

## Zasilanie zdalnych układów pomiarowych instalowanych na napowietrznych liniach przesyłowych

**Streszczenie.** Zaprezentowano laboratoryjny model zdalnego, mikroelektronicznego układu czujnikowego, zasilanego z hybrydowego, elektrostatyczno-piezoelektrycznego harwestera energii, współpracującego z koncentrycznym kondensatorem tubowym, instalowanym na linii napowietrznej. Układ ten przetestowano na modelu jednofazowej linii przesyłowej SN przy napięciu do 60 kV. Opracowany samowystarczalny energetycznie system pomiarowy stanowi element globalnej sieci IoT, przystosowany do integracji z rozwiązaniami informatycznymi Smart Grid.

**Abstract.** The paper presents a laboratory model of a remote microelectronic sensor devices, supplied by a hybrid electrostatic-piezoelectric energy harvester, accommodated in a coaxial capacitor installed on the overhead transmission line. The system was laboratory-tested using a model of single-phase overhead transmission line up to 60 kV. Developed energy self-sufficient system is part of a global IoT network, suitable for integration with smart power grid IT solutions. (**Supplying remote measurement systems installed on overhead transmission lines**).

**Słowa kluczowe:** czujnik, Smart Grid, harvesting energii, przetwornik piezoelektryczny.

**Keywords:** sensor, Smart Grid, energy harvesting, piezoelectric transducer.

### Wstęp

Dane pomiarowe (napięcie, prąd, temperatura, zwis przewodów, oblodzenie, lokalne warunki środowiskowe) związane z eksploatacją napowietrznych linii wysokiego (WN) – a coraz częściej średniego (SN) – napięcia są w coraz większym stopniu wykorzystywane do zarządzania i optymalizacji pracy systemu elektroenergetycznego. Jest to szczególnie widoczne w przypadku rozwiązań informatycznych Smart Grid, które bez dostępu do aktualnych i lokalnie zbieranych danych pomiarowych nie są w stanie realizować swoich podstawowych zadań, jakimi są zwiększenie efektywności transferu energii ze źródła do odbiorcy oraz eliminacja przerw w jej dostarczaniu. Służą temu m.in. nowoczesne układy diagnostyczne, pozwalające na inteligentne zarządzanie przepływem energii, zabezpieczeniami oraz restytucją sieci [1].

O ile pomiary parametrów elektrycznych (napięcie, prąd) nie nastroczają problemów metrologicznych o tyle pomiary np. lokalnej temperatury przewodów linii napowietrznej, rzeczywistego ich zwisu czy też oblodzenia (zarówno rzeczywistego jak i potencjalnego) nie są wciąż dobrze opanowane od strony metrologicznej jak i inżyniersko-projektowej. Jednym z zagadnień jest m.in. konieczność zdalnej pracy mikroelektronicznych, cyfrowych (a zatem niskonapięciowych) układów pomiarowo-transmisyjnych na wysokim, przemiennym potencjale linii SN lub WN. Podstawowym, wciąż nierozwiązanym problemem jest w tym wypadku brak pewnego zasilania tych układów. Klasyczne rozwiązanie z transformatorem obniżającym napięcie linii na potrzeby własne (szczególnie w przypadku linii WN) czy też zastosowanie baterii (ze względu na konieczność ich wymiany) nie wchodzi w takim wypadku w rachubę.

Wydaje się, iż jedynym skutecznym i efektywnym rozwiązaniem problemu zasilania jest w tym wypadku harvesting energii. Jest to generacja energii elektrycznej z innych form energii, dostępnych w bezpośrednim otoczeniu zasilanego układu czujnikowego (jak np. światło słoneczne, ruch powietrza, pole elektryczne lub magnetyczne). Zasilanie harvestingowe jest coraz częściej z powodzeniem stosowane w eksperymentalnych, bezprzewodowych, rozproszonych sieciach pomiarowych IoT (Internet of Things). Systemy te, pozyskując zdalnie różnego rodzaju dane, np. parametry środowiskowe we wnętrzu budynków, umożliwiają nie tylko bezpośrednią analizę ich wartości oraz trendów [2] ale również zaawansowaną ich interpretację np. pod kątem zachowań użytkowników budynku w celu optymalizacji zużycia energii.

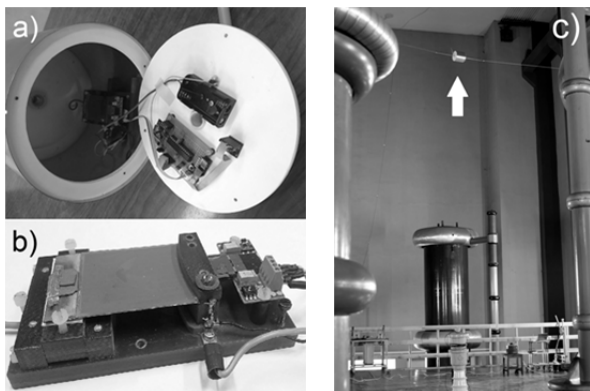
Dyskutując jednak stricte wysokonapięciowe użycie harvestingu energii należy wymienić m.in. pracę Mosera, prezentującą zdalny układ, wykrywający oblodzenie napowietrznej linii przesyłowej 220 kV AC na jednej z austriackich przełęczy górskich. Zasilano go z harwestera energii, korzystającego z pojemnościowego sprzężenia doziemnego dzielnika napięcia w postaci metalowej tuby, nałożonej koncentrycznie na jeden z przewodów linii. Umożliwia on obniżenie napięcia 220 kV do 5 kV, a następnie (przy użyciu transformatora) do 3 V w celu zasilania mikro-elektronicznych układów czujnikowo-radiowych [3]. Zangl zaprezentował podobną ideę zasilania układu czujnikowego, pracującego na przewodzie linii WN w celu pomiaru jej zwisu. Pojemnościowo-transformatorowy harvester energii dawał ciągłą moc zasilania ok. 200 mW dla linii o napięciu 100 kV na wysokości 4,5-9 m [4]. Również Zhao zaprezentował zdalny układ monitorujący linię przesyłową 110 kV z analogicznie rozwiązany źródłem zasilania. Dla laboratoryjnego modelu harwestera z kondensatorem o średnicy 10 cm i długości 20 cm dla napięcia 60 kV i wysokości 9 m uzyskano moc ok. 16 mW [5]. Natomiast grupa Grossera opracowała i uruchomiła testową sieć 59 zdalnych czujników ASTROSE, zainstalowanych na linii przesyłowej 110 kV w górach Harz. Czujnik te były zasilane przy pomocy harvesterów o konstrukcji analogicznej do omawianych powyżej, umożliwiając zdalny pomiar prądu linii, jej temperatury oraz zwisu, a ze względu na ograniczony zasięg łącz radiowych wykorzystywały multi-hoppingową sieć ad-hoc [6].

Jak widać z tego krótkiego przeglądu literaturowego, dotyczącego harvestingowego zasilania zdalnych układów czujnikowych z przetwarzaniem energii przemiennego pola elektrycznego wokół przewodu linii napowietrznej, zdecydowana większość rozwiązań bazuje na idei doziemnego sprzężenia pojemnościowego kondensatora tubowego oraz na transformatorowym obniżaniu napięcia wyjściowego takiego dzielnika. Wadą tych rozwiązań jest konieczność stosowania miniaturowych, wysokonapięciowych transformatorów, które stanowią jednak zle dopasowanie impedancyjne do źródła o charakterze stricte pojemnościowym, jakim jest dzielnik pojemnościowy. W dalszej części pracy przedstawiono realizację techniczną i testy laboratoryjne dwustopniowego przetwarzania energii zmiennego pola elektrycznego linii przez hybrydowy harvester elektrostatyczno-piezoelektryczny (e-p), który współpracując z dzielnikiem koncentrycznym, nie wymaga transformatora.

## Obiekty i układy doświadczalne

Biorąc pod uwagę wzory podane w dalszej części artykułu oraz konieczność umieszczenia wewnątrz tuby kondensatora koncentrycznego elementów harwestera i systemu pomiarowego dobrano jej wymiary: promień  $R=100$  mm, długość  $L=200$  mm; typowy promień przewodu fazowego linii SN  $r=5,0$  mm. Kondensator wykonano jako cienkościenne (1 mm) stalowy cylinder zamknięty dielektrycznymi denkami o grubości 5 mm z osiowo przeprowadzoną stalową rurką o średnicy 10 mm i długości 1 m, imitującą przewód linii. Wewnątrz tuby kondensatora zamocowano harvester oraz płytki PCB bezprzewodowego systemu pomiarowego, bazującego na mikrokontrolerze atmega328p (Atmel), wieloparametrowym czujniku BME280 (Bosch) i scalonym transceiverze radiowym 2,4 GHz nRF24L01+ (Nordic Semiconductor). Na jednym z denek umieszczono również antenę radiową o zysku 5 dBi. Elektryczną masę harwestera (jego elektrodę ruchomą) oraz masę układów elektronicznych połączono z elektrodą cylindryczną, natomiast elektrodę nieruchomą harwestera z elektrodą centralną. Wewnątrz kondensatora tubowego umieszczono też bateryjne źródło zasilania, używane podczas wybranych testów układu (rysunek 1a). Próby terenowe pozwoliły na oszacowanie zasięgu transmisji radiowej na ponad 150 m.

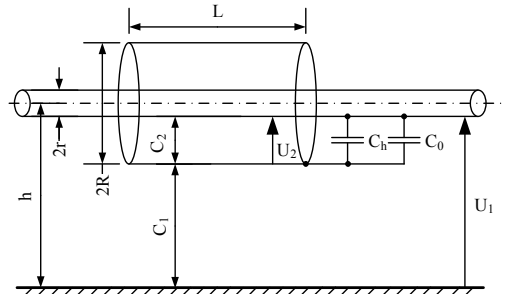
Przetwornik e-p został zbudowany na bazie elementu piezoelektrycznego Volture V20W (Mide, USA) w postaci bimorficznej, kompozytowej płytki, zamocowanej sztywno na dielektrycznej podporze przy pomocy sugerowanego przez producenta półokrągłego docisku [7]. Podporę zamocowano do izolacyjnej podstawy a wolny koniec płytki piezoelektrycznej wyposażono w elektrodę, wykonaną z dwustronnie metalizowanej miedzią płytki 38x20x0,7 mm z kompozytu szkło-epoksyd. Obie warstwy Cu zwarto a ich połączenie wyprowadzono wzdłuż krawędzi przetwornika piezoelektrycznego elastyczną linką. Na górnej powierzchni tej elektrody przyklejono wolframowy obciążnik o doświadczalnie dobranej masie. Pod elektrodą ruchomą zamocowano zespół elektrody nieruchomej. Wykonano ją z folii Cu 35x12x0,3 mm izolowanej od góry kompozytową folią dielektryczną silikon-BaTiO<sub>3</sub> o grubości 0,5 mm oraz względnej przenikalności elektrycznej  $\epsilon_r=6,5$ . Przewidziano również możliwość regulacji szczeliny powietrznej między elektrodą ruchomą a nieruchomą. Wszystkie omówione w pracy testy przeprowadzono dla szeregowego połączenia piezoelementów w bimorfu.



Rys.1. Układ pomiarowy: a) kondensator tubowy, b) harvester elektrostatyczno-piezoelektryczny, c) zdalny system zainstalowany na modelu linii SN w laboratorium wysokonapięciowym

Do przetwarzania zmiennego napięcia wyjściowego piezoelektryku na napięcie stałe o parametrach wymaganych przez układy mikroelektroniczne wykorzystano impulsową przetwornicę AC-DC typu Volture

EHE004 na bazie układu LTC3588-1 (Linear Technology). Przetwornicę wyposażono w kondensator gromadzący energię  $C_{bat}=200$   $\mu$ F, wyjściowy kondensator buforowy  $C_{wy}=47$   $\mu$ F i skonfigurowano na napięcie wyjściowe  $U_{zas}=2,5$  V. Układ czujnikowy umożliwił również zdalny pomiar napięcia  $U_{bat}$  na pojemności  $C_{bat}$  – napięcie to w nieliniowy sposób powiązane było z wartością szczytową napięcia pobudzającego harvester  $U_2$ . Gotowy harvester pokazano na rysunku 1b.



Rys.2. Uproszczony model doziemnego, tubowego dzielnika pojemnościowego

Pakiety danych pomiarowych, transmitowane radiowo przez zdalny układ czujnikowy odbierane były przez moduł konwertera protokołu, opisany szczegółowo w pracy [2]. Odebrane surowe dane były kompensowane (w oparciu o zestaw współczynników korekcyjnych, odczytany zdalnie z czujnika BME280) i udostępniane lokalnie w formie tekstowej poprzez interfejs USB. Wartości pomiarowe uśrednione w okresie 60 s były również retransmitowane poprzez bezprzewodową sieć Wi-Fi do zdalnego serwera.

Testy wysokonapięciowe prowadzono w hali WN przy użyciu uproszczonego modelu linii SN w postaci stalowej liny o średnicy 5 mm, przewleczonej przez centralną rurkę kondensatora tubowego i rozciągniętej w poprzek pomieszczenia na wysokości 6 m nad uziemioną podłogą i ok. 6 m od sufitu. Model linii zasilano z transformatora probierczego TP60, zasilanego poprzez autotransformator z sieci 230 V 50 Hz. Pomiaru napięcia linii dokonywano przy pomocy wysokonapięciowej sondy HP34300A i multimetru Fluke 286. Na rysunku 1c pokazano gotowy do testów kondensator tubowy zawieszony na modelu linii [8].

## Uproszczony model matematyczny

Przyjmując oznaczenia jak na rysunku 2 oraz wykorzystując znane wzory na napięcie wyjściowe obciążonego dzielnika pojemnościowego, pojemność kondensatora koncentrycznego oraz pojemność doziemną linii można pokazać, że napięcie  $U_2$  pracy harwestera ma w przybliżeniu wartość:

$$(1) \quad U_2 = \frac{\frac{2\pi R U_1 \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln h}}{\frac{2\pi R \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln h} + \frac{2\pi r \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln R} + C_h + C_0}$$

gdzie:  $h$  - wysokość linii nad ziemią,  $r$  - promień przewodu linii,  $R$  - promień tuby,  $L$  - długość tuby,  $C_1$  - pojemność doziemna tuby,  $C_2$  - pojemność tuby względem linii,  $C_h$  - pojemność elektrod przetwornika elektrostatycznego,  $C_0$  - pojemność dodatkowa,  $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni,  $\epsilon_r$  - przenikalność względna powietrza,  $U_1$  - napięcie linii.

Natomiast rozważając w uproszczeniu przetwornik elektrostatyczny jako płasko-równoległy kondensator

o powierzchni okładek  $S$  i szczeliny międzyelektrodowej  $d$ , naładowany do napięcia  $U(t)=U_2\sin(\omega t)$ , to na jego elektrody działa ściskające naprężenie Maxwell'a  $\sigma_M=\epsilon_0\epsilon_r U^2(t)/2d^2$ . Jeżeli jedna z elektrod tego kondensatora jest zawieszona sprężysto ze stałą sprężystości  $k$  to naprężenie  $\sigma_M$  powoduje jej przesunięcie w stronę elektrody nieruchomej o  $(d_0-d)$ , gdzie  $d_0$  jest statyczną szerokością szczeliny. Ruch elektrody ruchomej będzie trwał dopóki siła sprężysta nie zrównoważy siły wywołanej naprężeniem Maxwell'a:

$$(2) \quad \sigma_M S + k(d_0 - d) = 0$$

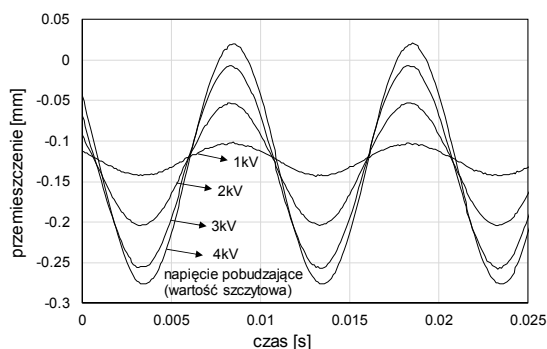
Rozwiązując równanie (2) w dziedzinie rzeczywistej otrzymuje się skomplikowane wyrażenie na  $d(t)$ , zawierające jednak czynniki o podwojonej częstotliwości kołowej  $2\omega$ . A zatem dla napięcia pobudzającego o częstotliwości 50 Hz elektroda ruchoma będzie drgała z częstotliwością 100 Hz.



Rys. 3. Zależność napięcia wyjściowego piezoelementu harvestera od napięcia pobudzającego przetwornik elektrostatyczny

### Wyniki pomiarów wstępnych

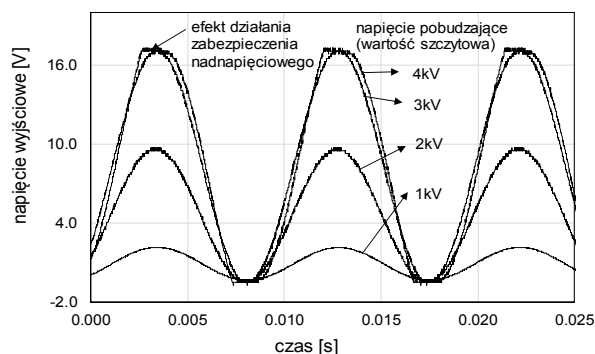
Pomiar pojemności  $C_2$  kondensatora koncentrycznego z wbudowanym harvesterem i układami elektronicznym (wykonany mostkiem RLC Hioki 3522-50) wykazał 17 pF, czyli ponad 4,5 razy więcej niż wartość obliczona ze wzoru na pojemność kondensatora koncentrycznego. Da takiej wartości  $C_2$  przyjęte parametry  $R$ ,  $L$  oraz  $r$  dają obliczeniową pojemność doziemną tuby kondensatora  $C_1=2,72$  pF, co dla pojemności dodatkowej  $C_0=30$  pF i dla  $U_1=84,5$  kV daje  $U_2\approx 4,6$  kV (napięcia podane jako wartości szczytowe).



Rys. 4. Czasowe zmiany wychylenia belki piezoelementu harvestera dla wybranych wartości napięcia pobudzającego

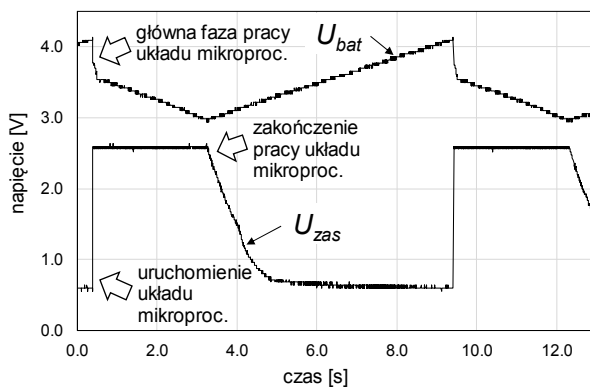
Wstępne testy przetwornika elektrostatyczno-piezoelektrycznego przeprowadzono zasilając jego elektrody napięciem sinusoidalnym o regulowanej częstotliwości i amplitudzie (generator Agilent 33521A ze wzmacniaczem Trek 610e) i mierząc napięcie na wyjściu przetwornika piezoelektrycznego (oscyloskopem Tektronix MSO2014 z bierną sondą 1:10). W pierwszym kroku

dobrano masę elektrody ruchomej tak, aby jej rezonans mechaniczny występował przy 100 Hz oraz aby – dzięki zwiększeniu momentu bezwładności - częstotliwość rezonansowa była jak najmniej niezależna od amplitudy drgań a zatem również napięcia pobudzającego. Dokonano także optymalizacji szerokości szczeliny międzyelektrodowej oraz zbadano efekt wprowadzenia do niej wkładki izolacyjnej o zwiększonej przenikalności elektrycznej, co zilustrowano na rysunku 3. Przekładka dielektryczna wraz z odpowiednio dobraną szczeliną powietrzną umożliwia uzyskanie większych napięć wyjściowych (do ok. 19 V) i większego zakresu napięć pobudzających (do 4 kV, wart. szczyt.) niż sama szczelina powietrzna. Zastosowanie jednak zbyt wąskiej szczeliny lub zbyt wysokiego napięcia pobudzającego powoduje pojawienie się wyładowań niezupełnych, co objawia się gwałtownym spadkiem wydajności przetwornika. Przyjęto zatem, że maksymalna wartość szczytowa napięcia pobudzającego zoptymalizowany przetwornik to 4 kV.



Rys. 5. Czasowe zmiany napięcia wyjściowego piezoelementu harvestera dla wybranych wartości napięcia pobudzającego

Wyznaczono również amplitudę oscylacji końca elektrody ruchomej harvestera (wykorzystano do tego celu dylatometr laserowy Keyence LK-H082). Na rysunku 4 pokazano przebieg czasowych zmian wychylenia elektrody ruchomej harvestera dla kilku wybranych amplitud napięcia pobudzającego. Piezoprzetwornik porusza się sinusoidalnie z częstotliwością 100 Hz a amplituda oscylacji dochodzi do 150  $\mu\text{m}$  przy pobudzeniu o amplitudzie 4 kV. Tak małe ugięcie wystarcza jednak do wygenerowania przez piezoprzetwornik napięcia wyjściowego o wartości międzyszczytowej przekraczającej 17 V, przy której zaczyna już działać zabezpieczenie nadnapięciowe, wbudowane w przetwornicę EHE004, co wyraźnie widać na rysunku 5.



Rys. 6. Czasowe zmiany napięcia zasilania zdalnego układu czujnikowego dla napięcia pobudzającego o amplitudzie 4 kV

Na rysunku 6 zilustrowano ostatecznie przebiegi napięć, uzyskiwane z przetwornicy EHE004, zasilającej kompletny zdalny układ pomiarowy przy podaniu na elektrody kondensatora tubowego napięcia sinusoidalnego o amplitudzie 4 kV i częstotliwości 50 Hz. Gdy  $U_{bat}$  osiąga górny poziom zabezpieczenia podnapięciowego (4,1 V) przetwornica włącza napięcie wyjściowe  $U_{zas}$ , co powoduje jednocześnie uruchomienie pomiarowego układu mikroprocesorowego. Ponieważ pobierana przez niego moc jest większa niż moc dostarczana z harwestera prowadzi to do spadku napięcia  $U_{bat}$  i gdy osiąga ono dolny poziom zabezpieczenia podnapięciowego (2,95 V) przetwornica wyłącza napięcie wyjściowe  $U_{zas}$ . Powoduje to zakończenie działania układu mikroprocesorowego oraz doładowanie kondensatora  $C_{bat}$  do 4,1 V przez nieobciążoną przetwornicę i powtórzenie całego cyklu. Analizując przebieg  $U_{bat}$  i znając wartość  $C_{bat}$  można wyznaczyć średnie wartości mocy, prądu i napięcia wyjściowego przetwornika e-p (odpowiednio 0,13 mW, 37,8  $\mu$ A i 3,5 V; wartości te uwzględniają straty energii i spadek napięcia na prostowniku pełno okresowym, w budowanym w układ LTC3588-1) oraz średnią moc i średni prąd zasilania czujnikowego układu mikroprocesorowego (odpowiednio 0,28 mW i 80,6  $\mu$ A). Możliwe jest również wyznaczenie średniego prądu i całkowitej energii pobieranej przez układ mikroprocesorowy podczas głównej fazy jego pracy, obejmującej auto konfigurację, pomiary oraz radiową transmisję danych, trwającą przez 180 ms od chwili włączeniu napięcia  $U_{zas}$  (odpowiednio 622  $\mu$ A i 0,4 mJ).

### Samowystarczalna praca układu czujnikowego na modelu napowietrznej linii SN

Po uruchomieniu i optymalizacji harwestera przeprowadzono testy samowystarczalnej energetycznie pracy kompletnego układu na laboratoryjnym modelu napowietrznej linii SN dla napięć od 20 do 60 kV (wart. skut.). W pierwszej fazie pomiarów okazało się, że dobrany obliczeniowo kondensator  $C_0=30$  pF ma zbyt małą wartość, gdyż już przy napięciu linii  $U_1=21,3$  kV (wart. skut.) napięcie pracy harwestera  $U_2$  osiągnęło graniczną wartość 4 kV. Świadczy to o rozbieżności pomiędzy wartością pojemności doziemnej  $C_1$ , wyznaczonej obliczeniowo a jej rzeczywistą wartością, charakterystyczną dla laboratoryjnego układu testowego. Jest to jednak uzasadnione, gdyż wartość obliczeniowa  $C_1$  nie uwzględnia obecności innych – poza ziemią - uziemionych elementów wokół modelu linii (a przede wszystkim uziemionego sufitu laboratorium WN). Po zwiększeniu wartości  $C_0$  do 94 pF uzyskano bezpieczne wartości  $U_2$  (<4 kV) dla napięć  $U_1<63$  kV (wart. skut.). Przy tak dobranej pojemności przy  $U_1=60$  kV (wart. skut.) układ pracował stabilnie, dokonując pomiarów i bezbłędnie wysyłając ich wyniki co ok. 9 s, co bardzo dobrze zgadza się z okresem restartu zasilania, odczytanym z rysunku 5.

### Podsumowanie i wnioski

Zaprezentowane prace koncepcyjne, konstrukcyjne i doświadczalne pozwoliły na uzyskanie samowystarczalnego energetycznie zdalnego, mikroprocesorowego układu pomiarowego, zainstalowanego bezpośrednio na napowietrznej linii SN 50 Hz, zdolnego do retransmisji danych pomiarowych na odległość przekraczającą 150 m. Układ ten wykorzystuje harvester energii z pojemnościowym sprzężeniem doziemnym oraz hybrydowy przetwornik elektrostatyczno-piezoelektryczny, pracujący przy napięciu wejściowym do 4

kV. Układ przeszedł testy w warunkach laboratoryjnych dla napięcia linii do 60 kV (wart. skut.).

Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że uzyskana średnia moc wyjściowa przetwornika piezoelektrycznego jest ponad 10x mniejsza niż moc maksymalna, podawana dla przyspieszenia 1g i częstotliwości 95 Hz przez producenta zastosowanego elementu piezoelektrycznego [7] (gdy oszacowane przyspieszenie ruchu w testowanym harvesterze to 2,5g;  $1g=9,81$  m/s<sup>2</sup>). Rozbieżność ta wymaga weryfikacji doświadczalnej oraz optymalizacji harwestera.

Czujnikowy układ mikroprocesorowy również wymaga dalszej optymalizacji zarówno sprzętowej jak i programowej pod kątem ograniczenia zużycia energii, gdyż średnie wartości prądu zasilania, wyznaczone w jego jałowej fazie pracy, są kilkukrotnie większe od wartości katalogowych prądów jałowych jego elementów składowych.

Przy projektowaniu harwestera do samowystarczalnej pracy na rzeczywistej linii SN należałoby pojemność doziemną  $C_1$  układu wyznaczyć na podstawie symulacji rozkładu pola elektrycznego wokół modelu harwestera zawieszonoego na linii trójfazowej, przeprowadzonej metodą elementów skończonych, gdyż jej dobór w warunkach rzeczywistych byłby znacznie utrudniony ze względu na konieczność wielokrotnego wyłączania linii i demontażu układu.

*Praca naukowa finansowana w ramach badań statutowych Katedry Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej.*

**Autorzy:** dr inż. Paweł Żyłka, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: pawel.zylka@pwr.wroc.pl; mgr inż. Piotr Wawrzyniak, KMB Grupa Sp. z o.o. Sp. K., ul. Kleczkowska 50, 50-227 Wrocław, E-mail: piotr.k.wawrzyniak@gmail.com

### LITERATURA

- [1] Cieśla A., Hanzelka Z., Inteligentne systemy elektroenergetyczne. Platforma technologiczna Smart Grid, <http://www.smartgrid.agh.edu.pl/.../104-intelligentne-systemy-elektroenergetyczne-ang-smart-grid>, dostęp 31-07-2017.
- [2] Żyłka P., Pociecha D., Harvesting energy from human kinesin for indoor environment sensing, *Proc. 14th International Conference on Optical and Electronic Sensors COE 2016*, edited by Piotr Jasiński, Proc. SPIE, Vol. 10161, 1016105-1.
- [3] Moser M.J. et al., Strong and Weak Electric Field Interfering: Capacitive Icing Detection and Capacitive Energy Harvesting on a 220-kV High-Voltage Overhead Power Line, *IEEE Trans. Industr. Electr.*, Vol. 58, no. 7 (2011), pp. 2597-2604.
- [4] Zangl H. et al., A Feasibility Study on Autonomous Online Condition Monitoring of High-Voltage Overhead Power Lines, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 58, No. 5, 2009, pp. 1789-96.
- [5] Zhao X. et al., Energy harvesting for a wireless-monitoring system of overhead high-voltage power lines, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2013, Vol. 7, Iss. 2, pp. 101-7.
- [6] Voigt S., Kurth S., ASTROSE® - Autonomous sensor network for condition monitoring of power lines, *Fraunhofer ENAS*, Kazan, January 2014.
- [7] Vulture Piezoelectric Energy Harvesters, Mide, document rev. No. 002, 01-23-2013
- [8] Wawrzyniak P., Harvesting energii jako źródło zasilania aparatury kontrolno-pomiarowej w napowietrznych liniach wysokich napięć, dyplomowa praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, 2017.