

# Możliwość generacji energii elektrycznej podczas ugięcia szklanej tafli

## SŁOWA KLUCZOWE

efektywność energetyczna,  
mikrogeneracja energii, szklane fasady

## KEY WORDS

energy efficiency, energy  
microharvesting, glass facades

dr inż. Krzysztof Rafał

dr inż. Andrzej Grzebielec\*

andrzej.grzebielec@pw.edu.pl

Politechnika Warszawska, Wydział  
Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

## STRESZCZENIE

Pozyskiwanie energii (energii elektrycznej czy ciepła) z wykorzystaniem szkła kojarzy się głównie z fotowoltaiką i kolektorami słonecznymi. Natomiast wiele szklanych biurowców boryka się z problemem naporu wiatru na powierzchnie. Artykuł prezentuje wyniki badań eksperymentalnych rozwiązania, które pozwala na odzyskanie części energii wynikającej właśnie z tego naporu. Ilość uzyskanej energii jest nieporównywalnie mniejsza niż w przypadku zastosowania fotowoltaiki, czy chociażby turbin wiatrowych dlatego mówi się raczej o mikrogeneracji czy mikropozyskaniu. Nie mniej jednak artykuł pokazuje, że istnieje potencjał wykorzystania fasad szklanych do generacji energii elektrycznej w inny sposób niż wykorzystując zjawiska fotowolticzne.

## SUMMARY

Energy generation (electricity or heat) using glass is mainly connected with photovoltaics and solar collectors. On the other hand, many glass office buildings struggle with the problem of wind pressure on the surfaces. The article presents the results of experimental research on a solution that allows to recover some of the energy resulting from this pressure. The amount of energy obtained is incomparably smaller than in the case of the use of photovoltaics or even wind turbines, therefore it is rather referred to as microgeneration or micro-acquisition. Nevertheless, the article shows that there is a potential for using glass facades to generate electricity in a different way than using photovoltaic phenomena.

## WSTĘP

Budynki w miastach są poddawane przez większą część roku naporowi wiatru. Pojawiają się pomysły aby pomiędzy nimi montować turbiny wiatrowe i odzyskiwać część energii. Niestety rozwiązania to nie spełnia wymogów bezpieczeństwa i raczej nie będzie rozwijane. Dlatego też pojawiają się inne pomysły jak energię wiatru wykorzystywać w miastach. Takim właśnie rozwiązaniem jest pomysł z wykorzystaniem mikrogeneratorów prądu elektrycznego wykorzystującego ugięcie szklanych szyb [1-3]. Poprzez zastosowanie zwykłej dźwigni można za pomocą niewielkich ugięć tafli szklanej przesunąć znacząco rdzeń generatora produkując tym samym energię elektryczną. Napór wiatru może być ciągły przez co generacja energii będzie niewielka, natomiast problem ten można zniwelować poprzez zastosowanie sprężyn o odpowiednim współczynniku sprężystości.

## STANOWISKO BADAWCZE

Do wyznaczenia ilości generowanej energii elektrycznej zbudowano stanowisko badawcze z następujących elementów:

- falownik o możliwości zadawania częstotliwości wyjściowej od 0,5 do 400 Hz firmy SANYU.EU, model: SX1000-OR7G-2;
- silnik asynchroniczny 3-fazowy (zasilany poprzez falownik) firmy BESEL S.A. o mocy 0,06 kW, typ: SKg 56-4A1;
- opornik MDR-93-1 z możliwością nastawy oporu od 0 do 100 Ohm;
- karta pomiarowa Advantech USB 4704.
- komputer klasy PC;
- generatory przewidziane do montażu w profilach okien biurowców.

Stanowisko badawcze umożliwia zmianę generatorów, zmianę obciążenia, zmianę prędkości obrotowej silnika - a tym samym częstotliwości przesuwania się cewki wzdłuż magnesu oraz skoku cewki. Do zapisywania wyników eksperymentu wykorzystano kartę pomiarową Advantech oraz program dostarczony przez producenta karty o nazwie: Advantech Driver Demo: Interrupt Data Transfer. Program został zmodyfikowany w celu zapisywania danych do formatu CSV

## METODYKA BADAŃ

Metoda badań składała się z trzech etapów:

### Etap 1: przygotowanie eksperymentu

W ramach tego etapu ustalano częstotliwość zadawaną na falowniku, skok cewki, obciążenie wywołane opornikiem oraz umieszczano generator w przygotowanym miejscu.

### Etap 2: badanie generatora

W ramach tego etapu uruchamiano silnik zgodnie z nastawami z etapu pierwszego, oraz obserwowano czy układ: silnik, mechanizm posuwu oraz generator działają prawidłowo i bez zakłóceń. Jeśli tak, uruchamiano program pomiarowy. Program pomiarowy dokonywał odczytu generowanego napięcia w przeciągu 2 sekund z częstotliwością czytania 1000 wartości na jedną sekundę. W wyniku odczytu uzyskiwano 2000 wartości, które były zapisywane w pliku w formacie CSV.

### Etap 3: obróbka danych

Dane dostarczone z programu pomiarowego poddawano obróbce, w celu wyznaczenia napięcia skutecznego oraz uzyskiwanej mocy. Napięcie skuteczne wyznaczone zostało z zależności (1):

$$U = RMS = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_N^2}{N}} \quad (1)$$

gdzie  $U_1, U_2, \dots, U_N$  to napięcia chwilowe, a  $N$  to liczba wyników pomiarowych w badanym przypadku  $N=2000$ . Znając napięcie skuteczne  $U$  oraz opór  $R$  zadany w pierwszym etapie wyznaczano generowaną moc  $P$  zgodnie z zależnością (2):

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (2)$$

W tym etapie także wyznaczano rzeczywistą częstotliwość  $f$  przesuwania się cewki na podstawie wyników eksperymentalnych (dla silników asynchronicznych częstotliwość zadana na falowniku różni się od rzeczywistych obrotów silnika ze względu na poślizg).

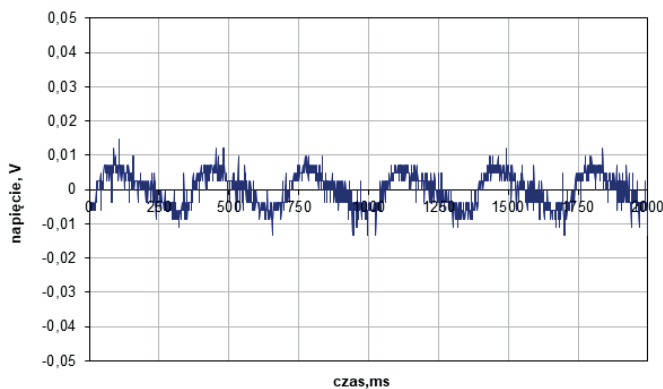
### WYNIKI POMIARÓW

Zgodnie z metodyką opisaną we wcześniejszym rozdziale przeprowadzono badania dla trzech dostarczonych różnych generatorów:

- bez pierścienia stalowego;
- z pierścieniem stalowym o szerokości 16 mm;
- z pierścieniem stalowym o szerokości 6 mm.

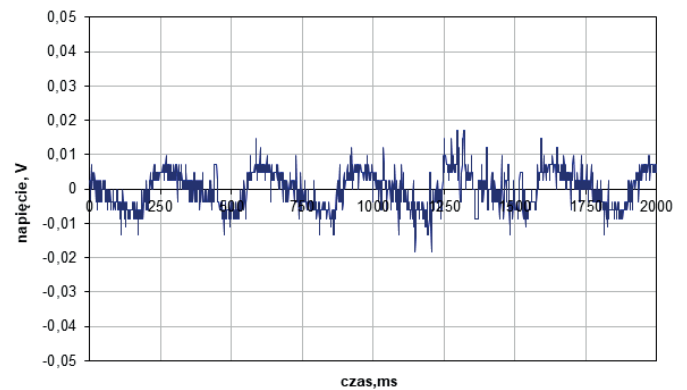
#### Generator nr 1: bez pierścienia stalowego

Na rysunkach od 1 do 3 przedstawiono wyniki badań dla pierwszego generatora w funkcji zmieniającego się obciążenia zacisków.



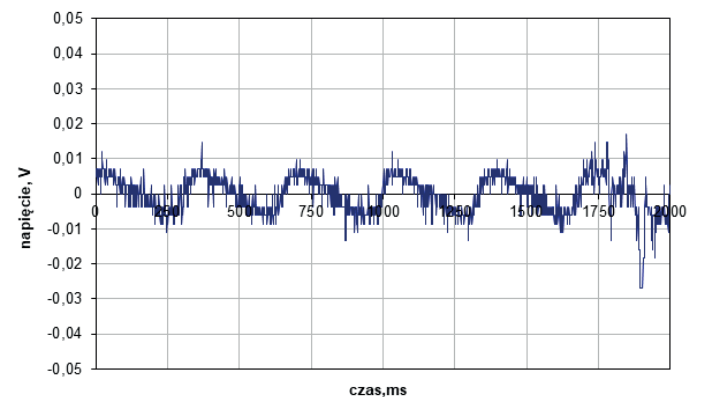
Rys. 1. Skok 4mm, nastawa na falowniku F6,0, obciążenie: 100 Ω.

U	R	P	f
[mV]	[Ω]	[μW]	[Hz]
4,83	100	0,23	2,96



Rys. 2. Skok 4mm, nastawa na falowniku F6,0, obciążenie: 80 Ω.

U	R	P	f
[mV]	[Ω]	[μW]	[Hz]
5,40	80	0,36	2,94

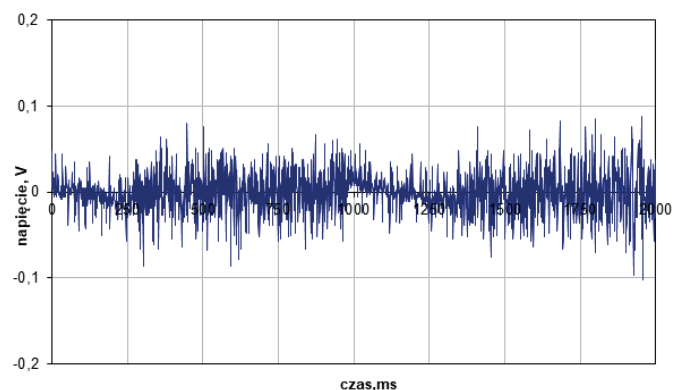


Rys. 3. Skok 4mm, nastawa na falowniku F6,0, obciążenie: 60 Ω.

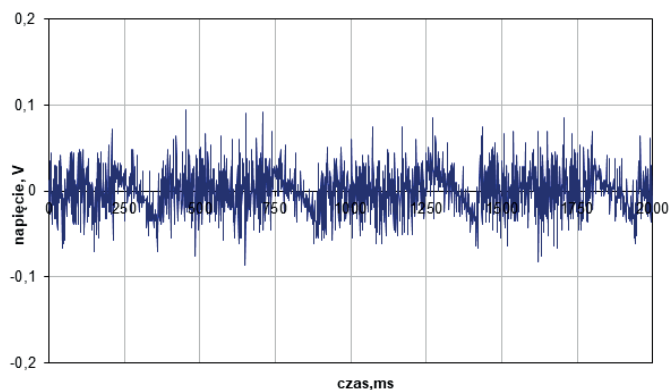
U	R	P	f
[mV]	[Ω]	[μW]	[Hz]
5,46	60	0,50	2,93

#### Generator nr 2: z pierścieniem stalowym o szerokości 16 mm

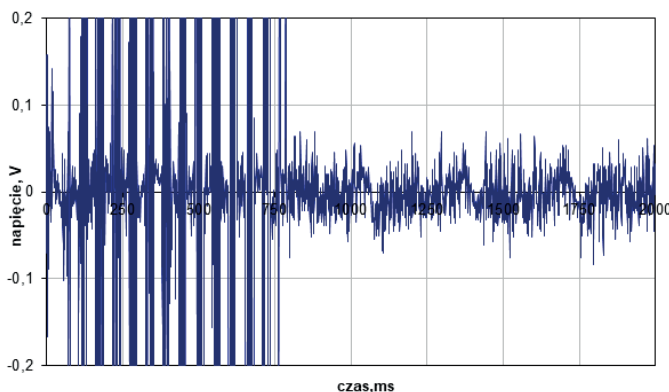
Dla generatora nr 2 przeprowadzono cały szereg pomiarów w zależności od skoku, obciążenia oraz częstotliwości drgań. Pierwsza seria pomiarowa (przedstawiona na rysunkach 4-7) została wykonana dla pracy układu bez zwierania obwodu.



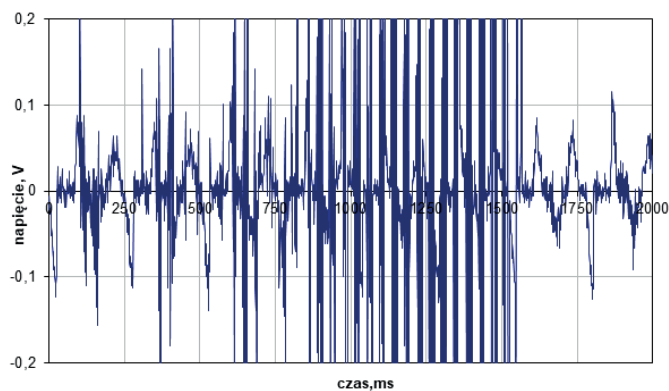
Rys. 4. Skok 2mm, nastawa na falowniku F2,2.



Rys. 5. Skok 2mm, nastawa na falowniku F4,0.



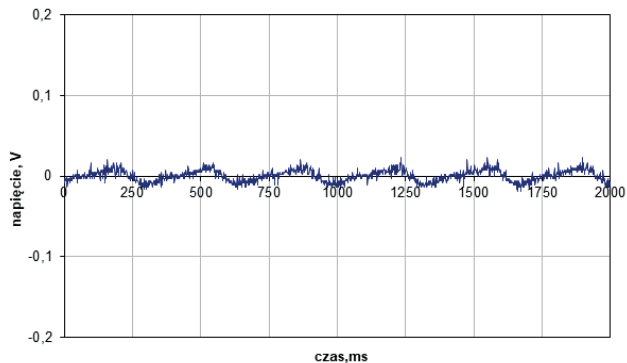
Rys. 6. Skok 2mm, nastawa na falowniku F6,0.



Rys. 7. Skok 2mm, nastawa na falowniku F8,0.

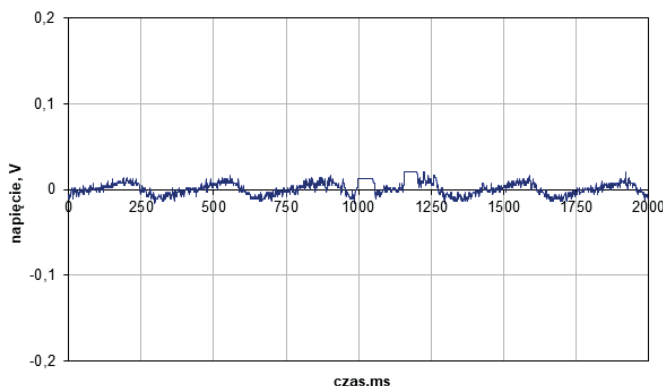
**Generator nr 3: z pierścieniem stalowym szerokości 6 mm**

Dla generatora, w którym zamontowano pierścień o szerokości 6 mm została przeprowadzona seria badań, w której dla stałego skoku i stałej częstotliwości zmieniano obciążenie.



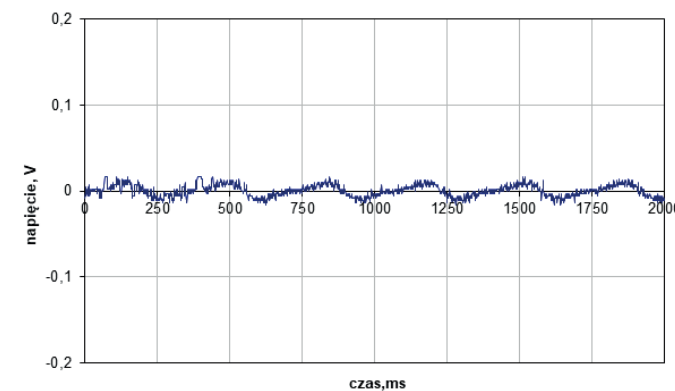
Rys. 8. Skok 4mm, nastawa na falowniku F6,0, obciążenie 100 Ω.

U	R	P	f
[mV]	[Ω]	[μW]	[Hz]
7,11	100	0,51	2,90



Rys. 9. Skok 4mm, nastawa na falowniku F6,0, obciążenie 80 Ω.

U	R	P	f
[mV]	[Ω]	[μW]	[Hz]
7,62	80	0,73	2,90



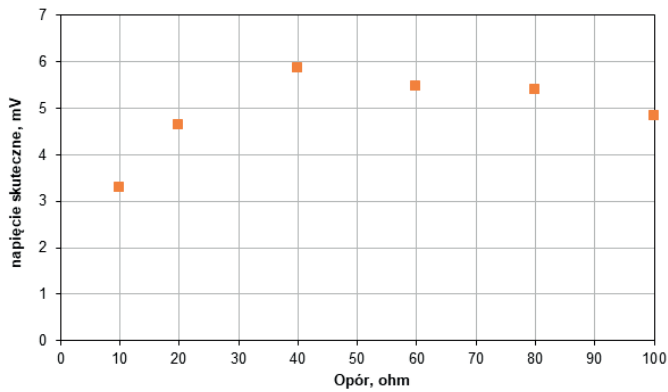
Rys. 10. Skok 4mm, nastawa na falowniku F6,0, obciążenie 60 Ω.

U	R	P	f
[mV]	[Ω]	[μW]	[Hz]
7,05	60	0,83	2,95

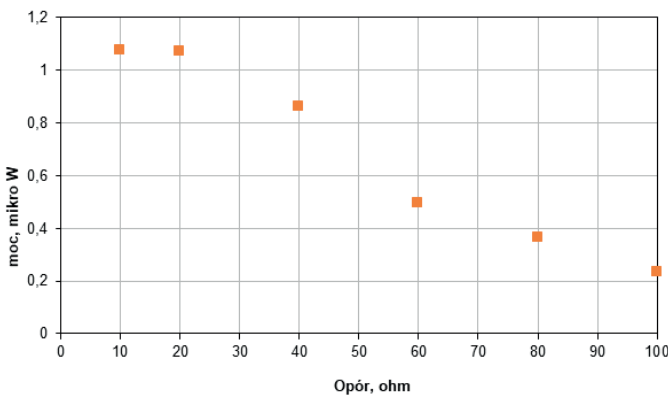
**ANALIZA WYNIKÓW**

**Generator nr 1: bez pierścienia**

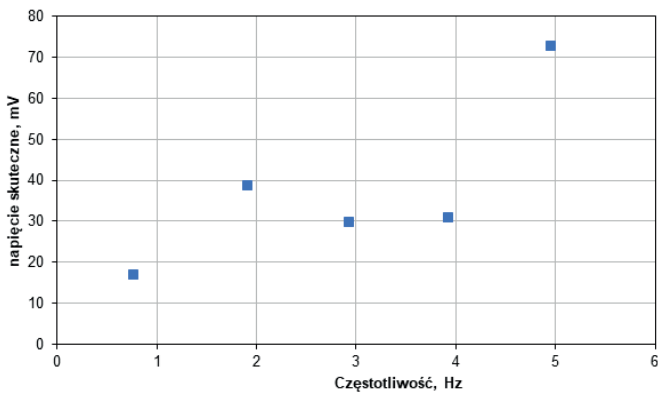
W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano charakterystyki pracy generatorów w w funkcji oporu dla różnych skoków. Wartości uzyskiwanego napięcia oraz mocy zaprezentowano na wykresach 11-14.



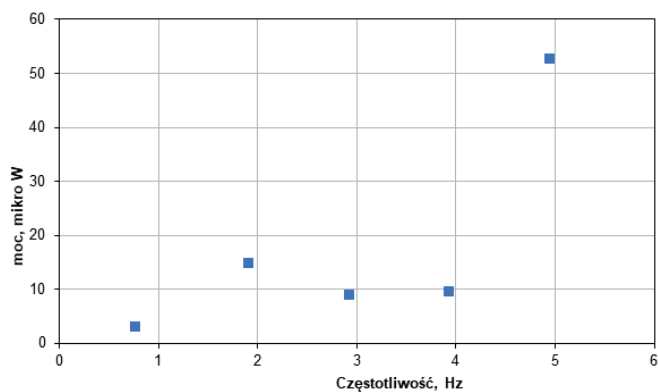
Rys. 11. Napięcie skuteczne w funkcji oporu dla skoku 4 mm, częstotliwość 2,92 Hz



Rys. 12. Napięcie skuteczne w funkcji oporu dla skoku 4 mm, częstotliwość 2,92 Hz



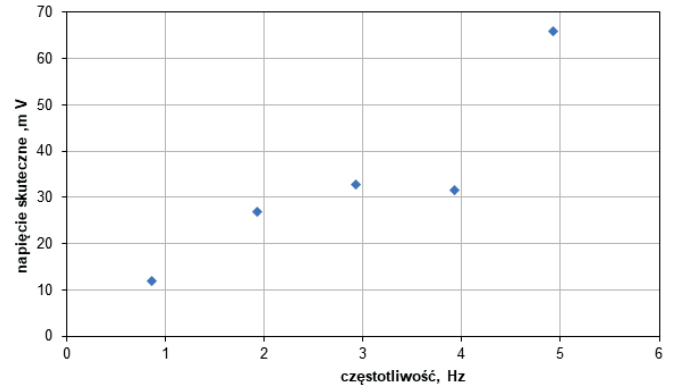
Rys. 13. Napięcie skuteczne w funkcji częstotliwości dla skoku 8 mm i oporu 100 Ω.



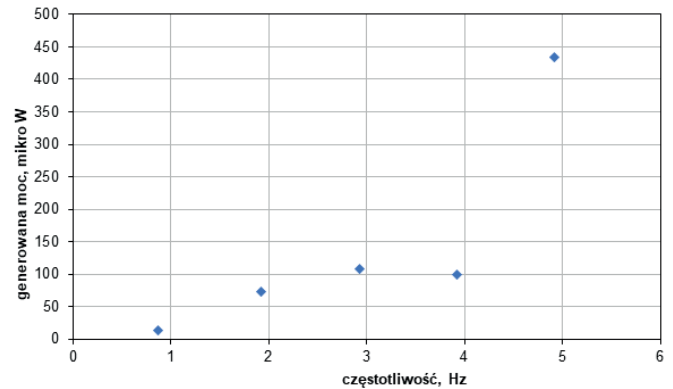
Rys. 14. Generowana moc w funkcji częstotliwości dla skoku 8 mm i oporu 100 Ω.

**Generator nr 2: z pierścieniem stalowym o szerokości 16 mm**

Na podstawie uzyskanych wyników dla generatora nr 2 wyznaczono zależność pomiędzy częstotliwością, a napięciem skutecznym oraz generowaną mocą. Wyniki zostały zaprezentowane na wykresach 15 i 16.

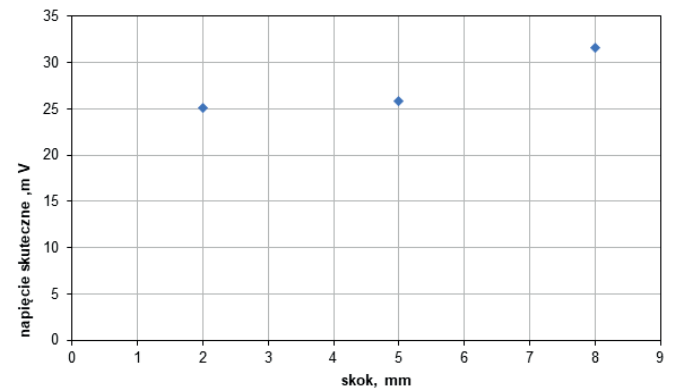


Rys. 15. Napięcie skuteczne w funkcji częstotliwości dla skoku 8 mm i oporu 10 Ω.

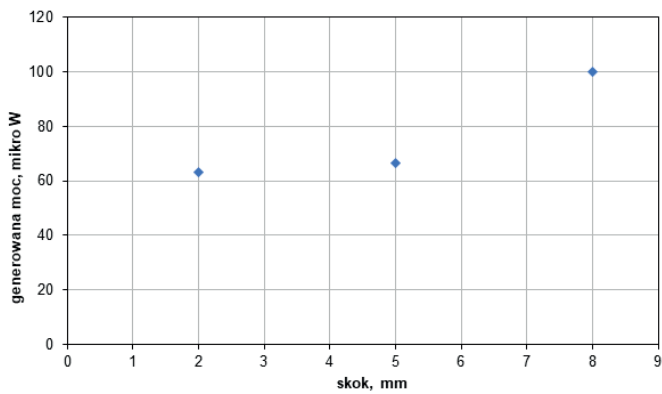


Rys. 16. Generowana moc w funkcji częstotliwości dla skoku 8 mm i oporu 10 Ω.

Na wykresie 17 i 18 przedstawiono z kolei wartość napięcia skutecznego oraz generowanej mocy w funkcji skoku rdzenia generatora.



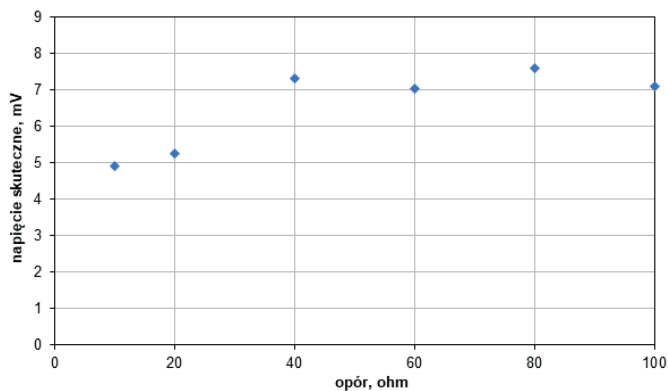
Rys. 17. Generowana moc w funkcji skoku dla nastawy na falowniku F8,0 i oporu 10 Ω.



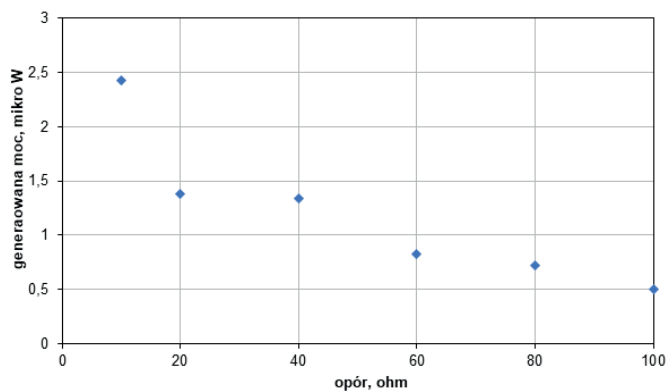
Rys. 18. Generowana moc w funkcji skoku dla nastawy na falowniku F8,0 i oporu 10 Ω.

### Generator nr 3: z pierścieniem stalowym o szerokości 6 mm

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych określono jak wpływa na napięcie skuteczne oraz generowaną moc obciążenia układu.



Rys. 19. Napięcie skuteczne w funkcji oporu dla skoku 4 mm, częstotliwość 2,90 Hz



Rys. 20. Generowana moc w funkcji oporu dla skoku 4 mm, częstotliwość 2,90 Hz

## PODSUMOWANIE

Zgodnie z przewidywaniami dla wszystkich generatorów zauważono że:

- Wraz ze wzrostem obciążenia rośnie napięcie skuteczne, osiągając w pewnym zakresie maksimum;
- Wraz ze wzrostem obciążenia spada generowana moc;

- Wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie napięcie skuteczne;
- Wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie generowana moc;
- Wraz ze wzrostem skoku wzrasta napięcie skuteczne;
- Wraz ze wzrostem skoku wzrasta generowana moc;

W ramach badań eksperymentalnych udało się uzyskać maksymalne moce na poziomie 0,5 mW, a napięcia skuteczne 65 mV (przy czym chwilowe napięcia sięgały 0,3 V). Wartości te były uzyskiwane dla największych skoków, przy największej częstotliwości oraz oporu na poziomie 10 Ω.

Projekt realizowany w ramach projektu: **2017-2018: RPMA.01.02.00-14-5772/16**: Badania przemysłowe i prace rozwojowe nad stworzeniem układu do pozyskiwania energii pochodzącej z sił przyrody oddziałujących na elementy (fasady) szklane. Projekt realizowany przez firmę Bernard Wiśniewski.

## Literatura

1. Ahmed Harounab, Ichiro Yamadac, Shin'ichi Warisawac: Micro electromagnetic vibration energy harvester based on free/impact motion for low frequency-large amplitude operation, Sensors and Actuators A: Physical Volume 224, 1 April 2015, Pages 87-98
2. Miah A. Halim, Jae Y.Park: Modeling and experiment of a handy motion driven, frequency up-converting electromagnetic energy harvester using transverse impact by spherical ball, Sensors and Actuators A: Physical Volume 229, 15 June 2015, Pages 50-58
3. Miah A. Halim, Hyunok Cho, Jae Y. Park: Design and experiment of a human-limb driven, frequency up-converted electromagnetic energy harvester, Energy Conversion and Management Volume 106, December 2015, Pages 393-404
4. Yecheng Shen, Kaiyuan Lu: Scavenging power from ultra-low frequency and large amplitude vibration source through a new non-resonant electromagnetic energy harvester, Energy Conversion and Management Volume 222, 15 October 2020, 113233
5. X.Yang, C. Wang, S.K. Lai: A magnetic levitation-based tristable hybrid energy harvester for scavenging energy from low-frequency structural vibration, Engineering Structures Volume 221, 15 October 2020, 110789
6. Vasile Surducun, Emanoil Surducun, Robert Gutt: Harvesting and conversion of the environmental electromagnetic pollution into electrical energy by novel rectenna array coupled with resonant micro-converter, Energy Volume 211, 15 November 2020, 118645



**dr inż. Andrzej Grzebielec** jest pracownikiem Politechniki Warszawskiej na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa, specjalizuje się w zagadnieniach związanych z energetyką.