

# O strumieniu mocy w silniku lub w układzie napędowym

Zygmunt Paszota

## 1. Wprowadzenie

Straty energetyczne i sprawność energetyczna silnika lub układu napędowego powinny być przedstawiane jako zależne od wielkości fizycznych niezależnych od tych strat. Takimi niezależnymi wielkościami są prędkość i obciążenie wału silnika wymagane przez maszynę lub urządzenie napędzane przez silnik. Chwilowa prędkość i obciążenie decydują o chwilowej wielkości mocy użytecznej silnika i, w zróżnicowany sposób, o rodzaju i chwilowej wielkości strat. Jednakże straty energetyczne i sprawność energetyczna silników są określane przez badaczy i producentów jako zależne od wielkości fizycznych, które zależą od strat. Na przykład sprawność energetyczna silników zastosowanych w napędzie hydrostatycznym jest przedstawiana jako zależna od natężenia strumienia zasilającego silnik i od spadku ciśnienia w silniku. Przyczyną takiej sytuacji jest tradycyjny, powszechnie akceptowany i stosowany, lecz niestety błędny obraz strumienia mocy w silnikach i w układach napędowych, przedstawiony w literaturze za pomocą wykresu Sankeya spadku mocy w kierunku przepływu mocy [2, 3].

## 2. Badania napędu parowego przeprowadzone przez Matthew H. Sankeya

Matthew H. Sankey był irlandzkim inżynierem mechanikiem i kapitanem w Corps of Royal Engineers. Prowadził badania, których celem był wzrost sprawności energetycznej silników parowych. Był członkiem British Institution of Civil Engineers. Jego obszerne opracowanie pt.: *The Thermal Efficiency of steam Engines*, w którym zamieścił wykresy strumienia mocy w układzie napędowym, zostało opublikowane w *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers* w 1898 roku. W swoim opracowaniu kapitan Sankey przedstawił dwa wykresy strumienia mocy w parowym układzie napędowym: w rzeczywistym – badanym – i w wyidealizowanym (z mniejszymi stratami). Wykresy przedstawione są na rysunku 1.

O wykresach Sankey pisze:

– Kocioł, silnik, kondensator i sprężarka, pompa zasilająca i podgrzewacze są pokazane na wykresie za pomocą prostokątów. Przepływ ciepła przedstawiono w postaci strumienia, którego szerokość obrazuje ilość ciepła wchodząca i opuszczająca każdy element układu w jednostce czasu; straty są przedstawione jako wiele traconych odgałęzień strumienia. Specjalną uwagę należy zwrócić na jedno (niestety małe) odgałęzienie, które reprezentuje pracę oddawaną tłokom silnika.

W przypadku mniejszych strat mocy, które występują w wyidealizowanym parowym układzie napędowym, Sankey pokazuje nieznaczny wzrost mocy użytecznej silnika, a także spadek

**Streszczenie:** W silniku lub w układzie napędowym wielkość strumienia mocy rośnie w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu mocy. Straty energetyczne i sprawność energetyczna silnika lub układu napędowego powinny być przedstawiane jako funkcje wielkości fizycznych niezależnych od strat. Takimi wielkościami są prędkość i obciążenie silnika. Jednakże obraz strumienia mocy w silniku lub w układzie napędowym jest przedstawiany w literaturze w formie tradycyjnego wykresu Sankeya spadku mocy zgodnego z kierunkiem przepływu mocy. Artykuł nawiązuje do wykresu Matthew H. Sankeya zamieszczonego w jego referacie *The Thermal Efficiency of Steam Engines* z roku 1898. Przedstawiony jest także wykres wzrostu mocy w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu mocy. Wykres ten, zastępujący wykres Sankeya, otwiera nową perspektywę badań mocy strat energetycznych i sprawności energetycznej silników i układów napędowych.

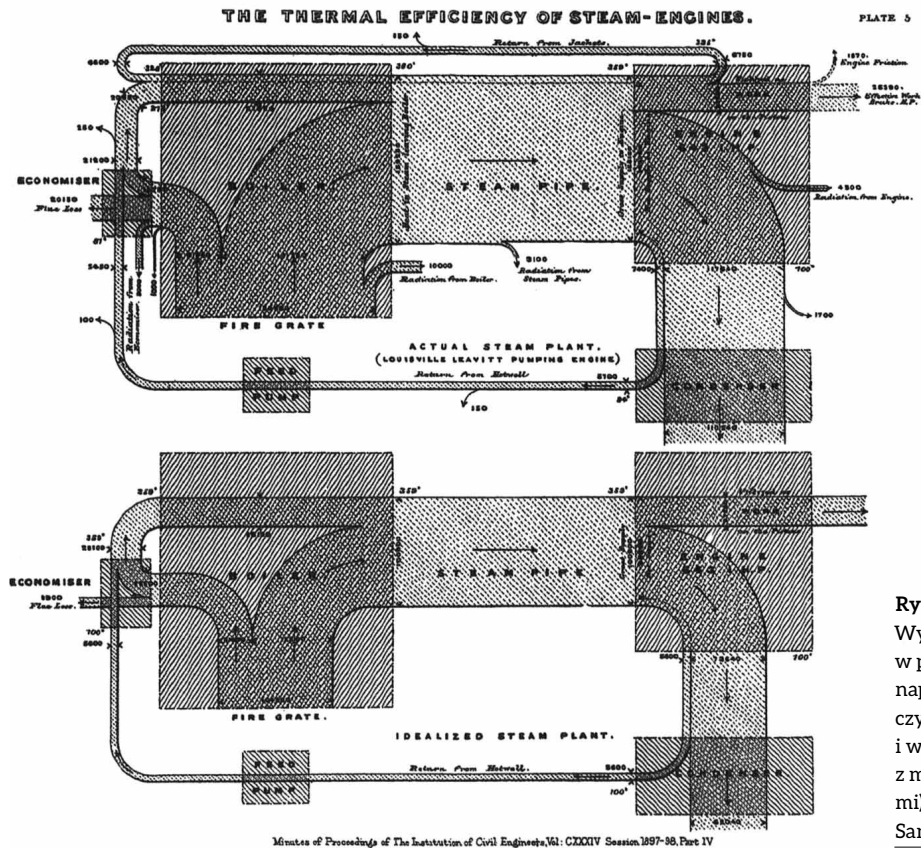
Słowa kluczowe: silniki, układy napędowe, sprawność energetyczna, wykres Sankeya, nowa perspektywa badań

### ON POWER STREAM IN MOTOR OR IN DRIVE SYSTEM

**Abstract:** *In a motor or in a drive system the quantity of power increases in the direction opposite to the direction of power flow. Energy losses and energy efficiency of a motor or a drive system must be presented as functions of physical quantities independent of losses. Such quantities are speed and load. But the picture of power stream in a motor or in a drive system is presented in the literature in the form of traditional Sankey diagram of power decrease in the direction of power flow. The paper refers to Matthew H. Sankey's diagram in his paper The Thermal Efficiency of Steam Engines – of 1898. Presented is also a diagram of power increase in the direction opposite to the direction of power flow. The diagram, replacing the Sankey diagram, opens a new perspective of research into power of energy losses and efficiency of motors and drive systems.*

**Keywords:** *motors, drive systems, energy losses, energy efficiency, Sankey diagram, new research field*

mocy konsumowanej przez silnik (w przewodzie parowym) i spadek mocy konsumowanej przez kocioł. W efekcie sprawność energetyczna układu napędowego wzrasta.



**Rys. 1.**  
Wykresy spadku mocy w parowym układzie napędowym (w rzeczywistym - badanym i w wyidealizowanym - z mniejszymi stratami) badanym przez Sankeya [1]

Z wykresów strumienia mocy przedstawionych na rysunku 1 oraz z cytowanego opisu Sankeya można wyciągnąć wniosek, że moc strat należy traktować jako tracone odgałęzienia głównego strumienia, osłabiające ten strumień, a także, że praca (w jednostce czasu) oddawana tłokom silnika wynika z mocy konsumowanej przez układ i z mocy strat występujących w układzie.

Wykres strumienia mocy w układzie napędowym, przyjęty przez Sankeya, jest prawdopodobnie efektem jego koncentracji na spadku mocy głównego strumienia zgodnym z kierunkiem przepływu mocy, w efekcie strat energetycznych występujących w układzie i odprowadzanych na zewnątrz układu.

Należy zauważyć na wykresach Sankeya przedstawionych na rysunku 1, że wielkość strat energetycznych w systemie napędowym zmienia się w zależności od jakości systemu nawet wtedy, gdy moc użyteczna układu praktycznie się nie zmienia.

Dlatego też należy przyjąć, że w zależności od tego, czy mamy do czynienia z rzeczywistym czy też z wyidealizowanym układem, przy tych samych wielkościach fizycznych opisujących moc użyteczną układu (tzn. przy tej samej prędkości i tym samym obciążeniu wału silnika) moc konsumowana przez układ napędowy będzie się zmieniała w efekcie zmiany mocy strat energetycznych.

Należy także przyjąć, że wielkość mocy wejściowej konsumowanej przez układ będzie określana przez wymaganą wyjściową moc użyteczną i moc strat energetycznych występujących w systemie i wynikających z jego jakości.

Jednakże, stosując wykres Sankeya, nie można przedstawiać strat energetycznych w układzie napędowym jako zależnych od wielkości fizycznych decydujących o użytecznej mocy wyjściowej układu, a także nie można opisać matematycznie mocy strat energetycznych i sprawności energetycznej układu jako zależnych od prędkości i obciążenia wału silnika w układzie.

Być może kapitan Sankey w swoich rozważaniach nie odczuwał potrzeby stosowania opisu matematycznego zależności strat energetycznych w silniku bądź w układzie napędowym czy też zależności sprawności energetycznej od wielkości fizycznych o niej decydujących.

Uproszczony wykres strumienia mocy w silniku lub w układzie napędowym, nawiązujący do wykresów Sankeya na rysunku 1, posiada formę przedstawioną na rysunku 2.

Zgodnie z rysunkiem 2 moc użyteczna (wyjściowa)  $P_u$  silnika (układu napędowego) wynika z różnicy mocy konsumowanej (wejściowej)  $P_c$  i mocy  $\Delta P$  strat:

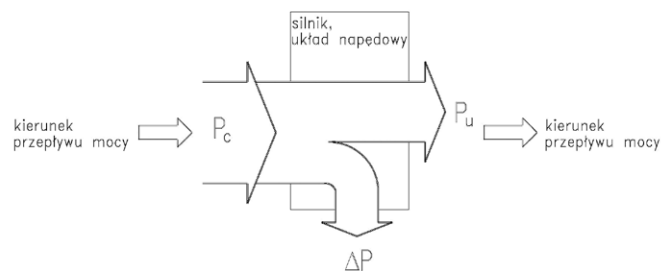
$$P_u = P_c - \Delta P \quad (1)$$

Konsekwencją równania (1) jest powiązanie mocy  $\Delta P$  strat energetycznych z mocą konsumowaną  $P_c$  i opis sprawności energetycznej silnika lub układu napędowego w postaci:

$$\eta = \frac{P_u}{P_c} = \frac{P_c - \Delta P}{P_c} = 1 - \frac{\Delta P}{P_c} \quad (2)$$

Równanie (2), nawiązujące do wykresu spadku mocy przedstawionego na rysunku 2, opisujące sprawność energetyczną  $\eta$ , umożliwia jedynie określenie efektywności wykorzystania mocy konsumowanej  $P_c$  w silniku lub w układzie napędowym.

Wykres Sankeya i wynikające z niego równania (1) i (2) nie określają w pełni zjawisk fizycznych występujących w układzie napędowym.



$P_c$  jest mocą konsumowaną (wejściową) wyrażoną w watach [W];  
 $P_u$  jest mocą użyteczną (wyjściową) [W];  
 $\Delta P$  jest mocą strat [W]

**Rys. 2.** Uproszczony wykres spadku mocy w silniku lub w układzie napędowym zgodnego z kierunkiem przepływu mocy, nawiązujący do wykresów Sankeya przedstawionych na rysunku 1

Straty energetyczne, na przykład straty mechaniczne, objętościowe lub ciśnieniowe w silniku lub w układzie napędowym, są odprowadzane na zewnątrz w postaci ciepła. Jednakże te różne straty zależą od wielkości fizycznych bezpośrednio o nich decydujących. Jednocześnie moc tych strat wymusza wzrost strumienia mocy na dopływie do miejsca, w którym straty powstają, w wyniku konieczności ich pokonania (zrównoważenia). Natomiast moc użyteczna układu napędowego musi wynikać z wielkości mocy wymaganej od układu przez napędzaną nim maszynę lub urządzenie.

Wykres strumienia mocy w silniku lub w układzie napędowym powinien umożliwić pokazanie wielkości fizycznych bezpośrednio lub pośrednio decydujących o wielkości poszczególnych strat. Opisy matematyczne strat powinny umożliwić zbudowanie opisów sprawności energetycznych wynikających ze strat.

Iloczyn poszczególnych sprawności decyduje o sprawności elementów układu i, w efekcie, o sprawności całkowitej układu napędowego. Jednakże wykres Sankeya takich możliwości nie daje.

### 3. Wykres wzrostu mocy przeciwnego do kierunku przepływu mocy

Ocena zachowania energetycznego różnych odmian i wielkości silników lub układów napędowych wymaga opisu i porównania ich sprawności energetycznej jako zależności od współczynników  $\bar{\omega}_M$  prędkości i  $\bar{M}_M$  obciążenia wału silnika obrotowego bądź tłoczyska silnika liniowego (np. siłownika hydraulicznego), współczynników zmieniających się w polu pracy ( $0 \leq \bar{\omega}_M < \bar{\omega}_{Mmax}$ ,  $0 \leq \bar{M}_M < \bar{M}_{Mmax}$ ). Maksymalne wartości  $\bar{\omega}_{Mmax}$  współczynnika prędkości i  $\bar{M}_{Mmax}$  współczynnika obciążenia silnika, wynikające z maksymalnych możliwości układu napędowego i z występujących w nim strat, wyznaczają zakres pola pracy silnika.

Rysunek 3 obrazuje pole pracy silnika w hydrostatycznym układzie napędowym.

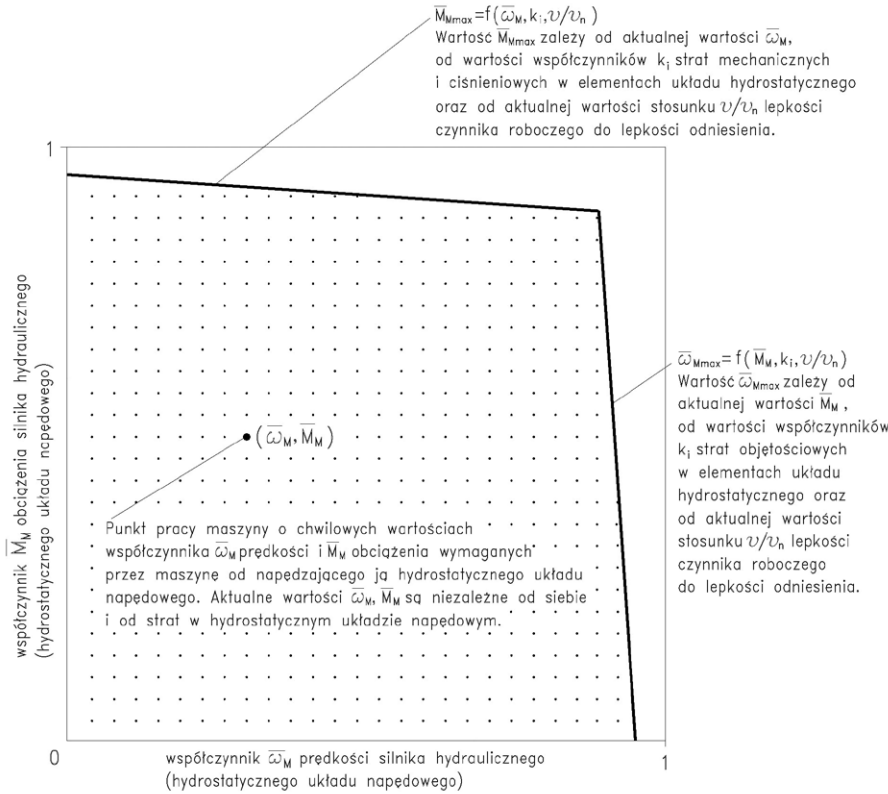
Chwilowa prędkość kątowa  $\omega_M$  wału (prędkość obrotowa  $n_M$  wału) wymagana od silnika hydraulicznego obrotowego, bądź prędkość liniowa  $v_M$  tłoczyska wymagana od silnika hydraulicznego (siłownika hydraulicznego) pracującego w hydrostatycznym układzie napędowym są zastąpione w modelach matematycznych strat energetycznych i sprawności energetycznej przez bezwymiarowy współczynnik  $\bar{\omega}_M$  prędkości silnika:

$$\bar{\omega}_M = \frac{\omega_M}{\omega_{Mt}} = \frac{n_M}{n_{Mt}} = \frac{\omega_M q_{Mt}}{2\pi Q_{Pt}} = \frac{n_M q_{Mt}}{Q_{Pt}} \quad (3)$$

bądź

$$\bar{\omega}_M = \frac{v_M}{v_{Mt}} = \frac{v_M S_M}{Q_{Pt}} \quad (4)$$

Teoretyczna prędkość kątowa  $\omega_{Mt}$  wału silnika obrotowego (teoretyczna prędkość obrotowa  $n_{Mt}$ ) traktowana jest jako stała wielkość odniesienia dla chwilowej prędkości kątowej



**Rys. 3.** Zakres ( $0 \leq \bar{\omega}_M < \bar{\omega}_{Mmax}$ ,  $0 \leq \bar{M}_M < \bar{M}_{Mmax}$ ) zmiany współczynnika  $\bar{\omega}_M$  prędkości i współczynnika  $\bar{M}_M$  obciążenia silnika w hydrostatycznym układzie napędowym [2]

$\omega_M$  (prędkości obrotowej  $n_M$ ). Wielkość prędkości  $\omega_{Mt}$  ( $n_{Mt}$ ) wynika z ilorazu teoretycznej wydajności  $Q_{Pt}$  pompy zastosowanej w hydrostatycznym układzie napędowym i z teoretycznej chłonności  $q_{Mt}$  silnika hydraulicznego na jeden obrót jego wału (w przypadku  $\omega_{Mt}$ , iloczynu pomnożonego przez współczynnik  $2\Pi$  (3)).

Teoretyczna prędkość liniowa  $v_{Mt}$  tłoczyska silnika liniowego (siłownika hydraulicznego) traktowana jest jako stała wielkość odniesienia dla chwilowej prędkości liniowej  $v_M$ . Wielkość prędkości  $v_{Mt}$  wynika z ilorazu teoretycznej wydajności  $Q_{Pt}$  pompy zastosowanej w hydrostatycznym układzie napędowym i z powierzchni  $S_M$  tłoka silnika (4).

Chwilowy moment obrotowy  $M_{Mb}$ , obciążający wał silnika, wymagany od silnika hydraulicznego obrotowego, bądź chwilowa siła  $F_{Mb}$ , obciążająca tłoczysko silnika, wymagana od silnika hydraulicznego liniowego (siłownika hydraulicznego) pracującego w hydrostatycznym układzie napędowym, są zastąpione w modelach matematycznych strat

energetycznych i sprawności energetycznej przez bezwymiarowy współczynnik obciążenia silnika:

$$\bar{M}_M = \frac{M_M}{M_{Mt}} = \frac{2\Pi M_M}{q_{Mt} p_n} \quad (5)$$

bądź

$$\bar{M}_M = \frac{F_M}{F_{Mt}} = \frac{F_M}{S_M p_n} \quad (6)$$

Teoretyczny moment obrotowy  $M_{Mt}$  wału silnika hydraulicznego obrotowego traktowany jest jako stała wielkość odniesienia dla chwilowego momentu obrotowego  $M_M$ . Wielkość momentu  $M_{Mt}$  wynika z iloczynu ciśnienia nominalnego  $p_n$  hydrostatycznego układu napędowego (w przewodzie tłocznym pompy) i z teoretycznej chłonności  $q_{Mt}$  silnika hydraulicznego na jeden obrót jego wału (iloczynu podzielonego przez współczynnik  $2\Pi$  (5)).

Teoretyczna siła  $F_{Mt}$  tłoczyska silnika hydraulicznego liniowego (siłownika hydraulicznego) traktowana jest jako stała wielkość odniesienia dla chwilowej wielkości siły  $F_M$ . Wielkość siły  $F_M$  wynika z iloczynu ciśnienia nominalnego  $p_n$  hydrostatycznego układu napędowego (w przewodzie tłoczym pompy) i z powierzchni  $S_M$  tłoka siłownika.

Uproszczony wykres strumienia mocy, pokazujący wpływ mocy użytecznej (wyjściowej)  $P_u$ , to znaczy wpływ prędkości i obciążenia wału lub tłoczyska silnika na moc  $\Delta P$  strat w silniku bądź w układzie napędowym i, w efekcie, na przyrost mocy strumienia w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu mocy oraz na moc konsumowaną  $P_c$ , posiada formę przedstawioną na rysunku 4.

W silniku lub w układzie napędowym wielkość strumienia mocy rośnie, w wyniku konieczności zrównoważenia mocy strat energetycznych, w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu mocy.

Moc użyteczna (wyjściowa)  $P_u$  silnika lub układu napędowego, pracującego w zakresie ( $0 \leq \bar{\omega}_M < \bar{\omega}_{Mmax}$ ,  $0 \leq \bar{M}_M < \bar{M}_{Mmax}$ ) nie zależy od mocy  $\Delta P$  strat w silniku lub w układzie napędowym, a wynika z chwilowych wartości współczynnika  $\bar{\omega}_M$  prędkości i współczynnika  $\bar{M}_M$  obciążenia wymaganych przez napędzane urządzenie:

$$P_u = f(\bar{\omega}_M, \bar{M}_M) \quad (7)$$

Moc  $\Delta P$  strat w silniku lub w układzie napędowym zależy od struktury układu napędowego i od jakości jego elementów składowych oraz, w zróżnicowany sposób, od chwilowych wartości współczynnika  $\bar{\omega}_M$  prędkości silnika i współczynnika  $\bar{M}_M$  obciążenia silnika zmieniających się w zakresie ( $0 \leq \bar{\omega}_M < \bar{\omega}_{Mmax}$ ,  $0 \leq \bar{M}_M < \bar{M}_{Mmax}$ ):

$$\Delta P = f(\bar{\omega}_M, \bar{M}_M) \quad (8)$$

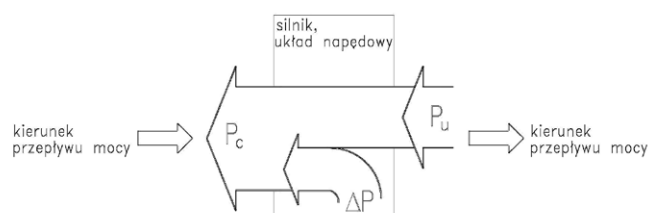
Moc konsumowana (wejściowa)  $P_c$  silnika lub układu napędowego wynika z sumy mocy użytecznej (wyjściowej)  $P_u$  i mocy  $\Delta P$  strat:

$$P_c = P_u + \Delta P = f(\bar{\omega}_M, \bar{M}_M) \quad (9)$$

Konsekwencją równań (8) i (9) jest opis sprawności energetycznej  $\eta$  silnika lub układu napędowego jako zależności od współczynników  $\bar{\omega}_M$  i  $\bar{M}_M$ :

$$\eta = \frac{P_u}{P_c} = \frac{P_u}{P_u + \Delta P} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P}{P_u}} = f(\bar{\omega}_M, \bar{M}_M) \quad (10)$$

Równanie (10) opisujące sprawność energetyczną  $\eta$ , w porównaniu z równaniem (2), umożliwia nie tylko określenie efektywności wykorzystania mocy konsumowanej  $P_c$  przez silnik lub układ napędowy, lecz także opisanie matematyczne zależności chwilowej wielkości mocy użytecznej  $P_u$ , mocy  $\Delta P$  występujących strat oraz, w efekcie, mocy konsumowanej  $P_c$  i chwilowej wartości sprawności energetycznej  $\eta$  silnika lub



Rys. 4. Uproszczony wykres wzrostu mocy w silniku lub w układzie napędowym przeciwnego do kierunku przepływu mocy, zastępujący wykres Sankey'a przedstawiony na rysunku 1

układu napędowego od współczynnika  $\bar{\omega}_M$  prędkości i współczynnika  $\bar{M}_M$  obciążenia wału lub tłoczyska silnika.

W napędzie hydrostatycznym [4] badania energetyczne pompy i silnika hydraulicznego jako niezależnych maszyn polegają jedynie na określeniu współczynników  $k_i$  strat ciśnieniowych, objętościowych i mechanicznych występujących w tych maszynach, współczynników określonych przy lepkości odniesienia  $\nu_n = 35 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ .

Współczynniki  $k_i$  są zastosowane w opisach matematycznych zależności poszczególnych strat od wielkości fizycznych bezpośrednio o nich decydujących. Charakterystyki sprawności ciśnieniowej, objętościowej, mechanicznej i całkowitej pompy oraz silnika hydraulicznego są obliczane równocześnie z określeniem sprawności całkowitej hydrostatycznego układu napędowego, w którym pompa i silnik hydrauliczny są zastosowane. Znajomość współczynników  $k_i$  strat w elementach układu hydrostatycznego umożliwia otrzymanie, metodą numeryczną, zależności sprawności  $\eta_{pp}$ ,  $\eta_{pv}$ ,  $\eta_{pm}$  i  $\eta_p$  pompy, sprawności  $\eta_{Mp}$ ,  $\eta_{Mv}$ ,  $\eta_{Mm}$  i  $\eta_M$  silnika hydraulicznego, sprawności  $\eta_c$  przewodów, sprawności strukturalnej  $\eta_{st}$  zespołu sterowania dławieniowego prędkości silnika hydraulicznego (jeśli taki zespół jest zastosowany) oraz sprawności całkowitej  $\eta$  hydrostatycznego układu napędowego jako funkcji współczynnika  $\bar{\omega}_M$  prędkości i współczynnika  $\bar{M}_M$  obciążenia silnika zmieniających się w zakresie ( $0 \leq \bar{\omega}_M < \bar{\omega}_{Mmax}$ ,  $0 \leq \bar{M}_M < \bar{M}_{Mmax}$ ) pola pracy układu, przy wybranym stosunku  $\nu/\nu_n$  lepkości  $\nu$  oleju hydraulicznego do lepkości  $\nu_n$  odniesienia.

Proponowana metoda jest precyzyjna i prosta w zastosowaniu. Upraszcza ona badania laboratoryjne pomp, silników hydraulicznych i hydrostatycznych układów napędowych. Umożliwia poszukiwanie oszczędnych energetycznie struktur napędu hydrostatycznego maszyn.

## Podsumowanie

Z wykresów spadku mocy w napędzie parowym badanym przez Sankeya [1] i z towarzyszącego badaniom komentarza Sankeya można wyciągnąć wniosek, że straty energetyczne w napędzie są traktowane jako tracone odgałęzienia od głównego strumienia mocy, które osłabiają ten strumień, bądź też wniosek, że „praca (w jednostce czasu) oddawana tłokom silnika” wynika z mocy konsumowanej przez układ i z mocy strat występujących w układzie.

Wykres strumienia mocy w układzie napędowym przyjęty przez Sankeya był prawdopodobnie efektem jego skoncentrowania się na zmniejszaniu się głównego strumienia mocy zgodnym z kierunkiem przepływu mocy, zmniejszaniu się wynikającym ze strat energetycznych występujących w układzie, strat, które są tracone i odprowadzane na zewnątrz układu.

Jednakże, nawiązując do wykresów Sankeya opisujących badany i wyidealizowany parowy układ napędowy, należy zauważyć, że poziom strat energetycznych występujących w układzie zmienia się w zależności od jakości systemu nawet wówczas, gdy moc użyteczna układu pozostaje praktycznie niezmienna.

Zatem można wnioskować, że w zależności od tego, czy rozważamy badany czy wyidealizowany układ, konsumowana moc wejściowa, przy takich samych wielkościach fizycznych opisujących użyteczną moc wyjściową (na przykład, przy tej samej prędkości i tym samym obciążeniu wału silnika), będzie się zmieniała jako zależna od wielkości mocy strat energetycznych występujących w układzie.

Można także wnioskować, że wielkość mocy wejściowej konsumowanej przez układ jest zależna od wielkości wyjściowej mocy użytecznej i mocy strat energetycznych wynikających z jakości układu.

Jednakże, posługując się wykresem Sankeya, nie można przedstawić strat energetycznych występujących w układzie napędowym jako zależnych od wielkości fizycznych decydujących o wyjściowej mocy użytecznej, przedstawić zależności wejściowej mocy konsumowanej od wyjściowej mocy użytecznej i opisać matematycznie mocy strat energetycznych i sprawności energetycznej układu jako zależnych od prędkości i obciążenia silnika w układzie.

Opis sprawności energetycznej  $\eta$  silnika lub układu napędowego, wynikający z wykresu Sankeya, umożliwia jedynie określenie efektywności wykorzystania mocy konsumowanej przez silnik lub układ.

Wykres Sankeya nie opisuje w pełni zjawisk fizycznych występujących w układzie napędowym.

W silniku lub w układzie napędowym wielkość strumienia mocy rośnie, w efekcie konieczności zrównoważenia występujących strat energetycznych, w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu strumienia mocy.

Moc użyteczna (wyjściowa) silnika lub układu napędowego, pracującego w polu pracy ( $0 \leq \bar{\omega}_M < \bar{\omega}_{Mmax}$ ,  $0 \leq \bar{M}_M < \bar{M}_{Mmax}$ ), jest niezależna od mocy strat w silniku lub w układzie napędowym, a wynika z chwilowych wartości współczynnika  $\bar{\omega}_M$  prędkości i współczynnika  $\bar{M}_M$  obciążenia wymaganych przez napędzane urządzenie.

Moc strat energetycznych występujących w silniku lub w układzie napędowym zależy od struktury układu i od jakości jego elementów składowych, a także, w zróżnicowany sposób, od chwilowych wartości współczynnika  $\bar{\omega}_M$  prędkości i współczynnika  $\bar{M}_M$  obciążenia zmieniających się w polu pracy ( $0 \leq \bar{\omega}_M < \bar{\omega}_{Mmax}$ ,  $0 \leq \bar{M}_M < \bar{M}_{Mmax}$ ).

Proponowane równanie (10), opisujące sprawność energetyczną  $\eta$ , umożliwia nie tylko ocenę efektywności wykorzystania mocy konsumowanej przez silnik lub układ napędowy, lecz także opisanie matematyczne zależności chwilowej wielkości mocy użytecznej silnika lub układu napędowego, mocy


występujących strat  $i$ , w efekcie, mocy konsumowanej oraz chwilowej wartości sprawności energetycznej jako zależności od współczynnika  $\bar{\omega}_M$  prędkości wału (lub tłoczyska) silnika oraz od współczynnika  $\bar{M}_M$  wału (lub tłoczyska) zmieniających się w polu pracy ( $0 \leq \bar{\omega}_M < \bar{\omega}_{Mmax}$ ,  $0 \leq \bar{M}_M < \bar{M}_{Mmax}$ ).

Proponowany wykres wzrostu strumienia mocy w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu mocy w silniku lub w układzie napędowym, zastępujący wykres Sankeya, otwiera nową perspektywę badań nad mocą strat energetycznych i sprawnością energetyczną silników i układów napędowych.

pozycja [4] cytowanej literatury przedstawia prawidłowy obraz strat energetycznych i sprawności energetycznej układów napędu hydrostatycznego maszyn. Jest on przykładem do naśladowania w innych typach napędu. Umożliwia on obiektywne porównanie sprawności energetycznej różnych odmian napędów.

## Literatura

- [1] SANKEY M.H.: *The Thermal Efficiency of Steam Engines*. „Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers”. CXXXIV (1897–1898, Part IV). Reprint in *Journal of the American Society of Naval Engineers*. Vol.XI.NO.4. November, 1899. Published quarterly by the Society. Washington. Pages 949–975. Retrieved from UNIVERSITY OF MICHIGAN.
- [2] PASZOTA Z.: *Losses and energy efficiency of drive motors and systems. Replacement of the Sankey diagram of power decrease in the direction of power flow by a diagram of power increase opposite to the direction of power flow opens a new perspective of research of drive motors and systems*. „Polish Maritime Research” 1/2013.
- [3] The Naval Architect, May 2013, pages 72–76, Feature/Eastern Europe: *Driving a new perspective. Professor Zygmunt Paszota, faculty of ocean engineering and ship technology, Gdansk University of Technology, Poland, explains a new approach to the Sankey Diagram for drive motors*.
- [4] PASZOTA Z.: *Energy losses in hydrostatic drive. Drive investigation method compatible with diagram of power increase opposite to the direction of power flow*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.

 prof. dr hab. inż. Zygmunt Paszota, prof. zw. P.G.  
Politechnika Gdańska; Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa  
e-mail: zpaszota@pg.gda.pl