

Maciej DELIŚ, Tomasz BIAŁECKI, Bolesław GIEMZA, Marek DOMAŃSKI,
Dawid KAPICA, Andrzej KULCZYCKI

Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

METHODOLOGY OF STAND TESTS ON THE SELECTION OF HIGH ENERGY MATERIALS FOR THE CONSTRUCTION OF A TRIBOGENERATOR

Metodyka badań stanowiskowych nad doborem materiałów wysokoenergetycznych do budowy tribogeneratora

Abstract: *The topic of developing a methodology and a stand test for the evaluation of materials intended for the construction of tribogenerators has been actualized in this article. The proposed method concerns the use of sliding friction in the course of which the mechanical energy is converted into electric energy using the triboelectric and electrostatic effect. The stand test scheme and research methodology are discussed. A preliminary study of friction pairs was carried out, proving the effectiveness of the methodology.*

Keywords: triboelectricity, triboelectric generator, triboelectric nanogenerator

Streszczenie: *W artykule opisano metodykę i stanowisko do oceny materiałów przeznaczonych do budowy tribogeneratorów. Zaproponowana metoda dotyczy przypadku wykorzystania tarcia ślizgowego, w trakcie którego energia mechaniczna zamienia jest na energię elektryczną z wykorzystaniem efektu tibiotelektrycznego i elektrostatycznego. Omówiono schemat budowy stanowiska oraz metodykę badań. Przeprowadzono wstępne badania par ciernych, udowadniając skuteczność metodyki.*

Słowa kluczowe: triboelektryka, generator triboelektryczny, nanogenerator triboelektryczny

1. Introduction

Due to the growing demand for energy, depletion of fossil energy sources, rising costs and environmental protection considerations in recent years, there is a great interest in new, unconventional sources and technologies of energy production. In the environment, there are many types of energy that can be harvested: chemical energy, thermal energy, mechanical energy, solar energy, wind energy [2,4,5,8,11].

An example of such a source is energy from triboelectric and electrostatic effects occurring between two cooperating materials. In recent years, researchers have been dynamically developing scientific works over the use of this effect by means of triboelectric generators (TEG) and triboelectric nanogenerators (TENG).

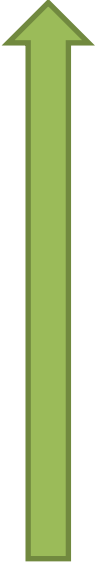
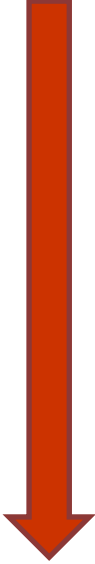
They are environmentally friendly, efficient devices for converting ubiquitous chaotic mechanical energy into electrical energy. Devices usually consist of two materials that generate electricity during cyclic contact between themselves or sliding friction. The mechanical energy, that has not been used so far, generated as a result of: movement, vibration, water waves, wind flow, etc., could be harvested. It can potentially be used in lighting electroluminescent diodes (LED), supplying sensors and monitoring biomechanical movements, recharging batteries, activating sensors without the need for external power supply [1,3,6,7,9,12].

To obtain the highest efficiency (the highest energy), it is needed to select the appropriate friction pair materials. In the case of triboelectric effect, a positive electric charge is created on the material, which is higher in the triboelectric series, and the negative charge on the material located on the lower positions – table 1. Generalizing and omitting eg. the surface condition of the material (oxidation, contamination, etc.) – the greater the distance between the two materials in the triboelectric series, the greater the charge due to sliding friction or contact and the separation of materials.

In order to develop an objective, repeatable, accurate methodology to assess the electrical energy emitted as a result of the triboelectric effect from a sliding friction junction for solid materials, a proprietary test stand was developed. It allows testing different sets of friction materials in terms of the obtained triboelectric effect, also for very small currents.

Table 1

Triboelectric series of selected materials [10]

	<p>+ Positive end of the series – positive charge (materials with a lower value of the output work)</p> <ul style="list-style-type: none"> • air • asbestos • glass • nylon • wool • lead • silk • aluminium • paper • wood • cotton 		 <ul style="list-style-type: none"> • cotton • steel • hard rubber • epoxy glass • nickel and copper • brass and silver • gold, platinum • sulfur • polystyrene foam • acrylic • polyester • synthetic rubber • orlon • polyurethane foam • saran • polyethylene • polypropylene • polyvinyl chloride (PVC) • silicon • teflon • silicone rubber <p>– Negative end of the series – negative charge (materials with a higher value of output work)</p>
--	---	--	--

2. Construction of a test stand

Test stand for evaluating the value of electricity generated during friction consists of a drive system with a head with a counter-sample holder and a movable table with a sample holder. It allows carrying out experiments in the reciprocating motion of the pin/ball on flat type – diagram of the test stand fig. 1.

The device equipped with dedicated software allows the user to regulate: stroke, frequency of movement, acceleration and sample speed. It allows long-term operation without switching off or offloading the stand test.

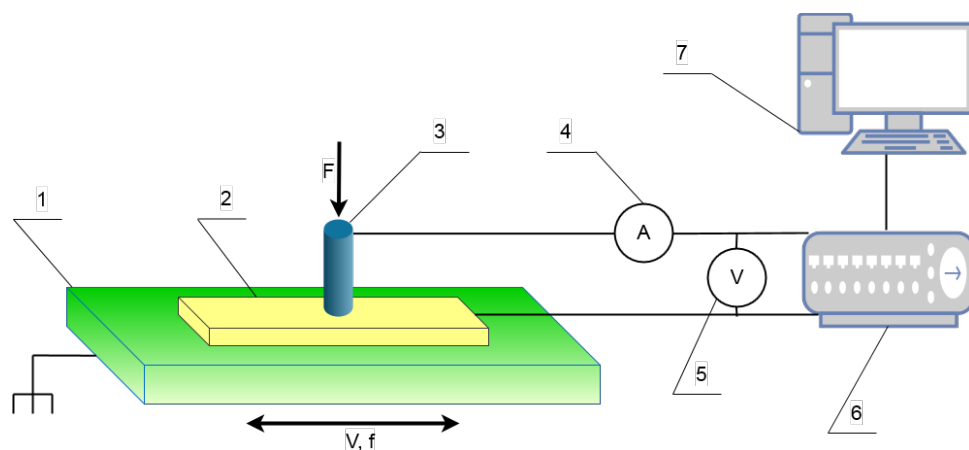


Fig. 1. Diagram of the test stand. 1 – sliding table, 2 – sample, 3 – counter-sample, 4 – ammeter, 5 – voltmeter, 6 – measuring device, 7 – registration and data archiving

The head positioning the counter-sample allows loading the handle with additional mass. Both sample holder and counter-samples are electrically insulated – fig. 2.

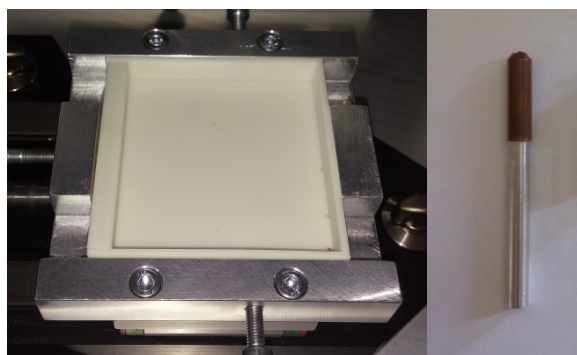


Fig. 2. Electrically insulated sample holder and counter-samples

The recording of work parameters is carried out with the use of a precision digital high-resolution electrometer, providing high flexibility of signal analysis.

3. Research methodology

To assess the electrical energy, harvested from the sliding friction junction, the direct current voltage and current were measured in the range of changes: frequency of motion, frequency of motion with load, length of friction, load of counter-sample, speed, acceleration, braking speed, and simultaneous changing the speed of acceleration and braking. It was decided that friction pair tests will be conducted for three values of each variable – table 2.

Table 2

Values of variables

No	Variable	a	b	c
1	Frequency of motion [Hz]	0,5	1	2
2	Frequency of motion with load 500g [Hz]	0,5	1	2
3	Length of friction [mm]	15	25	35
4	Load of counter-sample [g]	100	400	900
5	Speed [m/s]	1	2	5
6	Acceleration [m/s ²]	1	2	5
7	Braking speed [m/s ²]	1	2	5
8	Simultaneous speed of acceleration and braking [m/s ²]	1;1	2;2	5;5

The frequency of reading and writing of the measured parameters was 5 Hz. The impact of the fastening and the surface of the counter-sample were assessed by carrying out a series of measurements, where in each series the counter-sample was rotated by 90°. The distribution of results was 10 mV for the average result of 38 mV, which is considered acceptable.

As materials for the production of test samples were selected:

- Polieteroeteroketon – (sign PEEK) – Ketron PEEK 1000 – semi-crystalline thermoplastic polymer from the group of high-performance plastics,
- Filament *Conductive Graphene Filament* (sign 3D print) – the sample was printed using 3D printing,
- Poli(tetrafluoroethylene) – (sign PTFE).

The samples had the shape of cuboids with dimensions 70x30x10mm.

As materials for the production of test counter-samples were selected:

- Aluminium – (sign Al),
- Duralumin – (sign Dural),
- Copper – (sign Cu).

The counter-samples had the shape of cylinders with diameters 5mm.

The selected friction pairs (nine friction pairs) were tested within the scope of designated eight variables – 3 values of each variable.

4. Test results of selected friction pairs

Sample results of voltage (DC V) and current (DC I) measurements for fixed set measurement conditions depending on changes in the frequency of motion for various friction pairs are presented in table 3.

Table 3

Sample results of voltage and current measurements depending on changes in traffic frequency

Frequency of movement	0,5 [Hz]		1 [Hz]		2 [Hz]	
Friction pair	DC V [mV]	DC I [nanoA]	DC V [mV]	DC I [nanoA]	DC V [mV]	DC I [nanoA]
PEEK – Al	48	14	53	16	68	16
PEEK – Dural	32	15	34	12	24	11
PEEK – Cu	0,3	18	0,4	14	0,3	17
3D print – Al	8,0	74	11	90	13	90
3D print – Dural	7,9	8,9	9,1	8,8	8,9	7,6
3D print – Cu	0,5	3,9	5,9	5,1	11	4,3
PTFE – Al	120	5	127	1,8	138	1,1
PTFE – Dural	285	2,5	223	4,1	217	9,0
PTFE – Cu	59	4,6	58	3,8	37	3,2

Analyzing the results of the obtained tests, it can be noticed that according to the theory, the voltage for all frictional pairs with the PTFE sample was the highest (PTFE occurs at the extreme position in the triboelectric series – material with a higher output work value). They multiplied in relation to the results obtained for a sample made in 3D printing technology from the conductive filament and also were more than twice as high as in the case of a sample made of PEEK.

Referring to the results of the electrical voltage in terms of counter-sample change, as expected, the lowest values were obtained for a counter-sample made of copper (copper has higher values of output from aluminium). The highest voltage values were obtained for a counter-sample made of dural (aluminium alloy) with a PTFE sample. The twofold increase in voltage for the PTFE-dural connection compared to the PTFE-Al connection can be associated with a much higher hardness of the alloy.

The increase in the frequency of movement is reflected in voltage for the tribologic pairs with the aluminium counter-samples. In other cases, this relationship cannot be determined, and in the case of the tribological pair PTFE – Dural there is a voltage drop along with the increase in the frequency of movement.

In all measurements, the amperage had very low values of the order of nanoamps. A slight increase was noted only for the 3D print-Al pair. This may be related to the use in the composition to produce a sample of a filament of very good conductive graphene.

The other variables, such as the friction length or a load of counter-sample, which are not described in detail in the article, also show dissimilar dependences for different friction pairs. These dependencies will be described in detail in a separate, broader study.

5. Summary

The results of electrical power voltage tests at the sliding friction junction evaluated in accordance with the proposed methodology are consistent with the theoretical physical basis. Due to the very low values of the current, further research is necessary for this direction.

The developed methodology will allow obtaining unequivocal and objective parameters regarding the possibility of using a friction pair for the construction of tribogenerators.

The device requires further work on the exact determination of its measurement errors, and the development with additional drive and measurement modules, such as force sensors and an optical sensor, for example, to assess the thickness of the boundary layer. In addition, the possibility of extending the test stand is considered for the assessment, in addition to the sliding contact, also the cyclic contact during which also the triboelectric effect is created.

It is planned to study a wider spectrum of samples from materials with a complex composition and a complicated structure, for example, 3D layered prints.

6. References

1. Cheng X.L., Miao L.M., Song Y., Su Z.M., Chen H.T., Chen X.X. et al.: High Efficiency Power Management and Charge Boosting Strategy for a Triboelectric Nanogenerator. *Nano Energy*, No. 38, 2017.

2. Dagdeviren C. et al.: Recent progress in flexible and stretchable piezoelectric devices for mechanical energy harvesting, sensing and actuation. *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 9, 2016.
3. Fan F.R., Tang W., Wang Z.L.: Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics, *Advanced Materials*, 28(22) 2016.
4. Himmel M.E. et al. Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science* 315, 2007.
5. Lewis N.S.: Toward cost-effective solar energy use. *Science* 315, 2007.
6. Liang Q.J., Zhang Q., Yan X.Q., Liao X.Q., Han L.H., Yi F. et al.: Recyclable and Green Triboelectric Nanogenerator. *Advanced Materials*. Vol. 29, Iss. 5, 2017.
7. Trinh V.L., Chung C.K.: A facile method and novel mechanism using microneedlestructured PDMS for triboelectric generator applications. *Small* 13(29), 2017.
8. Wang Z.L.: Self-powered nanosensors and nanosystems. *Advanced Materials* Vol. 24, Iss. 2, 2012.
9. Wang Z.L., Chen J., Lin L.: Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy & Environmental Science*, Iss. 8, 2015.
10. Wang Z., Lin L., Chen J., Niu S., Zi Y.: *Triboelectric Nanogenerators*, Springer, 2016.
11. Wen X., Yang W., Jing Q., Wang Z.L.: Harvesting broadband kinetic impact energy from mechanical triggering/vibration and water waves. *ACS Nano* 8, 2014.
12. Xu W., Huang L.B., Wong M.C., Chen L., Bai G.X., Hao J.H.: Environmentally Friendly Hydrogel-Based Triboelectric Nanogenerators for Versatile Energy Harvesting and Self-Powered Sensors. *Advanced Energy Materials*, Vol. 7, Iss. 1, 2017.

Autor contribution: M. Deliś 25%, T. Bialecki 15%, B. Giemza 15%, M. Domański 15%, D. Kapica 15%, A. Kulczycki 15%.

METODYKA BADAŃ STANOWISKOWYCH NAD DOBOREM MATERIAŁÓW WYSOKOENERGETYCZNYCH DO BUDOWY TRIBOGENERATORA

1. Wstęp

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na energię, wyczerpywaniem się kopalnych źródeł energii, rosnącymi jej kosztami oraz względami ochrony środowiska w ostatnich latach istnieje duże zainteresowanie nowymi, niekonwencjonalnymi źródłami i technologiami wytwarzania energii. W środowisku istnieje wiele rodzajów energii, którą można wykorzystać i gromadzić: chemiczna, cieplna, mechaniczna, słoneczna, energia wiatru [2,4,5,8,11].

Przykładem takiego źródła jest energia pochodząca z wykorzystania efektu triboloektrycznego i elektrostatycznego zachodzącego pomiędzy dwoma współpracującymi materiałami. W ostatnich latach dynamicznie rozwijają się prace badawcze nad wykorzystaniem tego efektu za pomocą generatorów triboloektrycznych (TEG) i nanogeneratorów triboelektrycznych (TENG).

Są one przyjaznymi dla środowiska wydajnymi urządzeniami konwersji wszechobecnej chaotycznej energii mechanicznej na energię elektryczną. Urządzenia zazwyczaj składają się z dwóch materiałów, które w trakcie cyklicznego kontaktu pomiędzy sobą lub tarcia ślizgowego generują energię elektryczną. Niewykorzystywana dotychczas energia mechaniczna powstająca na skutek: ruchu, wibracji, falowania wód, przepływu wiatru itp. mogłaby być odzyskiwana. Może ona zostać potencjalnie zastosowana w oświetlaniu diod elektroluminescencyjnych (LED), zasilaniu czujników i monitorowaniu ruchów biomechanicznych, doładowywaniu baterii, uruchamianiu czujników bez potrzeby stosowania zewnętrznego zasilania [1,3,6,7,9,12].



Aby uzyskać jak najwyższą sprawność (najwyższą energię), należy dobrać odpowiednie materiały pary ciernej. W przypadku zjawiska triboelektrycznego, dodatni ładunek elektryczny powstaje na materiale, który znajduje się wyżej w szeregu triboelektrycznym, a ładunek ujemny na materiale znajdującym się na niższych pozycjach – tabela 1. Uogólniając i pomijając np. stan powierzchni

materiału (utlenianie, zanieczyszczenia itp.) – im większe jest oddalenie pozycji dwóch materiałów w szeregu triboelektrycznym, tym większy powstanie ładunek na skutek tarcia ślizgowego lub kontaktu i rozdzielenia materiałów.

W celu opracowania obiektywnej, powtarzalnej, dokładnej metodyki do oceny energii elektrycznej emitowanej w wyniku efektu triboelektrycznego ze ślizgowego węzła tarcia dla materiałów stałych opracowano autorskie stanowisko badawcze. Pozwala ono testować różne zestawy materiałów ciernych pod względem uzyskiwanego efektu triboloelektrycznego, również dla bardzo małych prądów.

Tabela 1

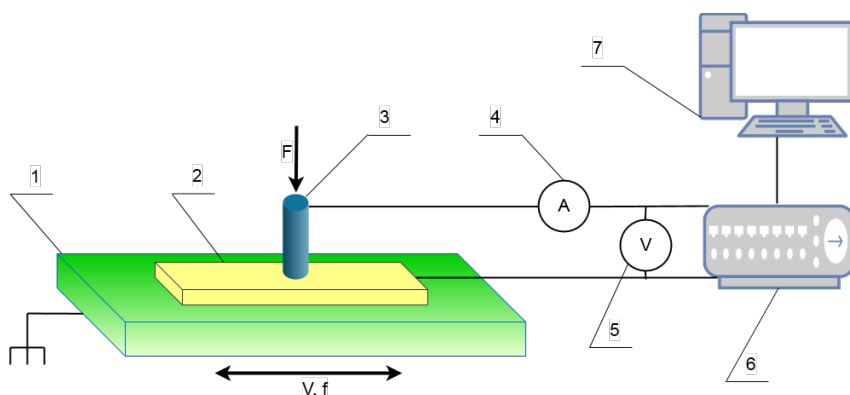
Szereg triboelektryczny wybranych materiałów [10]

	<p>+ Dodatni koniec szeregu – ładunek dodatni (materiały o niższej wartości pracy wyjścia)</p> <ul style="list-style-type: none"> • powietrze • azbest • szkło • nylon • wełna • ołów • jedwab • aluminium • papier • drewno • bawełna 		<ul style="list-style-type: none"> • bawełna • stal • guma twarda • szkło epoksydowe • nikiel i miedź • mosiądz i srebro • złoto, platyna • siarka • pianka polistyrenowa • akryl • poliestr • syntetyczna guma • orlon • pianka poliuretanowa • saran • polietylen • polipropylen • polichlorek winylu (PCV) • krzem • teflon • silikonowa guma <p>– Ujemny koniec szeregu – ładunek ujemny (materiały o wyższej wartości pracy wyjścia)</p>
--	---	--	--

2. Budowa stanowiska badawczego

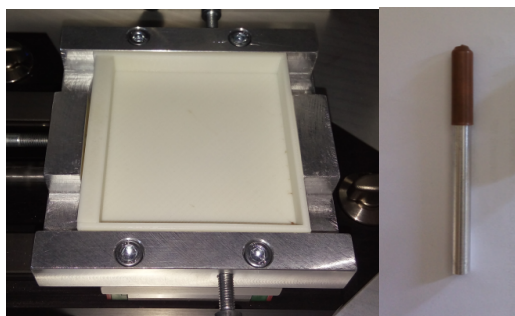
Stanowisko do oceny wartości uzyskiwanej energii elektrycznej wytwarzanej podczas tarcia składa się z układu napędowego z głowicą z uchwytem na przeciwpórkę oraz ruchomego stolika z uchwytem na próbkę. Pozwala to realizować eksperymenty w ruchu posuwisto-zwrotnym typu *pin/ball on flat* – schemat stanowiska rys. 1.

Urządzenie wyposażone w dedykowane oprogramowanie pozwala użytkownikowi regulować: skok, częstotliwość ruchu, przyspieszenie, prędkość próbki. Umożliwia długotrwałą pracę bez wyłączania lub odciążania urządzenia.



Rys. 1. Poglądowy schemat stanowiska. 1 – stół przesuwny, 2 – próbka, 3 – przeciwpórkę, 4 – amperomierz, 5 – woltomierz, 6 – urządzenie pomiarowe, 7 – rejestracja i archiwizacja danych

Głowica pozycjonująca przeciwpórkę umożliwia obciążanie uchwytu dodatkową masą. Zarówno uchwyt próbki, jak i przeciwpórkę są izolowane elektrycznie – rys. 2.



Rys. 2. Izolowane elektrycznie uchwyt próbki i przeciwpórkę

Rejestracja parametrów pracy odbywa się za pomocą precyzyjnego elektrometru cyfrowego o dużej rozdzielczości, zapewniającego dużą elastyczność analizy sygnałowej.

3. Metodyka badań

Do oceny energii elektrycznej, pozyskiwanej ze ślizgowego węzła tarcia, w tak skonstruowanym układzie posłużyły napięcie oraz natężenie prądu stałego mierzone w zakresie zmian: częstotliwości ruchu, częstotliwości ruchu z obciążeniem, drogi tarcia, obciążenia przeciwpróbki ciężarem, prędkości przesuwu, prędkości przyspieszania, prędkości hamowania, oraz jednoczesnej zmiany prędkości przyspieszania i hamowania. Zdecydowano, iż badania parciernych będą prowadzone dla trzech wartości każdej ze zmiennej – tabela 2.

Tabela 2

Wartości poszczególnych zmiennych

Lp	Zmienna	a	b	c
1	Częstotliwość ruchu [Hz]	0,5	1	2
2	Częstotliwość z obciążeniem 500g [Hz]	0,5	1	2
3	Droga tarcia [mm]	15	25	35
4	Obciążenie [g]	100	400	900
5	Prędkość przesuwu [m/s]	1	2	5
6	Prędkość przyspieszenia [m/s ²]	1	2	5
7	Prędkość hamowania [m/s ²]	1	2	5
8	Prędkość przyspieszenia i hamowania [m/s ²]	1;1	2;2	5;5

Częstotliwość odczytu i zapisu wartości mierzonych parametrów wyniosła 5 Hz. Oceniono wpływ mocowania i powierzchni trzpienia poprzez wykonanie serii pomiarów, gdzie w każdej z serii dokonywano obrotu trzpienia o 90°. Rozrzut wyników wynosił 10 mV dla średniego wyniku 38,3 mV, co uznaje się za dopuszczalne.

Jako materiały do wytworzenia próbek do badań wyselekcjonowano:

- polieteroeteroketon – (oznaczenie PEEK) – Ketron PEEK 1000 – półkryształiczny polimer termoplastyczny z grupy tworzyw wysokosprawnych,
- filament *Conductive Graphene Filament* (oznaczenie Druk 3D) – próbkę wydrukowano za pomocą druku 3D,

- poli(tetrafluoroetylen) – (oznaczenie PTFE).

Próbki miały kształt prostopadłościanów o wymiarach 70x30x10 mm.

Jako materiały do wytworzenia przeciwpróbek do badań wyselekcjonowano:

- aluminium – (oznaczenie Al),
- dural – (oznaczenie Dural),
- miedź – (oznaczenie Cu).

Przeciwpróbki miały kształt walców o średnicach 5 mm.

Wytypowane pary cierne (dziewięć par ciernych) zbadano w zakresie wyznaczonych ośmiu zmiennych – 3 wartości każdej zmiennej.

4. Wyniki badań wybranych par ciernych

Przykładowe wyniki pomiarów napięcia (DC V) i natężenia prądu (DC I) dla stałych zadanych warunków pomiarowych w zależności od zmian częstotliwości ruchu dla różnych par ciernych przedstawia tabela 3.

Tabela 3

Przykładowe wyniki pomiarów napięcia i natężenia prądu w zależności od zmian częstotliwości ruchu

Częstotliwość ruchu	0,5 [Hz]		1 [Hz]		2 [Hz]	
Para cierna	DC V [mV]	DC I [nanoA]	DC V [mV]	DC I [nanoA]	DC V [mV]	DC I [nanoA]
PEEK – Al	48	14	53	16	68	16
PEEK – Dural	32	15	34	12	24	11
PEEK – Cu	0,3	18	0,4	14	0,3	17
Druk 3D – Al	8,0	74	11	90	13	90
Druk 3D – Dural	7,9	8,9	9,1	8,8	8,9	7,6
Druk 3D – Cu	0,5	3,9	5,9	5,1	11	4,3
PTFE – Al	120	5	127	1,8	138	1,1
PTFE – Dural	285	2,5	223	4,1	217	9,0
PTFE – Cu	59	4,6	58	3,8	37	3,2

Analizując wyniki otrzymanych badań, można zauważyć, iż zgodnie z teorią napięcie dla wszystkich skojarzeń ciernych z próbką z PTFE było najwyższe (PTFE występuje na skrajnej pozycji w szeregu triboelektrycznym – materiał o wyższej wartości pracy wyjścia). Z wielokrotniały się one w stosunku do wyników otrzymanych dla próbki wykonanej w technologii druku 3D z filamentu przewodzącego

jak i również były ponad dwukrotnie wyższe w stosunku do próbki wykonanej z tworzywa PEEK.

Odnosząc się do wyników napięcia elektrycznego pod względem zmiany przeciwpróbki, zgodnie z oczekiwaniami, najniższe wartości otrzymywano dla przeciwpróbki wykonanej z miedzi (miedź ma wyższe wartości pracy wyjścia od aluminium). Najwyższe wartości napięć uzyskiwano dla przeciwpróbki wykonanej z duralu (stop aluminium) z próbką PTFE. Około dwukrotny wzrost napięcia dla połączenia PTFE-dural w stosunku do połączenia PTFE-Al może być związany również ze znacznie wyższą twardością stopu.

Wzrost częstotliwości ruchu odzwierciedla się w parach tribologicznych z przeciwpróbką Al wzrostem uzyskanego napięcia. W pozostałych przypadkach nie można stwierdzić takiej zależności, a w przypadku pary tribologicznej PTFE – Dural następuje spadek napięcia wraz ze wzrostem częstotliwości ruchu.

We wszystkich pomiarach natężenie prądu miało bardzo małe wartości rzędu nanoamperów. Nieznaczny wzrost odnotowano jedynie dla pary trącej Druk 3D-Al. Może to być związane z zastosowaniem w składzie służącego do wytworzenia próbki filamentu bardzo dobrze przewodzącego grafenu.

Pozostałe zmienne, jak droga tarcia czy obciążenie przeciwpróbki ciężarem, nieomawiane szczegółowo w artykule, również wykazują zależności odmienne dla różnych par trących. Zależności te zostaną szczegółowo opisane w odrębnym, szerszym opracowaniu.

5. Podsumowanie

Wyniki badań napięcia energii elektrycznej w ślizgowym węźle tarcia oceniane według zaproponowanej metodyki są zgodne z teoretycznymi podstawami fizycznymi. Ze względu na otrzymanie bardzo małych wartości natężenia prądu konieczne są dalsze badania w tym kierunku.

Opracowywana metodyka pozwoli na uzyskanie jednoznacznych i obiektywnych parametrów odnośnie do możliwości stosowania danej pary ciernej przeznaczonej do budowy tribogeneratorów.

Urządzenie wymaga dalszych prac nad dokładnym określeniem jego błędów pomiarowych, a w przyszłości rozbudowy o kolejne moduły napędowe i pomiarowe, takie jak czujniki siły i czujniki optyczne, chociażby do oceny grubości warstwy granicznej. Dodatkowo rozważana jest możliwość rozbudowy stanowiska w celu oceny oprócz styku ślizgowego, także cyklicznego styku kontaktowego, w trakcie którego również powstaje efekt triboelektryczny.

Planuje się zbadanie szerszego spektrum próbek z materiałów o złożonym składzie i skomplikowanej strukturze np. warstwowych druków 3D.

6. Literatura

1. Cheng X.L., Miao L.M., Song Y., Su Z.M., Chen H.T., Chen X.X. et al.: High Efficiency Power Management and Charge Boosting Strategy for a Triboelectric Nanogenerator. *Nano Energy*, No. 38, 2017.
2. Dagdeviren C. et al.: Recent progress in flexible and stretchable piezoelectric devices for mechanical energy harvesting, sensing and actuation. *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 9, 2016.
3. Fan F.R., Tang W., Wang Z.L.: Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics, *Advanced Materials*, 28(22) 2016.
4. Himmel M.E. et al. Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science* 315, 2007.
5. Lewis N.S.: Toward cost-effective solar energy use. *Science* 315, 2007.
6. Liang Q.J., Zhang Q., Yan X.Q., Liao X.Q., Han L.H., Yi F. et al.: Recyclable and Green Triboelectric Nanogenerator. *Advanced Materials*. Vol. 29, Iss. 5, 2017.
7. Trinh V.L., Chung C.K.: A facile method and novel mechanism using microneedlestructured PDMS for triboelectric generator applications. *Small* 13(29), 2017.
8. Wang Z.L.: Self-powered nanosensors and nanosystems. *Advanced Materials* Vol. 24, Iss. 2, 2012.
9. Wang Z.L., Chen J., Lin L.: Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy & Environmental Science*, Iss. 8, 2015.
10. Wang Z., Lin L., Chen J., Niu S., Zi Y.: *Triboelectric Nanogenerators*, Springer, 2016.
11. Wen X., Yang W., Jing Q., Wang Z.L.: Harvesting broadband kinetic impact energy from mechanical triggering/vibration and water waves. *ACS Nano* 8, 2014.
12. Xu W., Huang L.B., Wong M.C., Chen L., Bai G.X., Hao J.H.: Environmentally Friendly Hydrogel-Based Triboelectric Nanogenerators for Versatile Energy Harvesting and Self-Powered Sensors. *Advanced Energy Materials*, Vol. 7, Iss. 1, 2017.

Udział autorów w przygotowaniu publikacji: M. Deliś 25%, T. Białecki 15%, B. Giemza 15%, M. Domański 15%, D. Kapica 15%, A. Kulczycki 15%.