

doi:10.15199/48.2017.10.38

Wpływ zastosowania wysokosprawnych silników elektrycznych na efekty ekologiczne w Polsce

Streszczenie. Przedstawiono oszacowanie redukcji CO₂ w wyniku zastosowania silników o wyższych klasach sprawności. Wzięto pod uwagę zarówno redukcje CO₂ na skutek niewyprodukowania energii elektrycznej, jak również zwiększenie emisji CO₂ na skutek zastosowania w tych silnikach większej ilości materiałów.

Abstract. Evaluation of CO₂ reduction as a result of high efficiency motors using are presented in the paper. There were taken into consideration CO₂ reduction as a result of non-produced electrical energy as well as CO₂ increasing as a result of more materials using in this type of motors. (Influence of high efficiency electrical motors applying on ecological effects in Poland).

Słowa kluczowe: silniki elektryczne wysokosprawne, oszczędność energii, efekty ekologiczne, redukcja emisji dwutlenku węgla.

Keywords: high efficiency electrical motors, energy saving, ecological effects, reduction of carbon dioxide emission.

Wstęp

Stosując w układach napędowych silniki wysokosprawne bierze się zwykle pod uwagę efekt ekonomiczny użycia takich silników dla przedsiębiorstwa [1]. Z perspektywy kraju jednak należy rozważyć także efekty ekologiczne stosowania tego typu silników. Trzeba zauważyć, że z jednej strony dzięki oszczędności energii, a więc jej niewyprodukowaniu, uzyskujemy redukcję emisji dwutlenku węgla (CO₂), (co warunkach Polski ma szczególne znaczenie, ponieważ większość energii uzyskiwana jest ze spalania węgla), z drugiej zaś strony silniki wysokosprawne zawierają więcej materiałów, do produkcji których zużyto energię i wyemitowano CO₂. W artykule przedstawiono bilans tych wielkości.

Emisje i produkcja energii w Polsce

Poziom (w wartościach bezwzględnych) całkowitej emisji głównych zanieczyszczeń powietrza w Polsce, w tym dwutlenku węgla — głównego gazu cieplarnianego (tab.1), należy do jednego z wyższych wśród krajów Unii Europejskiej. W przeliczeniu na jednego mieszkańca roczna emisja dwutlenku węgla w 2012 r. wyniosła 8,3 t dla Polski wobec 7,4 t dla Unii Europejskiej.

W 2012 r. w Polsce największe ilości zanieczyszczeń powstały w procesach spalania: w sektorze energii (51% całkowitej emisji dwutlenku siarki i 31% tlenków azotu) oraz w gospodarstwach domowych (odpowiednio: 22% i 8%). Także transport drogowy stanowił jedno z głównych źródeł zanieczyszczeń gazowych powietrza, w szczególności tlenków azotu (33% całkowitej emisji tlenków azotu) [2].

Tabela 1. Całkowita emisja głównych zanieczyszczeń powietrza w 2012 r. w Polsce [2]

Lp.	Zanieczyszczenie	Ilość [t]
1.	Dwutlenek siarki	853 000
2.	Tlenki azotu	817 000
3.	Dwutlenek węgla	320 862 000
4.	Tlenek węgla	2 818 000
5.	Pyły	428 000

Przychód energii [2] (produkcja+import) w 2012 w Polsce wynosił 171 942 GWh, produkcja energii w 2012 roku w Polsce wynosiła 162 139 GWh, w tym przez elektrownie ciepłe zawodowe 146 480 GWh.

Zużycie węgla kamiennego w elektrowniach, elektrociepłowniach i ciepłowniach w 2012 r. wynosiło 46 005 000 t.

Zużycie węgla brunatnego w elektrowniach, elektrociepłowniach i ciepłowniach w 2012 r. wynosiło

63 334 000 t.

Moc zainstalowana brutto w elektrowniach ciepłych zawodowych wynosiła w 2012 r.:

(1) - na węglu kamiennym 20 453 MW

(2) - na węglu brunatnym 9 621 MW

razem 30 074 MW

przy mocy ogółem 38 207 MW.

Według [3] przy wytworzeniu 1 kWh energii powstaje:

(3) 760 g/kWh (760 t/GWh) CO₂ w elektrowni na węglu kamiennym (Kozienice),

(4) 1642 g/kWh (1642 t/GWh) CO₂ w elektrowni na węglu brunatnym (Bełchatów).

Na podstawie (1) i (2) oraz ilości wyprodukowanej energii przez elektrownie ciepłe zawodowe (146 480 GWh) można obliczyć, że elektrownie wyprodukowały w 2012 r.:

(5) - na węglu kamiennym 97 653 GWh

(6) - na węglu brunatnym 48 827 GWh

(7) razem 146 480 GWh energii,

oraz wytworzyły:

(8) - na węglu kamiennym 74 216 280 t CO₂

(9) - na węglu brunatnym 80 173 934 t CO₂

(10) razem 154 390 214 t CO₂.

Emisję CO₂ można policzyć także na podstawie [4] - w 2013 r. w Polsce wynosiła 831,5 kg CO₂/MWh, a więc 146 480 GWh * 831,5 t CO₂/GWh = 121 798 120 t CO₂. Jest to wartość mniejsza niż (10), co wynika zarówno z przyjęcia emisji na podstawie dwóch tylko przedstawicieli elektrowni (Kozienice (3), Bełchatów (4)) dla pierwszej wartości (10), jak i z umowności przyjęcia wartości ogłoszonej przez KOBIZE (Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami) dla wartości drugiej [4].

Emisja CO₂ stanowiła 80,2% całkowitej emisji gazów cieplarnianych w Polsce w roku 2012 [5]. Głównym źródłem emisji CO₂ jest podkategoria Spalanie Paliw (1.A). Udział tej podkategorii stanowił 92,9% w całkowitej emisji CO₂ w roku 2012. Udziały głównych podkategorii kategorii 1.A były następujące: Przemysł energetyczny – 52,7%, Przemysł wytwórczy i budownictwo – 9,5%, Transport – 14,1% oraz Inne Sektory – 16,6%.

Redukcja emisji CO₂ uzyskana dzięki zastosowaniu silników wysokosprawnych

Do oszacowania zużycia i zaoszczędzenia energii przez silniki wysokosprawne potrzebna jest ilość energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom. Podawana przez [2] wartość energii z sieci operatorów systemów dystrybucyjnych dostarczona odbiorcom w 2012 r. wynosi 121 032 GWh.

Silniki indukcyjne trójfazowe o mocy 0,75 kW – 375 kW zużywają ok. 26 % energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom [1], a więc w Polsce silniki te zużyły w 2012 r. $121\,032 \cdot 0,26 = 31\,468$ GWh.

Przyjmując czas pracy elektrowni ciepłej w Polsce równy 5100 h w ciągu roku (na podstawie rocznika statystycznego [2]) silniki indukcyjne trójfazowe o mocy 0,75 kW – 375 kW pobrały moc łączną równą (11) $31\,468 \text{ GWh} / 5100 \text{ h} = 6170 \text{ MW}$.

Tabela 2. Oznaczenia klas sprawności silników wg CEMEP (European Committee of Manufactures of Electrical Machines and Power Electronics) 1999 r., IEC (International Electrotechnical Commission) 2014 r. i NEMA (National Electrical Manufacturers Association) 2011 r.

Silniki o sprawności poza klasyfikacją standardowej	Oznaczenie wg CEMEP	Oznaczenie wg IEC	Oznaczenie wg NEMA
	Eff3		
wysokiej	Eff2	IE1	
bardzo wysokiej	Eff1	IE2	energy efficient
super wysokiej		IE3	premium efficiency
ekstra wysokiej		IE4	
		IE5	

Określenie zaproponowane przez autora artykułu.

W tabeli 2 przedstawiono oznaczenia klas sprawności obecnie obowiązujące wg IEC i NEMA oraz nieobowiązujące wg CEMEP. W artykule są używane oznaczenia wg IEC.

Gdyby wszystkie trójfazowe silniki indukcyjne klatkowe o mocy 0,75 kW – 375 kW pracujące obecnie w Polsce zastąpić silnikami klasy IE2 [1] tzn. o sprawności średnio o 2 punkty procentowe większej, to można zaoszczędzić $0,02 \cdot 6\,170 \text{ MW} = 123,4 \text{ MW}$ co odpowiada $123,4 \text{ MW} \cdot 5100 \text{ h} \approx 629 \text{ GWh}$ energii.

Analogicznie dla:

klasy IE3 $0,04 \cdot 6\,170 \text{ MW} = 246,8 \text{ MW}$ co odpowiada $246,8 \text{ MW} \cdot 5100 \text{ h} \approx 1\,259 \text{ GWh}$ energii;

klasy IE4 $0,06 \cdot 6\,170 \text{ MW} = 370,2 \text{ MW}$ co odpowiada $370,2 \text{ MW} \cdot 5100 \text{ h} \approx 1\,888 \text{ GWh}$ energii.

Redukcja CO₂ wyniosłaby (przyjęto emisję wg KOBIZE)

[4]:

(12)

$$\text{IE1-IE2 } 629 \text{ GWh} \cdot 831,5 \text{ t CO}_2/\text{GWh} \approx 523\,014 \text{ t CO}_2$$

(13)

$$\text{IE1-IE3 } 1\,259 \text{ GWh} \cdot 831,5 \text{ t CO}_2/\text{GWh} \approx 1\,046\,859 \text{ t CO}_2$$

(14)

$$\text{IE1-IE4 } 1\,888 \text{ GWh} \cdot 831,5 \text{ t CO}_2/\text{GWh} \approx 1\,569\,872 \text{ t CO}_2.$$

Obliczona w ten sposób redukcja CO₂ uwzględnia tylko zmniejszenie emisji związanej z zaoszczędzoną energią przez silniki o wyższych klasach sprawności. Należy jednak wziąć pod uwagę, że silniki o wyższych klasach sprawności zawierają więcej materiałów czynnych: blachy elektrotechnicznej, miedzi i aluminium, a także stali, przy produkcji których także wytwarzany jest CO₂. Do obliczenia rzeczywistej redukcji CO₂ należy więc wziąć te wartości pod uwagę.

Zwiększenie emisji CO₂ na skutek zastosowania w silnikach wysokosprawnych większej ilości materiałów

Według [6] emisja CO₂ KGHM Polska Miedź S.A. wyniosła w 2012 r. 2,886 t CO₂ / t Cu, czyli 2,886 kg CO₂ / kg Cu, zużycie energii 4,5 kWh/kg Cu [7], przy produkcji 550 000 t Cu rocznie w 2012 r.

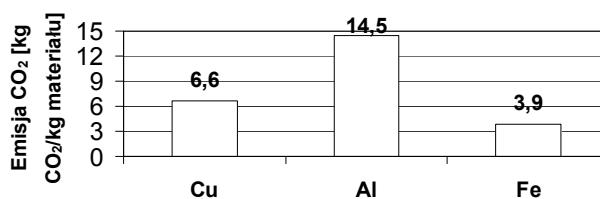
Według [8] emisja CO₂ przy produkcji Al wyniosła w 2001 r. 1,6 t CO₂ / t Al, czyli 1,6 kg CO₂ / kg Cu, zużycie energii 15,5 kWh/kg Al, przy produkcji ok. 40 000 t Al rocznie.

Według [9] emisja CO₂ wyniosła w 2006 r. 1,0 kg CO₂ / t stali, zużycie energii 0,3 toe / t stali (1 toe - tona oleju ekwiwalentnego = 41,868 GJ lub 1 toe = 11,630 MWh, 1 GJ = 277,78 kWh, 1 J = 1/3 600 000 kWh) czyli 3,5 kWh/kg stali [10], przy produkcji ok. 8,4 mln t stali rocznie w 2006 r.

W tabeli 3 zestawiono w/w dane a na rysunku 1 przedstawiono graficznie emisje CO₂ przy produkcji poszczególnych materiałów czynnych stosowanych w silnikach uwzględniające zarówno emisję bezpośrednią jak i wynikającą ze zużycia energii przy ich produkcji.

Tabela 3. Emisja CO₂ przy produkcji materiałów (mat.): miedzi (Cu), aluminium (Al) i stali

Mat.	Zużycie energii [kWh/kg mat.]	Bezpoś. rednia [kg CO ₂ /kg mat.]	Z energii [kg CO ₂ /kg mat.]	Razem [kg CO ₂ /kg mat.]	Produkcja roczna mat. [tyś. t]	Razem roczna [tyś. t CO ₂ /rok]
Cu	4,5	2,9	3,7	6,6	550	3 630
Al	15,5	1,6	12,9	14,5	40	580
stal	3,5	1,0	2,9	3,9	8400	32 760

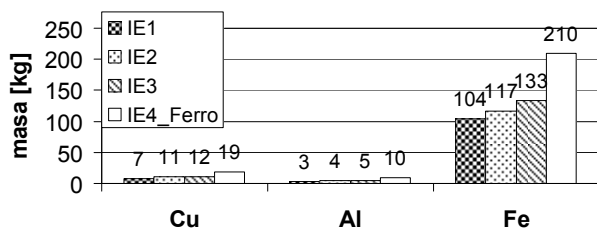


Rys. 1. Emisja CO₂ przy produkcji poszczególnych materiałów czynnych stosowanych w silnikach uwzględniająca zarówno emisję bezpośrednią jak i wynikającą ze zużycia energii przy produkcji

Na podstawie wyników prac wykonanych w ubiegłych latach w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki oraz dodatkowych obliczeń wyznaczono masy materiałów czynnych i kadłuba silnika 160 L-4 (tab. 4). Silnik klasy IE4 został zaprojektowany z zastosowaniem zalewania szczyrbów żłobkowych ferrowycią (IE4-Ferro) co przyczyniło się do zmniejszenia strat dodatkowych jałowych w tym silniku i zwiększenia sprawności.

Tabela 4. Zestawienie wyników obliczeń silnika 160 L4 o mocy znamionowej 15 kW dla różnych klas sprawności (η – sprawność znamionowa, D_1 – średnica zewnętrzna stojana, l – długość rdzenia, m – masa całkowita silnika, m_{ws} – masa uzwojenia stojana, m_{wr} – masa klatki wirnika, m_{Fe} – masa rdzenia stojana i wirnika, m_{fr} – masa kadłuba)

Wielkość	IE1	IE2	IE3	IE4_Ferro
η [%]	88,67	90,64	92,14	93,89
D_1 [mm]	245	245	245	280
l [mm]	177	200	230	280
m [kg]	114,4	131,2	149,6	239,4
m_{ws} [kg]	7,4	10,5	11,5	19,4
m_{wr} [kg]	2,7	4,1	5,3	10,0
m_{Fe} [kg]	62,1	70,1	80,7	128,0
m_{fr} [kg]	42,2	46,5	52,1	82,0



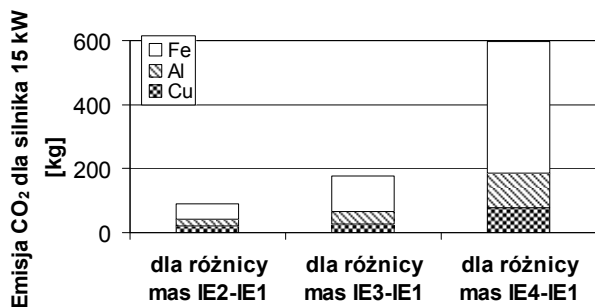
Rys. 2. Masy poszczególnych materiałów czynnych i kadłuba (Fe = blacha elektrotechniczna + kadłub) silnika o mocy znamionowej 15 kW dla różnych klas sprawności

Z tabeli 4 i rysunku 2 wynika, że pomimo zastosowania specjalnych zabiegów konstrukcyjno-technologicznych masa silnika IE4 o mocy znamionowej 15 kW znacznie, nieproporcjonalnie do innych silników (IE1÷IE3) wzrasta. Wykonanie takiego silnika w tradycyjny sposób (bez zalewania szczerbin żłobkowych ferrożywicą) nie byłoby możliwe ze względu na przekroczoną dopuszczalną długość rdzenia. Masa takiego silnika byłaby wtedy kilkukrotnie większa niż masa silnika IE1.

W celu wyznaczenia emisji CO₂ spowodowanej wzrostem masy, przy zastąpieniu silnika IE1 silnikami o wyższych klasach sprawności wzięto pod uwagę różnice między masami silników wyższych klas (IE2÷IE4) a masą silnika IE1. Te bowiem różnice przyczyniają się do dodatkowej emisji CO₂ ponad emisję konieczną przy wyprodukowaniu silnika IE1. Obliczenia te zostały wykonane na podstawie emisji przedstawionych w tabeli 3 oraz różnicy mas poszczególnych par (IE2÷IE4)-IE1. W tabeli 5 i na rysunku 3 przedstawiono wyniki tych obliczeń.

Tabela 5. Zestawienie wyników obliczeń emisji CO₂ (silnik 160 L4) wynikającej z różnic mas poszczególnych materiałów między silnikami o klasach sprawności. IE2÷IE4 a silnikiem o klasie sprawności IE1

Rodzaj materiału	Emisja CO ₂ [kg]		
	dla różnicy mas IE2-IE1	dla różnicy mas IE3-IE1	dla różnicy mas IE4-IE1
Cu	20,5	27,1	79,2
Al	20,3	37,7	105,9
Stal-blacha el.	31,2	72,5	257,0
Stal-obudowa	16,8	38,6	155,2
Razem-stal	48,0	111,2	412,2
Ogółem	88,7	175,9	597,3



Rys. 3. Emisja CO₂ dla różnicy masy materiałów dla poszczególnych klas sprawności silnika o mocy znamionowej 15 kW

Do obliczeń globalnych emisji CO₂ związanych z większą ilością materiałów zastosowanych w silnikach wysokosprawnych przyjęto założenie, że silnik o mocy znamionowej 15 kW będzie średnim przedstawicielem iloczynu mocy i ilości pracujących silników, co prowadzi do stwierdzenia, że oszacowana moc pobrana przez silniki z zakresu mocy 0,75 kW – 375 kW (11) jest przetworzona na moc oddaną przez silniki o mocy znamionowej przedstawiciela tj. 15 kW. Przyjęcie takiego założenia jest uzasadnione tym (tab. 6), że udział w rynku silników o mocy znamionowej z przedziału 7,5 kW < P_N ≤ 37 kW wynosi ponad 1/3. Chociaż różnice w masach między silnikami wyższych klas sprawności a IE1 dla innych wielkości silników mogą się różnić od przedstawiciela 15 kW, to oszacowanie globalnych emisji CO₂ związanych z większą ilością materiałów zastosowanych w silnikach wysokosprawnych nie powinno być zbyt rozbieżne w stosunku do rzeczywistych wartości. Dlatego w tab. 7 przedstawiono wyniki obliczeń emisji CO₂ przypadające na 1 kW mocy znamionowej (oddanej) silnika o mocy

znamionowej 15 kW. Wartości te są potrzebne do dalszych obliczeń emisji.

Tabela 6. Udział w rynku silników prądu przemiennego pod względem mocy znamionowej dla różnych przedziałów mocy [11]

Przedział mocy znamionowej	Średnia moc sumaryczna w przedziale [MW]	Udział pod wzgl. średniej mocy sumarycznej [%]
0,75 kW < P _N ≤ 7,5 kW	33464	33,74
7,5 kW < P _N ≤ 37 kW	33264	33,54
37 kW < P _N ≤ 75 kW	11312	11,40
75 kW < P _N ≤ 375 kW	21150	21,32
Razem	99190	100,00

Tabela 7. Zestawienie wyników obliczeń emisji CO₂ (silnik 160 L4) przypadającej na kW mocy znamionowej silnika, wynikającej z różnic mas poszczególnych materiałów między silnikami o klasach sprawności. IE2-IE4 a silnikiem o klasie sprawności IE1

Emisja CO ₂ [kg / kW mocy znamionowej silnika]		
dla różnicy IE2-IE1	dla różnicy IE3-IE1	dla różnicy IE4-IE1
5,9	11,7	39,8

W tabeli 8 przedstawiono wyniki obliczeń emisji CO₂ (silnik 160 L4) rocznie przy założeniu resursu 15 lat, wynikającej z różnic mas poszczególnych materiałów między silnikami o klasach sprawności IE2-IE4 a silnikiem o klasie sprawności IE1. Obliczenia te wykonano wg następującego wzoru

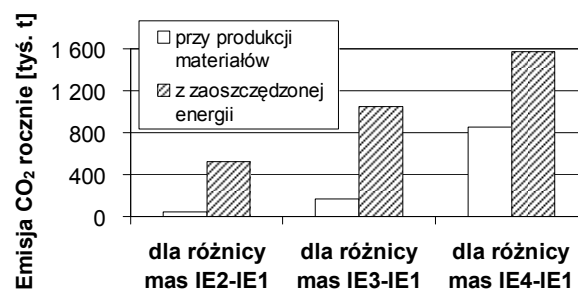
$$(15) \left(\text{Emis. CO}_2 [\text{kg/kW } P_N] (\text{tab. 7}) \times \text{moc pob. (11) [MW]} \times \left(\frac{\eta_{\text{IE2-IE4}} [\%] - \eta_{\text{IE1}} [\%]}{100} \right) (\text{tab. 4}) \right) / 15 \text{ lat [t]}$$

Tabela 8. Zestawienie wyników obliczeń emisji CO₂ (silnik 160 L4) rocznie (resurs 15 lat), wynikającej z różnic mas poszczególnych materiałów między silnikami o klasach sprawności. IE2-IE4 a silnikiem o klasie sprawności IE1

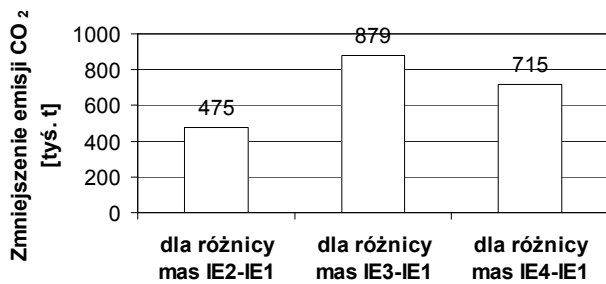
Emisja CO ₂ rocznie (resurs 15 lat) [tys. t]		
dla różnicy IE2-IE1	dla różnicy IE3-IE1	dla różnicy IE4-IE1
48	167	855

Globalne wyniki obliczeń emisji CO₂

Na podstawie wartości (12)÷(14) tj. wyznaczonych ilości zmniejszenia emisji CO₂ związanych z zaoszczędzeniem energii przez silniki o wyższych klasach sprawności oraz tabeli 8 czyli zwiększenia emisji CO₂ związanej z większą ilością materiałów zastosowanych w silnikach wysokosprawnych wykonano rysunek 4. Na rysunku 5 przedstawiono natomiast różnice pomiędzy tymi wartościami.



Rys. 4. Porównanie emisji CO₂ z zaoszczędzonej energii i powstającej przy produkcji materiałów (różnicy masy materiałów dla poszczególnych klas sprawności) w ciągu roku



Rys. 5. Zmniejszenie emisji CO₂ z uwzględnieniem zarówno zaoszczędzonej energii (różnice sprawności) jak i zużytych materiałów (różnicy masy materiałów dla poszczególnych klas sprawności) w ciągu roku

Bilans emisji CO₂ związanej z zastosowaniem silników wysokosprawnych w Polsce jest dodatni tzn. występuje redukcja CO₂, a największa przy zastosowaniu silnika o klasie sprawności IE3. Mogłoby się wydawać, że największe zmniejszenie emisji CO₂ występuje dla silnika o najwyższej sprawności (IE4) – jednak wyniki obliczeń pokazują, że na skutek przewymiarowania i dużej masy redukcja przy zastosowaniu tego silnika jest jednak mniejsza niż silnika IE3. Należy podkreślić, że silnik IE4 prezentowany w artykule jest projektowany wg tradycyjnej technologii z zastosowaniem jednak zalewania szczyrbów ferrozycią, w celu zmniejszenia strat dodatkowych jałowych i zwiększenia sprawności.

Podsumowanie

Przyjmując założenie, że gdyby wszystkie trójfazowe silniki indukcyjne klatkowe o mocy 0,75 kW – 375 kW i klasie sprawności IE1 pracujące obecnie w Polsce zastąpić silnikami klasy IE2 tzn. o sprawności średnio o 2 punkty procentowe większej, to można zaoszczędzić 629 GWh energii rocznie. Analogicznie dla:

klasy IE3 1 259 GWh energii rocznie

klasy IE4 1 888 GWh energii rocznie.

Redukcja CO₂ uwzględniająca tylko zmniejszenie związane z niewyprodukowaniem energii zaoszczędzonej przez silniki o wyższych klasach sprawności wynosi rocznie dla różnicy:

IE1-IE2 523 tys. t CO₂

IE1-IE3 1 047 tys. t CO₂

IE1-IE4 1 570 tys. t CO₂,

natomiast emisja CO₂ wynikająca z różnic mas poszczególnych materiałów między silnikami o klasach sprawności IE2-IE4 a silnikiem o klasie sprawności IE1 wynosi rocznie dla różnicy:

IE1-IE2 48 tys. t CO₂

IE1-IE3 167 tys. t CO₂

IE1-IE4 855 tys. t CO₂.

Ostatecznie redukcja CO₂ wynosi rocznie dla różnicy:

IE1-IE2 475 tys. t CO₂

IE1-IE3 879 tys. t CO₂

IE1-IE4 715 tys. t CO₂.

To oznacza, że silnik o klasie sprawności IE4 o konstrukcji tradycyjnej, nawet ze szczyrbami zalewanymi

ferrozycią przyczynia się do zmniejszenia poziomu emisji CO₂ o wartość mniejszą niż silnik o klasie sprawności IE3. Dlatego stosuje się rozwiązania konstrukcyjne silników (już nie indukcyjnych a synchronicznych) z magnesami trwałymi (Line Started Permanent Magnet Synchronous Motor), eliminując w ten sposób straty w klatce wirnika w ustalonym stanie pracy silnika i pozwalające na zmniejszenie masy materiałów czynnych w silniku i podwyższenie jego sprawności.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że silnik indukcyjny IE3 o tradycyjnej konstrukcji jest optymalny zarówno dla klienta, któremu zależy na osiągnięciu zysku z zaoszczędzonej energii [1] jak i w skali kraju, ponieważ per saldo w największym stopniu zmniejsza emisję CO₂ a także zapotrzebowanie na moc o ok. 250 MW.

Autorzy: dr hab. inż. Konrad Dąbala, dr inż. Maciej Bogumił, Instytut Elektrotechniki, Zakład Napędów Elektrycznych, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: k.dabala@iel.waw.pl, m.bogumil@iel.waw.pl.

LITERATURA

- [1] Dąbala K., Sulima R., Ocena wpływu zastosowania wysokosprawnych silników elektrycznych na oszczędność energii, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 2, 26-29
- [2] Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2014. Zakład Wydawnictw Statystycznych, <http://www.stat.gov.pl>, Warszawa, 2014
- [3] Kudelko M. i in.: Implementation of ExternE Methodology in Eastern Europe. www.externe.info/externe_2006/expolwp7.pdf, Kraków, Prague, 2004
- [4] KOMUNIKAT dotyczący emisji dwutlenku węgla przypadającej na 1 MWh energii elektrycznej 22.12.2014 r. <http://www.kobize.pl/news/326/116/KOMUNIKAT-dotyczacy-emisji-dwutlenku-wegla-przypadajacej-na-1-MWh-energii-elektrycznej.html>
- [5] Olecka A., Krajowy raport inwentaryzacyjny 2014. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2012, http://www.kobize.pl/materialy/Inwentaryzacje_krajowe/2014/NI-R-2014-PL-v1.2.pdf, Warszawa, luty 2014
- [6] http://www.kghm.pl/index.dhtml?category_id=268
- [7] <http://raportroczny.kghm.pl/zrownowazono-rozwoj/srodowisko/kluczowe-dane/zuzycie-energii/>
- [8] Płonka A i in., Zintegrowane Zapobieganie i Ograniczanie Zanieczyszczeń (IPPC). Dokument Referencyjny BAT dla najlepszych dostępnych technik w produkcji metali nieżelaznych, <http://ippc.mos.gov.pl/ippc/?id=36>, 2001
- [9] Niesler M., Najlepsze dostępne techniki (bat) wytyczne dla produkcji żelaza i stali huty zintegrowane, <http://ippc.mos.gov.pl/ippc/custom/BAT%20-%20huty%20zintegrowane.pdf>, 2005
- [10] KAPE: Raport o efektywności energetycznej(1).pdf, <http://konfederacjaiewiatan.pl/upload/File/2009%2004/Raport%20o%20efektywnosci%20energetycznej%281%29.pdf>, Warszawa, 2008
- [11] Dąbala K., Hybrydowa metoda wyznaczania sprawności silników indukcyjnych, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, Nr 271, Warszawa, 2015, 1-145