

Wojciech Moćko<sup>1,2</sup>, Andrzej Wojciechowski<sup>1</sup>, Paweł Staniak<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa

<sup>2)</sup> Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

<sup>3)</sup> Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

## ZASTOSOWANIE ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII W TRANSPORCIE

### APPLICATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN TRANSPORT

**Abstract:** Aim of the study was to analyze the influence of renewable energy sources on the well-to-wheel CO<sub>2</sub> emission of the electric driven vehicle, especially with respect to the Polish electric energy supply structure. The main reasons of growing hybrid and electric powered vehicles share in the market are: limited fossil fuels sources, narrow emission standards, global warming effect. Well-to-wheel analysis of CO<sub>2</sub> emission is a very reliable methodology which enables to compare various types of vehicle powertrain and fuels. Overall CO<sub>2</sub> emission of the electric vehicle depends mainly on share of the renewable energy sources (RES) in the market. Authors conclude that in Polish conditions, where RES share is negligible, overall CO<sub>2</sub> emission of electric vehicle is comparable with combustion engine powered one.

#### 1. Wstęp

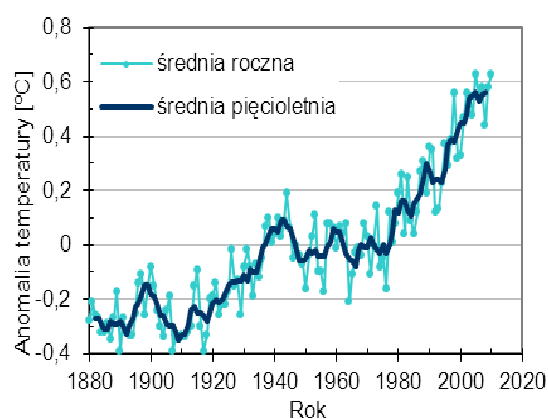
W ostatnich latach w wielu krajach prowadzone są intensywne działania ukierunkowane na popularyzację ekologicznego transportu. Jednym ze sposobów na osiągnięcie tych zamierzeń jest wykorzystanie w pojazdach napędu elektrycznego. Wielkość całkowitej emisji gazów cieplarnianych produkowanych przez samochód bardzo silnie zależy od udziału energii odnawialnej w sieci energetycznej, z której ładowane są akumulatory trakcyjne. W celu ograniczenia emisji szkodliwych substancji pochodzących z przemysłu energetycznego prowadzone są, niekiedy wymuszone uwarunkowaniami prawnymi, prace nad nowymi typami odnawialnych źródeł energii (OZE) w postaci elektrowni wodnych, słonecznych czy wiatrowych [1,2,3]. W dalszej części pracy przeanalizowano wpływ udziału OZE w produkcji energii na całkowitą emisję CO<sub>2</sub> pochodzącą z pojazdu elektrycznego.

#### 2. Przyczyny zainteresowania transportem ekologicznym

##### 2.1. Ocieplenie klimatu

Pierwszym sygnałem do rozpoczęcia intensywnych prac nad ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych, w tym CO<sub>2</sub> pochodzenia antropogenicznego - choć i w tej materii zdania specjalistów nie są jednoznaczne [4] - były wyniki pomiaru temperatury, które w ostatnich kilkudziesięciu latach wykazują silną tendencję wzrostową (rys.1) [5]. Ustalono, że przyczyną

zaistniałej sytuacji jest gwałtowny rozwój przemysłu i wiązany z nim niekontrolowany wzrost zanieczyszczenia powietrza. Zachowanie takiego trendu może w niedługim czasie doprowadzić do poważnych zmian klimatycznych, polegających na globalnym ociepleniu, stopieniu lodowców i podniesieniu poziomu oceanów. Aby temu zapobiec podjęto działania na skalę globalną. W efekcie zawartego w Kioto porozumienia wiele krajów zobowiązało się do kontroli i obniżenia emisji gazów cieplarnianych (rys.2).



Rys. 1. Globalne zmiany temperatury w ostatnich latach [6]

##### 2.2. Wymagania legislacyjne

W wyniku wielu uwarunkowań ekonomicznych, politycznych i środowiskowych Parlament Europejski stopniowo wprowadza rozpo-

rządzenia, których celem jest propagowanie i rozwój przyjaznych środowisku rozwiązań technicznych. Jednym z głównych nurtów takiej działalności jest ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> oraz szkodliwych substancji do atmosfery. Poniżej przedstawiono przykłady aktów prawnych, które pośrednio lub bezpośrednio są związane z problematyką odnawialnych źródeł energii w transporcie.

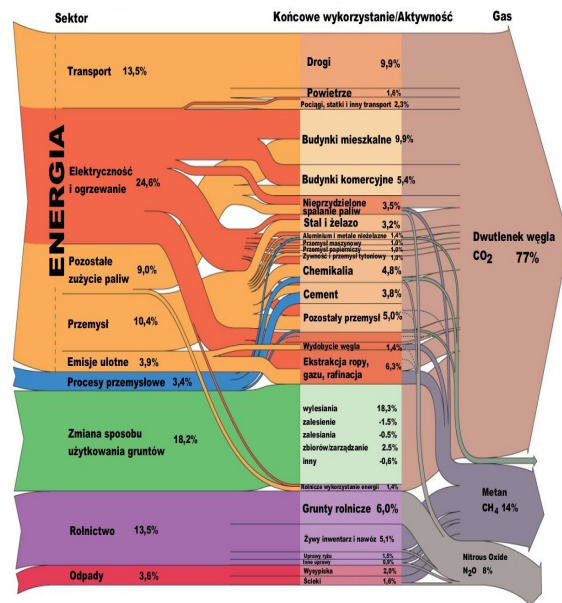
Normy emisji szkodliwych substancji określają dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń takich jak: tlenek węgla, węglowodory, węglowodory niemetanowe, tlenki azotu, cząstki stałe, generowanych przez samochody w przeliczeniu na kilometr. Przegląd wymagań zawartych w kolejnych wydaniach normy zaprezentowano w tabelach 1 i 2 odpowiednio dla samochodów z silnikiem o zapłonie iskrowym oraz samoczynnym. Coraz bardziej restrykcyjne wymagania wymuszają na producentach stosowanie w układach napędowych coraz nowszych technologii takich jak np. zawór recyrkulacji spalin, czy filtr cząstek stałych. Jedną z możliwości ograniczenia emisji szkodliwych substancji jest także zastosowanie napędu hybrydowego lub elektrycznego, który może wykorzystywać energię pochodzącą z OZE.

Poza rozporządzeniami dotyczącymi emisji zanieczyszczeń Komisja Europejska prowadzi także prace legislacyjne zmierzające do ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> pochodzącego z transportu. Opracowana przez KE strategia zakłada wykorzystanie w samochodach obok alternatywnych paliw takich, jak biopaliwa płynne i paliwa gazowe, także napędu elektrycznego [7]. Magazynem energii w przypadku napędu elektrycznego mogą być ogniwa paliwowe lub akumulatory.

Szczegółowe normy zakładają ograniczenie średniego indywidualnego poziomu emisji (SIPE) CO<sub>2</sub> dla samochodów osobowych do poziomu 130 g/km w 2015 r. i 95g/km w 2020 r. [8], natomiast dla lekkich pojazdów dostawczych 175 g/km w 2017 r. i 147 g/km w 2020 r. [9] SIPE jest definiowany jako średnia indywidualnych poziomów emisji CO<sub>2</sub> wszystkich nowych samochodów danego producenta. Istotną kwestią z punktu widzenia pojazdów niskoemisyjnych, w tym także elektrycznych jest wprowadzenie w rozporządzeniach [8], [9], definicji superjednostki, która jest określana jako nowy samochód o indywidualnym poziomie emisji CO<sub>2</sub> poniżej 50g/km. W obliczeniach dotyczących SIPE superjednostki liczone są jako wielokrotność typu samochodu, przy czym

w kolejnych latach współczynnik maleje do 1. Jest to działanie silnie stymulujące producentów do wprowadzania na rynek pojazdów elektrycznych lub hybrydowych (bo tylko takie mogą spełnić wymagania stawiane superjednostkom), gdyż szczególnie w początkowych latach nawet pojedyncze modele, dzięki mnożnikowi równemu 3,5 silnie wpływają na obliczoną wartość SIPE.

W następstwie ratyfikacji protokołu z Kioto UE podjęła szereg działań mających na celu obniżenie emisji gazów cieplarnianych takich, jak: dwutlenek węgla, metan, tlenek azotu, fluorowęglowodór, perfluorowęglowodór, sześćsiorku siarki.



Rys. 2. Schemat światowej emisji gazów cieplarnianych [4].

Jednym ze sposobów osiągnięcia założonych efektów jest wykorzystanie (OZE) do produkcji energii elektrycznej, co pośrednio dotyczy także transportu, gdyż energia pochodząca z OZE może być użyta do ładowania akumulatorów trakcyjnych. Docelowy udział OZE w końcowym zużyciu energii państw UE będzie się zwiększał stopniowo tak, aby w 2020 roku osiągnąć 20% [10]. Szczegóły dotyczące zmian w strukturze produkcji energii dla poszczególnych krajów Unii Europejskiej zamieszczono w dalszej części artykułu.

Tabela 1. Wartości emisji dla samochodów osobowych i lekkich pojazdów dostawczych z silnikiem o zapłonie iskrowym.

	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
CO (g/km)	2.72	2.20	2.30	1.00	1.00	1.00
HC (g/km)	-	-	0.20	0.10	0.10	0.10
NO <sub>x</sub> (g/km)	-	-	0.15	0.08	0.06	0.06
HC + NO <sub>x</sub> (g/km)	0.97	0.5	-	-	-	-
Cząstki stałe (g/km)	-	-	-	-	0.005*	0.005*
Obowiązuje od	07/1992	01/1996	01/2000	01/2005	09/2009	08/2014

\* dotyczy pojazdów z bezpośrednim wtryskiem paliwa

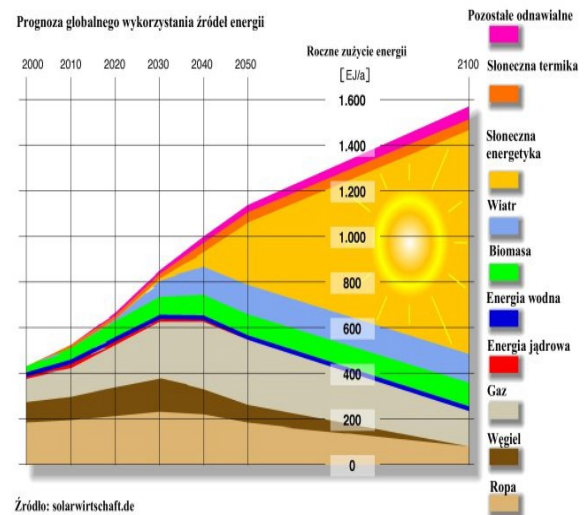
Tabela 2. Wartości emisji dla samochodów osobowych i lekkich pojazdów dostawczych z silnikiem o zapłonie samoczynnym.

	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
CO (g/km)	3.16	1.00	0.64	0.50	0.50	0.50
HC (g/km)	-	0.15	0.06	0.05	0.05	0.09
NO <sub>x</sub> (g/km)	-	0.55	0.50	0.25	0.18	0.08
HC + NO <sub>x</sub> (g/km)	1.13	0.70*	0.56	0.30	0.23	0.17
Cząstki stałe (g/km)	0.14	0.08	0.05	0.025	0.005	0.005
Obowiązuje od	07/1992	01/1996	01/2000	01/2005	09/2009	08/2014

\* dla samochodów z zapłonem samoczynnym i bezpośrednim wtryskiem paliwa wartość dopuszczalna dla emisji węglowodorów i tlenków azotu wynosi 0.9g/km, a cząstek stałych 0.10g/km, aż do 30.09.1999r

### 2.3. Ograniczone zasoby surowców energetycznych

Kolejnym powodem zainteresowania OZE są ograniczone zapasy paliw kopalnych. Analizy dotyczące tego problemu są rozbieżne, jednak w ciągu najbliższych kilkudziesięciu lat gospodarki światowe dotknie problem braku surowców energetycznych. Jedynym możliwym rozwiązaniem jest wykorzystanie OZE w postaci elektrowni wiatrowych, słonecznych lub wodnych, a także biopaliw oraz energetyki atomowej (rys. 3).



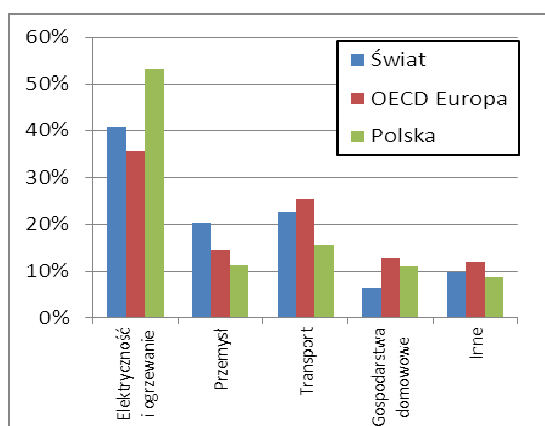
Rys. 3. Prognoza globalnego wykorzystania źródeł energii [5].

### 3. Samochody o napędzie elektrycznym

Dane dotyczące emisji CO<sub>2</sub> pochodzącej z różnych dziedzin gospodarki dla Polski, Europy i świata mają zbliżony charakter, co przedstawiono na rys. 4. Większość emitowanego dwutlenku węgla powstaje w wyniku produkcji energii elektrycznej (ok. 40%) oraz w sektorze transportowym (ok. 20%). Należy przy tym zwrócić uwagę, że wykorzystanie napędu elektrycznego w transporcie wiąże obie dziedziny, które łącznie odpowiedzialne są za ponad połowę emisji gazów cieplarnianych. W związku z tym przy założeniu popularyzacji samochodów elektrycznych, wykorzystanie OZE pozwoli wydatnie zmniejszyć ilość substancji powodujących ocieplenie klimatu pochodzenia antropogenicznego zarówno w transporcie, jak i w energetyce.

Zastosowanie w motoryzacji napędu elektrycznego pozwala na rozwiązanie wielu problemów: zmniejszenie zużycia ograniczonych zapasów paliw kopalnych, emisji szkodliwych substancji, w tym gazów cieplarnianych, czy silnego zanieczyszczenia powietrza w dużych aglomeracjach miejskich. W związku z tym w ostatnich latach prowadzone są bardzo intensywne prace badawczo-rozwojowe mające na celu opracowanie i wdrożenie do produkcji różnego rodzaju pojazdów o napędzie elektrycznym. Prace obejmują zarówno samochody osobowe, dostawcze, jak również autobusy. Zaproponowano wiele rozwiązań układów napędowych takich, jak silniki elektryczne, szeregowy i równoległy hybrydy, hybrydy z możliwością doładowania z sieci – tzw. „plug-in”, napęd sil-

nikiem centralnym lub też silnikami umieszczonymi w kołach pojazdu. Dużym zainteresowaniem rynku cieszą się oferowane od kilku lat samochody hybrydowe, które oferują na znaczne obniżenie zużycia paliwa (a związku z tym także emisji szkodliwych substancji) w cyklu miejskim przy zachowaniu pełnej funkcjonalności, pojazdu o klasycznym napędzie spalinowym. Przykładem hybrydowego samochodu osobowego, który zdobył pokaźny udział w rynku, szczególnie amerykańskim, jest Toyota Prius.



Rys. 4. Udział różnych gałęzi gospodarki w emisji CO<sub>2</sub> [11]

Tabela 3. Emisja CO<sub>2</sub> pochodząca ze spalania surowców energetycznych [11]

	Calkowita emisja CO <sub>2</sub> ze spalania surowców energetycznych [mln ton]
Świat	28 999,4
OECD Europa	3 765,2
Polska	286,8

Stopień rozwoju napędów hybrydowych w samochodach osobowych można określić jako dobry, podobnie jak wielkość udziału tych pojazdów w rynku. Natomiast w przypadku pojazdów o napędzie czysto elektrycznym udział w rynku jest ciągle znikomy, mimo że prace badawcze, jak i działania zmierzające do ich upowszechniania są bardzo intensywne. Najistotniejszą wadą samochodów elektrycznych jest ograniczony zasięg, który wynika z pojemności akumulatorów trakcyjnych mierzonej w amperogodzinach oraz wysoka cena akumulatorów. Należy jednak podkreślić, że to właśnie samochody o napędzie elektrycznym ładowane energią o dużym udziale OZE

umożliwiają znaczną redukcję całkowitej emisji CO<sub>2</sub> i szkodliwych substancji.

#### 4. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w transporcie

##### 4.1. Calkowita emisja CO<sub>2</sub>

Zmagazynowana w akumulatorach trakcyjnych energia wykorzystywana w układzie napędowym pojazdu elektrycznego musi być w miarę zużycia uzupełniana poprzez doładowanie z sieci energetycznej. W trakcie produkcji energii elektrycznej do atmosfery emitowany jest CO<sub>2</sub>, którego ilość zależy od struktury danego systemu energetycznego. Dla samochodu elektrycznego można zatem, podobnie jak w przypadku pojazdów z silnikami spalinowymi, określić całkowitą emisję CO<sub>2</sub> w przeliczeniu na km (WtW Well-to-Wheel), która zależy od typu elektrowni zasilających daną sieć, strat związanych z przesyłem oraz sprawności układu napędowego [12].

Tabela 4. Calkowita emisja CO<sub>2</sub> samochodu kompaktowego w zależności od konfiguracji napędu [12]

Konfiguracja napędu*	Paliwo	Calkowita emisja [g/km]
SZC	Olej napędowy	156±5
SZI	Benzyna	163±6
Hybrydowy równoległy	Benzyna	129±4
SHEV silnik centralny	Benzyna	108±21
SHEV silniki w kołach	Benzyna	93±20
PHEV CM 2010	En. elektryczna/benzyna	25-151
PHEVWM w przyszłości	En. elektryczna/benzyna	22-129
BPEVCM 2010	En. elektryczna	0-166
BPEVCM 2015	En. elektryczna	0-163
BPEVWM 2015	En. elektryczna	0-139
BPEVWM w przyszłości	En. elektryczna	0-136

\*) SZC – silnik o zapłonie samoczynnym; SZI – silnik o zapłonie iskrowym; SHEV – napęd hybrydowy szeregowy, PHEV CM – napęd hybrydowy „plug-in” z centralnym silnikiem, PHEVWM – napęd hybrydowy „plug-in” z silnikami w kołach, BPEVCM – napęd elektryczny z centralnym silnikiem, BPEVWM – napęd elektryczny z silnikami w kołach.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych przez van Vlieta [13] dotyczących całkowitej emisji CO<sub>2</sub> przez samochody klasy kompaktowej wyposażone w różne ro-

dzaje napędu. Widoczne w tabeli 4 przedziały emisji dla samochodów zasilanych energią elektryczną z sieci (PHEV oraz BPEV) oznaczają wartości możliwe do uzyskania w zależności od typu elektrowni z jakiej pochodzi prąd wykorzystany do ładowania. Dla samochodu elektrycznego BPEVWM 2015 całkowita emisja wynosi 0 g/km w przypadku energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii, 47 g/km w przypadku energii pochodzącej z elektrowni gazowej i 139 g/km przy wykorzystaniu energii pochodzącej z elektrowni węglowych starego typu [12].

#### 4.2. Inteligentne sieci energetyczne

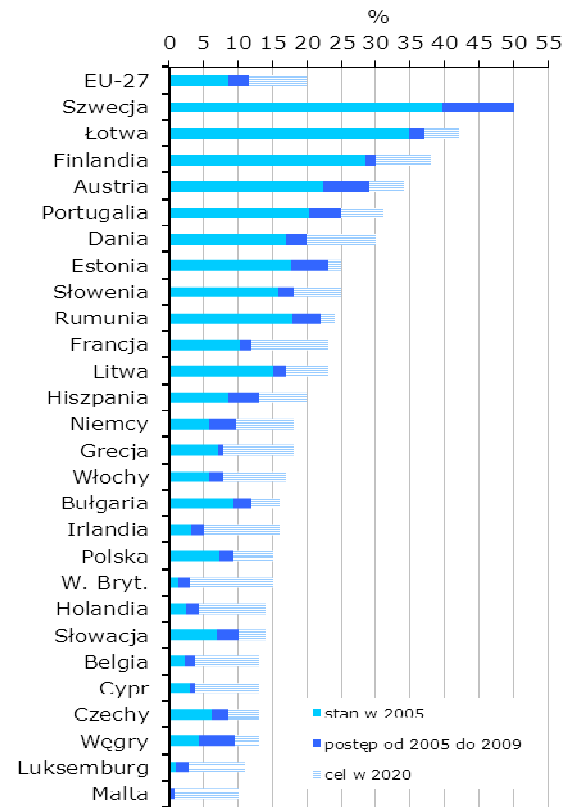
Szybki rozwój systemów teleinformatycznych pozwala na rozbudowę istniejących sieci energetycznych o możliwość szybkiej wymiany informacji pomiędzy jej elementami oraz analizy aktualnego zapotrzebowania i aktywnego dostosowania do chwilowych potrzeb użytkowników. Rozwiązanie nosi nazwę inteligentnych sieci energetycznych (ISE). Z punktu widzenia infrastruktury przeznaczonej do ładowania akumulatorów trakcyjnych w pojazdach elektrycznych zastosowanie ISE umożliwia:

- wykorzystanie akumulatorów jako zasobników energii dla sieci energetycznej w celu zminimalizowania szczytów i dołków,
- ładowanie w taryfach nocnych z wykorzystaniem tańszej energii, które po pierwsze obniża koszty, a po drugie niweluje minima energetyczne,
- ograniczenie zapotrzebowania na energię w celu zapobiegania przeciążeniu sieci,
- optymalne ładowanie akumulatorów z wykorzystaniem energii o dużym udziale OZE.

#### 4.3. Struktura energetyczna Polski i krajów europejskich oraz plany rozwoju

Zgodnie z przyjętą strategią rozwoju udział OZE dla krajów UE w 2020 r. powinien wzrosnąć do ok. 20% [10]. W chwili obecnej wśród poszczególnych krajów panuje duże zróżnicowanie (rys. 5), przy czym średnia wartość wynosi ok. 10%. W porównaniu do pozostałych Polska jest krajem o małym udziale OZE w całkowitej produkcji, zarówno jeśli chodzi o stan aktualny jak i o plany. W efekcie emisja WtW pojazdu ładowanego w Polsce jest porównywalna z samochodami o napędzie spalinowym. Sytuację może poprawić planowana budowa

elektrowni atomowych, które nie są zaliczane do OZE, ale także nie emitują gazów cieplarnianych w czasie produkcji energii elektrycznej. Problemy związane z energetyką atomową nie zostały przeanalizowane w ramach niniejszego artykułu.



Rys. 5. Udział OZE w energii końcowej[14]

#### 5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można wyciągnąć następujące wnioski:

- zastosowanie OZE w transporcie oraz znaczny wzrost udziału pojazdów elektrycznych w rynku jest w długim horyzoncie czasowym nieunikniony ze względu na ograniczone zasoby paliw kopalnych,
- całkowita emisja CO<sub>2</sub> przez samochód elektryczny jest uwarunkowana głównie przez udział OZE w całkowitej produkcji danego kraju,
- w obecnej chwili w warunkach polskich, gdzie przemysł energetyczny jest oparty na elektrowniach węglowych całkowita emisja pojazdu elektrycznego jest porównywalna z pojazdami o napędzie spalinowym.
- Przewiduje się, że dla Polski najbardziej efektywne pozyskiwanie energii odnawial-

nej do zastosowania w transporcie będzie miała:

- energia słoneczna,
- energia wiatru,
- biometan, CNG, LPG,
- bioetanol, oleje roślinne.

## 6. Literatura

- [1]. Dąbała K., Krzemień Z.: *Prądnica o małej prędkości obrotowej przeznaczona do stosowania w odnawialnych źródłach energii*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 84, 2009, s. 157-160.
- [2]. Glinka T., Goc W.: *Drobne elektrownie wiatrowe – przesłanki wprowadzenia*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 78, 2007, s.141-146.
- [3]. Lerch T.: *Współpraca elektrowni wiatrowej z maszyną dwustronnie zasilaną z systemem energetycznym w warunkach niesymetrii napięć*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 80, 2008 s. 121-126.
- [4]. A. Wojciechowski, M. Krupiński: Para wodna, jako główny czynnik stymulujący zjawisko cieplarniane, *Transport Samochodowy* Nr 2, 2010 r., s. 7-16.
- [5]. A. Wojciechowski i in.: Kierunki postępu technicznego i organizacyjnego w transporcie samochodowym w Polsce w aspekcie zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych, *Transport Samochodowy* Nr 2, 2010 r., s. 25-36.
- [6]. Hansen J.E., Ruedy R., Sato M., Lo K., NASA Goddard Institute for Space Studies, 10.3334/CDIAC/cli.001 .
- [7]. *Europejska strategia na rzecz ekologicznie czystszych i energooszczędnych pojazdów*. KOM (2010) 186.
- [8]. *Normy emisji dla nowych samochodów osobowych w ramach zintegrowanego podejścia Wspólnoty na rzecz zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> z lekkich pojazdów dostawczych*. Rozp. PE nr 443/2009 z dnia 23 kwietnia 2009 r.
- [9]. *Normy emisji dla nowych lekkich samochodów dostawczych w ramach zintegrowanego podejścia Unii na rzecz zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> z lekkich pojazdów dostawczych*. Rozp. PE nr 510/2011 z dnia 11 maja 2011 r.
- [10]. *Promowanie stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE*. Dyrektywa UE 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r.
- [11]. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion (2011 Edition), IEA, Paris.
- [12]. Campanari S., Manzolini G., de la Iglesi F. G.: *Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations*. *Journal of Power Sources* 186, 2009, s. 464-477.
- [13]. van Vliet O., Brouwer A. S., Kuramochi T., van den Broek M., Faaij A.: *Energy use, cost and CO<sub>2</sub> emissions of electric car*. *Journal of Power Sources* 196, 2011, s. 2298-2310.
- [14]. *REN21 Renewable 2011 Global Status Report*.

## Autorzy

dr inż. Wojciech Moćko<sup>1,2</sup>

e-mail: wojciech.moćko@its.waw.pl

dr inż. Andrzej Wojciechowski<sup>1</sup>

e-mail: andrzej.wojciechowski@its.waw.pl

mgr inż. Paweł Staniak<sup>3</sup>

e-mail: staniakp@ee.pw.edu.pl

<sup>1)</sup> Instytut Transportu Samochodowego

ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa

<sup>2)</sup> Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa

<sup>3)</sup> Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa.

## Finansowanie

Zaprezentowane badania zostały przeprowadzone w ramach realizacji projektu badawczego nr NR10-0020-1.

