

Materiały Elektroniki i Przetwarzania Energii

Ćwiczenie 2

Tryboelektryczne układy odzyskiwania energii

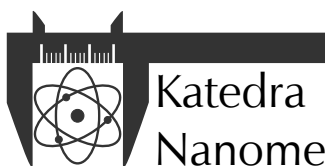
dr hab. inż. Tomasz Piasecki, prof. uczelni (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Efekt tryboelektryczny
2. Ujęcie ilościowe efektu tryboelektrycznego
3. Budowa i zasada działania elektrometru
4. Budowa i zasada działania układu pozyskiwania energii z generatora tryboelektrycznego
5. Metoda pomiaru mocy generatora tryboelektrycznego

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Efekt tryboelektryczny [1]	1
1.2	Podstawy fizyczne i ujęcie ilościowe	1
2	Przyrządy pomiarowe	3
2.1	Elektrometr	3
2.2	Układ pozyskiwania energii	5
3	Przebieg ćwiczenia	6
3.1	Kontaktowy efekt tryboelektryczny	6
3.2	Generator tryboelektryczny	6



Katedra
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

Pozyskiwanie energii dzięki innym zjawiskom opisano we wstępie instrukcji do ćwiczenia 2. Zapoznaj się z tym opisem, jeżeli tego ćwiczenia jeszcze nie realizowałeś/realizowałaś.

1.1 Efekt tryboelektryczny [1]

Effekt tryboelektryczny opisuje przenoszenie ładunku elektrycznego między dwoma obiektami, gdy stykają się one lub przesuwają względem siebie. Może to mieć miejsce w przypadku różnych materiałów, takich jak podeszwa buta na dywanie, lub między dwoma kawałkami tego samego materiału. Jest ono wszechobecne i występuje z różną intensywnością dla wszystkich materiałów stałych. Istnieją dowody na to, że tryboładowanie może występować między kombinacjami ciał stałych, cieczy i gazów, na przykład ciecz przepływająca w stałej rurze lub samolot lecący w powietrzu.

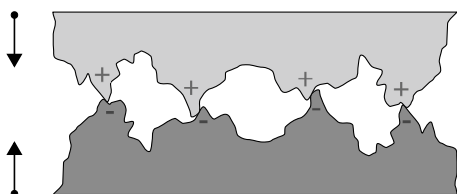
Elektrostatyczne ładowanie się jest konsekwencją efektu tryboelektrycznego, gdy ładunek pozostaje na jednym lub obu obiektach i nie jest odprowadzany. Termin tryboelektryczność był używany w odniesieniu do dziedziny badań lub ogólnego zjawiska efektu tryboelektrycznego, lub do elektryczności statycznej, która z niego wynika.

Effekt tryboelektryczny leży u podstaw najstarszych eksperymentów elektrycznych, właśnie związanych z elektrycznością statyczną wykonywanych przez Talesa z Miletu około 585 r p.n.e. Sama nazwa elektron bierze się od greckiego słowa oznaczającego bursztyn. Przedrostek „trybo-” bierze się od greckiego słowa oznaczającego pocieranie.

Uważa się, że pierwsze opracowanie naukowe dotyczące tryboelektryczności powstało w roku 1600. Wtedy William Gilbert opublikował „De Magnete”. Odkrył tryboelektryczność przy pocieraniu wielu materiałów takich jak siarka, wosk, szkło. Spostrzegł też, że wilgoć przeszkadza w elektryzowaniu się. Nazwę „elektryczność” wprowadził Sir Thomas Browne w swojej publikacji „Pseudodoxia Epidemica: or, Enquiries into very many received tenents and commonly presumed truths” kontekście jego badań nad efektem. W 1663 Otto von Guericke skonstruował swoją maszynę elektrostatyczną generującą ładunek na skutek tarcia. Zapewne mieliście do czynienia w szkole z innym, późniejszym urządzeniem tego typu - generatorem Van de Graafa.

W XVII wieku Charles François de Cisternay du Fay spostrzegł, że wytwarzane są dwa „rodzaje” ładunku. Później Benjamin Franklin nazwał je dodatnim i ujemnym. W 1757 Johan Carl Wilcke w swojej rozprawie doktorskiej uszeregował materiały pod względem siły i znaku wytwarzanych ładunków. Obecnie takie uporządkowanie nazywamy szeregiem tryboelektrycznym. Uszeregowane pod tym kątem wybrane materiały wymieniono w tabeli 1.

1.2 Podstawy fizyczne i ujęcie ilościowe



Rysunek 1: Ilustracja ładowania się materiałów stykających się z sobą [1]

Może to wydać się dziwnym, ale zjawisko tryboelektryczności obserwowane od tysiącleci nie jest w pełni wyjaśnione do dzisiaj. Z pewnością jedną z przyczyn elektryzowania się materiałów różnica prac wyjścia pomiędzy materiałami. Nie tłumaczy jednak ona w pełni tego, jak intensywnie materiały się elektryzują.

Elektryzowanie się następuje już przy stykaniu i rozłączaniu powierzchni materiałów. Ze względu na chropowatość (rysunek 1), w mikroskali stykają się wierzchołki nierówności kontaktujących ze sobą obiektów. Różnica prac wyjścia powoduje, że część elektronów opuści materiał o mniejszej pracy wyjścia przechodząc do drugiego. Przy roz-

Tabela 1: Szereg tryboelektryczny wybranych materiałów. Podano gęstość powierzchniową ładunku tryboelektrycznego TECD [2].

Nazwa materiału	TECD ($\mu\text{C m}^{-2}$)
Kauczuk fluoroelastomerowy Viton®	-148,20
Acetal	-143,33
Garolit trudnopalny	-142,76
Garolite G-10	-139,89
Przezroczysta celuloza	-133,30
Przezroczysty polichlorek winylu PVC	-117,53
Politetrafluoroetylen PTFE	-113,06
Odporna na ścieranie guma poliuretanowa	-109,22
Akrylonitryl-butadien-styren ABS	-108,07
Przezroczysty poliwęglan (błyszczący) PC	-104,63
Polistyren PS	-103,48
Polieteroimid PEI	-102,91
Polidimetylosiloksan* PDMS	-102,05
Tkanina poliestrowa (gładka)	-101,48
Garolit łatwy w obróbkę	-100,33
Wysokotemperaturowa guma silikonowa klasy spożywczej	-94,03
Folia poliimidowa Kapton	-92,88
Folia poliestrowa DuraLar PET	-89,44
Polifluorek winylidenu PVDF	-87,35
Polieteroeteroketon PEEK	-76,25
Polietylen PE	-71,20
Wysokotemperaturowa guma silikonowa	-69,95
Odporny na zużycie garolit	-68,51
Polietylen o niskiej gęstości LDPE	-67,94
Polistyren wysokoudarowy HIPS	-67,37
Polietylen o wysokiej gęstości HDPE	-59,91
Odporna na warunki atmosferyczne guma EPDM	-53,61
Pasek skórzany (gładki)	-52,75
Wypełniony olejem odlewany nylon 6	-49,59
Przezroczysty akryl lany PMMA	-48,73
Silikon	-47,30
Odporna na ścieranie guma SBR	-40,13
Elastyczny pasek skórzany (gładki)	-34,40
Eter polifenyłowy norylu	-31,82
Polisiarczek fenylenu PPS	-31,82
Skóra świnińska (gładka)	-30,10
Polipropylen PP	-27,23
Śliski nylon 66	-26,09
Kauczuk santoprenowy	-25,23
Odporna na chemikalia i parę wodną guma aflas	-22,65
Polisulfon	-18,92
Odlewany nylon 6	-18,35
Papier do kopiowania	-18,35
Kauczuk fluorosilikonowy	-18,06
Żywica acetalowa Delrin®	-14,91
Drewno (sklejka klasy morskiej)	-14,05
Odporny na zużycie śliski garolit	-11,47
Super rozciągliwa i odporna na ścieranie guma naturalna	-10,61
Odporna na olej guma Buna-N	2,49
Olejoodporna guma BUNA-N/kauczuk winylowy klasy spożywczej	2,95

dzieleniu materiałów ładunek pozostaje przemieszczony tam, gdzie był. Mówi się w takim wypadku o tryboelektryczności kontaktowej oraz o ładunku statycznym kontaktowym. Osobiście możesz tego doświadczać np. przy odlepianiu folii ochronnych z plastikowych powierzchni.

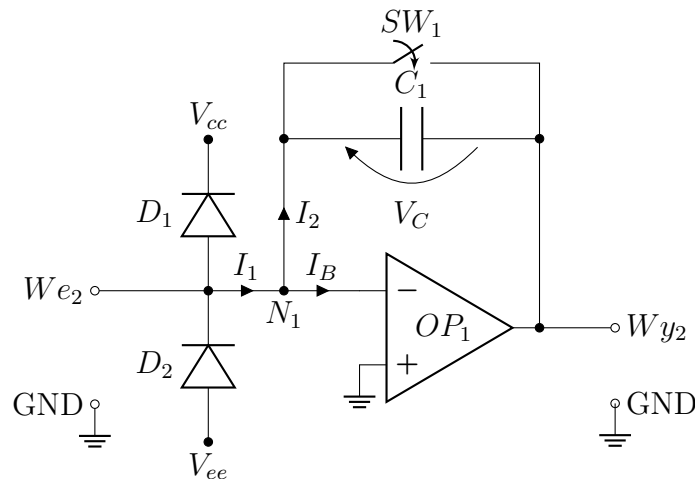
Pocieranie zwiększa intensywność zjawiska, gdyż więcej mikroskopijnych nierówności ma szansę kontaktować się ze sobą. Dzięki temu funkcjonować mogą rozmaite maszyny elektrostatyczne oraz układy pozyskiwania energii konwertujące ruch czy drgania na energię elektryczną - nanogeneratory tryboelektryczne (TENG - triboelectric nanogenerator).

Zjawisko to można opisać ilościowo podając gęstość powierzchniową ładunku wytworzoną dzięki efektowi tryboelektrycznemu. Jeśli do pomiaru użyto elektrodę o powierzchni A i uzyskano ładunek Q to gęstość powierzchniowa ładunku tryboelektrycznego (*triboelectric effect charge density TECD*) wynosi:

$$TECD = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

2 Przyrządy pomiarowe

2.1 Elektrometr



Rysunek 2: Schemat elektryczny prostego elektrometru, dostępnego na makiecie do ćwiczenia.

Elektrometr służy do pomiaru ładunku wpływającego do wejścia $We+$. W skrócie:

- napięcie na wyjściu Wy_2 jest równe $-\frac{Q}{C_1}$
- pojemność kondensatora C_1 decyduje o zakresie pracy elektrometru
- w praktyce napięcie to samorzutnie zmienia się powoli w czasie i wtedy, gdy żaden mierzony ładunek nie wpływa do elektrometru
- przełącznikiem SW_1 normalnie zwiera się elektrometr i otwiera się go tylko na krótki czas, w którym mierzony jest ładunek; po odczycie wyniku pomiaru elektrometr zwiera się z powrotem

A oto szczegóły konstrukcji i działania elektrometru. Ładunek mierzony, doprowadzony z wejścia WE_2 powoduje przepływ prądu I_1 . W węzle N_1 dzięki wzmacniaczowi operacyjnemu utrzymywana jest tzw. pozorna masa. Dzięki niej potencjał tego węzła równy jest potencjałowi masy i pomiar ładunku jest stale dokonywany w odniesieniu do potencjału masy.

W węzle N_1 sumują się prądy: wejściowy I_1 , prąd ładujący kondensator I_2 oraz I_B nazywany wejściowym prądem polaryzacji wzmacniacza operacyjnego. Przyjmijmy na razie, że I_B jest pomijalnie mały. Wtedy $I_1 = I_2$ i całość prądu wywołanego mierzonym ładunkiem wpływa do

kondensatora C_1 ładując go do ładunku Q_1 . A z kolei napięcie na kondensatorze:

$$V_C = \frac{Q_C}{C_1} \quad (2)$$

gdzie C_1 to pojemność kondensatora. Zależność jest zatem prosta. Ładunek o wartości, przykładowo, 20 nC naładuje kondensator o pojemności 10 nF do napięcia 2 V. Zmieniając kondensator na inny, o innej pojemności, zmienia się czułość bądź zakres pracy elektrometru.

Lewa okładka kondensatora C_1 znajduje się na potencjale (pozornej) masy. Zatem, ze względu na przyjęte kierunki strzałkowania prądów i napięć można stwierdzić, że napięcie na wyjściu elektrometru W_{y2} jest równe $-V_C$.

Przełącznik SW_1 służy do zwierania kondensatora C_1 w celu jego rozładowania. Od chwili jego ponownego rozwarcia rozpoczyna się pomiar ładunku.

A jakie znaczenie ma wejściowy prąd polaryzacji wzmacniacza operacyjnego I_B ? Jeżeli $I_1 = 0$, czyli do elektrometru nie wpływa żaden prąd, wtedy $I_2 = -I_B$. Zatem wejściowy prąd polaryzacji stale zmienia ładunek w kondensatorze C_1 . W dokumentacji popularnego wzmacniacza operacyjnego LM324 można odczytać, że w nim typowo $I_B = 10$ nA. Wydaje się to wartością małą ale to oznacza przepływ ładunku 10 nC w ciągu każdej jednej sekundy. Takie ładunek zmieni napięcie na kondensatorze C_1 o pojemności 10 nF o 1 V! Gdyby zatem do konstrukcji elektrometru użyć LM324 wtedy co sekundę napięcie na jego wyjściu samorzutnie zmieniałoby się o 1 V nawet, gdy elektrometr nic nie mierzy!

Do konstrukcji elektrometrów używa się zatem dedykowanych temu wzmacniaczy operacyjnych optymalizowanych pod kątem małej wartości wejściowego prądu polaryzacji. W makiecie użyto wzmacniacza MAX9945, w którym $I_B = 50$ fA (femtoamperów, 1×10^{-15} A, tysięcznych części pikoampera)¹.

W praktyce nie da się całkowicie uniknąć niechcianych prądów wpływających do wejścia elektrometru i ładujących stopniowo kondensator C_1 ². Dlatego elektrometry wyposaża się w przełącznik SW_1 zwierający i rozładowujący ten kondensator w kontrolowany sposób. Typowe użycie elektrometru polega na utrzymaniu zwartego SW_1 w czasie przygotowania pomiaru i rozwarciem go tylko na czas samego pomiaru. Po odczycie napięcia na wyjściu elektrometru zwiera się go ponownie. W trakcie realizacji ćwiczenia popatrz jak zmieniają się wskazania na wyjściu elektrometru gdy pozostaje on rozarty.

Pozostały do omówienia diody D_1 i D_2 . Służą one do zabezpieczenia wejścia elektrometru przed dużymi ładunkami elektrostatycznymi oraz przed przekroczeniem dopuszczalnego napięcia na wejściu odwracającym wzmacniacza operacyjnego. Owszem, jest na nim pozorna masa ale pod warunkiem liniowej pracy wzmacniacza operacyjnego. Nie będzie to miało miejsca gdy kondensator C_1 naładuje się już do napięcia o wartości przekraczającej wartości graniczne na wyjściu wzmacniacza. Diody D_1 i D_2 są normalnie spolaryzowane zaporowo i prąd odprowadzający ładunek popłynie przez nie tylko, jeżeli napięcie na wejściu przekroczy w dół bądź w górę przedział napięć od ujemnego do dodatniego napięcia zasilania układu.

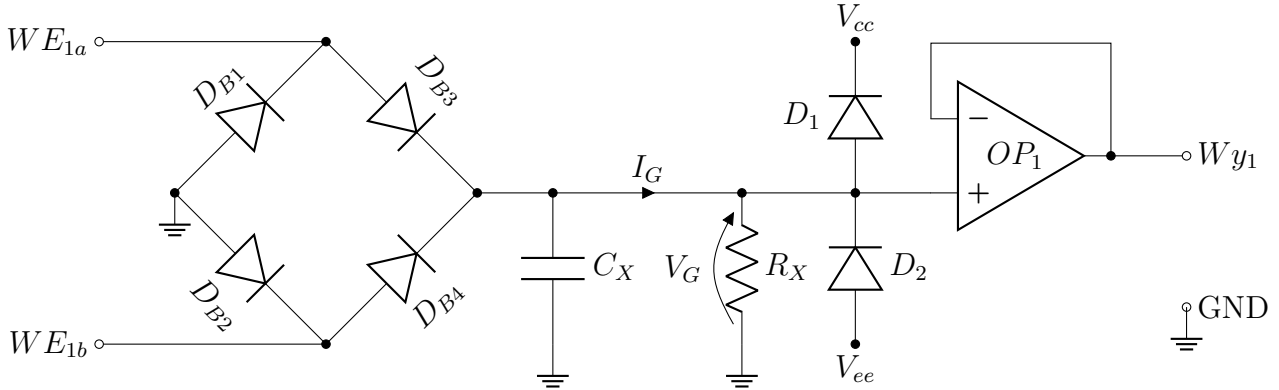
Pamiętać należy jednak o właściwym doborze i tego komponentu. Dioda półprzewodnikowa nigdy nie jest idealnym przyrządem przepuszczającym prąd jedynie w jedną stronę. Przy niewielkiej polaryzacji wstecznej płynie przez nią niewielki ale nie zerowy prąd nazywany prądem nasycenia. Jego wartość dla typowej diody prostowniczej to są dziesiątki czy setki nanoamperów, co nie przeszkadza takiej diodzie pracować w prostowniku ale dyskwalifikuje ją z użycia w

¹Dodatkowo, wzmacniacz ten ma relatywnie niewielkie wejściowe napięcie niezrównoważenia, które w układzie elektrometru manifestuje się tym, jak dokładnie potencjałowi masy odpowiada masa pozorna na wejściu odwracającym wzmacniacza

²Ograniczeniu tych prądów też tzw. elektroda ochronna (guard electrode) obecna w obwodzie drukowanym elektrometru, który masz przed sobą, czy okablowaniu w elektrometrach profesjonalnych. Jeśli ciekawi Cię ten temat - zapytaj prowadzącego.

elektrometrze. Efekt byłby identyczny z tym, jaki daje duży wejściowy prąd polaryzacji wzmacniacza operacyjnego, co omówiono wcześniej. W układzie zastosowano diody BAS116, których prąd nasycenia jest rzędu 1 fA.

2.2 Układ pozyskiwania energii



Rysunek 3: Schemat układu pozyskiwania energii z makiety dydaktycznej.

Układ pozyskiwania energii z generatora tryboelektrycznego dodatkowo może posłużyć do pomiaru generowanej mocy. W skrócie:

- generator tryboelektryczny dołącz do wejść WE_{1a} i WE_{1b}
- prąd przemienny z generatora prostowany jest w prostowniku dwupołówkowym i ładuje kondensator C_X ; jego wartość należy dobrać tak, aby stała czasu $\tau = R_X C_X$ była rzędu 100 ms
- rezystor R_X obciąża generator prądem I_G ; dobierz go tak, aby V_G było rzędu 1 V
- obserwując napięcie V_G można oszacować generowaną moc $P = \frac{V_G^2}{R_X}$
- wzmacniacz OP_1 działa jako wtórnik pozwalający na pomiar V_G na wyprowadzeniu WY_1 bez obciążania układu pozyskiwania energii

A oto szczegóły konstrukcji układu pozyskiwania energii z generatora tryboelektrycznego. W opisie częściowo wykorzystano informacje z opisu działania elektrometru. Wróć do niego jeśli coś będzie niejasne.

Generator tryboelektryczny generuje przemienny prąd wywołany elektryzowaniem się materiałów trących o elektrody. Elektrody należy dołączyć do wejść WE_{1a} i WE_{1b} . Prąd ten prostowany jest w prostowniku dwupołówkowym w konfiguracji mostka, złożonego z diod D_{Bx} i ładuje kondensator C_X . Aby ten kondensator nie rozładowywał się przez prostownik ten drugi zrobiony jest ze znanych Ci z opisu elektrometru diod o bardzo małym prądzie nasycenia BAS116.

Z kondensatora C_X pobierany jest prąd I_G , który płynie przez rezystor R_X . Napięcie na tym rezystorze jest miarą generowanej mocy:

$$P = \frac{V_G^2}{R_X} \quad (3)$$

Wartości R_X i C_X należy dobrać eksperymentalnie. R_X powinien być dobrany tak, aby napięcie na nim było w okolicy ułamka wolta do paru woltów. Potem dobrać trzeba wartość C_X tak, aby stała czasu $\tau = R_X C_X$ była rzędu 100 ms. Zapewni to małe wahania V_G w trakcie pomiaru.

Pomiaru V_G nie można zrobić bezpośrednio woltomierzem. Jego rezystancja wejściowa, typowo wynosząca 10 M Ω , połączona byłaby równolegle do R_X przez co kondensator C_X rozładowywał by się też przez woltomierz.

Wzmacniacz OP_1 pełni rolę wtórnika napięcia. Dzięki niemu możliwe jest obserwowanie napięcia V_G przez pomiar wykonywany na złączu WY_1 . Zastosowano tu taki sam wzmacniacz, jak w elektrometrze. Powód jest podobny. Wejściowy prąd polaryzacji wzmacniacza OP_1 też powodował by zmiany ładunku na C_X . Użyty tu wzmacniacz - MAX9945 ma bardzo mały wejściowy prąd polaryzacji co minimalizuje ten efekt.

Diody D_1 i D_2 służą zabezpieczeniu wzmacniacza OP_1 , podobnie, jak w elektrometrze.

3 Przebieg ćwiczenia

3.1 Kontaktowy efekt tryboelektryczny

Ćwiczenie polega na porównaniu właściwości tryboelektrycznych pewnej puli materiałów. Bazować można na próbkach znajdujących się w laboratorium ale przynieść można (a wręcz należy) próbki materiałów własnych. Ważne jest, by był to materiał nieprzewodzący elektrycznie, płaski, suchy i czysty.

W pomiarach używany będzie elektrometr. Jego działanie opisano w punkcie 2.1. Zakres ustala się pojemnością kondensatora całkującego. Rozpocznij od zastosowania w nim kondensatora o pojemności 10 nF. Odpowiednio zasil elektrometr i zewrzyj kondensator całkujący pokrętką "Zero".

Zmierz wielkość elektrody, wyznacz jej powierzchnię.

Pomiar ładunku statycznego przebiega następująco:

- Zewrzyj elektrometr. Woltomierz dołączony do wyjścia powinien wskazywać wartość bliską 0.
- Przyłóż elektrodę do badanego materiału.
- Rozewrzyj elektrometr.
- Oddziel elektrodę od materiału. Zarejestruj wskazanie elektrometru zaraz po oddzieleniu elektrody. Wskazanie będzie zmieniało się z czasem.
- Możliwe, że eksperyment trzeba będzie powtórzyć. Jeżeli napięcie wyjściowe elektrometru było większe niż ± 10 V należy zmniejszyć czułość elektrometru przez zastosowanie kondensatora całkującego o większej pojemności. Jeżeli napięcie było mniejsze niż ± 200 mV należy zwiększyć czułość elektrometru przez zastosowanie kondensatora całkującego o mniejszej pojemności. Po zmianie kondensatora powtórz od nowa wszystkie czynności.

Pomiar powtórz wskazaną przez prowadzącego liczbę razy (5-20) dla każdego materiału. Oceń powtarzalność wyników.

Na podstawie ładunku i powierzchni elektrody oblicz gęstość powierzchniową ładunku tryboelektrycznego TECD w $\mu\text{C m}^{-2}$. Uszereguj testowane materiały pod względem wartości. Porównaj wyniki z danymi z tabeli 1. Rozbieżności skomentuj. Weź pod uwagę nie tylko sam materiał ale też jego właściwości fizyczne: gładkość powierzchni, twardość, to czy materiał był elastyczny, itp.

3.2 Generator tryboelektryczny

Na wyposażeniu stanowiska jest prosty generator tryboelektryczny wraz z opisanym w punkcie 2.2 obwodem. Eksperyment z jego wykorzystaniem przebiega następująco:

- Przygotuj generator tryboelektryczny umieszczając w nim testowane materiały. Można wykorzystać materiały na wyposażeniu stanowiska bądź wyciąć kawałki materiałów własnych. Zachęcam do przyniesienia różnych grubszych folii, fragmentów butelek plastikowych itp. materiałów, które będzie można zbadać.
- Umieść w generatorze elektrody i upewnij się, że nic nie przeszkadza w swobodnym obracaniu się generatora.

- Zasil układ pomiarowy stosując ograniczenie prądowe 50 mA.
- Dołącz woltomierz do wyjścia generatora.
- Umieść w układzie pomiarowym wybrany rezystor. Dobierz do niego kondensator o pojemności takiej, by stała czasowa $\tau = R_x C_x$ wynosiła około 100 ms.
- Zaczynij obracać korbę generatora ze stałą, miarową prędkością, na przykład 1 obrotu na sekundę.
- Oceń, czy napięcie wyjściowe jest rzędu ułamka wolta, czy pojedynczych woltów. Jeśli nie, zmień wartość rezystora i powtórz czynności.
- Na podstawie wartości napięcia na wyjściu generatora oceń natężenie prądu I_G oraz generowaną moc.

Eksperyment można powtórzyć dla innego zestawienia materiałów. W sprawozdaniu zapisz informacje o badanych materiałach, uzyskanych wynikach i wnioskach z ewentualnych powtórzeń bądź porównać.

Literatura

- [1] Wikipedia, Triboelectric effect, https://en.wikipedia.org/wiki/Triboelectric_effect
- [2] Zou, Haiyang, et al. "Quantifying the triboelectric series." Nature communications 10.1 (2019): 1427. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x>
- [3] Wykład Materiały Elektroniki.