

ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ W BUDYNKU JEDNORODZINNYM A ZMIENNOŚĆ SEZONOWA ENERGII ZE ŹRÓDEŁ ODNAWIALNYCH

STRESZCZENIE

Wykorzystanie odnawialnych zasobów energetycznych do zasilania budynków wiąże się z wieloma problemami praktycznymi. Jednym z nich jest zmienność energii dopływającej z tego rodzaju źródeł. Powoduje to konieczność właściwego doboru elementów systemu zasilającego pod kątem planowanego obciążenia. Stosowane są także baterie akumulatorów dla celów stabilizacji oraz tworzenia rezerw na wypadek braku dopływu energii ze źródeł odnawialnych. Stąd też konieczna staje się analiza dostępnych zasobów energetycznych w odniesieniu do przyszłego zastosowania planowanego systemu zasilającego.

Słowa kluczowe: energia słoneczna, energia wiatrowa, zasilanie budynku

ELECTRICITY DEMAND IN DETACHED BUILDING AND SEASONAL FLUCTUATION OF ENERGY FROM RENEWABLE SOURCES

Use of renewable energy resources for supplying of buildings with electricity links to a number of practical problems. One is the variability of energy from such sources. This necessitates the proper selection of power system components for the intended load. There are also used batteries for the stabilization and as a back-up source in case of lack of energy from renewable sources. Hence, it becomes necessary to analyze the available energy resources for the future application of the proposed power supply system.

Keywords: solar energy, wind energy, building supply

1. WSTĘP

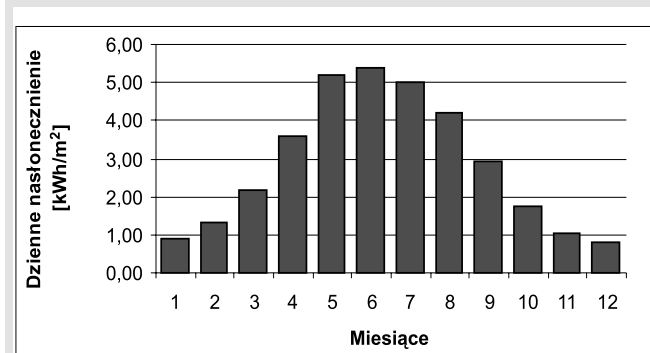
Coraz szersze wykorzystanie energii z zasobów odnawialnych dla pokrycia potrzeb energetycznych w budownictwie, szczególnie energooszczędnym i pasywnym, niesie za sobą szereg nowych problemów teoretycznych i praktycznych. Jednym z nich jest optymalne wykorzystanie dostępnych zasobów energetycznych przy zachowaniu korzystnego dla użytkownika kosztu inwestycyjnego i eksploatacyjnego instalacji zasilającej.

Ze względu na naturalną zmienność energii dostarczanej z zasobów odnawialnych, konieczne staje się jej magazynowanie lub uzupełnienie niedoborów energii przez źródła konwencjonalne. Jest to jednak dodatkowy czynnik zwiększający koszty energii.

Dla zmniejszenia kosztów planowanego systemu zasilającego wskazane jest określenie skorelowania potrzeb energetycznych danego obiektu ze zmiennością energii dostarczanej z lokalnych zasobów energetycznych. Zaliczmy do nich energię promieniowania słonecznego, wiatru, wód płynących oraz ciepła gruntu, powietrza, wód podziemnych i powierzchniowych. Przy tym do wytwarzania energii elektrycznej w systemach małej mocy na potrzeby budownictwa indywidualnego najpowszechniej wykorzystuje się dwa pierwsze źródła.

2. ZMIENNOŚĆ ENERGII Z ZASOBÓW ODNAWIALNYCH

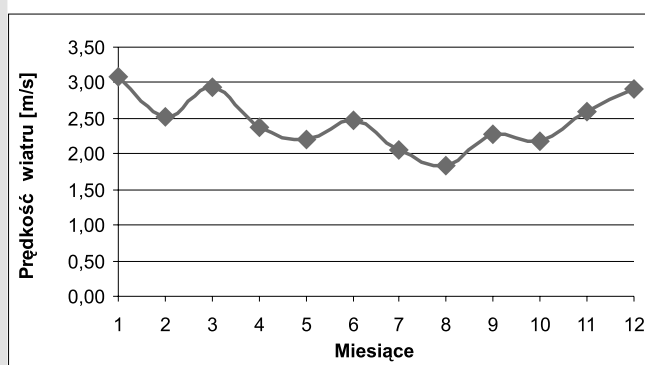
Promieniowanie słoneczne w Polsce charakteryzuje się bardzo nierównym rozkładem w cyklu rocznym, ponieważ średnio 80% z całkowitej energii słonecznej przypada na sześć miesięcy sezonu wiosenno-letniego, od początku kwietnia do końca września (rys. 1). Dla systemów solarnych szczególnie niekorzystne są zatem warunki zimowe, kiedy ilość energii słonecznej padającej na jednostkę powierzchni jest najmniejsza.



Rys. 1. Sumy dzienne promieniowania całkowitego w Krakowie w latach 1971–2000 [3]

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

Polska leży w strefie wiatrów zmiennych z przewagą wiatrów zachodnich. Wiatry wschodnie wieją głównie zimą. Najbardziej istotną cechą energii wiatrowej jest jej duża zmienność. Na potrzeby energetycznego wykorzystania wiatru najistotniejsza jest zmienność roczna, która w Polsce charakteryzuje się cyklicznością sezonową. Największe prędkości wiatru obserwowane są w okresie jesienno-zimowym, zaś najmniejsze w okresie wiosenno-letnim (rys. 2). Stąd też energia wiatru jest lepiej dopasowana do potrzeb energetycznych odbiorców komunalno-bytowych, u których zużycie energii elektrycznej również jest największe w tym okresie, głównie z uwagi na dłuższy czas pracy odbiorów o charakterze oświetleniowym.



Rys. 2. Roczny przebieg prędkości wiatru w Krakowie w latach 1971-2000 [3]

3. ZUŻYCIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ W BADANYM BUDYNKU

Zapotrzebowanie na energię elektryczną danego odbiorcy uśrednione w kolejnych przedziałach czasowych analizowanego okresu nazywa się profilem obciążenia odbiorcy. Najczęściej używane są profile dobowe, tygodniowe i roczne. Dla okresu dobowego stosuje się uśrednienie zużycia energii w przedziałach godzinowych, dla okresu tygodniowego – w kolejnych dniach, a rocznego – w okresach miesięcznych.

W profilu rocznym odbiorcy z grupy gospodarstw domowych dla kolejnych miesięcy widoczna jest zmienność zapotrzebowania na energię elektryczną. Jest ono największe w okresie jesienno-zimowym. Następnie stopniowo maleje do minimum w czasie wakacji letnich i ponownie rośnie do maksimum okresie grudzień-styczeń.

Według danych spółek dystrybucyjnych [4], jednostkowe zużycie energii elektrycznej w gospodarstwach domowych w okresie 2005-2008 wynosiło średnio 1998 kWh (tab. 1), przy przeciętnej wielkości gospodarstwa wynoszącej 3,3 osoby.

Struktura zużycia energii elektrycznej w gospodarstwach domowych jest określona przez urządzenia elektryczne znajdujące się na ich wyposażeniu. Według prowadzonych badań [1, 5] niemal wszystkie gospodarstwa domowe w Polsce są wyposażone w podstawowy sprzęt i urządzenia elektryczne (tab. 2).

Tabela 1. Zużycie energii elektrycznej w gospodarstwach domowych (GD) w Polsce 2005-2008 [4]

Rok	2005	2006	2007	2008
Liczba odbiorców	13648	13722	13727	13890
Zużycie łączne [MWh]	26336	27549	27713	28269
Średnie zużycie energii na 1 GD [kWh/rok]	1929,66	2007,65	2018,87	2035,21

Tabela 2. Wyposażenie gospodarstw domowych w sprzęt AGD [1, 5]

Sprzęt, urządzenie	[%]
Telewizor	98,4
Chłodziarka	97,8
Automat pralniczy	77,1
Magnetowid, odtwarzacz	53,1
Odbiornik radiofoniczny	52,0
Zestaw Hi-Fi	44,9
Zamrażarka	35,3
Pralka i wirówka	34,3
Komputer osobisty	29,0
Kuchenka mikrofalowa	26,6
Odtwarzacz płyt kompaktowych	11,1
Zmywarka do naczyń	3,4

Do obliczeń modelowych zapotrzebowania energetycznego gospodarstwa domowego przyjęto typowy budynek jednorodzinny, zlokalizowany w pobliżu Krakowa. Jest to dom parterowy bez podpiwniczenia, murowany zbudowany w technologii tradycyjnej z poddaszem użytkowym i z dwuspadowym dachem. W budynku znajduje się sześć pokoi, kuchnia, oraz dwie łazienki, kotłownia i garaż. Powierzchnia użytkowa budynku wynosi 133,1 m², powierzchnia zabudowy 114,0 m², a kubatura 715,0 m³. Potrzeby grzewcze budynku (c.o. + c.w.u.) pokrywane są z kotła gazowego. Na podstawie posiadanych danych statystycznych przyjęto standardowe wyposażenie budynku w urządzenia elektryczne (tab. 3).

Czas pracy odbiorników oświetleniowych podano dla grudnia. W dalszych obliczeniach zużycia energii został on zmniejszony proporcjonalnie do średniej długości dnia w miesiącu. Przy dodatkowym założeniu stałego czasu pracy pozostałych urządzeń, otrzymano roczny przebieg zmienności zapotrzebowania na energię elektryczną w budynku (rys. 3).

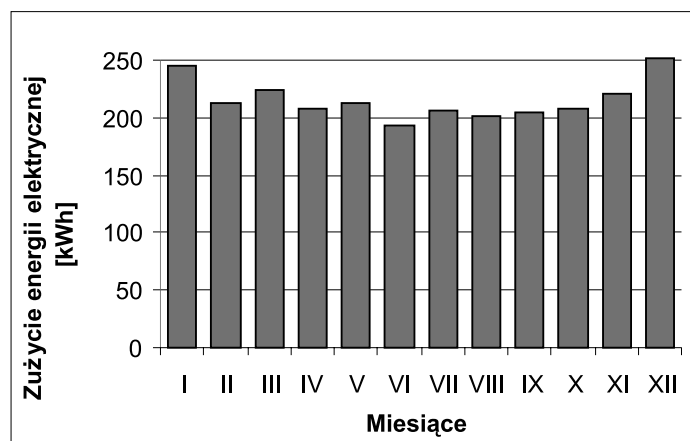
Łączne roczne zużycie energii elektrycznej w analizowanym obiekcie określono na 2585 kWh. Jest to wartość odpowiadająca przeciętnemu zużyciu energii dla tej wielkości gospodarstwa domowego w Polsce [1, 5].

Tabela 3. Zestawienie odbiorników energii elektrycznej w analizowanym budynku

Odbiornik	Ilość	Moc [W]	Moc sumaryczna	Czas pracy dobowy	Czas pracy tygodniowy
Kuchnia					
Żarówka	2	75	150	3	21
Żarówka halogen	4	35	140	4	28
Czajnik Elektryczny	1	1000	1000	0,2	1,4
Mikser	1	400	400		1
Chłodziarko-zamrażarka 300 l	1	60	60	24	168
Piekarnik	1	2000	2000		2
Kuchenka elektryczna	1	1000	1000	0,2	1,4
Wentylator kuchenny	1	50	50	2	14
Pokój 1					
Żarówka	4	60	240	4	28
Telewizor LCD	1	120	120	3	21
Sprzęt AV	1	40	40	3	21
Pokój 2					
Świetlówka	2	15	30	4	28
Lampa biurowa	1	40	40	3	21
Komputer PC	1	150	150	3	21
Hall + korytarz					
Świetlówka	2	15	30	4	28
Telefon	1	10	10	24	168
Odkurzacz	1	800	800		2
Łazienka 1					
Pralka	1	2300	2300		1
Żarówka	2	60	120	2	14
Inne urządzenia	2	100	200	0,2	1,4
Kotłownia					
Pompa obiegowa	1	50	50	4	28
Żarówka	1	75	75	0,5	3,5
Pompa (woda)	1	500	500	0,5	3,5
Garaż					
Żarówka	4	60	240	0,5	3,5
Szlifierka	1	800	800		0,5
Wiertarka	1	600	600		0,2
Inne narzędzia	2	50	100		0,5
Poddasze					
Pokój 1					
Żarówka	1	60	60	1	7
Świetlówka	3	16	48	3	21
Lampa biurowa	1	40	40	3	21
Radio	1	20	20	2	14
Pokój 2					
Żarówka	1	60	60	1	7
Świetlówka	3	12	36	2	14
Lampa biurowa	1	40	40	3	21
Zestaw AV	1	25	25	3	21
Inne urządzenia	4	10	40	2	14

Tabela 3 cd.

Pokój 3					
Żarówka	1	60	60	1	7
Świetlówka	2	12	24	2	14
Lampka nocna	1	25	25	2	14
Radio	1	20	20	1	7
Pokój 4					
Żarówka	1	60	60	1	7
Świetlówka	2	12	24	2	14
Łazienka					
Żarówka	2	60	120	1	7
Żarówka halogen	3	25	75	2	14
Suszarka	1	800	800	0,1	0,7
Golarka	1	50	50	0,1	0,7
Inne urządzenia	2	30	60	0,2	1,4
Hall + korytarz					
Świetlówka	3	12	36	3	21
Strych					
Żarówka	2	75	150	0,4	2,8



Rys. 3. Przebieg rocznego zużycia energii w analizowanym budynku

4. ZASOBY ENERGII WIATROWEJ I SŁONECZNEJ

Do obliczeń energetycznych w budownictwie wygodnie jest stosować dane klimatyczne zawarte w tzw. typowym roku meteorologicznym. Został on wprowadzony w związku z obowiązkiem sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej budynków. Typowy rok meteorologiczny [2] to roczny ciąg danych klimatycznych z meteorologicznej stacji pomiarowej, wybrany spośród wielolecia, albo kombinacja miesięcznych ciągów danych wybranych spośród danych wieloletnich. Na podstawie danych meteorologicznych z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMiGW) stworzone zostały pliki z typowymi latami meteorologicznymi według standardu ISO dla 61 stacji IMiGW. Dane te wykorzystano, jako model klimatu otoczenia badanego budynku mieszkalnego.

Na potrzeby zasilania w energię elektryczną w budynku zaproponowano wykorzystanie energii promieniowania słonecznego oraz energię wiatru. Uwzględnienie powyższych danych pozwala na określenie przebiegu rocznego strumienia energii dostarczanego przez źródło wiatrowe i słoneczne. W tym celu wykorzystano dane dla stacji IMiGW Krakowie Balicach [3]. Wartość dostępnej energii słonecznej określono wprost z danych pomiarowych. Pomiarzy wiatru prowadzone są na wysokości 10 m nad poziomem gruntu. Energię wiatru określono z zależności:

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot t$$

gdzie:

- ρ – gęstość powietrza [kg/m^3],
- A – powierzchnia wirnika [m^2],
- v – prędkość wiatru [m/s],
- t – czas [s].

Gęstość powietrza została skorygowana według zmian średniej temperatury powietrza. Skorzystano z zależności:

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T}$$

gdzie:

- p – ciśnienie [Pa],
- r – indywidualna stała gazowa powietrza suchego [J/(kg·K)],
- T – temperatura [K].

Zużycie energii elektrycznej w budynku oraz uzyskane wartości jednostkowej energii promieniowania słonecznego i energii wiatru dla kolejnych miesięcy w roku zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zasoby energetyczne i potrzeby cieplne budynku

Miesiąc	Energia słoneczna	Energia wiatrowa	Zużycie energii w budynku
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh]
1	37,58	28,23	244,67
2	50,02	6,80	212,43
3	76,85	11,83	223,75
4	116,48	5,89	208,03
5	158,92	4,87	212,63
6	156,60	6,63	192,62
7	150,74	3,91	205,50
8	136,14	2,85	201,47
9	97,49	5,33	203,94
10	66,80	5,00	208,03
11	43,20	8,07	220,72
12	39,73	11,78	251,99

5. REZULTATY OBLICZEŃ

Analizę korelacji obliczonego zapotrzebowania budynku na energię elektryczną przeprowadzono względem dostępnych jednostkowych zasobów energetycznych [kWh/m²]. To działanie nie powinno być rozumiane jako uzależnienie tych dwóch zmiennych (zasoby i zużycie energii). Właściwym wyjaśnieniem jest próba znalezienia odpowiedzi na pytanie „jaka część zmiennej zależnej jest wyjaśniona otrzymaną zależnością funkcyjną i współczynnikiem determinacji”. Badania miały określić zgodność i stopień pokrycia potrzeb energetycznych analizowanego budynku przez rozpatrywane dostępne zasoby energetyczne (słoneczne i wiatrowe) w okresie jednego roku kalendarzowego.

Do obliczeń wykorzystano arkusz kalkulacyjny MS-Excel z opcją analizy linii trendu na wykresie. Zbadano trzy przypadki, tj. energię wiatru, energię słoneczną i oba źródła jednocześnie. Rezultaty obliczeń przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Trzy podstawowe warianty zasilania budynku

Źródło energii	Wiatr	Słońce	Wiatr + Słońce
Prosta regresji	$y = 1,923x + 199,2$	$y = -0,066x + 12,38$	$y = -0,262x + 242,4$
R^2	0,564	0,783	0,444

Należy zauważyć, iż jedynie w przypadku wykorzystania wiatru otrzymano dodatnią wartość współczynnika kierunkowego prostej regresji. Oznacza to zgodność zmian dopływu energii wiatru ze zmianami zapotrzebowania energetycznego budynku. Kwadrat współczynnika korelacji wyniósł $R^2 = 0,564$ (współczynnik determinacji), co określa jaką część zmienności cechy Y (zużycia energii elektrycznej w budynku) można opisać za pomocą zmienności cechy X (energia wiatru).

W pozostałych dwóch przypadkach wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji były ujemne. Wskazuje to na nadmiar dostarczanej energii w pewnych przedziałach czasu, przy jej deficycie w pozostałych, w odniesieniu do bieżących potrzeb. W praktyce jest to widoczne w systemach fotowoltaicznych, które muszą być w okresie zimowym wspomagane innym źródłem energii elektrycznej.

Interesujące może być zbadanie zmienności udziału obu źródeł na stopień pokrycia potrzeb energetycznych budynku. Wykonano takie obliczenia, a ich rezultaty zawarto w tabeli 6. Przedstawia ona równania regresji oraz wartości współczynnika determinacji R^2 przy różnej wartości wykorzystania energii słonecznej i wiatrowej. Symbol „s” w pierwszej kolumnie oznacza energię słoneczną i jej udział jednostkowy, natomiast „w” – energię wiatrową.

Tabela 6. Rezultaty obliczeń dla systemu mieszanego

Udział źródeł	Równanie regresji	R^2
s	$-0,066x + 12,38$	0,783
s + 0,2w	$-0,264x + 240,8$	0,510
s + 0,4w	$-0,264x + 241,3$	0,495
s + 0,6w	$-0,264x + 241,7$	0,479
s + 0,8w	$-0,263x + 242,1$	0,462
s + w	$-0,259x + 234,6$	0,487
0,8s + w	$-0,325x + 242,7$	0,421
0,6s + w	$-0,423x + 242,9$	0,380
0,4s + w	$-0,580x + 242,2$	0,291
0,2s + w	$-0,503x + 229,2$	0,052
w	$+1,923x + 199,2$	0,564

Uzyskane rezultaty wskazują na lepszą zgodność zmienności sezonowej energii wiatru na potrzeby zasilania budynku w energię elektryczną. Przy tym należy jednak pamiętać, iż w pewnych okresach utrzymuje się pogoda bezwietrzna. Stąd też istnieje potrzeba stosowania źródeł dodatkowych i akumulacji energii elektrycznej.

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono analizę zasobów energii słonecznej i wiatrowej dla ich wykorzystania w systemie zasilającym budynek jednorodzinny w energię elektryczną. Do celów obliczeniowych posłużono się danymi z tzw. typowego roku meteorologicznego. Określono wyposażenie budynku w odbiorniki energii elektrycznej, określono zużycie dla kolejnych miesięcy w roku.

Na podstawie danych klimatycznych i obliczonego zapotrzebowania energetycznego budynku określono zgodność i stopień pokrycia potrzeb energetycznych analizowanego budynku przez rozpatrywane dostępne zasoby energetyczne (słoneczne i wiatrowe) w ciągu jednego roku.

Przeprowadzone analizy wskazują na lepszą zgodność zmienności sezonowej energii wiatru na potrzeby zasilania budynku w energię elektryczną. Przy projektowaniu takiego mieszanego systemu zasilania należy zwrócić uwagę także na szereg aspektów praktycznych. Przede wszystkim, prędkość wiatru w badanej lokalizacji jest zbyt mała w przypadku tradycyjnych turbin wiatrowych o osi poziomej. Mają one bowiem prędkość rozruchową rzędu 3 m/s. W badanej lokalizacji, dla uzyskania lepszych warunków pracy siłowni wiatrowej, konieczne byłoby zatem posadzenie takiej turbiny na wysokim (20–30 m) maszcie, co podnosi koszty inwestycji. Można zastosować turbiny wiatrowe o osi pionowej (VAWT), które charakteryzują się niskimi prędkościami rozruchu, ale mają niższą sprawność. Ze względu na okresy bezwietrzne występuje ponadto potrzeba akumulacji energii.

Wartość energii dostarczonej do odbiorcy końcowego będzie pomniejszona o straty przetwarzania. Część energii nie zostanie także w ogóle przetworzona, ze względu na próg zadziałania urządzeń. Jest to widoczne w elektrowniach wiatrowych, które mają określoną prędkość rozruchu. Zatem w obliczeniach systemu zasilającego z uwzględnieniem rzeczywistych urządzeń, część zasobów energii wiatru (o prędkościach poniżej prędkości startowej i powyżej prędkości maksymalnej) zostanie pominięta.

Kolejną grupę zagadnień do rozważenia przez projektanta i potencjalnego inwestora stanowi strona ekonomiczna

i prawna takiej inwestycji. Wiadomo bowiem, iż w przypadku budownictwa jednorodzinnego, instalacje fotowoltaiczne są mniej kłopotliwe od strony inwestycyjnej (ograniczenia formalnoprawne). Ponadto, w czasie eksploatacji nie generują uciążliwego dla otoczenia hałasu tak jak siłownie wiatrowe. Z drugiej strony, ze względu na uzyskane rezultaty wskazujące na lepszą „jakość” energii wiatru do analizowanych zastosowań, zagadnienie to należy uznać za otwarte i będzie to tematem dalszych badań.

Literatura

- [1] Mały rocznik statystyczny Polski 2009, GUS, Warszawa 2010
- [2] Narowski P.: *Obliczenia energetyczne budynków. Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski*. Rynek Instalacyjny, październik 2008
- [3] *Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków*. <http://www.mi.gov.pl/2-48203f1e24e2f-1787735.html>
- [4] Władczyk M.: *Dystrybucja energii elektrycznej w Polsce*. Energia Elektryczna, nr 2, 2010
- [5] Wojtulewicz J., Osicki A., Pasierb S.: *Oszacowanie potencjału zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w gospodarstwach domowych w Polsce*. Katowice, styczeń 2006, Fundacja na rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii w Katowicach

Wpłynęło: 15.07.2010

Piotr MICHALAK



Studia magisterskie na kierunku elektrotechnika, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, ukończył w roku 1999. Następnie podjął pracę w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych na stanowisku asystenta; od roku 2009 jest adiunktem w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska. Zajmuje się problematyką wykorzystania odnawialnych zasobów energetycznych oraz zastosowań energoelektroniki w energetyce odnawialnej. Jest autorem i współautorem 40 referatów i artykułów.

e-mail: pmichal@agh.edu.pl