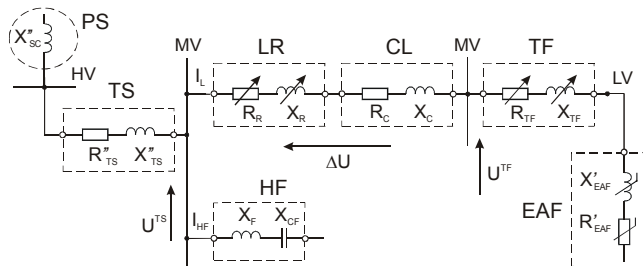
Racjonalizacja stanów pracy pieca łukowego polega na takim prowadzeniu procesu wytopu, aby uzyskać dużą wydajność przy odpowiednio wysokim współczynniku mocy  $tg\varphi$  i sprawności elektrycznej pieca  $\eta_e$  [1]. Wiąże się to z wyborem optymalnego punktu pracy pieca, przy czym praktyczna realizacja tego zagadnienia wymaga modyfikacji parametrów elektrycznych toru zasilania pieca z uwzględnieniem ograniczeń technicznych i technologicznych [2].

Schemat zastępczy układu zasilania odniesiony do poziomu średniego napięcia dla instalacji pieca łukowego przedstawiono na rysunku 2. Skrócenie czasu wytopu i

zwiększenie intensywności procesu topienia wymaga podniesienia napięcia na transformatorze piecowym TF. Można to uzyskać przez zmianę wartości parametrów w torze średniego napięcia w następujący sposób:

- poprzez regulację zaczeptów na transformatorze sieciowym TS i podniesienie napięcia w torze zasilania, co ze względu na żywotność izolacji nie jest zalecane [1],
- w wyniku zmniejszenia impedancji toru zasilania transformatora TF przez ograniczenie reaktancji dławika LR w wyniku przełączenia zaczeptów.

Wartości parametrów dławika szeregowego LR dla poszczególnych zaczeptów zestawiono w tabeli 1.



Rys.2. Schemat zastępczy toru średniego napięcia instalacji zasilania pieca łukowego

Tabela 1. Parametry dławika liniowego LR

Zaczep $i =$	%	$X_R [\Omega]$	$R_R [m\Omega]$	$L_R [mH]$	$Q_R [-]$
u5-x	100	2,60	16,9	8,28	154
u4-x	80	2,10	14,2	6,69	148
u3-x	60	1,53	11,3	4,86	135
u2-x	40	1,05	8,7	3,35	121
u1-x	20	0,53	5,5	1,70	97
u-x	BYPASS	-	-	-	-

Za najbardziej efektywny sposób poprawy wskaźników elektroenergetycznych procesu wytopu, bez dodatkowych nakładów inwestycyjnych, należy uznać zmniejszenie reaktancji dławika powietrznego LR przez zmianę zaczeptu u-i-x. Dalsze zwiększenie intensywności procesu topienia poprzez zmniejszenie impedancji toru zasilania pieca wiąże się w pierwszej kolejności z wymianą transformatora piecowego TF na jednostkę o większej mocy przejściowej.

### Ocena wpływu zmiany impedancji dławika LR w torze zasilania pieca łukowego

W celu ustalenia wpływu zmian reaktancji dławika liniowego na charakterystyki pieca oraz wskaźniki elektroenergetyczne wykonano w trakcie prowadzenia wytopów ciągły pomiar przebiegów napięć i prądów w torze zasilania średniego napięcia przed dławikiem LR oraz po stronie pierwotnej transformatora piecowego TF. Pomiarzy wykonano metodą komputerową wykorzystując sygnały pochodzące z obwodów wtórnych przekładników napięciowych i prądowych. Do analizy przyjęto dwa bazowe wytopy różniące się wartościami impedancji dławików liniowych:

- przed przełączeniem zaczeptów dławika dla  $i = 4$ ,
- po przełączeniu zaczeptów dławika dla  $i = 3$ .

Zarejestrowane sygnały napięciowo-prądowe w postaci ciągów próbek, poddano przetworzeniu i analizie komputerowej wyznaczając prądy i pobierane moce w określonych punktach toru zasilania pieca łukowego.

Skuteczną wartość średnią prądu  $I_L$  transformatora TF za okres  $T$  dla kolejnych próbek  $N$  obliczono wg wzoru (1):

$$(1) \quad I_L = \frac{1}{3}(I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (i_{Lk}^{(j)})^2}$$

gdzie:  $N$  oznacza ilość próbek na okres,  $j \in \{1, \dots, N\}$  – numer punktu pomiarowego,

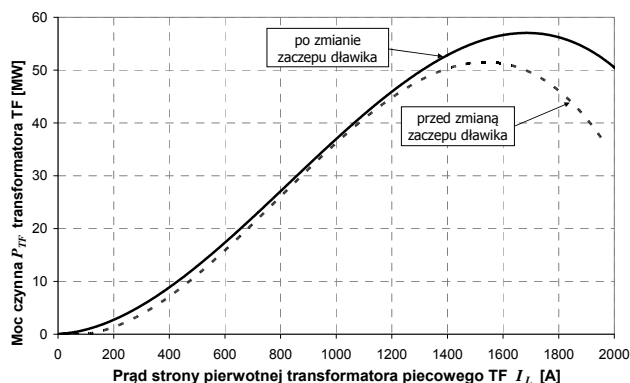
Moc czynną transformatora piecowego TF wyliczono dla kolejnych okresów (czas  $T=20$  ms  $\Rightarrow f_s=50$  Hz) wg relacji:

$$(2) \quad P_{TF} = \sum_{k=1}^3 \frac{1}{T} \int_0^T u_{Lk}(t) \cdot i_{Lk}(t) dt = \sum_{k=1}^3 \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N u_{Lk}^{(j)} \cdot i_{Lk}^{(j)} \right]$$

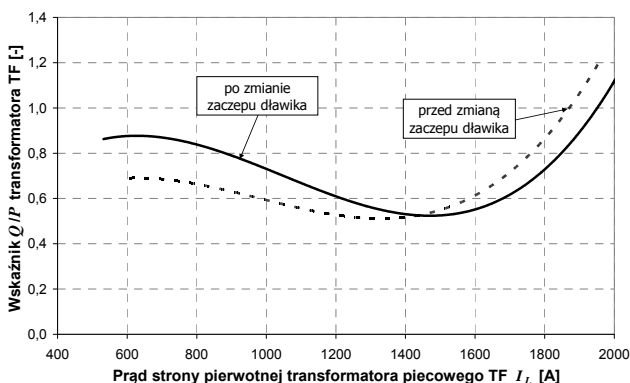
Natomiast moc pozorną transformatora TF w poszczególnych okresach  $T$  wyznaczono według formuły:

$$(3) \quad S_{TF} = \sum_{k=1}^3 (U_{Lk} \cdot I_{Lk}) = \sum_{k=1}^3 \left[ \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N (u_{Lk}^{(j)})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N (i_{Lk}^{(j)})^2} \right]$$

Obliczone wartości prądów i mocy umożliwiły wyznaczenie charakterystyk roboczych pieca łukowego przedstawionych na rysunkach 3 i 4.



Rys.3. Regulacyjne charakterystyki robocze pieca łukowego  $P_{TF}(I_L)$  dla dwóch wartości reaktancji dławika liniowego LR



Rys.4. Zależność współczynnika mocy  $tg\varphi(I_L)$  od prądu pieca łukowego dla dwóch wartości reaktancji dławika liniowego LR

Do pełnej oceny efektów zmiany impedancji toru zasilania pieca wyliczono wartości spadków napięć i strat mocy w torze przesyłowym średniego napięcia (dławik LR wraz z linią kablową CL - rys.2) wg następujących zależności:

$$(4) \quad \Delta U = \frac{1}{3} (U_{L1}^{TS} + U_{L2}^{TS} + U_{L3}^{TS}) - \frac{1}{3} (U_{L1}^{TF} + U_{L2}^{TF} + U_{L3}^{TF})$$

$$(5) \quad \Delta P = P_{MVL} - P_{TF}$$

gdzie:  $U_{L1}^{TS}, U_{L2}^{TS}, U_{L3}^{TS}$  - wartości skuteczne napięć fazowych w rozdzielni średniego napięcia transformatora TS,  $U_{L1}^{TF}, U_{L2}^{TF}, U_{L3}^{TF}$  - wartości skuteczne napięć fazowych po stronie pierwotnej transformatora piecowego TF,  $P_{MVL}$  - moc czynna w torze zasilania pieca przed LR.

Z porównania charakterystyk pieca łukowego pokazaanych na rysunkach 3 i 4 wynika, że po zmniejszeniu reaktancji dławika LR nastąpił wzrost mocy czynnej pieca o 3,5 MW (dla prądu toru średniego napięcia równego 1530 A), a minimum charakterystyki wskaźnika  $tg\varphi(I_L)$

przesunęło się z wartości 1300 A do 1480 A, tj. w stronę maksymalnego prądu transformatora TF równego 1500 A.

Wartość energii elektrycznej  $EE_{TF}$  pobranej przez piec łukowy (pomiar po stronie pierwotnej transformatora TF), dla określenia wskaźnika  $W_{EE}$  wyliczono wg wzoru:

$$(6) \quad EE_{TF} = \int_0^{t_w} P_{TF}(t) \cdot dt = \sum_{r=1}^{NTW} \left\{ \sum_{k=1}^3 \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N u_{Lk}^{(j)(r)} \cdot i_{Lk}^{(j)(r)} \right] \right\}$$

gdzie:  $t_w$  – czas wytopu,  $NTW$  - liczba okresów  $T$  za czas wytopu  $t_w$ .

Obliczone wartości wskaźników elektroenergetycznych charakteryzujących proces wytopu stali dla stanu przed i po zmianie zacze pu dławika LR zamieszczono w tabeli 2.

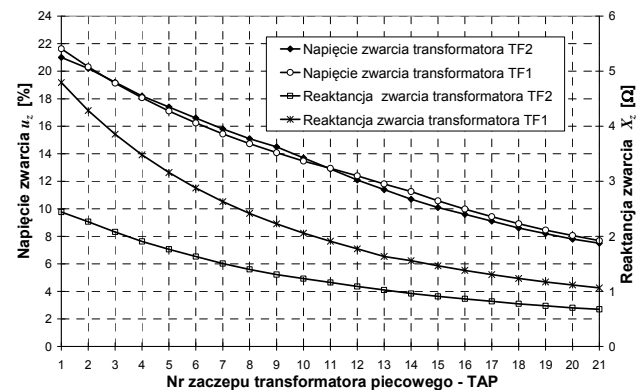
Tabela 2. Wartości wskaźników elektroenergetycznych w torze zasilania pieca łukowego przy zmianie zacze pu dławika LR

Zacze p dławika	$EE_{TF}$ [MWh]	$W_{EE}$ [kWh/Mg]	$t_{TAP-TAP}$ [min]	$t_c$ [min]	$(P/S)_1$ [-]	$\Delta U/U_N$ [-]	$\Delta P/S_{NTF}$ [-]
$i = 4$	34	371	50	42,5	0,83	0,113	0,025
$i = 3$	34,4	354	46,5	40	0,83	0,086	0,022

### Wymiana transformatora piecowego w instalacji zasilania pieca łukowego

Moc transformatora piecowego i jego wydajność prądowa są ważnymi parametrami determinującymi efektywność pracy pieca łukowego. W praktyce przyjmuje się, że piec łukowy powinien mieć wskaźnik mocy transformatora odniesione go do pojemności wsadowej ok. 1 MVA/1 Mg stopionej stali.

W ramach modernizacji instalacji pieca pokazanej na rysunku 1 dokonano wymiany transformatora piecowego TF na jednostkę o większej mocy, co spowodowało zmianę impedancji toru zasilania pieca. Zależność napięć zwarcia i reaktancji transformatorów TF1 (stary) i TF2 (nowy) od położenia przełącznika zacze pów pokazano na rysunku 5, a ich parametry napięciowo-prądowe podano w tabeli 3.



Rys.5. Charakterystyki napięć zwarcia i reaktancji zwarcia transformatorów TF1 i TF2 w funkcji pozycji przełącznika zacze pów

Tabela 3. Parametry napięciowo-prądowe transformatorów piecowych TF1 i TF2

Transformator piecowy	TAP	$S_{NTF}$ [MVA]	$u_{z\%}$ [%]	$U_2$ [V]	$I_2$ [kA]	$Z_{1-TF}$ [Ω]	$Z_{2-TF}$ [mΩ]
TF1	13	65	11,8	799	46,97	1,635	1,1598
TF2	9	100	14,5	896,5	64,4	1,305	1,1656

gdzie:  $Z_{1-TF}$  i  $Z_{2-TF}$  – wartości impedancji transformatora przeliczone odpowiednio na stronę pierwotną (MV) i wtórną (LV)

Pomimo niemal identycznej wartości napięć zwarc oba transformatorów dla poszczególnych pozycji przełącznika zacze pów występuje różnica ich reaktancji (rys.5), która jest największa dla niskich pozycji przełącznika TAP, a najmniejsza dla pozycji 21. Z uwagi na dopuszczalną

obciążalność prądową toru średniego napięcia zasilania transformatora piecowego (poziom  $I_{Ldop} = 1530$  A) należało w zmodernizowanej instalacji odpowiednio dobrać nastawy układu regulacji prądu elektrod i ograniczyć zakres sterowania przełącznika zacze pów do pozycji TAP 13. Ograniczenie prądu transformatora TF2 do wartości 1530 A (prąd znamionowy strony pierwotnej wynosi 1924 A) wpływa na wielkość mocy czynnej pieca możliwą do uzyskania bez przeciążenia toru zasilania średniego napięcia.

### Analiza pracy instalacji po wymianie transformatora piecowego

W celu ustalenia poboru mocy i energii w piecu łukowym dokonano w trakcie wytopów rejestracji przebiegów napięć i prądów po stronie pierwotnej i wtórnego transformatora piecowego przed (TF1) i po wymianie (TF2). Do pomiaru prądów i napięć po stronie wtórnego transformatora piecowego w torze wieloprądowym zastosowano aparaturę pomiarową wyposażoną w cewki Rogowskiego oraz przetworniki wysokonapięciowe LEM.

Podstawowe parametry elektroenergetyczne pozwalające określić sprawność przekazywania energii z systemu zasilania do pieca łukowego, tzn. moce czynne i pozorne oraz wartości skuteczne prądów wyznaczono odpowiednio po stronie wtórnego i pierwotnego transformatorów piecowych TF1 i TF2. Do analizy porównawczej związanej z wymianą transformatora piecowego TF1 na TF2 posłużono się wskaźnikami elektroenergetycznymi mierzonymi dla strony dolnego napięcia transformatorów, z uwagi na bezpośredni udział prądu strony wtórnego jako prądu elektrod w procesie topienia złomu stalowego.

Procedury obliczeń prądu i mocy dla strony wtórnego transformatorów piecowych TF1 i TF2 przyjęte zostały zgodnie z relacjami (1) ÷ (3) obowiązującymi w teorii mocy dla przebiegów odkształconych.

Rozkłady wartości mocy czynnej po stronie wtórnego transformatorów piecowych pokazano na rysunku 6. Na podstawie histogramów rozkładu prądów i mocy w tabeli 4 zestawiono wartości prądów wtórnych i mocy czynnych dla transformatorów TF1 i TF2, dla skumulowanych prawdopodobieństw wynoszących 90 % i 95 %.

Tabela 4. Wartości prądu i mocy czynnej w zależności od częstości występowania dla transformatorów TF1 i TF2

Parametr	Transformatory			
	TF1	TF2	TF1	TF2
Prawdopodobieństwo skumulowane	$p = 90 \%$		$p = 95 \%$	
$I_2$ [kA]	45,49	46,22	49,23	47,12
$P$ [MW]	54,22	56,10	55,03	56,46

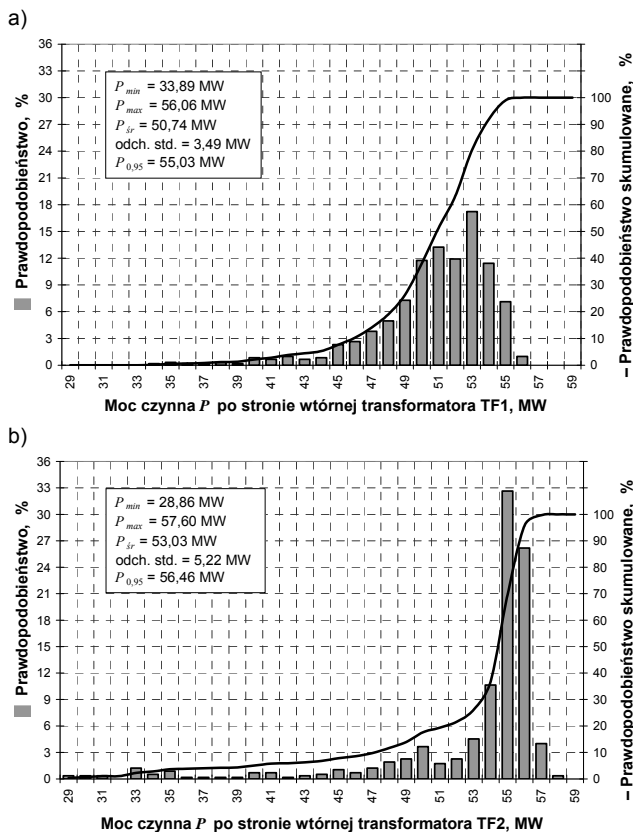
Analizując histogramy mocy czynnych obu transformatorów (rysunek 6), można stwierdzić, iż rozkład dla transformatora TF2 jest bardziej smukły, a jego największe prawdopodobieństwo przypada na pobór mocy 55 MW (rys.6b), natomiast dla transformatora TF1 najczęściej pobierana moc czynna wynosi 53 MW (rys.6a). Istotna jest również różnica w wartościach średniej mocy pobieranej w czasie wytopu:

$$(7) \quad \Delta P = P_{sr TF2} - P_{sr TF1} = 2,29 \text{ MW}$$

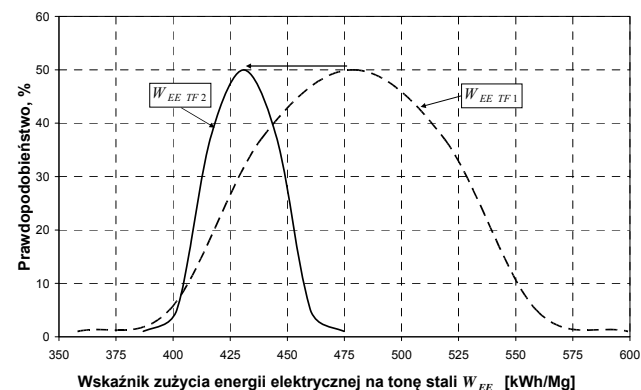
Różnica mocy dla prawdopodobieństwa 95 % wynosi  $P_{0,95 TF2} - P_{0,95 TF1} = 1,43$  MW, co świadczy o lepszym wykorzystaniu transformatora TF2 w procesie wytopu.

Uzupełnieniem histogramów jest rozkład prawdopodobieństwa wskaźnika zużycia energii elektrycznej wyliczony dla większej liczby wytopów dla obu transformatorów (rys.7) oraz wartości wskaźników elektroenergetycznych według tabeli 5. Z rozkładów tych wynika, że modernizacja instalacji

zasilania pieca łukowego polegająca na włączeniu nowego transformatora TF2 o mocy nominalnej 100 MVA pozwoliła obniżyć wskaźnik  $W_{EE}$  o około 50 kWh/Mg.



Rys.6. Histogram rozkładu mocy czynnej  $P$  po stronie LV i krzywa prawdopodobieństwa skumulowanego dla transformatorów TF



Rys.7. Krzywe rozkładu prawdopodobieństwa wskaźnika zużycia energii elektrycznej  $W_{EE}$  dla transformatorów TF1 i TF2

Tabela 5. Wskaźniki elektroenergetyczne i technologiczne

Transformator piecowy	$EE_{TF}$ [MWh]	$W_{EE}$ [kWh/Mg]	$t_{TAP-TAP}$ [min]	$t_e$ [min]	$(P/S)_1$ [-]
TF1	44	448,1	56	48	0,87
TF2	43	423,2	50	46	0,86

## Wnioski

Analiza wyników pomiarów dokonanych w trakcie optymalizacji instalacji zasilającej piec łukowy przez zmianę impedancji dławika liniowego udowodniły, że przetaczenie zaczeń pozwoliło poprawić wskaźniki energetyczne procesu wytopu wyrażające się:

- wzrostem mocy czynnej transformatora piecowego TF o ponad 5 % (rys.3);
- wzrostem napięcia zasilania transformatora piecowego o 3 %, w wyniku zmniejszenia spadku napięcia na dławiku LR (tabela 2);
- lepszym wykorzystaniem mocy pozornej transformatora piecowego liczonej za efektywny czas wytopu z wartości  $0,874 S_{NTF}$  do wartości  $0,933 S_{NTF}$  przy obciążeniu prądowym odpowiednio  $0,92 I_{TFmax}$  i  $0,95 I_{TFmax}$ ;
- skróceniem efektywnego i całkowitego czasu wytopu, średnio o ok. 7-8 % (tabela 2);
- obniżeniem strat mocy w torze zasilania średniego napięcia.

Wymiana transformatora piecowego na jednostkę o mocy 100 MVA pozwoliła na wyraźną poprawę wskaźników elektroenergetycznych określających efektywność procesu wytopu stali. Skrócono czasu wytopu  $t_{TAP-TAP}$  o ok.10 %, przy mniejszym o 4 % efektywnym czasie topienia  $t_e$ .

Równocześnie obniżono wskaźnik zużycia energii elektrycznej na tonę stali o ok. 9% (rys.7). Smukły kształt krzywej rozkładu prawdopodobieństwa wskaźnika zużycia energii elektrycznej  $W_{EE}$  dla transformatora TF2 świadczy pozytywnie o efektach uzyskiwanych w szerszym horyzoncie czasowym dla wielu wytopów.

Praca pieca łukowego AC z transformatorem piecowym o większej wydajności prądowej pozwala na lepszą stabilizację łuku, obniżenie zużycia elektrod, co w konsekwencji korzystnie wpływa na jakość procesu metalurgicznego w aspekcie obniżenia zużycia pozostałych mediów energetycznych.

**Autorzy:** prof. ATH dr hab. inż. Kazimierz Jagieła, E-mail: [kazimierz.jagiela@gmail.com](mailto:kazimierz.jagiela@gmail.com); Academy Technical and Humanistic in Bielsko-Biala, Department of Computer Science and Automation, 43-309 Bielsko-Biala, Willowa 2; dr inż. Janusz Rak, E-mail: [jrak@el.pcz.czest.pl](mailto:jrak@el.pcz.czest.pl); dr inż. Marek Gała, E-mail: [m.gala@el.pcz.czest.pl](mailto:m.gala@el.pcz.czest.pl); mgr inż. Marian Kępiński, email: [mkepiniski@el.pcz.czest.pl](mailto:mkepiniski@el.pcz.czest.pl); Czestochowa University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, 42-200 Czestochowa, Armii Krajowej 17

## LITERATURA

- Rak J., Jagieła K., Kępiński M., Selection of electric parameters of medium voltage supply AC arc furnace. *International Conference „Technical and Economic Aspect of Modern Technology Transfer in Context of Integration with European Union”*, Kosice 2004, vol. 1, 87-94
- Wciślik M., Metoda estymacji parametrów toru elektrycznego urządzenia łukowego dla potrzeb sterowania procesem elektrostalowniczym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Elektryka* 28, Kielce 1992
- Alonso M.A.P., Donsión M. P.: An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 19, No.1, January 2004, 367-373
- Jagiela K., Rak J., Gała M., Kępiński M., Identification of Electric Power Parameters of AC Arc Furnace Low Voltage System, *Proceedings 14th International Conference Harmonics and Quality of Power*, Bergamo, Italy, 26-29. Sept. 2010
- Liu Y.J., Chang G.W., Hong R.C., Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an ac electric arc furnace, *Electric Power Systems Research*, No. 80 (2010), 572-581
- Montanari G.C., Loggini M., Cavallini A., Pitti L., Zaninelli D., Arc-model furnace for study of flicker compensation in electrical networks, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 9, No.4, October 1994, 2026-2036
- Rak J., Influence of AC arc furnace on parameters of industrial medium-voltage network, *Proceedings 5th International Conference EPQU'99*, Cracow, Poland, 1999, 315-322