

dr inż. LESZEK MORZYŃSKI
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: lmorzyns@ciop.pl

System zdalnego monitorowania parametrów wibroakustycznych z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii



Odnawialne źródła energii są coraz powszechniej stosowane we współczesnej technice do zasilania urządzeń elektronicznych. Zastosowanie odnawialnych źródeł energii pozwala na ograniczenie kosztów eksploatacyjnych urządzeń, wpływa pozytywnie na środowisko naturalne, a ponadto zapewnia konstruowanym urządzeniom większą autonomię. W artykule przedstawiono koncepcję systemu umożliwiającego monitoring parametrów wibroakustycznych środowiska pracy, w skład którego wchodzi urządzenie pomiarowe zasilane przy wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii. Przedstawiono i omówiono różne rodzaje odnawialnych źródeł energii oraz możliwości ich zastosowania w zaproponowanym systemie pomiarowym.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, energy harvesting, wibroakustyka, hałas, drgania mechaniczne, monitoring

Vibroacoustic parameters remote measurement system with the use of renewable energy sources

Renewable energy is increasingly used in technology to power electronic devices. Renewable energy reduces maintenance costs, has a positive impact on the natural environment and provides more autonomy to devices. This article presents the concept of a system for monitoring vibroacoustic parameters of the working environment, with noise and vibration measuring devices powered with renewable energy. It discusses different kinds of sources of renewable energy and their possible use in the proposed monitoring system.

Keywords: renewable energy, energy harvesting, vibroacoustics, noise, vibration, monitoring

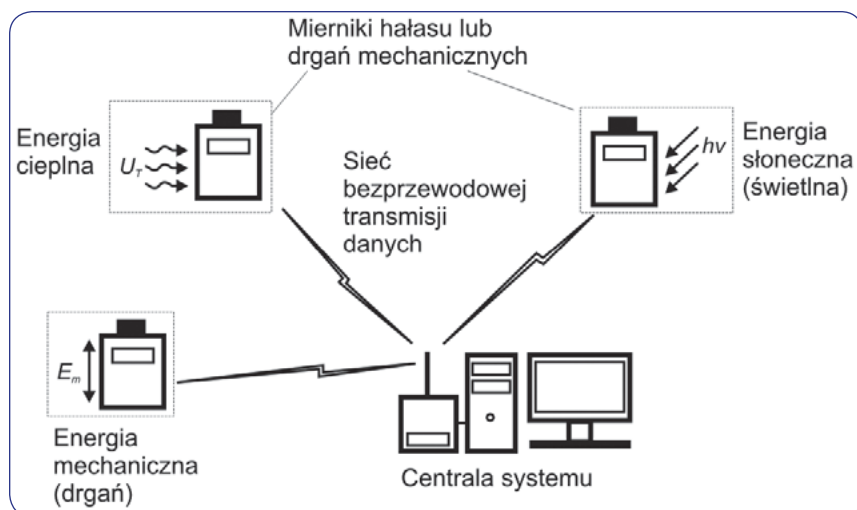
Wstęp

Zmniejszenie wykorzystywania tradycyjnych źródeł pozyskiwania energii na rzecz źródeł odnawialnych (OZE) jest jednym z najważniejszych priorytetów polityki energetycznej krajów wysoko rozwiniętych [1]. Działania te przyczyniają się do poprawy stanu środowiska naturalnego w efekcie zmniejszenia poziomu emisji zanieczyszczeń związanych ze spalaniem paliw kopalnianych, pozwalają się od nich uniezależnić, a także uniknąć powstawania odpadów niebezpiecznych lub szkodliwych, takich jak materiały radioaktywne z elektrowni atomowych czy też zużyte baterie (jeżeli zastąpimy zasilanie bateryjne zasilaniem wykorzystującym OZE). W perspektywie czasowej wykorzystanie na szeroką skalę OZE będzie się przekładało na znaczące obniżenie kosztów energii elektrycznej.

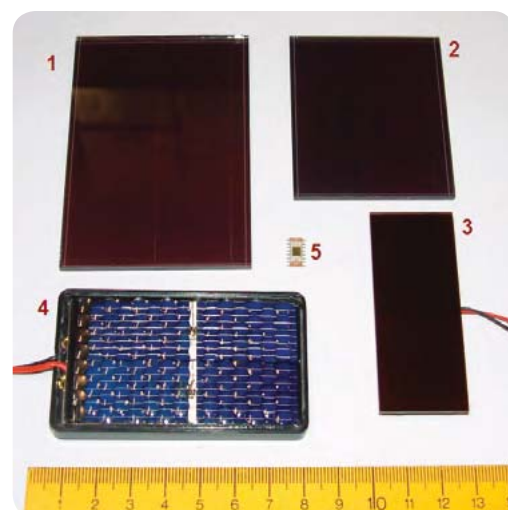
Tematem tego artykułu jest wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych do zasilania urządzeń pomiarowych w systemach monitoringu parametrów wibroakustycznych środowiska pracy. Przy możliwościach, jakie dają współczesne układy elektroniczne, możliwe jest opracowanie urządzeń pomiarowych hałasu i drgań mechanicznych charakteryzujących się poborem prądu na poziomie pojedynczych miliamperów, czyli prądów, jakie można uzyskać z termogeneratorów (przetworników termoelektrycznych) czy nawet z niewielkich ogniw fotowoltaicznych. W dalszej części tekstu przedstawiono koncepcję takiego systemu. Scharakteryzowano również trzy najczęściej wykorzystywane w *energy harvesting* OZE, wraz ze wskazaniem możliwości wykorzystania ich w zaproponowanym systemie monitoringu.

Rodzaje OZE i sposoby ich wykorzystywania

Istnieje wiele rodzajów odnawialnych źródeł energii: wodna, wiatrowa oraz słoneczna są wykorzystywane od wielu lat do produkcji energii elektrycznej, a ich udział w rynku energetycznym stale rośnie. W ostatnich latach coraz częściej zaczyna się wykorzystywać OZE do zasilania niewielkich, autonomicznych urządzeń elektronicznych, dzięki czemu



Rys. Schemat struktury systemu zdalnego monitoringu parametrów wibroakustycznych środowiska pracy
 Fig. A schematic of the structure of a system for remote monitoring of vibroacoustic parameters of the working environment



Fot. 1. Ogniwia fotowoltaiczne różnego typu
 Photo 1. Various photovoltaic links

nie wymagają one zasilania z sieci energetycznej. Działanie takie określa się angielskim terminem *energy harvesting* [2,3].

W ciągu ostatnich lat technika pozyskiwania energii elektrycznej z OZE do zasilania niewielkich elektronicznych układów autonomicznych przeżywa intensywny rozwój, przechodząc ze sfery badań do sfery komercjalizacji. Przykładem są bezprzewodowe przetworniki, do zasilania których używana jest energia mechaniczna związana ze zmianą ich położenia. Obok coraz doskonalszych generatorów elektrycznych wykorzystujących OZE, intensywnie rozwija się rynek układów elektronicznych, umożliwiających przetwarzanie i użytkowanie wytwarzanej przy ich wykorzystaniu energii elektrycznej. Nie jest to zadanie proste, gdyż generatory te cechują się zazwyczaj bardzo małymi mocami (uzyskuje się małe napięcia i/lub prądy) często dodatkowo o dużej zmienności w czasie.

Koncepcja systemu zdalnego monitoringu parametrów wibroakustycznych

Hałas oraz drgania mechaniczne [4,5] są szkodliwymi czynnikami fizycznymi, występującymi powszechnie w środowisku pracy. Według danych GUS w 2013 r. w warunkach zagrożenia hałasem zatrudnionych było ponad 190 tys. osób, a drganiami mechanicznymi – ponad 15 tys. [6]. Rzeczywista skala zagrożenia może być jednak nawet dwukrotnie większa, gdyż statystyki GUS obejmują jedynie te przedsiębiorstwa, które zatrudniają 10 lub więcej osób.

Praca w warunkach zagrożenia hałasem lub drganiami mechanicznymi może prowadzić do powstawania chorób zawodowych. W 2013 r. odnotowano 187 przypadków trwałego ubytku słuchu spowodowanego narażeniem na hałas oraz 36 przypadków zespołu wibracyjnego, będącego wynikiem narażenia na drgania mechaniczne w środowisku pracy [7]. Drgania te mogą mieć również destrukcyjny wpływ na maszyny, urządzenia i inne struktury mechaniczne, co może stać się przyczyną awarii przemysłowych i wypadków przy pracy. Warto również zauważyć, że hałas i drgania mechaniczne są czynnikami o podobnej naturze fizycznej, związanej z drganiami ośrodka propagacji i bardzo często występowanie jednego z nich wiąże się z występowaniem drugiego. Z tego

powodu określa się je wspólnym mianem „zagrożeń wibroakustycznych”.

Ponieważ zagrożenia wibroakustyczne są powszechne w środowisku pracy, stan zagrożenia musi być kontrolowany za pomocą odpowiednich pomiarów wielkości, charakteryzujących hałas i drgania mechaniczne w środowisku pracy [8], w regularnych, określonych prawem, odstępach czasu [9]. Natężenie czynników wibroakustycznych może jednak się zmieniać, np. w następstwie zmian parametrów procesów produkcyjnych czy też w wyniku zużywania się maszyn i narzędzi, zagrażając zdrowiu pracowników. Często zdarza się, że pracodawcy i pracownicy nie są świadomi tych zagrożeń. Z tego powodu w CIOP-PIB podjęto prace nad systemem zdalnego monitoringu parametrów wibroakustycznych środowiska pracy, którego zastosowanie powinno przyczynić się do ograniczenia problemu nadmiernego narażenia pracowników na hałas.

Schemat struktury opracowywanego systemu przedstawiono na rysunku. W skład systemu będą wchodziły układy pomiarowe – mierniki hałasu i drgań mechanicznych i centrala systemu, połączone ze sobą siecią bezprzewodowej transmisji danych. Układy pomiarowe, działające w sposób autonomiczny, rozmieszczone w wybranych lokalizacjach w zakładzie pracy będą na bieżąco monitorowały parametry wibroakustyczne środowiska pracy. Otrzymane dane o hałasie i drganiach mechanicznych będą przesyłane do centrali systemu poprzez sieć bezprzewodowej transmisji danych. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń [10], do przesyłu danych drogą radiową wykorzystana zostanie sieć działająca na podstawie protokołu ZigBee [11]. Centrala systemu, będąca komputerem wyposażonym w specjalne oprogramowanie, będzie gromadziła i przetwarzała dane o zagrożeniach wibroakustycznych, generując raporty o stanie zagrożenia dla osoby nadzorującej warunki pracy.

Koncepcja zakłada również, że układy pomiarowe drgań i hałasu będą zasilane z OZE: w szczególności będzie to energia słoneczna, ciepła i mechaniczna (rys.). Obecnie w urządzeniach do pomiaru lub monitoringu zagrożeń środowiskowych często wykorzystuje się zasilanie bateryjne. Jego stosowanie może wynikać z braku dostępu do innych źródeł zasilania (pomiaru na zewnątrz pomieszczeń), problemów wynikających z zastosowania połączeń

przewodowych (np. zagrożenia dla bezpieczeństwa pracowników) czy też potrzeby izolacji od zewnętrznych zakłóceń mogących występować w sieci elektrycznej zakładu pracy. Stosowanie wyłącznie zasilania bateryjnego jest kosztowne (zakup nowych baterii) lub czasochłonne (konieczność ładowania akumulatorów). Baterie mogą stanowić poważne zagrożenie dla środowiska naturalnego i ze względu na zawartość metali ciężkich muszą podlegać recyklingowi. Tych wad pozbawione są układy zasilania wykorzystujące odnawialne źródła energii – ich użycie pozwoli zatem zmniejszyć koszty obsługi urządzeń pomiarowych oraz wyeliminować zagrożenia dla środowiska naturalnego. Przetworniki energii ze źródeł odnawialnych na elektryczną cechują się dużą trwałością (np. trwałość krzemowego ogniwia fotowoltaicznego szacowana jest na ponad 20 lat, podobnie jak modułu Peltiera wykorzystywanego w generatorach termoelektrycznych) a ich recykling nie sprawia dzisiaj trudności. Każdy z układów zasilania opartych na OZE powinien posiadać w swojej strukturze element magazynujący energię elektryczną, wykorzystywaną do zasilania urządzenia pomiarowego przy braku lub niewystarczającej ilości energii elektrycznej dostępnej z OZE. Elementem tym może być tzw. superkondensator lub akumulator. Żywotność superkondensatorów oceniana jest na 30 lat natomiast akumulatorów litowo-jonowych – ok. 10 lat, przy zapewnieniu odpowiedniego sposobu użytkowania.

Układy pomiarowe zasilane OZE powinny przede wszystkim zastępować układy pomiarowe zasilane dotychczas z wykorzystaniem baterii, niemniej jednak należy dążyć do szerszego wykorzystania OZE w zasilaniu układów pomiarowych. Ilość energii elektrycznej wykorzystywanej do monitoringu parametrów wibroakustycznych środowiska pracy w stosunku do ilości energii elektrycznej zużywanej przez duży zakład przemysłowy jest niewielka, jednak przy założeniu zwiększenia liczby i zakresu monitorowanych punktów oraz patrząc z perspektywy regionu lub kraju, ilość potrzebnej energii elektrycznej może już osiągać istotne wartości.

Zastosowanie OZE w pomiarach wibroakustycznych wymaga z jednej strony opracowania odpowiednich układów do przetwarzania i magazynowania pozyskiwanej energii elektrycznej, a z drugiej – opracowania odpowiednich, energooszczędnych

Tabela 1. Wyniki pomiarów ogniw fotowoltaicznych w warunkach sztucznego oświetlenia
 Table 1. Results of the measurements of photovoltaic links performed in artificial lighting

Numer ogniwa	Napięcie na obciążeniu [V]	Prąd płynący przez obciążenie [μ A]	Moc elektryczna [mW]
1	1,42	1352	1,92
2	0,89	850	0,76
3	1,05	1000	1,05
4	0,92	925	0,85

konstrukcji układów pomiarowych. Możliwość wykorzystania do zasilania układu pomiarowego danego OZE będzie zależała od umieszczenia i warunków pracy tegoż układu pomiarowego. Należy również mieć na uwadze, że OZE oraz wykorzystujące je generatory elektryczne różnią się wydajnością i parametrami wytwarzanej energii elektrycznej, przez co w odniesieniu do każdego rodzaju OZE konieczna jest inna konstrukcja układów zasilania dla układów pomiarowych. W dalszej części tekstu scharakteryzowano trzy rodzaje OZE i wykorzystujące je generatory elektryczne oraz wskazano na możliwości ich zastosowania w opracowywanym systemie.

Energia słoneczna

Energia elektryczna uzyskiwana z energii słonecznej w elektrowniach stanowi obecnie na świecie mniej niż 1% całej wytwarzanej energii. Należy jednak podkreślić bardzo dynamiczny wzrost mocy tych elektrowni wynoszący ok. 50% rocznie [12].

Energię słoneczną definiuje się jako energię promieniowania elektromagnetycznego (optycznego) docierającego ze Słońca do Ziemi. Natężenie promieniowania słonecznego na terenie Polski (w południe) może zmieniać się w zakresie od 100 do ponad 1000 W/m² w zależności od pogody i pory roku, najczęściej jednak zawiera się w zakresie 600-800 W/m². Około połowa energii promieniowania słonecznego przypada na światło widzialne, czyli promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali od 400, do 700 nm. Około 90% energii promieniowania słonecznego przypada na promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fal od 250, do 1540 nm.

Generatorem elektrycznym wykorzystującym energię promieniowania słonecznego jest ogniwo fotowoltaiczne, nazywane również słonecznym lub baterią słoneczną. Istnieją różne rodzaje ogniw fotowoltaicznych, różniących się technologią i kosztem wytwarzania oraz sprawnością przetwarzania energii słonecznej na elektryczną. Do najczęściej wytwarzanych należą krzemowe ogniwa monokryształiczne. Charakteryzują się one dość dużą sprawnością¹, wynoszącą ok. 25%, ale są stosunkowo drogie w produkcji. Drugim powszechnie stosowanym rodzajem ogniw słonecznych są krzemowe ogniwa polikryształiczne. Są one znacznie tańsze w produkcji (stąd ich popularność), jednak mają mniejszą sprawność energetyczną: około 20%. Kolejnym rodzajem są ogniwa cienkowarstwowe (wytwarzane z różnych materiałów) i osiągające sprawności dochodzące do 23%.

Ogniwa fotowoltaiczne przetwarzają na energię elektryczną promieniowane elektromagnetyczne o określonych zakresach długości fali, zależnych głównie od szerokości tzw. przerwy energetycznej

nej półprzewodników, z których je wykonano. Na przykład krzemowe ogniwa monokryształiczne przetwarzają promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fali od ok. 350 do 1200 nm, a największą sprawność uzyskują w stosunku do fal o długościach ok. 1000 nm. Ogniwa cienkowarstwowe z amorficznego krzemu przetwarzają promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fali od ok. 300 do 800 nm, a największą sprawność uzyskują w odniesieniu do fal o długościach ok. 500 nm. Aby jak najlepiej wykorzystać energię promieniowania słonecznego opracowano zatem ogniwa wielowarstwowe, składające się z kilku różnych warstw półprzewodnika, z których każdy przetwarza efektywnie inny zakres promieniowania. W takich ogniwach uzyskuje się bardzo wysoką sprawność konwersji energii słonecznej na elektryczną, dochodzącą do 44%.

Duże ogniwa fotowoltaiczne, ze względu na swoją moc z pewnością mogłyby być wykorzystane do zasilania urządzeń pomiarowych drgań i hałasu. Żeby jednak zapewnić tym urządzeniom większą mobilność i wygodę użytkowania, powinno się zastosować jak najmniejsze ogniwa fotowoltaiczne. Ogniwa fotowoltaiczne są konstruowane w taki sposób, aby uzyskać jak największą ilość energii elektrycznej ze światła słonecznego. Z tego względu urządzenia pomiarowe drgań i hałasu nimi zasilane powinny być stosowane głównie na zewnątrz pomieszczeń, tam gdzie będzie zapewnione ich odpowiednie naświetlenie światłem słonecznym. Jako przykładowe zastosowanie można podać monitorowanie hałasu i drgań mechanicznych w kopalniach odkrywkowych, kamieniołomach, na budowach, dużych instalacjach przemysłowych (np. rafinerie, zakłady chemiczne) czy monitorowanie drgań i hałasu w środowisku naturalnym. Optymalizacją działania ogniwa fotowoltaicznego pod kątem wykorzystania promieniowania słonecznego nie oznacza jednocześnie, że ogniwo to nie będzie działało przy oświetleniu sztucznym. Moc elektryczna uzyskiwana z ogniwa fotowoltaicznego przy oświetleniu sztucznym będzie jednak w większości przypadków niższa, niż przy oświetleniu słonecznym i będzie zależała od charakterystyk: widmowej ogniwa i widmowej źródła światła. W dalszej części artykułu omówiono wybrane, nieduże ogniwa fotowoltaiczne i pokazano, jakie wielkości mocy elektrycznej można uzyskać z zastosowaniem tych ogniw w stosunku do typowego oświetlenia pomieszczeń pracy.

Na fot. 1. przedstawiono kilka niewielkich ogniw fotowoltaicznych. Numery 1, 2 i 3 to krzemowe ogniwa monokryształiczne. Ogniwo nr 1 przy natężeniu promieniowania słonecznego wynoszącym 100 W/m² ma moc znamionową wynoszącą 20 mW (wytwarzane napięcie 2 V, prąd 10 mA). Przy natężeniu promieniowania słonecznego wynoszącym 1000 W/m² moc znamionowa tego ogniwa wynosi 228 mW (2,4 V, 94,8 mA). W odniesieniu do ogniwa nr 2 moce znamionowe w stosunku do takich samych

warunków oświetlenia wynoszą odpowiednio 13 i 150 mW (napięcia nominalne 2 i 2,4 V). Ogniwo fotowoltaiczne nr 4 jest krzemowym ogniwem polikryształicznym (w obudowie). Wytwarzane przez nie napięcie znamionowe wynosi 1 V. Ciekawym przykładem jest ogniwo nr 5, stanowiące połączenie kilku ogniw słonecznych w obudowie układu scalonego. Przy oświetleniu promieniowaniem słonecznym o natężeniu 6000 lx wytwarza siłę elektromotoryczną o napięciu do 4,2 V i prąd o natężeniu do 100 μ A. W przypadku tego ogniwa ilość wytwarzanej energii elektrycznej jest zbyt mała do zasilania układów pomiarowych, jednak może ono zostać użyte jako źródło napięcia podtrzymującego funkcjonowanie niektórych układów elektronicznych w przypadku odłączenia innych źródeł zasilania (np. mikrokontrolera w stanie uśpienia czy zegara systemowego).

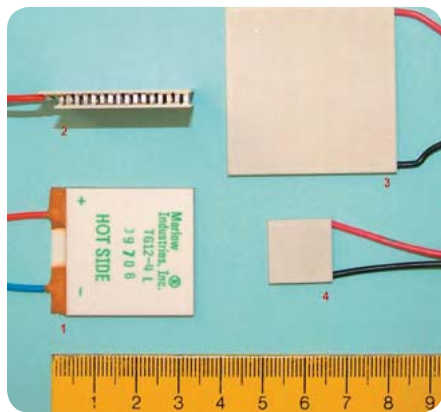
Jak wspomniano, ogniwa fotowoltaiczne mogą przetwarzać na energię elektryczną nie tylko światło słoneczne, ale również sztuczne. W tabeli 1. podano moce poszczególnych ogniw, uzyskiwane na przykładowym stanowisku pracy oświetlanym promieniowaniem sztucznym z użyciem świetlówek i żarówki halogenowej o łącznym natężeniu oświetlenia wynoszącym 1850 lx. Stosowane najczęściej do oświetlania pomieszczeń pracy świetlówki wytwarzają światło, którego widmo ma charakter wąskopasmowy, a główna część promieniowanej energii przypada na zakres widzialny i ultrafiolet. Często stosowane również do oświetlania pomieszczeń pracy żarówki halogenowe mają widmo ciągłe, przy czym duża część energii świetlnej przypada na światło widzialne o większych długościach fali oraz podczerwień. Pomiarów dokonywano przy obciążeniu ogniwa rezystorem o wartości 1 k Ω .

Jak wynika z tabeli 1., uzyskiwane moce elektryczne przy sztucznym oświetleniu są niższe niż moce nominalne deklarowane przez producentów przy oświetleniu słonecznym, co wynika z różnych charakterystyk widmowych światła słonecznego i światła ze źródeł sztucznych. Jednak ilość energii elektrycznej wytwarzanej przez ogniwa o numerach 1 do 4 mogłaby być wystarczająca do zasilania energooszczędnych układów pomiarowych hałasu i drgań mechanicznych. Można przyjąć, że ogniwa fotowoltaiczne w takich układach będą wytwarzały napięcia stałe z zakresu od 0,7 do 2,4 V. Z tego względu układy zasilania powinny zawierać przetwornice podwyższające otrzymywane napięcia do wartości 3 V, do której przystosowana jest obecnie większość niskonapięciowych układów elektronicznych.

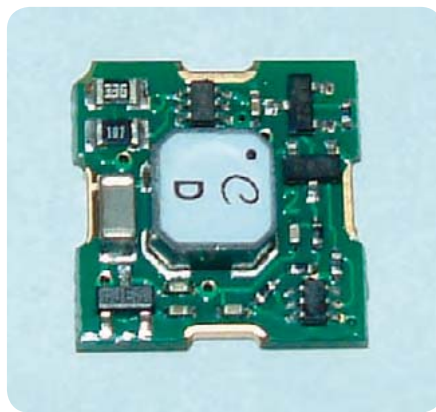
Energia termiczna

Energia termiczna, której miarą jest temperatura danego obiektu, może powstawać jako produkt uboczny procesów przemysłowych lub – działania maszyn i urządzeń. Jej źródłem mogą być procesy spalania (w tym paliw w silnikach spalinowych), obróbki termicznej materiałów, sprężania gazów, czy np. urządzenia prądu elektrycznego, m.in. silniki. Tylko w nielicznych przypadkach energia ta jest wykorzystywana np. do ogrzewania pomieszczeń – najczęściej, ze względu na jej niekorzystny wpływ na przebieg procesów czy działanie maszyn oraz na brak ekonomicznie opłacalnych sposobów wykorzystania, jest tracona lub eliminowana na skutek

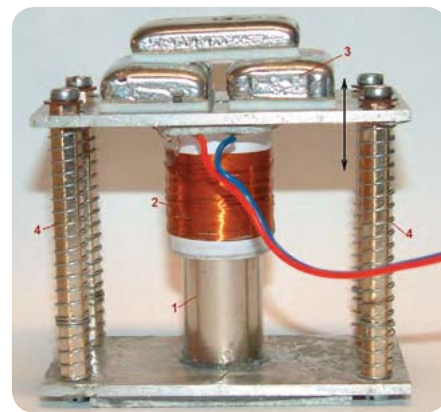
¹ Wielkość określająca, w jakim stopniu jedna postać energii przekształcana jest na drugą, najczęściej wyrażana w procentach.



Fot. 2. Przetworniki termoelektryczne
Photo 2. Thermoelectric conductors



Fot. 3. Przetwornica napięcia
Photo 3. Voltage transformer



Fot. 4. Generator indukcyjny liniowy (1 – magnes, 2 – cewka indukcyjna, 3 – masa obciążająca, 4 – sprężyny)
Photo 4. Induction line generator (1 – magnet, 2 – induction coil, 3 – burdening mass, 4 – springs)

Tabela 2. Wyniki pomiarów modułów Peltiera
Table 2. Results of Pelletier's module measurements

Nr modułu	Różnica temperatur strony ciepłej i zimnej ΔT [°C]	Napięcie na obciążeniu [V]	Prąd płynący przez obciążenie [mA]	Moc elektryczna [mW]
3	34	0,99	9,53	9,43
4	35	0,141	1,35	0,19

zastosowania odpowiednich układów chłodzenia. Obecnie energia termiczna może jednak być w większym stopniu wykorzystywana w technice do wytwarzania energii elektrycznej dzięki coraz doskonalszym termogeneratorom (przetwornikom termoelektrycznym) i przeznaczonym do nich układom przetwarzania energii elektrycznej. Jak pokazano w dalszej części artykułu, termogeneratory osiągają znaczące moce elektryczne już przy niewielkich różnicach temperatur. Układy pomiarowe hałasu i drgań mechanicznych zasilane tego rodzaju generatorami mogą znaleźć zastosowanie w firmach, w których efektem ubocznym procesu produkcji jest wytwarzanie ciepła, czyli w większości przedsiębiorstw przemysłowych lub wydobywczych.

Termogeneratory, których przykłady przedstawiono na fot. 2., wykorzystują zjawisko termoelektryczne, polegające na bezpośredniej transformacji napięcia elektrycznego występującego między dwoma punktami w układzie ciał na różnicę temperatur między tymi punktami lub transformacji różnicy temperatur między dwoma punktami na napięcie elektryczne między nimi.

Układami wykorzystywanymi obecnie powszechnie do konwersji energii elektrycznej i termicznej są moduły Peltiera, oznaczone na fot. 2. numerami 3 i 4. Znajdują zastosowanie przede wszystkim w chłodnictwie. Moduł Peltiera składa się z odpowiednio ułożonych par półprzewodników np. pomiędzy płytkami ceramicznymi, na których znajdują się elektrody. Efekt Peltiera polega na pochłanianiu lub wydzielaniu energii pod wpływem przepływu prądu elektrycznego, w wyniku czego temperatura jednej strony modułu spada, a drugiej – wzrasta. Mając do dyspozycji moduł Peltiera można uzyskać również odwrotne zjawisko, czyli zjawisko Seebecka, polegające na powstawaniu napięcia elektrycznego w obwodzie zawierającym dwa półprzewodniki, których złącza znajdują się w różnych temperaturach. W ten sposób, ogrzewając jedną stronę modułu Peltiera i schładzając drugą, możemy uzyskać termogenerator stanowiący źródło zasilania dla układów elektronicznych.

Wielkość prądu i napięcia wytwarzanego przez tak zastosowany moduł Peltiera zależy od różnicy temperatur pomiędzy stroną ciepłą a zimną modułu. Przykładowe wartości napięć i prądów uzyskiwanych z modułów oznaczonych na fot. 2. numerami 3 i 4, przy obciążeniu 100 Ω podano w tabeli 2.

Na fot. 2., pod numerami 1 i 2 pokazano termogeneratory, o konstrukcji zbliżonej do konstrukcji modułów Peltiera, zoptymalizowanej pod kątem wytwarzania energii elektrycznej z wykorzystaniem energii termicznej. Termogenerator ten może pracować przy temperaturach strony ciepłej dochodzących do 250 °C (przy pracy krótkotrwałej), przy czym przy pracy ciągłej zalecane są temperatury do 200 °C. Przetwornik TG12-4L przy różnicy temperatur stron ciepłej i zimnej wynoszącej 60 °C, przy obciążeniu 10 Ω wytwarza prąd elektryczny o napięciu mocy 0,4 W, a napięcie elektryczne wynosi 1,89 V. Przy różnicy temperatur wynoszącej 180 °C napięcie elektryczne wzrasta do 5,33 V, a moc do 2,7 W.

Jak wynika z przedstawionych danych, termogeneratory mogą stanowić źródła zasilania o stosunkowo dużych mocach, wystarczających do zasilania nawet nieoptymalizowanych pod kątem poboru mocy układów pomiarowych. Muszą być jednak spełnione dwa warunki:

- konieczny jest dostęp do źródła energii termicznej o wysokiej temperaturze względem otoczenia
- należy utrzymać jak największą różnicę temperatur pomiędzy stroną ciepłą i zimną termogeneratory za pomocą odpowiedniej izolacji termicznej obu stron i zastosowania wydajnego radiatora do odprowadzania ciepła ze strony zimnej.

W praktyce spełnienie tych warunków może być trudne, a przy różnicach temperatur wynoszących kilka stopni Celsjusza wytwarzane przez termogeneratory napięcia osiągają wartości kilkudziesięciu miliwoltów, które są niewystarczające do zasilania układów pomiarowych. Z pomocą w wykorzystaniu takich źródeł zasilania przychodzą dostępne już na rynku elektronicznym nowoczesne układy przetwornic napięcia, konstruowane pod kątem zastosowania w *energy harvesting*. Przedstawiona na fot. 3. przetwornica napięcia może wytwarzać napięcia wyjściowe w zakresie 3-5 V przy napięciu

wejściowym wynoszącym zaledwie 20 mV. Takie napięcia mogą być wytwarzane przez moduł Peltiera przy różnicy temperatur między stroną ciepłą i zimną wynoszącej ok. 2 °C. Sprawność przetwornicy napięcia w zależności od wartości napięć wejściowego i wyjściowego oraz prądu obciążenia może zawierać się w zakresie od 30 do 95%. W typowych warunkach pracy sprawność współczesnych przetwornic zawiera się najczęściej w zakresie 80-90%, w związku z czym ma ona niewielki wpływ na efektywność kompletnego źródła zasilania.

Energia mechaniczna

Drgające obiekty lub też elementy maszyn i urządzeń stanowiące źródło zagrożeń wibroakustycznych mogą również stanowić źródło energii wystarczającej do zasilania urządzeń pomiarowych drgań i hałasu. Aby wykorzystać energię mechaniczną związaną z drganiami, konieczne jest zastosowanie odpowiedniego generatora elektrycznego – indukcyjnego (elektrodynamicznego) lub piezoelektrycznego.

W generatorze indukcyjnym wykorzystywane jest zjawisko indukcji elektromagnetycznej polegającej na powstawaniu w przewodniku siły elektromotorycznej w wyniku zmian strumienia indukcji magnetycznej. Zmiana strumienia indukcji magnetycznej może być powodowana ruchem przewodnika i źródła pola magnetycznego względem siebie, a wartość indukowanej siły elektromotorycznej (wartość napięcia) zależy od szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej. Wynika z tego, że generator indukcyjny powinien zawierać źródło pola magnetycznego oraz przewodnik, które będą poruszały się względem siebie pod wpływem drgań mechanicznych.

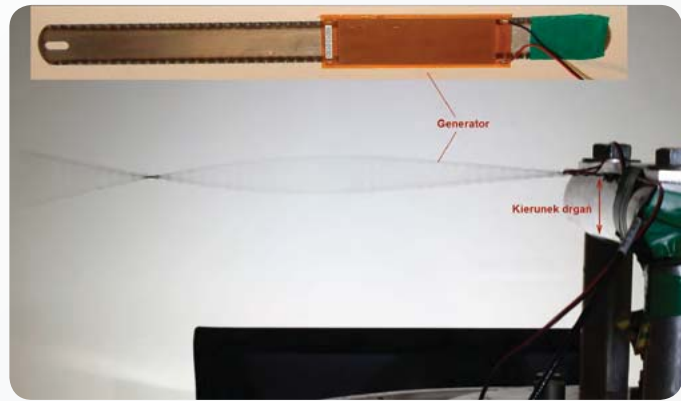
Możliwe jest opracowanie wielu konstrukcji generatora elektrodynamicznego. Na fot. 4. zaprezentowano przykład prostego rozwiązania eksperymentalnego wykonanego w CIOP-PIB. Jest to tzw. generator liniowy, składający się z neodymowego magnesu stałego, przymocowanego do nieruchomej, dolnej platformy generatora oraz cewki indukcyjnej przymocowanej do ruchomej, górnej platformy generatora, zawieszony na czterech sprężynach i obciążony dodatkową masą. Siły działające na generator wywołują drgania jego górnej, ruchomej platformy i zarazem – ruch cewki indukcyjnej względem magnesu. Powoduje to wytwarzanie w cewce siły elektromotorycznej zależnej m.in. od wartości indukcji magnetycznej



Fot. 5. Piezoelektryczny przetwornik kompozytowy MFC
Photo 5. Composite piezoelectric transformer (Macro Fiber Composite)

Fot. 6. Generator piezoelektryczny na stanowisku badawczym podczas pobudzenia wzбудnikiem drgań oraz widok ogólny (wstawka w górnej części fotografii)

Photo 6. Piezoelectric generator at the test stand during animation with the use of a vibration inductor and a general view (inset)



pola magnetycznego magnesu, liczby zwojów cewki indukcyjnej i prędkości drgań cewki.

Przedstawiony generator, przy częstotliwości drgań wynoszącej ok. 45 Hz, generuje napięcie o wartości skutecznej 800 mV i prąd o wartości skutecznej 6,7 mA, płynący przez obciążenie o wartości 100 Ω . Jego moc elektryczna wynosi zatem 5,36 mW.

Do pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych może też być użyty generator piezoelektryczny, skonstruowany na bazie materiałów lub przetworników piezoelektrycznych. Wykorzystywane w nich zjawisko piezoelektryczne polega na wytwarzaniu przez nie ładunków elektrycznych na ich powierzchni pod wpływem naprężeń mechanicznych. Generator piezoelektryczny będzie zatem wykorzystywał drgania mechaniczne do wywołania naprężeń w stosowanym w nim przetworniku piezoelektrycznym, w wyniku czego stanie się on źródłem napięcia zasilającego.

Przetworniki piezoelektryczne mogą mieć postać elementów wykonanych z ceramiki piezoelektrycznej o dowolnych kształtach. Na rynku dostępne są również piezoelektryczne przetworniki kompozytowe MFC, składające się z drobnych włókien piezoelektryka umieszczonych pomiędzy elektrodami grzebieniowymi i połączonych lepiszczem (fot. 5.).

Napięcie elektryczne wytwarzane przez prezentowany przetwornik jest proporcjonalne do wywołanych w nim naprężeń. Musi być on zatem przymocowany (przyklejony) do pewnej struktury mechanicznej, która pod wpływem drgań będzie się odkształcać, wywołując jednocześnie odkształcenia przetwornika (co powoduje powstawanie w jego strukturze naprężeń). Strukturą mechaniczną, na którą naklejony zostanie przetwornik MFC może być tzw. belka drgająca, czyli płaski, podłużny element (np. metalowy), zamocowany sztywno na jednym końcu. Przykład takiego generatora przedstawiono na fot. 6. Jako belkę drgającą wykorzystano brzeszczot piły do metalu, na który naklejono przetwornik MFC. Przy częstotliwości drgań 36 Hz, co odpowiadało drugiemu modowi drgań własnych układu, otrzymano napięcie o wartości skutecznej 2,2 V i prąd o wartości skutecznej 2,14 mA, płynący przez obciążenie o wartości 1 k Ω . Uzyskana moc elektryczna wyniosła zatem 4,7 mW.

Do przetwarzania energii drgań mechanicznych w elektryczną coraz częściej stosuje się również generatory magnetostrykcyjne. Wykorzystywane są w nich materiały magnetostrykcyjne, których magnetyzacja zmienia się pod wpływem odkształceń (tzw. efekt Villarięgo, odwrotny do zjawiska magnetostrykcji). W generatorach tych materiał magnetostrykcyjny poddawany jest zmiennym

odkształceniom wytwarzając zmienne pole magnetyczne, które przy wykorzystaniu zjawiska indukcji elektromagnetycznej generuje energię elektryczną. Więcej informacji na temat przetworników magnetostrykcyjnych można znaleźć w literaturze [13].

Cechą różniącą zaprezentowane generatory elektryczne indukcyjne i piezoelektryczne od pozostałych omówionych w artykule, jest wytwarzanie przez nie prądu przemiennego, o stosunkowo wysokich amplitudach napięcia (przy obciążeniu 100 k Ω wartość skuteczna tego napięcia wynosiła 33 V). Układy zasilania wykorzystujące to źródło energii elektrycznej powinny zatem zawierać prostownik napięcia i odpowiednią przetwornicę, obniżającą lub podwyższającą napięcie. Na rynku dostępne są obecnie układy elektroniczne łączące w sobie te trzy elementy.

Cechą charakterystyczną generatorów wykorzystujących energię mechaniczną jest również to, że największe moce wytwarzanej energii elektrycznej osiąga się przy częstotliwości pobudzenia odpowiadającej częstotliwości drgań własnych. W pozostałym zakresie częstotliwości pobudzeń ilość wytwarzanej przez nie energii elektrycznej jest znacząco mniejsza. Z tego względu konstrukcja generatora powinna zostać zaprojektowana z uwzględnieniem częstotliwości drgań obiektu stanowiącego źródło energii mechanicznej. W niektórych przypadkach możliwe jest takie zaprojektowanie generatora indukcyjnego, aby stanowił on jednocześnie tłumik drgań danego obiektu.

Podsumowanie

System zdalnego monitoringu parametrów wibroakustycznych środowiska pracy, którego koncepcję przedstawiono w artykule, jest oparty na wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii do zasilania układów pomiarowych hałasu i drgań mechanicznych. Jak pokazano w artykule, energia słoneczna, termiczna czy mechaniczna mogą być z powodzeniem zastosowane do zasilania elektronicznych układów pomiarowych. Niesie to istotne korzyści ekologiczne oraz ekonomiczne, jako że eliminuje konieczność stosowania baterii, które niewłaściwie utylizowane stanowią znaczące zagrożenie dla środowiska, a ponadto są drogie (co znacząco wpływa na koszty użytkowania systemu pomiarowego).

Wdrożenie proponowanego systemu umożliwi lepszy nadzór nad zagrożeniami wibroakustycznymi w środowisku pracy, a – w konsekwencji – zmniejszenie narażenia pracowników na hałas i drgania mechaniczne. Dzięki systemowi monitoringu możliwe jest też niezwłoczne reagowanie na pojawiające się nowe zagrożenia wibroakustyczne lub zmiany

natężeń już istniejących. Dane na temat zagrożeń wibroakustycznych występujących w przedsiębiorstwie, zbierane w wielu jego miejscach i w dłuższych odcinkach czasu pozwalają również na odpowiednie projektowanie procesów pracy czy zabezpieczeń przeciwhałasowych i przeciwdrganiowych, ograniczających narażenie pracowników na te czynniki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lewandowski W. M. *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2012
- [2] <http://www.energyharvesting.net/>
- [3] *Energy harvesting* <http://www.sagentia.com/-/media/Sagentia/Resource%20Library%20Files/White%20Papers/Energy%20harvesting.ashx> oraz, pomocniczo: http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting
- [4] Engel Z., Koradecka D., Augustyńska D., Kowalski P., Morzyński L., Żera J. *Zagrożenia wibroakustyczne* [w:] D. Koradecka (red.) *Bezpieczeństwo i higiena pracy*, CIOPIB, Warszawa 2008
- [5] Serwis internetowy „BEZPIECZNIEJ” – <http://www.ciop.pl/bezpieczniej> (dostęp z dn. 10.05.2015)
- [6] Główny Urząd Statystyczny, *Warunki pracy w 2013 r.* Warszawa 2014
- [7] Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr. med. Jerzego Nofera. Dane o zapadalności na choroby zawodowe http://www.imp.lodz.pl/home_pl/o_instytucje/reg_and_databases/work_disses1/dane_o_zapadalnosci/ (dostęp z dn. 10.04.2015)
- [8] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. 2014 poz. 817
- [9] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. 2011 Nr 33 poz. 166
- [10] Morzyński L. *Zastosowanie modułów XBee do monitorowania narażenia na hałas pracowników użytkujących nauszniki przeciwhałasowe*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2014, 9:187-190
- [11] ZigBee Alliance <http://www.zigbee.org> (dostęp z dn. 10.04.2015)
- [12] *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2014. Global Status Report*, http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf (dostęp z dn. 10.04.2015)
- [13] Kaleta J. *Materiały magnetyczne SMART. Budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie*. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej, Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.