

Zmniejszenie emisji CO₂ i innych zanieczyszczeń generowanych przez elektrownie węglowe poprzez modernizację napędów elektrycznych pomp i wentylatorów

Zbigniew Szulc

1. Wstęp

Produkcja energii elektrycznej w Polsce w głównej mierze oparta jest o pracę elektrowni węglowych. Według danych GUS w 2018 roku wyprodukowano w kraju 174 TWh energii elektrycznej. Elektrownie węglowe wygenerowały 77% energii elektrycznej. Praca tych elektrowni powoduje generację zanieczyszczeń. Ilość tych zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery zależy od rodzaju paliwa węglowego. Przykładowo jedna [3] z elektrociepłowni krajowych generowała kilka lat temu zanieczyszczenia w ilości określonej przy wyprodukowaniu 1 MWh (1):

- pył: 0,06099 kg;
- SO₂: 0,03612 kg;
- NO_x: 1,48509 kg;
- CO₂: 0,93101 t (931,01 kg).

Z porównania wartości masy tych składników widać duży wpływ CO₂ na generowane zanieczyszczenia.

Zapotrzebowanie na energię elektryczną ciągle wzrasta, a wśród jej odbiorców najwięcej zużywa napęd elektryczny. W ubiegłym wieku (XX) Zakład Napędu Elektrycznego Politechniki Warszawskiej oszacował na zlecenie PAN zużycie 56% produkowanej energii elektrycznej przez napęd elektryczny na przełomie lat 70/80. Wyrywkowe badania wykonane na przełomie XX i XXI wieku wykazały, że to zużycie zwiększyło się do ok. 60%. W krajach bardziej zaawansowanych technicznie (USA, Japonia, Niemcy) wartość ta sięga 70%.

Wśród maszyn roboczych zasilanych przez napędy elektryczne największą grupę stanowią pompy i wentylatory. Wspomniane powyżej oszacowania wykazały, że w Polsce grupa tych napędów zużywa [1, 2]:

- pompy: 30% produkowanej energii elektrycznej;
- wentylatory: 20% produkowanej energii elektrycznej.

Pompy i wentylatory jako maszyny robocze znajdują największe zastosowanie w przemyśle:

- energetycznym;
- paliwowym i rafineryjnym;
- chemicznym;
- wydobywczym;
- komunalnym.

Zmniejszenie energochłonności tych dwóch typów maszyn roboczych ograniczyć może znacznie zużycie energii elektrycznej. Umożliwi to zmniejszenie zapotrzebowania na energię elektryczną, a tym samym zmniejszy generację zanieczyszczeń.

Streszczenie: Szukanie metod ograniczenia zanieczyszczeń generowanych przez elektrownie węglowe w Polsce jest jednym z najważniejszych działań w energetyce. Największe zanieczyszczenia to CO₂ którego przy wyprodukowaniu 1 MWh energii elektrycznej może wynosić około 0,9 tony. W artykule przedstawiono jedną z metod ograniczania tych zanieczyszczeń dzięki zmniejszeniu zapotrzebowania na energię elektryczną przez napęd pomp i wentylatorów. W Polsce istnieją już praktyczne rozwiązania techniczne, które z dobrym efektem zmniejszyły od 10% do 30% zużycie energii elektrycznej poszczególnych aplikacji. Pozostałe do modernizacji układy napędowe zużywają jeszcze 40% generowanej energii elektrycznej (25% pompy i 15% wentylatory). Modernizacja tych układów pozwoli na zaoszczędzenie w ciągu 8–10 lat takiej ilości energii, że emisja CO₂ zmniejszyła by się o 10%.

Słowa kluczowe: generacja zanieczyszczeń, napęd elektryczny pomp i wentylatorów, ograniczenia zużycia energii elektrycznej.

REDUCTION OF CO₂ AND OTHER POLLUTION PRODUCED BY COAL POWER STATIONS THROUGH MODERNIZATION OF ELECTRIC DRIVES OF PUMPS AND FANS

Abstract: One of the most important action in power engineering is searching for methods of pollution reduction. The biggest pollution is CO₂. Emission of it in production of electricity is around 0,9 tons / 1 MWh. The article presents one of the methods of pollution reduction. This method based on decreasing energy consumption of electric drives of pumps and fans. There are practical technical solution in Poland, which decreased energy consumption from 10% to 30%. Others electric drives before modernization consume around 40% of total production of electricity (25% pumps and 15% fans). The modernization of such drives gives the possibility of reduction CO₂ emission by 10% within 8 to 10 years.

W artykule zostanie przedstawiona możliwość zmniejszenia energochłonności tych maszyn roboczych w warunkach technicznych naszego kraju. Podane zostaną metody jej zmniejszenia i efekty, jakie można dzięki temu uzyskać.

2. Rozwój konstrukcji układów napędowych pomp i wentylatorów

Napędy pomp i wentylatorów zużywają duże ilości energii elektrycznej w ciągu roku, ponieważ często pracują w technologii wymagającej dużej i długiej ciągłości procesu w ciągu roku. Przykładem są napędy pomp wody zasilającej, pomp w sieci ciepłej, pomp w zakładach chemicznych, rafineryjnych, elektrociepłowniach, ciepłowniach, pompowniach komunalnych itp. Podobnie niektóre wentylatory, sprężarki, dmuchawy często używane są w procesach wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej (wyciągowe, chłodzenia, podmuchu) oraz dużych obiektach produktów chemicznych, paliw czy w kopalniach.

Powyższe maszyny robocze wymagają sterowania ich parametrami wyjściowymi (ciśnienie, spręż, natężenie przepływu). Do lat 70. ubiegłego wieku takie sterowanie zapewniały metody dławienia (pompy), regulacje przysłonami wentylatora, liczbą załączonych maszyn itp. Do regulacji prędkości obrotowej tych maszyn stosowana była metoda sprężel ciernych, hydraulicznych, poślizgowych. Są one stosowane nadal mimo ich dużej energochłonności.

Regulacja prędkości obrotowej samych silników elektrycznych wymagała skomplikowanych obwodów urządzeń (prądnic, silniki pierścieniowe z rezystorami. Moce znamionowe silników sięgały najwyżej dziesiątków kW, rzadziej setek kW. Wyjątkiem były sprężła hydrokinetyczne i przekładnie hydrokinetyczne, gdzie moce silnika sięgają kilku MW (rzadko więcej). Niestety uzasadniony energochłonnością zakres regulacji prędkości obrotowej n/n_N jest niewielki. Wynosi najczęściej powyżej 0,7; 0,8. Oprócz dużej energochłonności nie rozwiązują one problemów rozruchu i hamowania.

Od lat 70. ubiegłego wieku zaczęto stosować półprzewodnikowe układy napędowe do pomp i wentylatorów. Najlepiej w praktyce sprawdziły się układy z przemiennikami częstotliwości (PC). Początkowo dla silników niskiego napięcia (PCNN), a na przełomie XX i XXI wieku dla silników średniego napięcia (PCSN). rozwój energoelektroniki i informatyki przemysłowej umożliwia obecnie konstrukcję PC na niskie napięcia (400 V; 500 V; 690 V) dla silników do setek kW (możliwe też do MW), a dla napięć powyżej 1 kV (2,3 kV; 3,3 kV; 6 kV) do kilku MW. Istnieją rozwiązania PC o napięciu wyjściowym znamionowym

11 kV i mocy silników kilkanaście lub więcej MW. Zakres wyjściowej częstotliwości PC wynosi praktycznie od 0 Hz do 50 Hz (60 Hz) i więcej (85–200 Hz). Te konstrukcje PC umożliwiają kontrolowany rozruch i hamowanie (ze zwrotem energii do sieci). Problem odkształconych przebiegów prądów i napięć wejściowych i wyjściowych został rozwiązany poprzez stosowanie filtrów pasywnych i aktywnych. Stosuje się elementy L i C oraz półprzewodniki HVIGBT (HV – wysokie napięcie 6 kV, a poprzednio tylko IGBT dla NN), a także tyrystory SGCT (tyrystory wyłączane z symetrycznymi bramkami). Informatyka przemysłowa w postaci sterowników PLC z rozbudowaną strukturą pomaga regulować silniki asynchroniczne i synchroniczne różnymi metodami (skalarną, wektorową, wektorem pola). Ze względu na duże zapotrzebowanie do różnych dziedzin (nie tylko pomp i wentylatorów), gdy wymagania są trudne (skomplikowana automatyka procesów, warunki klimatyczne), powstają nowe konstrukcje PC. Światowe firmy oferują coraz nowocześniejsze konstrukcje o coraz lepszych parametrach:

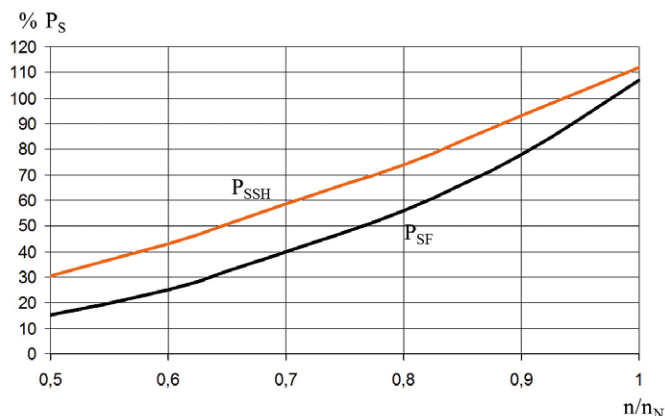
- większe sprawności PC w szerokim zakresie obciążeń i częstotliwości wyjściowych (η_{PC}, f_{wyj});
- mniejsze wartości współczynników odkształcenia przebiegów prądów wejściowych i napięć, wejściowych i wyjściowych $THDI < 10\%$, $THDU < 10\%$;
- mniejsze wymiary i masa;
- większa odporność na warunki klimatyczne;
- mniejsze oddziaływanie na otoczenie (zakłócenia elektromagnetyczne).

Równocześnie nastąpił rozwój silników elektrycznych klatkowych i synchronicznych. Produkowane po 2000 r. silniki klatkowe posiadają większą sprawność (o kilka %), lepszą izolację i chłodzenie. Natomiast silniki synchroniczne do wzbudzenia posiadają magnesy trwałe, co umożliwia uzyskanie większej sprawności niż dotychczasowe oraz łatwiejszą regulację.

Przedstawiony powyżej rozwój konstrukcji zachęca do stosowania układów regulacji do pomp i wentylatorów.

3. Zmniejszenie energochłonności układów napędowych pomp i wentylatorów

Poprawa efektywności energetycznej układów napędowych pomp i wentylatorów skutkuje mniejszym zużyciem energii



Rys. 1. Moc pobrana z sieci zasilającej przez układ napędowy ze sprzęgłem hydrokinetycznym (PSSH) i z falownikiem (PSF)

elektrycznej. Dla układów napędowych dużych mocy, np. pomp wody zasilającej w elektrowniach i ciepłowniach, gdzie pracują one długi czas w ciągu roku (7000–8000 h), daje bardzo dobre efekty oszczędności energii. Na rys. 1 przedstawiony został wykres mocy pobranej z sieci zasilającej przez układ napędowy ze sprzęgłem hydrokinetycznym (PSSH) i z falownikiem (PSF) w funkcji prędkości obrotowej (n/n_N). W szerokim zakresie regulacji (50%) układ napędowy z falownikiem pobiera moc mniejszą rzędu 15–20% [3].

Wykresy te były robione dla układu napędowego o mocy silnika 4 MW (6 kV) pracującego w jednej elektrociepłowni dużego obiektu przemysłowego. Dla układu z falownikiem sprawność jest symulacją opartą o dane firmowe producenta uzyskane na stacji prób. Podczas pracy pompy jej wydajność zmienia się w szerokim zakresie od 230 t/h do 360 t/h, a ciśnienie od 16,3 MPa do 17,5 MPa. Zastosowany falownik (PCSN) posiada częstotliwość wyjściową znamionową 75 Hz. Odkształcenie prądu wejściowego i wyjściowego jest rzędu $THD_1 = 5\text{--}10\%$. W silniku występują mniejsze straty mocy w obwodzie magnetycznym i mechaniczne oraz na rezystancjach (mniejsze wartości skuteczne prądu) silnika i sieci zasilającej. Korzystne zmniejszenie energochłonności występuje, gdy w samej pompie czy wentylatorze reguluje się parametry wyjściowe. Największa energochłonność występuje przy regulacji tych parametrów poprzez dławienie w pompie, a w wentylatorze poprzez sterowanie przysłonami.

Przykładem może być pompownia w obiegu chłodniczym wody dużego zakładu chemicznego [4]. Podczas dławienia pompy w wymaganym zakresie wydajności od 3000 m³/h do 4200 m³/h moc pobierana przez silnik zmieniała się od 740 do 850 kW (moc znamionowa silnika 1000 kW). Zastosowanie regulacji prędkości obrotowej w zakresie $n/n_N = 0,86\text{--}0,94$ zmniejszył zakres pobieranej mocy od 505 kW do 760 kW. W pompowni, w której pracuje ten zespół (pompa i napęd), są w sumie 4 pompy. Regulacja polega na pracy 1 do czterech pomp i dławieniu. Zastosowanie dwóch PC według obliczeń i pomiarów pozwoli zaoszczędzić w ciągu roku energię o wartości:

$$\Delta E = 3894 \text{ MWh}$$

Na podstawie [4] można oszacować zmniejszenie energochłonności przez wentylator bez regulacji prędkości obrotowej i po zastosowaniu PCNN. Dla przykładu wzięto pracę wentylatorowni w chłodni w miesiącu listopadzie 2012 r., gdy pracował 1 wentylator. Bez regulacji prędkości obrotowej na podstawie pomiarów i wyliczeń napęd tego wentylatora ($P_N = 90 \text{ kW}$, $U_N = 400 \text{ V}$) zużył 42 666 kWh. Po wprowadzeniu PCNN jest możliwe zużycie tylko 13 913 kWh. W ciągu roku pracuje w zależności od potrzeb od 1 do 4 wentylatorów. Oczywiście wprowadzenie do pracy układu napędowego z falownikiem PCNN lub PCSN wymaga dodatkowych urządzeń i prac. Urządzenia te to:

- kable łączące (czasem ekranowane);
- łączniki (jeżeli nie są na wyposażeniu PC);
- czujniki (układy pomiarowe) elektrycznych sygnałów;
- silniki, jeżeli dotychczasowy jest stary (powyżej 20 lat) lub ma niewłaściwe parametry.

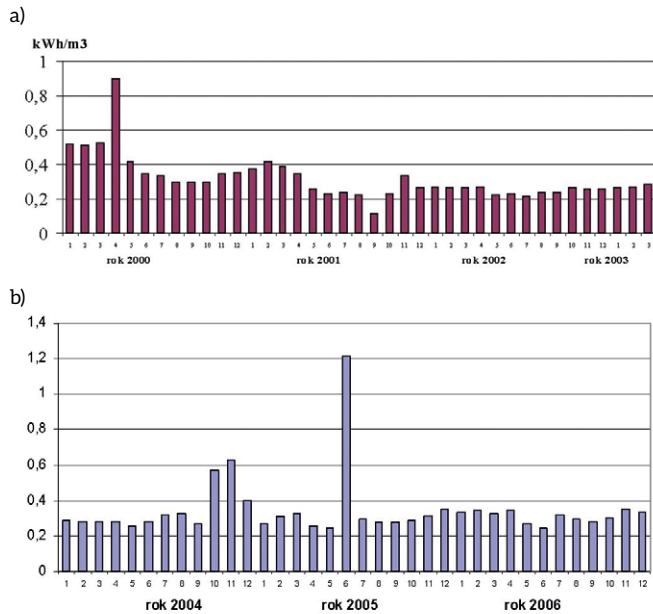
Prace dodatkowe to montaż i uruchomienie, które jest specjalistyczne, gdyż wymaga fachowej działalności i aparatury. Analiza ekonomiczna przy cenie zużytej (zaoszczędzonej energii) pozwala ocenić takie przedsięwzięcie. Na podstawie aktualnych informacji [6] można oszacować koszt zainstalowania PC oraz uruchomienia:

- dla niskiego napięcia ok. 28 000 zł (400 V) – 100 kW;
- dla średniego napięcia ok. 580 000 zł (6000 V) – 1000 kW.

Na podstawie tych informacji można ocenić czas zwrotu nakładów. Jednak ważniejszym problemem jest zmniejszenie emisji CO₂ i innych zanieczyszczeń generowanych przez elektrownie i ciepłownie węglowe. Dlatego tak ważna jest energochłonność odbiorników elektrycznych.

4. Przykłady zastosowań zmodernizowanych napędów pomp i wentylatorów

W naszym kraju pierwsze aplikacje napędów rozpatrywanych maszyn roboczych z PC to lata 70. ubiegłego wieku, a ich szybki rozwój to przełom XX i XXI wieku. Jednym z pierwszych napędów regulowanych dużej mocy był układ napędowy pompy sieciowej wdrożony w elektrociepłowni [5] miasta 60-tysięcznego. Regulowany układ napędowy uruchomiony został na początku 2000 roku w przepompowni, która pracuje cały rok. PC średniego napięcia 6 kV zasilą silnik 1250 kW o napięciu 6 kV (znamionowym). Regulacja w przepompowni odbywała się poprzez załączanie kolejnych pomp o mniejszych wartościach przepływu i dławieniu. Po uruchomieniu PCSN zasilają on dwa takie same układy silnik – pompa. Jeden taki zestaw pracuje, a drugi jest rezerwowym. PCSN zasilają przez jeden miesiąc jeden, a w drugim miesiącu drugi. Jest jeszcze jedna rezerwa bez regulacji prędkości obrotowej z silnikiem 400 kW, 6 kV i pompą o mniejszym przepływie znamionowym. Poprzednio (przed modernizacją) było 8 pomp o mocy silników 90 kW, 400 kW, 500 kW, 1050 kW. Silnik o mocy 90 kW był na niskie napięcie 400 V.



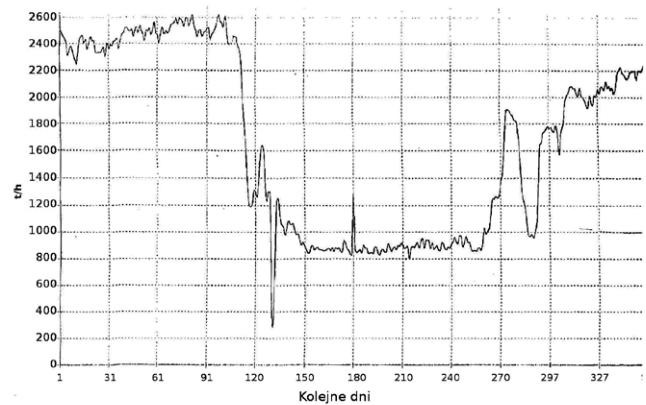
Rys. 2. a – zużycie energii elektrycznej na przetłoczenie 1 m³ wody grzewczej w pompowni sieciowej elektrociepłowni po wprowadzeniu regulacji prędkości obrotowej pompy. Uruchomienie – kwiecień 2000 r. (praca do 2003 r.);
b – zużycie energii elektrycznej w latach 2004–2006. Awaria pompowni – czerwiec 2005 r.

Na rys. 2 została przedstawiona energochłonność przepompowni po uruchomieniu w kwietniu 2000 r. Przed modernizacją (do kwietnia 2000) przetłoczenie 1 m³ wody grzewczej wymagało ok. 0,5 kWh. Po modernizacji 0,4 kWh; 0,3 kWh lub w niektórych miesiącach mniej. Wykresy a i b pokazują miesięczną energochłonność od 2000 r. do 2006 r. Awaria układu napędowego (czerwiec 2005 r.) skutkowałą załączeniem pompy z silnikiem 400 kW, 6 kV i wzrostem energochłonności do 1,2 kWh/m³. Oszczędność energii elektrycznej w ciągu roku wynosi ok. 2000 MWh. Na rys. 3 została przedstawiona zależność natężenia przepływu tej przepompowni w funkcji czasu dla jednego roku. Duża zmienność natężenia przepływu (max./min. = 2,5 razy) tłumaczy duże możliwości oszczędności energii elektrycznej.

Druga aplikacja oparta na pomiarach i obliczeniach dotyczy wspomnianej powyżej wentylatorowni chłodzenia [3]. W tabeli 1 zostały przedstawione wartości energii pobranej przez napędy tej wentylatorowni bez regulacji prędkości obrotowej i po wprowadzeniu takiej regulacji w ciągu miesięcy roku 2012. Regulacja prędkości została zastosowana do używanych silników o mocy znamionowej 90 kW i napięciu 400 V. W wentylatorowni pracuje od 1 do 4 wentylatorów napędzanych tymi silnikami. Do każdego silnika ma być zastosowany PCNN. Możliwa do zaoszczędzenia energia elektryczna na podstawie tabeli 1 wynosi:

$$\Delta E_Z = E_{br} - E_{zr}$$

przy czym:



Rys. 3. Zależność natężenia przepływu w funkcji czasu dla wybranego roku w pompowni sieciowej

Tabela 1. Porównanie energii elektrycznej zużytej w wentylatorowni przed i po wprowadzeniu regulacji prędkości obrotowej

Miesiące roku 2011	E_{br} [kWh]	E_{zr} [kWh]	Liczba pracujących wentylatorów z regulacją prędkości obrotowej
Styczeń	51 005	12 256	2
Luty	52 825	11 130	2
Marzec	117 841	54 475	3
Kwiecień	103 407	52 174	3
Maj	101 587	44 147	3
Czerwiec	brak danych	brak danych	brak danych
Lipiec	brak danych	brak danych	brak danych
Sierpień	186 920	22 224	4
Wrzesień	134 095	64 214	4
Październik	75 174	16 588	2
Listopad	42 666	13 913	1
Grudzień	16 254	6 742	2

E_{br} – suma energii zużytej przez napędy wentylatorów bez regulacji prędkości obrotowej w ciągu roku;

E_{zr} – suma energii zużytej przez napędy wentylatorów z regulacją prędkości w ciągu roku.

Po podstawieniu danych:

$$\Delta E_Z = 51\,3660 \text{ kWh} \approx 514 \text{ MWh}$$

W zależności od temperatury wody wejściowej chłodni liczba pracujących układów napęd – wentylator zmienia się od 1 do 4. Stąd wynika duża możliwość oszczędności energii elektrycznej pomimo małej mocy silników napędowych.

5. Efekty zmniejszenia energochłonności

Przedstawione przykłady pokazują możliwości zmniejszenia energochłonności tych odbiorników energii elektrycznej. Tak jak stwierdzono we wstępie, napędy pomp i wentylatorów zużywają rocznie ok. 50% wyprodukowanej energii elektrycznej (20% wentylatory, 30% pompy). Do chwili obecnej wydaje się, iż z dobrym przybliżeniem ok. 5% pomp i 5% wentylatorów posiada układy regulacji prędkości obrotowej. Możliwa jest więc jeszcze modernizacja 25% układów napęd – pompa i 15% układów napęd – wentylator. Należy przy tym przyjąć, że modernizacja powinna dotyczyć nie tylko napędów, ale też pomp i wentylatorów. Dopiero wtedy efekty tej modernizacji są dobre. Jak podaje literatura [1, 2] oraz doświadczenia autora artykułu [5], można przyjąć, że wówczas możliwe jest zmniejszenie energochłonności od 10% do 30%. Przyjmując wartość średnią 20%, możliwe jest oszacowanie zmniejszenia energochłonności tych napędów. Biorąc rok 2018 jako wyjściowy do dalszych oszacowań otrzymujemy:

- roczna produkcja energii elektrycznej (zapotrzebowanie):
 $E_p = 174 \text{ TWh}$;
- możliwa modernizacja napędów pomp i wentylatorów rzędu 40% wyprodukowanej energii elektrycznej:
 $174 \text{ TWh} \cdot 0,4 = 69,6 \text{ TWh}$;
- poprawa energochłonności po modernizacji jest rzędu 20%:
 $69,6 \text{ TWh} \cdot 0,2 = 13,92 \text{ TWh}$;
- dwutlenku węgla CO_2 :
 $13,92 \text{ TWh} \cdot 0,931 \text{ ton/MWh} \approx 12,9 \text{ mln ton}$;
- pyłu:
 $13,92 \text{ TWh} \cdot 0,06099 \text{ kg/MWh} \approx 850 \text{ tys. ton}$;
- NO_x :
 $13,92 \text{ TWh} \cdot 1,48509 \text{ kg/MWh} \approx 20670 \text{ tys. ton}$;
- SO_2 :
 $13,92 \text{ TWh} \cdot 0,03612 \text{ kg/MWh} \approx 503 \text{ tys. ton}$.

Podstawowe efekty zmniejszenia energochłonności to ograniczenie emisji zanieczyszczeń elektrowni węglowych. Ponieważ elektrownie węglowe produkują 77% energii elektrycznej, więc efekty zmniejszenia pracy tych elektrowni wynoszą w procentach:

$$\frac{13,92}{174 \cdot 0,77} \cdot 100\% = 10,4\%$$

6. Możliwości modernizacji w Polsce

Ograniczenie produkcji elektrowni węglowej w kraju o 10% jest więc możliwe i całkiem realne w ciągu ok. 15 lat. Przy większym zaangażowaniu mniejszych firm i stworzeniu dla nich możliwości rozwoju w kierunku modernizacji napędów elektrycznych z PC dla pomp i wentylatorów istnieją duże szanse nawet do 10 lat. Oprócz takich, jak: ABB, Siemens, Rockwell Automation, które mają zakłady produkcyjne PCNN i PCSN w Europie i Polsce, także kilkanaście małych firm wykonujących projekty, montaż, uruchomienie i serwis ma realną szansę spełnienia wymagań klimatycznych Unii Europejskiej. Oprócz rozwoju OZE chyba nadal warto rozwijać wysokosprawne bloki energetyczne, gdzie paliwem przez następne lata może być nasz

węgiel. Stworzy to warunki do rozwoju naszych źródeł energii elektrycznej typu OZE, gdyż będziemy mieli jeszcze zapewnione podstawowe źródła energii.


7. Wnioski

Powyższe oszacowania mogą być obarczone błędem nawet do 15%, chociaż założone zostały minimalne progi parametrów zwiększających energochłonność. Ogólnie można stwierdzić, że:

- rozwój stosowania energooszczędnych układów napędowych jest jednym ze sposobów ograniczenia emisji dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń generowanych przez elektrownie węglowe;
- ograniczenie to jest całkiem realne w Polsce i przy większości naszych produktów i urządzeń;
- takie działanie daje również możliwości rozwoju nowoczesnych dziedzin gospodarki (energoelektronika, automatyka przemysłowa, informatyka);
- doświadczenia dotychczas zdobyte w tych dziedzinach są w naszym kraju duże i dają duże prawdopodobieństwo realizacji nawet w ciągu 10 lat;
- dotychczas czas zwrotu prosty wynosi 3–5 lat, a zdyskontowany przy stopie dyskonta 10% do 6 lat. Oczywiście zależy to od ceny energii elektrycznej i układu napędowego.

Literatura

- [1] JĘDRAL W.: *Pompy wirowe*. Wyd. 2, zmienione, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [2] KOCZARA W.: *Wprowadzenie do napędu elektrycznego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- [3] SZULC Z.: *Napęd dla dużej mocy*. „Pompy, Pompownie” 1/2018.
- [4] SUCHOWOLEC M., SZULC Z., OLESZCZUK J., PIERŚCIONEK A.: *Koncepcja wraz z analizą techniczno-ekonomiczną doboru urządzeń (falowniki) do sterowania pracą agregatów pompowych oraz wentylatorów*. Opracowanie dla przemysłu chemicznego. Katowice – Police 2013. Introl Sp. z o.o. – Przedsiębiorstwo Automatyki i Pomiarów; Automatyka Sp. z o.o. – Usługi Kontrolno-Pomiarowe, Grupa – Azoty.
- [5] KUBERA T., SZULC Z.: *Ocena jakości zasilania silników indukcyjnych z przemiennikami częstotliwości SN*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 1(101)/2014.
- [6] TARŁOWSKI M.: *Opracowanie ekonomiczne dla PC do pomp i wentylatorów*. TAKOM Sp. z o.o., Warszawa – Laski 2019.

 dr inż. Zbigniew Szulc – Politechnika Warszawska ISEP