

Moduły IoT do monitorowania wybranych parametrów środowiska pracy w strefach zagrożenia czynnikami szkodliwymi

Streszczenie. W artykule zaprezentowano przykładowe opracowania modułów czujnikowych wykonanych w technologii Internetu Rzeczy do monitorowania wybranych parametrów środowiska pracy w strefach zagrożenia czynnikami szkodliwymi. Omówiono wybrane komponenty niezbędne do realizacji modułów, tj. komunikacja bezprzewodowa, zasilanie typu „harvesting energy”. Przedstawiono przykładową realizację czujnika poziomu tlenu węgla.

Abstract. The article presents examples of studies of sensor modules made in the Internet of Things technology for the monitoring of selected parameters of the working environment in threatened zones with harmful factors. Selected components necessary for the implementation of modules were discussed, i.e. wireless communication, power supply type "harvesting energy". An example of a carbon monoxide sensor is presented. (IoT modules for monitoring the parameters of the working environment in the risk zone of harmful factors).

Słowa kluczowe: internet rzeczy, komunikacja bezprzewodowa, czujniki, odzysk energii z otoczenia.

Keywords: internet of things, wireless communication, sensors, harvesting energy.

Wstęp

Ze względu na zagrożenia związane z wykonywaniem czynności zawodowych istnieje potrzeba ciągłego monitorowania warunków środowiska pracy, jak również stanu zdrowia pracowników. Z tego powodu rozwiązania systemowe oraz środki ochrony indywidualnej przeznaczone do użytku w niebezpiecznych warunkach pracy wyposaża się w elementy sensoryczne lub układy elektroniczne umożliwiające monitorowanie warunków pracy oraz sygnalizację zmiany intensywności zagrożeń i wzrost ryzyka. Obecnie, rozwiązania z zakresu ciągłego monitorowania różnorodnych parametrów (parametry procesów przemysłowych, jakości środowiska, funkcji życiowych) są szeroko opracowywane i badane ze względu na szybki rozwój technologii Internetu Rzeczy (IoT). Technologia ta umożliwia tworzenia inteligentnych sieci sensorowych, w ramach której urządzenia komunikują się między sobą i łączą się ze światem fizycznym, dzięki czemu dostarczają informacji i usług użytkownikom [1]. Technologia IoT została pomyślnie wdrożona w systemie opieki zdrowotnej [2], transporcie i logistyce, monitorowaniu środowiska, inteligentnych budynkach, kontroli i zarządzaniu procesami przemysłowymi (Industry 4.0) [3]. Istnieje też druga strona medalu. Pozyskiwane dane są często danymi wrażliwymi, które nie mogą wydostawać się poza sieć. Jednak według raportu firmy Hewlett Packard ponad 70% urządzeń w IoT jest niezabezpieczonych [4]. A więc środowisko IoT narażone jest na ataki w celu przechwycenia danych. Ze względu na powyższe problemy sieci zbudowane w oparciu o IoT muszą zostać wyposażone w techniki kryptograficzne zapewniające cyberbezpieczeństwo systemu [5].

W ostatnich latach obserwuje się ogromny postęp w dziedzinie miniaturyzacji czujników, prędkości przetwarzania i przesyłu danych, autonomicznych źródeł zasilania oraz właściwości fizycznych materiałów, przewodzących, włókien, w tym przewodzących [6-15]. Powyższe technologie mają zastosowanie w konstrukcji inteligentnych środków ochrony indywidualnej, m.in. odzieży ochronnej umożliwiającej monitorowanie parametrów fizycznych mikroklimatu pod odzieżą oraz parametrów fizjologicznych użytkownika (np. temperaturę skóry, częstość skurczów serca). Odzież zintegrowana z

czujnikami i elektroniką wpisuje się obecnie w jeden z głównych trendów rozwoju wyrobów odzieżowych, w tym środków ochrony indywidualnej. Czujniki stosowane w odzieży najczęściej są wyrobami dostępnymi na rynku, które są inkorporowane do odzieży lub otoczenia pracownika. Do łączenia elementów elektronicznych stosuje się najczęściej przewodzący elektroprowadzący (klasyczną stalową, z dodatkiem lub całkowicie wykonaną z metali szlachetnych, tj. srebra, miedzi). Ponadto stosuje się kleje elektroprowadzące lub druk elektroprowadzący (ang. inkjet printing).

Potrzeba stosowania środków ochrony indywidualnej z wbudowanymi układami elektronicznymi w postaci czujników, sygnalizatorów czy układów alarmujących o przekroczeniu poziomów bezpieczeństwa dotyczy zarówno służb ratowniczych, tj. ratownictwa chemicznego, górniczego oraz straży pożarnej, jak również innych profesji wymagających ciągłego monitorowania warunków środowiska pracy i kondycji pracowników.

Pomimo podejmowanych projektów tylko nieliczne, bardzo proste i mające zastosowanie w ograniczonym zakresie konstrukcje odzieży, czy obuwia wyposażonego w elementy elektroniczne są dostępne na rynku. Niezależnie od rodzaju zastosowanego układu elektronicznego niezbędne jest zapewnienie wydajnego źródła zasilania o niewielkich wymiarach, umożliwiającego poprawne funkcjonowanie dodatkowych, przenośnych urządzeń elektronicznych wbudowywanych w środki ochrony indywidualnej.

Jednym z najważniejszych wyzwań, przed jakim obecnie stoją producenci elektronicznego sprzętu mobilnego jest opracowanie rozwiązań znacznie wydłużających pracę urządzeń przenośnych, a także umożliwienie doładowania baterii w miejscach pozbawionych dostępu do sieci energetycznej. Na rynku oferowane są mobilne, awaryjne systemy zasilania zawierające akumulator (np. Li-Ion, Li-Cd) umożliwiający doładowanie baterii urządzeń przenośnych (np. Choiix Power Fort 5.5 Whrs), lub ogniwo paliwowe (np. ogniwo DMFC), w którym wykorzystuje się nierównowagę chemiczną tlenu i wodoru do wytwarzania energii elektrycznej. Innym ciekawym rozwiązaniem zasilania urządzeń mobilnych może być zastosowanie

superkondensatora, który jest odmianą kondensatora elektrolitycznego o bardzo dużej pojemności elektrycznej. W niektórych urządzeniach mobilnych już są one montowane wprost na płytkach drukowanych i służą do podtrzymywania napięcia podczas awarii bądź przerw zasilania. Jednak rozwiązania te nie są pozbawione wad. Wszystkie przedstawione rozwiązania są magazynem określonej ilości energii elektrycznej, która może również ulec wyczerpaniu. Poza tym sprawność tych źródeł energii w dużym stopniu zależy od warunków pracy (temperatura, wilgotność), które mogą wpłynąć na zmniejszenie ilości zmagazynowanej energii. Ponadto urządzenia te ze względu na swoje gabaryty ograniczają możliwości ich zastosowania, bądź zmniejszają komfort użytkowników: pracowników w strefie niebezpiecznej, ratowników, służb mundurowych.

Alternatywą dla powyższych rozwiązań może być ładowanie baterii zasilających urządzenia przenośne energią ludzkich mięśni [16-26] lub energią rozproszoną: światło, energia cieplna, drgania, fale elektromagnetyczne. Szacuje się, że podczas biegu nasze stopy wytwarzają kilkadziesiąt watów energii w postaci ciepła [15-17]. Istnieje wiele obiecujących konstrukcji plecaków, wkładek do butów czy specjalnych gadżetów napędzanych siłą ludzkich mięśni, które próbuje się wykorzystać do zasilania telefonów satelitarnych i odbiorników GPS dzwiganych po bezdrożach [17-21]. Najczęściej zawierają one różnego rodzaju konstrukcje generatorów, wykorzystujących zjawisko indukcji elektromagnetycznej do generowania siły elektromotorycznej. Zaawansowane są też prace nad materiałami piezoelektrycznymi, które produkują energię elektryczną w wyniku ich rozciągania lub ściskania [22-25]. Prowadzone są również badania, w których przekaznikiem energii mechanicznej są mikrokropelki naładowanej cieczy przepływające specjalnymi kanalikami pod stopą piechura [26].

Ograniczenie wypadków przy pracy jak i sytuacji potencjalnie niebezpiecznych jest bardzo istotne z punktu widzenia pracodawcy i państwa. Pracodawca mając narzędzie do monitorowania obecności pracowników w wybranych strefach może identyfikować potencjalne sytuacje niebezpieczne lub nieodpowiedzialne zachowania pracowników oraz szybko podejmować odpowiednie przeciwdziałania. Z punktu widzenia państwa, ograniczenie sytuacji niebezpiecznych i wypadków przy pracy poprawi bezpieczeństwo pracowników i zmniejszy koszty ewentualnego leczenia i rehabilitacji a także zmniejszy ilość ewentualnych rencistów z tytułu wypadku przy pracy.

W 2017 r. liczba poszkodowanych w wypadkach przy pracy według danych GUS wyniosła ogółem 88330 osób i była o 0,5% większa niż w 2016 roku. Spośród 88330 poszkodowanych ogółem, 87400 osób uległo wypadkom przy pracy ze skutkiem lekkim (o 0,2 % więcej niż w 2016 r.), 661 osób – wypadkom z ciężkimi obrażeniami ciała (analogicznie o 42,5 % więcej), wypadkom śmiertelnym – 269 osób (tj. o 12,6 % więcej niż ub. roku). W podziale terytorialnym kraju, najwyższe wskaźniki wypadkowości odnotowano w województwach: dolnośląskim (8,98), warmińsko-mazurskim (8,44) i wielkopolskim (8,15), najniższe w województwie mazowieckim (4,76) i małopolskim (5,16).

Rozwój technologii, zwłaszcza technik informatycznych i optoelektrycznych, umożliwia konstruowanie bardziej skutecznych systemów detekcji sytuacji niebezpiecznych na stanowiskach pracy co prowadzi do ograniczenia wypadków przy pracy. Badania koncentrować się będą na wykorzystaniu nowoczesnych sensorów i układów elektronicznych umożliwiających lokalizowanie pracownika oraz

monitorowanie warunków pracy oraz w razie potrzeby sygnalizację zmiany intensywności zagrożeń i wzrostu ryzyka.

Jedną z popularniejszych platform monitorowania pracowników w miejscach niebezpiecznych jest „Maximo”, opracowana i utrzymywana przez firmę IBM [27, 28]. Jest to system korzystający z aplikacji umieszczonej w Internecie oraz urządzeniu przenośnym (smartfon, smartwatch). Rozwiązanie to może być rozszerzane o urządzenia wyprodukowane przez inne firmy, które po odpowiedniej konfiguracji mogą współpracować z systemem. Doświadczenie Instytutu Mikroelektroniki i Fotoniki w zakresie projektowania i wytwarzania sensorów oraz budowy systemów pomiarowych pozwoli nam na stworzenie kompleksowego rozwiązania dostosowanego do krajowego rynku.

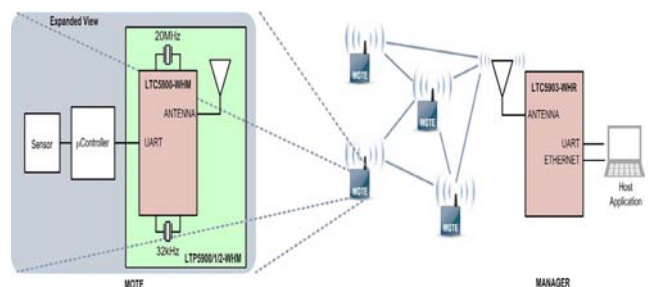
Celem prac badawczych jest opracowanie modelu systemu monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych oraz wykrywania obecności pracowników w strefach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i niebezpiecznymi. Nowością jest możliwość stopniowania zagrożenia w danej strefie w zależności od aktualnie panujących tam warunków środowiskowych (np. automatyczne i bieżące dostosowanie dopuszczalnej odległości pomiędzy pracownikiem a urządzeniem w zależności od temperatury urządzenia).

Model systemu telemetrycznego

Wymóg oparcia systemu nadzoru na bazie IoT jest uzasadniony i powinien zapewnić możliwość elastycznego rozwoju takiego środowiska. Takie podejście jest zgodne z obserwowanymi tendencjami rozwojowymi zakładającymi szerokie wykorzystanie procedur opartych na algorytmach Sztucznej Inteligencji (AI).

Istotną cechą modułów IoT jest to, że zazwyczaj przesyłają dane w sposób nieciągły, w ustalonych odstępach czasu lub w przypadku osiągnięcia progu reakcji przez nadzorowany parametr. Poza tymi okresami przechodzą w stan uśpienia, co znacząco redukuje zużycie energii. Prędkości przesyłania danych są także niewielkie w porównaniu z urządzeniami multimedialnymi (0.3 – 57kbps). Jest to następnym czynnikiem zmniejszającym zużycie energii.

Protokoły komunikacyjne stosowane w urządzeniach IoT powinny zapewniać możliwie duży zasięg transmisji, a także łatwość dołączenia nowego urządzenia do istniejącej sieci lokalnej. Zazwyczaj jest to automatyczne i nie wymaga dodatkowych działań ze strony użytkownika. Dodatkową zaletą jest także opcja korzystania z protokołów nie wymagających wnoszenia opłat licencyjnych, jednak nie zawsze jest to możliwe. Sieci lokalne zazwyczaj są typu mesh i mają zdolność samo-konfiguracji. Wyróżnia się w nich koordynator (jeden dla sieci lokalnej), router (działanie podobne jak w sieciach klasycznych) i urządzenia końcowe (rysunek 1).



Rys.1. Schemat ideowy mikro sieci wykorzystującej energooszczędne protokoły komunikacyjne i zabezpieczenia wbudowane w procesory sterujące.

Najczęściej stosowane są protokoły komunikacyjne:

- Lo-Ra-WAN (implementacje IoT – X, ResIoT, NB-IOT, Things Connected – opracowana przez UK Digital Catapult)
- 6Lo-WPAN (implementacje DYMO Low, HI-LOW, LOAD)
- Z-Wave
- ZigBee
- Smart Mesh

Do transmisji wykorzystywane są częstotliwości 2.4GHz oraz należące do pasma ISM 433MHz i 868MHz (Standard IEEE 802.15.4).

W kraju dostępnych jest kilka środowisk programowych umożliwiających obsługę systemów telemetrycznych, wydaje się że najbardziej rozwiniętym dysponuje Comarch.

Realizacja modułów czujnikowych IoT

W opracowanych modelach zastosowano urządzenia nazywanych harvesterami, które przekształcają energię rozproszoną w energię elektryczną. Najczęstszym źródłem zasilania są panele fotowoltaiczne małej mocy, zarówno krzemowe jak i elastyczne ogniwa fotowoltaiczne. Opcjonalnie można wykorzystać termogeneratory (TEG) wytwarzające energię elektryczną bezpośrednio z energii cieplnej.

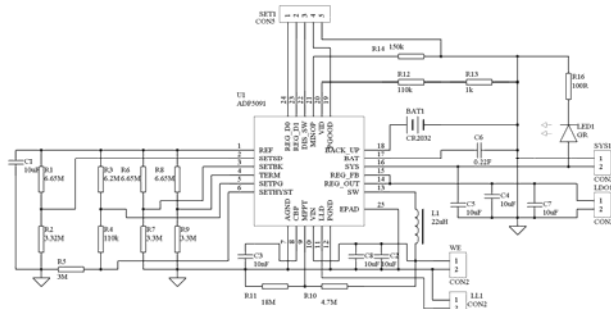
Opracowane harvestery są wyposażone w baterię podtrzymującą (backup), zapewniającą energię w sytuacji awaryjnej. Do przechowywania energii używane są akumulatory litowe wykonane w bezpiecznej technologii Li-FePO4 lub superkondensatory. Zaletą superkondensatorów jest bardzo duża trwałość – wytrzymują kilkadziesiąt tysięcy szybkich cykli ładowania i rozładowania. Dzięki zastosowaniu tego typu urządzeń można wydłużyć czas pracy między wymianami baterii.

W ramach opracowanych modeli urządzeń zastosowano i przetestowano:

- sterowniki IoT oparte na procesorach Nordic. Prace rozpoczęto od układu Thingy, obecnie jako bazę zastosowano najnowsze moduły oparte na układach nRF9160. Zapewniają one możliwość wykorzystania standardowych środowisk programowych jak i przyłączenie szerokiego zakresu modułów pomiarowych,
- elektrochemiczne czujniki gazowe monitorujące obecności niebezpiecznych gazów (tlenek węgla, wodór, ozon, dwutlenek siarki, kwas chlorowodorowy, amoniak, dwutlenek azotu),
- moduły pomiarowe służące do kontroli dynamiki ruchu – oparte na akcelerometrach, żyroskopach i magnetometrach (pomiaru względem ziemskiego pola magnetycznego) do wykrywania nagłych zmiany położenia ciała, które mogą wskazywać wystąpienie sytuacji niebezpiecznych,
- moduły służące do wykrywania obecności osób lub źródeł ciepła w pomieszczeniach działające w oparciu o pomiar temperatury za pomocą matrycowych czujników podczerwieni,
- moduły do pomiaru nacisków oparte na foliach piezoelektrycznych o dużej trwałości, umożliwiające monitorowanie ruchu lub zmiany obciążeń na danej powierzchni,
- beacons i kompas elektroniczny umożliwiające kontrolę położenia względem istotnych punktów w przestrzeni roboczej,
- harvestery zasilające oparte na układach Analog Devices o mocy do 250mW.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat harwestera zbudowanego w oparciu o układ ADP5091 z firmy Analog Devices do współpracy z modułami fotowoltaicznymi. Moduł czujnikowy z opracowanym harvesterem przedstawia rysunek 3.

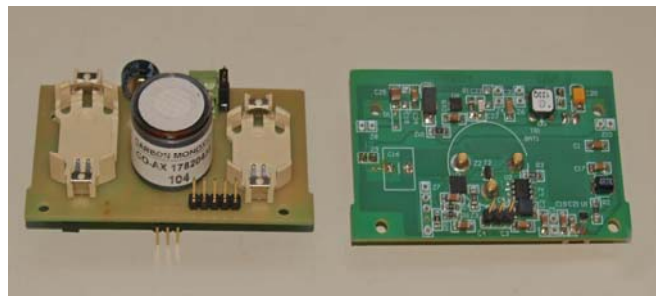
Przykładową realizację czujnika do pomiaru poziomu tlenu węgla przedstawiają rysunki 4 i 5.



Rys.2. Schemat harwestera zbudowanego w oparciu o układ ADP5091 z firmy Analog Devices.



Rys.3. Układ zasilający (harvester) z klasycznym ogniwem fotowoltaicznym.



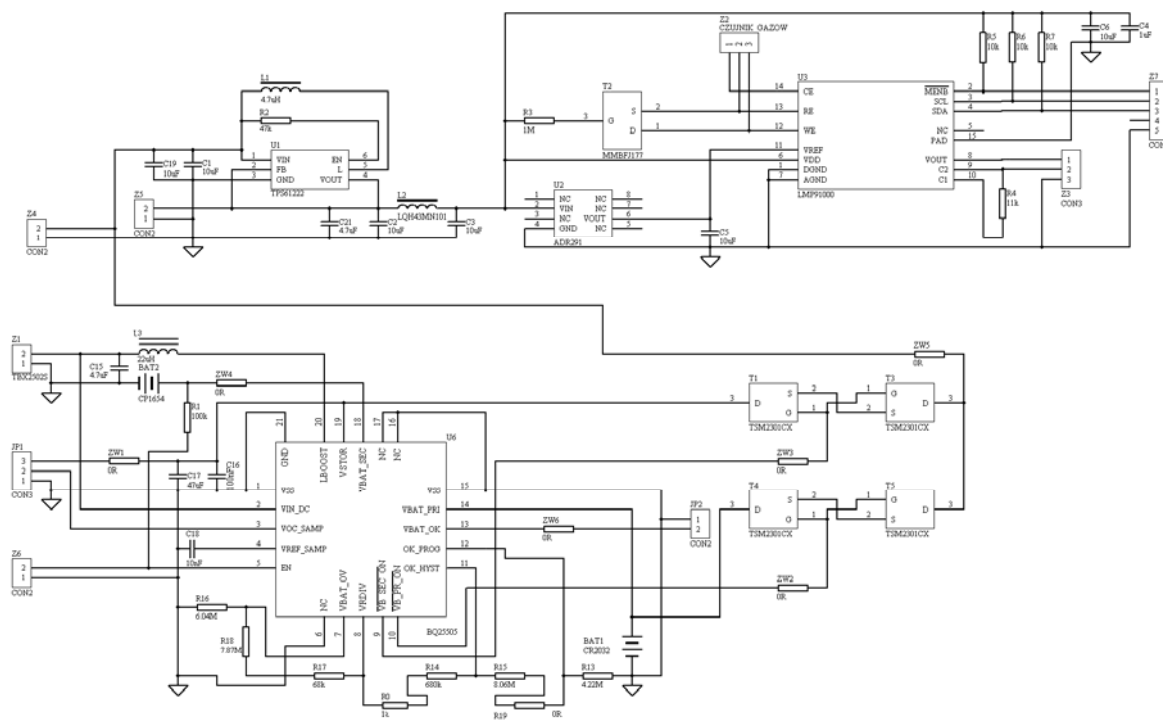
Rys.5. Uniwersalny układ pomiarowy z czujnikiem do pomiaru poziomu tlenu węgla.

Podsumowanie

W ramach zrealizowanych prac badawczych, zaprojektowano i wykonano modele układów elektronicznych, które monitorują położenie zarówno pracowników jak i urządzeń niebezpiecznych dla ich zdrowia. Wykonane modele komunikują się ze sobą zgodnie z koncepcją Internetu rzeczy (IoT) za pomocą miniaturowych modułów komunikacyjnych firmy Taiyo Yuden. Do budowy modeli wykorzystano również projekty własnych układów monitorujących ruch pracowników:

- inercyjne układy pomiarowe zawierające akcelerometr, żyroskop i magnetometr działające w trzech wymiarach, wyposażone w układ określający pozycję układu pomiarowego,
- czujniki aktywności oparte na sensorach z folii piezoelektrycznej PVDF,
- układy nadzorujące tętno i rytm oddechu.

Przeprowadzono analizę i dokonano wyboru bezkontaktowych czujników temperatury (w tym także czujników pokazujących rozkład temperatur na większych powierzchniach) oraz sensorów gazów szkodliwych dla zdrowia, które posłużą do nadzorowania miejsc niebezpiecznych.



Rys.4. Schemat układu do pomiaru poziomu mono tlenku węgla - CO.

Wykonane modele układów przystosowane są do zasilania z miniaturowych akumulatorów litowych lub harwesterów przetwarzających energię rozproszoną (światłą, ciepłą, fal elektromagnetycznych) w energię elektryczną oraz zawierają układy o niskich potrzebach energetycznych (układy ultra low energy) dzięki czemu zapewniono odpowiednio długi czas ich pracy. Opcjonalnie, do bezprzewodowego ładowania opracowanych urządzeń, opracowano ładowarkę wykorzystującą sprzężenie indukcyjne, które podnosi w znaczący sposób komfort oraz bezpieczeństwo użytkowania urządzeń, gdyż nie ma sprzężenia galwanicznego między układem ładującym a urządzeniem ładowanym.

Do obsługi sieci czujników współpracujących w ramach IoT zastosowano rozwiązanie pracujące w standardzie stworzonym przez Open Connectivity Foundation. Nawiązano w tym zakresie współpracę z firmą Comarch, co pozwoliło dostosować opracowane modele do szczegółowych wymagań potencjalnych końcowych użytkowników.

W ramach badań sprawdzono nieprzerwany czas pracy systemów przy zastosowaniu standardowych źródeł zasilania. Otrzymane wyniki dowodzą, że moduł czujnikowy wysyłający pomiary z częstotliwością 1Hz, wyposażony w źródło (bateria lub akumulator) o pojemności 200mAh może poprawnie działać przez około 4000 godzin. Moduły, które nie wykonują żadnych pomiarów, natomiast mają za zadanie ostrzeganie pracownika o wejściu do strefy niebezpiecznej (beacon-y) mogą działać na baterii o tej samej pojemności kilkukrotnie dłużej.

Potwierdzono eksperymentalnie zasięg modułów w standardzie Bluetooth 4.2. W przypadku widoczności urządzeń wewnątrz budynku uzyskano zasięg 50m. Na otwartej przestrzeni uzyskano połączenie urządzeń oddalonych od siebie o deklarowane w specyfikacji 100m.

Prace badawcze zostały sfinansowane z projektu pt. „Opracowanie systemu do monitorowania wybranych

parametrów fizjologicznych oraz wykrywania obecności pracowników w strefach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i niebezpiecznymi” (nr III.PB.20) realizowanego w ramach V etapu Wieloletniego Programu pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” koordynowanego przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (2020-2022).

Autorzy: dr inż. Piotr Guzdek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, E-mail: piotr.guzdek@imif.lukasiewicz.gov.pl; mgr inż. Grzegorz Kolaszczyński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Oddział w Krakowie, ul.Zabłocie 39, 30-701 Kraków,

E-mail: grzegorz.kolaszczyński@imif.lukasiewicz.gov.pl.; mgr inż. Jacek Piekarski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Oddział w Krakowie, ul.Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: jacek.piekarski@imif.lukasiewicz.gov.pl.; dr inż. Ewa Klimiec, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Oddział w Krakowie, ul.Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: ewa.klimiec@imif.lukasiewicz.gov.pl.; dr inż. Krzysztof Zaraska, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Oddział w Krakowie, ul.Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: krzysztof.zaraska@imif.lukasiewicz.gov.pl.

LITERATURA

- [1] Jaiswal K., Sobhanayak S., Kumar Mohanta B., Jena D., IoT-cloud based framework for patient's data collection in smart healthcare system using raspberry-pi, International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), (2017), 1-4.
- [2] Jain D., Venkata Krishna P., Saritha V., A study on Internet of Things based applications, arXiv:1206.3891, School of Computing Science and Engineering VIT University, Vellore, TN, India, 2012.
- [3] Kumar S.A., Vealey T., Srivastava H., Security in internet of things: Challenges, solutions and future directions, IEEE In 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), (2016) 5772-5781.
- [4] Engels D., Fan X., Gong G., Hu H., Smith E.M., Ultralightweight cryptography for low-cost RFID tags: Hummingbird algorithm and protocol, Centre for Applied Cryptographic Research (CACR) Technical Reports, vol. 29 (2009).

- [5] Katagi M., Moriai S., Lightweight cryptography for the internet of things, Sony Corporation, (2008) 7-10.
- [6] Singh Dahiya A., Thireau J., Boudaden J., Lal S., Gulzar U., Zhang Y., Gil T., Azemard N., Ramm P., Kiessling T., Review—Energy Autonomous Wearable Sensors for Smart Healthcare: A Review, *J. Electrochem. Soc.*, 167 (2020) 037516.
- [7] Stavropoulos T.G., Papastergiou A., Mpaltadoros L., Nikolopoulos S., Kompatsiaris I., IoT Wearable Sensors and Devices in Elderly Care: A Literature Review, *Sensors* 20 (2020) 2826.
- [8] Liu J., Liu M., Bai Y., Zhang J., Liu H., Zhu W., Recent Progress in Flexible Wearable Sensors for Vital Sign Monitoring, *Sensors* (2020) 4009.
- [9] Kim J., Campbell A.S., Esteban-Fernández de Ávila B., Wang J., Wearable biosensors for healthcare monitoring, *Nature Biotechnology* 37 (2019) 389–406.
- [10] Lee J.-H., Miniaturized Human Insertable Cardiac Monitoring System with Wireless Power Transmission Technique, *Journal of Sensors*, 2016 (2016) 1–7.
- [11] Frydrysiak M., Zięba J., Textronic, Sensor for Monitoring Respiratory Rhythm, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, (2012)74-78.
- [12] Leśnikowski J., Dielectric permittivity measurement methods of textile substrate of textile transmission lines, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012)148-151.
- [13] Zięba J., Frydrysiak M., Tokarska M., Research of Textile Electrodes for Electrotherapy, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 19 (2011) 70-74.
- [14] Sibinski M., Jakubowska M., Słoma M., Flexible Temperature Sensors on Fibers, *Sensors*, 10 (2010) 7934- 7946.
- [15] Starner T., Paradiso J.A., Human Generated Power for Mobile Electronics, in Piguët, C. (ed), *Low Power Electronics*, CRC Press, Chapter 45 (2004) 1-35.
- [16] Zervos H., *Thermoelectric Energy Harvesting 2013-2023: Devices, Applications, Opportunities*, PRNewswire, New York, USA, 2013.
- [17] Sue C.-Y., Tai N.-C., Human powered MEMS-based energy harvest devices”, *Applied Energy*, 93 (2012) 390–403.
- [18] Shengulette J., Pace is picking up for Energy Harvester’s Walking Charger, *Rochester Democrat and Chronicle*, Gannett Co., Inc., McLean, USA, 2012.
- [19] Paradiso J.A., Starner T., Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics, *IEEE Pervasive Computing*, 4(2005)18-27.
- [20] Saha C.R., O'Donnell T., Wang N., McCloskey P., Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion, *Sensors and Actuators A*, 147(2008)248–253.
- [21] MunazA. , Lee B.-C., Chung G.-S., A study of an electromagnetic energy harvester using multipole magnet, *Sensors and Actuators A*, 201 (2013) 134– 140.
- [22] Korla S., Leon R.A., Tansel I.N., Yenilmez A., Yapici A., Demetgul M., Design and testing of an efficient and compact piezoelectric energy harvester, *Microelectronics Journal* 42 (2011) 265–270.
- [23] Tkaczyk E., Compact and Lightweight Energy Conversion Using Electrostrictive Polymers, *Proc. Prospector IX: Human-Powered Systems Technologies*, Space Power Inst., Auburn Univ., Nov. 1997, 313-329.
- [24] Kymissis J., Kendall C., Paradiso J., Gershenfeld N., Parasitic Power Harvesting in Shoes, *Proc. 2nd Int’l Symp. Wearable Computers*, IEEE CS Press, (1998) 132–139.
- [25] Priya S., Inman D.J., *Energy harvesting Technologies*, Springer, New York, USA, 2009.
- [26] Krupenkin T., Taylor A.J., Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting, *Nature Communications*, 2 (2011) 448.
- [27] <https://www.ibm.com/business-operations/enterprise-asset-management/worker-workplace-safety-solutions>.
- [28] <https://www.ibm.com/docs/en/mwi?topic=devices-supported-maximo-worker-insights>.