

## Układy mikroprocesorowe w Internecie rzeczy

**Streszczenie.** Na naszych oczach dokonuje się nowa rewolucja technologiczna. Internet rzeczy jest jednym z najbardziej jaskrawych przykładów wpływu technologii na jakość życia człowieka. W artykule przedstawiono najbardziej popularne rozwiązania układów i modułów mikroprocesorowych, niezbędnych w Internecie rzeczy, które znacząco przyczyniły się do jego rozwoju.

**Abstract.** A new technological revolution is taking place before our eyes. The Internet of Things is one of the most striking examples of the impact of technology on the quality of human life. The article presents the most popular solutions of microprocessor systems and modules, necessary in the Internet of Things, which have significantly contributed to its development. (**Microprocessor systems for the Internet of Things**).

**Słowa kluczowe:** Internet rzeczy, układy mikroprocesorowe.

**Keywords:** Internet of Things, microprocessor systems.

### Wstęp

Sieć Internet zrewolucjonizowała komunikację międzyludzką w ogromnym stopniu. Praktycznie każdy użytkownik komputera, telefonu, tabletu nie wyobraża sobie korzystania z powyższych urządzeń bez połączenia z Internetem. Codzienny przegląd prasy, zakupy, przesyłanie zdjęć, filmów, wiadomości to tylko jedne z wielu możliwości jakie daje nam sieć globalna i to bez wychodzenia z domu. Przed epoką Internetu każda z wymienionych czynności wymagałaby udania się do np. kiosku, sklepu czy też urzędu pocztowego. Można zastanawiać się czy omawiane zmiany są korzystne z punktu widzenia ogólnie pojmowanego zdrowia psychicznego i fizycznego społeczeństwa, jednakże wydaje się, że z obranej drogi nie ma odwrotu.

Naturalną cechą ludzką, właściwie cechą charakteru, jest ciekawość. Oczywiście każdy człowiek wykazuje ją w różnym stopniu i zmienia się ona wraz z wiekiem. Należy jednak pamiętać, że ciekawość stanowi największą siłę napędową rozwoju umysłowego człowieka i jej zaspokajanie jest niezbędne nie tylko dla rozwoju umysłowego dzieci, ale również sprzyja tzw. higienie mózgu, szczególnie u osób starszych. Znamienna jest wypowiedź jednego z największych fizyków XX-wieku, Alberta Einsteina – „nie mam szczególnych uzdolnień, cechuje mnie tylko niepojęta ciekawość”. Można zatem zaryzykować twierdzenie, że ogromna popularność Internetu wynika z chęci zaspokajania ludzkiej ciekawości, choć oczywiście nie zawsze „zdrowej”.

Dynamiczny rozwój Internetu, dokonujący się na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat, wynika nie tylko ze ogromnego wzrostu liczby użytkowników i zwiększenia możliwości sprzętu informatycznego, ale również, może nawet przede wszystkim, z rozwoju technologii internetowych. Jedną z najważniejszych nowych koncepcji wykorzystujących komunikację w sieci globalnej jest Internet rzeczy (IoT – Internet of Things) [1]. Koncepcja ta zakłada wyposażenie wszelkiego rodzaju urządzeń (rzeczy), zarówno domowych, codziennego użytku (np. telewizor, lodówka, samochód) jak również specjalistycznych urządzeń przemysłowych, naukowo-badawczych, w układy mikroprocesorowe umożliwiające nie tylko sterowanie pracą urządzeń, ale również wymianę informacji pomiędzy elementami systemu. Dzięki połączeniu takich układów do sieci Internet możliwe stają się np.: zdalny pomiar temperatury czy zdalne włączanie pieca, przy czym zasadniczo nie ma znaczenia czy takie urządzenie znajduje się w sąsiednim pomieszczeniu, czy na drugim końcu świata. Przyczynami ogromnej popularności

Internetu rzeczy są wspomniane cechy ludzkiego charakteru: ciekawość oraz lenistwo, wynikające z nadrzędnej zasady fizycznej rządzącej światem - zasady minimum całkowitej energii potencjalnej. Wspomniane wyżej przyczyny można określić bardziej naukowo – celem Internetu rzeczy jest wzrost efektywności działań człowieka, ale również zwiększenie efektywności biznesowej, produkcyjnej firm, poprzez dostarczanie szczegółowych danych w czasie rzeczywistym i odpowiednio szybką reakcją na zmiany. Szacowana liczba urządzeń tworzących aktualnie Internet rzeczy jest trudna do precyzyjnego określenia i sięga kilkunastu miliardów, przy czym należy rozróżnić zastosowania konsumenckie, komercyjne, przemysłowe i infrastrukturalne.

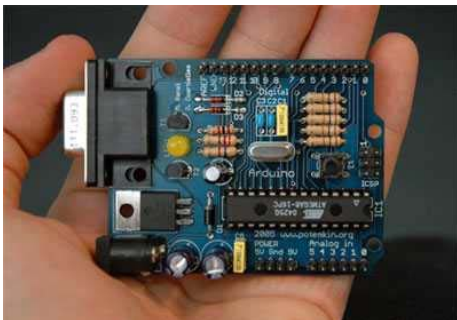
Podstawowymi komponentami Internetu rzeczy (IoT) są inteligentne urządzenia, tj. urządzenia, które zostały wyposażone w zdolność obliczeniową i odpowiednie interfejsy komunikacyjne. Kluczowym elementem systemu IoT jest również warstwa aplikacji IoT, niezbędna do integracji danych pozyskiwanych od urządzeń IoT. Do warstwy aplikacji należy zaliczyć wszelkiego rodzaju oprogramowanie i usługi wykorzystujące m.in. technologie uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji w procesie analizy danych i podejmowania decyzji. Informacje między elementami systemu są najczęściej przekazywane z wykorzystaniem technologii chmurowych. Równie ważnym komponentem IoT jest także interfejs użytkownika, dający możliwość zdalnego monitorowania i zarządzania urządzeniami. Najbardziej popularne rozwiązania w tym zakresie to zarządzanie poprzez stronę internetową lub odpowiednią aplikację mobilną. Kluczowym dla Internetu rzeczy zagadnieniem jest ponadto rozwój technologii, standardów i protokołów w sieciach bezprzewodowych. Internet rzeczy nie byłby obecnie tak popularny i powszechnie dostępny gdyby nie standardy WiFi, Bluetooth czy ZigBee oraz technologie 4G i 5G [2].

W niniejszym opracowaniu przedstawiono najbardziej popularne rozwiązania układów i modułów mikroprocesorowych używanych w Internecie rzeczy. W latach 90-tych XX-go wieku pojawiły się na szeroką skalę pierwsze urządzenia codziennego użytku wyposażone w mikroprocesory, jednak implementacja tego typu układów była utrudniona ze względu na ograniczone możliwości obliczeniowe ówczesnych procesorów i przede wszystkim wielkość kompletnych modułów. Dynamiczny rozwój technologii półprzewodnikowych, w tym miniaturyzacja układów scalonych i znaczący spadek kosztów wdrażania takich rozwiązań, umożliwił integrację układów mikroprocesorowych, wyposażonych w różnorodne czujniki,

praktycznie z każdym urządzeniem, czy przedmiotem codziennego użytku. Dobrym przykładem może być tzw. elektronika noszona, np. w postaci biżuterii, zegarków czy też inteligentnej odzieży [3].

### Przegląd rozwiązań układowych

Niewątpliwie przełomowym projektem, który przyczynił się do popularyzacji układów mikroprocesorowych, jest projekt Arduino [4]. Projekt ten powstał w Ivrea Interaction Design Institute we Włoszech jako zestaw narzędzi dla studentów początkujących w dziedzinie programowania i bez doświadczenia w elektronice. Arduino jest platformą integrującą proste w użyciu i stosunkowo tanie moduły mikrokontrolerów oraz oprogramowanie umożliwiające programowanie mikrokontrolerów przy użyciu języków C/C++. Zarówno produkty sprzętowe Arduino jak i oprogramowane są objęte licencjami umożliwiającymi produkcję płytek i dystrybucję oprogramowania przez kogokolwiek, co niewątpliwie stanowi główną przyczynę ogromnej popularności projektu.



Rys.1. Płytki Arduino RS232 [4]

Pierwsza powszechnie dostępna płytki Arduino RS232 (2005)(rys. 1) zawierała procesor ATmega8 firmy Atmel oraz interfejs komunikacyjny RS232C. Niedługo potem powstały kolejne wersje płytek, w tym najbardziej popularne do chwili obecnej: Arduino Nano i Uno (rys. 2), wyposażone w procesor ATmega328 oraz interfejs USB [4].



Rys.2. Płytki Arduino Uno [4]

W większości podstawowych płytek Arduino zastosowano 8-bitowe mikrokontrolery z rodziny AVR firmy Atmel Corporation. Są to stosunkowo proste mikrokontrolery RISC, zawierające w jednym chipie, oprócz co oczywiste, jednostki arytmetyczno-logicznej taktowanej zegarem do 20MHz, pamięć flash 32kB, 23 porty wejścia/wyjścia, sprzętowe interfejsy komunikacyjne UART, SPI, I2C, 10-bitowy przetwornik A/C. W 2016 firma Atmel została wprawdzie przejęta przez konkurenta w dziedzinie produkcji popularnych mikrokontrolerów jednocukładowych – firmę Microchip Technology. Nowy właściciel jak dotąd kontynuuje jednak produkcję układów wprowadzonych na rynek przez Atmel.

Każda z płytek Arduino jest wyposażona w wielopinowe złącza, najczęściej typu żeńskiego, poprzez które

udostępnione są wielofunkcyjne porty wejścia/wyjścia mikrokontrolera, umożliwiające łatwe podłączenie elementów zewnętrznych, takich jak: czujniki, klawiatury, elementy sygnalizacyjne czy wyświetlacze. Do modułów głównych można również podłączyć moduły nakładkowe, rozszerzające możliwości funkcjonalne, tzw. Arduino Shield.

Do ogromnej popularności projektu Arduino przyczyniło się także otwarte oprogramowanie Arduino IDE (Integrated Development Environment) (rys. 3), dostępne dla najważniejszych systemów operacyjnych: Windows, Linux, macOS [4]. Arduino IDE jest wyposażone we wszystkie niezbędne narzędzia do programowania mikrokontrolerów: edytor z systemem pomocy, kompilator, konsolidator, debugger oraz moduł programatora. Otwarty kod programu daje możliwość tworzenia przez entuzjastów oraz producentów układów scalonych bibliotek do obsługi takich układów. Co bardzo istotne możliwe jest także dodanie obsługi innych procesorów.



Rys. 3. Ekran główny środowiska Arduino IDE [4]

Począwszy od modelu RS232 firma Arduino wprowadziła do sprzedaży ponad 100 produktów sprzętowych, w tym rodzinę Classic, do której można zaliczyć m.in., płytki Arduino Uno, rodziny Nano, Mega oraz MKR, a także wspomniane moduły Shield. Niewątpliwą wadą najbardziej popularnych płytek Uno czy Nano, z punktu widzenia zastosowań dla Internetu rzeczy, jest brak wbudowanego interfejsu sieciowego. Aby podłączyć takie płytki do sieci Internet konieczne jest zastosowanie odpowiednich modułów nakładkowych (np. Ethernet Shield). Najnowsze dostępne płytki Arduino są już wyposażone w odpowiednie podzespoły, np. moduł WiFi, ale w międzyczasie na rynku pojawiły się układy firmy Espressif Systems, które jak dotąd, zdominowały peryferijne aplikacje IoT.

Układem, który zrewolucjonizował praktyczne aplikacje Internetu rzeczy jest ESP8266, wypuszczony na rynek w 2014 roku przez wspomnianą firmę Espressif [5]. O skali rewolucji świadczy podawana łączna liczba sprzedanych chipów przez producenta, wynosząca aktualnie ponad miliard w ciągu niecałych 10 lat. Takiego sukcesu nie spodziewali się nawet właściciele firmy Espressif, a świadczy to niewątpliwie o ogromnych potrzebach rynku IoT.



Rys. 4. „Sprawca” rewolucji w IoT – układ ESP8266EX [5]

Układ ESP8266 zdecydowanie ułatwił konstruowanie urządzeń wymagających komunikacji bezprzewodowej WiFi, poprzez integrację w jednym chipie (technologia SoC – System on Chip) wielu niezbędnych elementów funkcjonalnych. Pozwoliło to na znaczące zmniejszenie wymiarów potencjalnych aplikacji oraz znacząco obniżyło koszty ich wytwarzania, przy czym sam układ ESP można kupić za kwotę rzędu 1 USD.

W strukturze układu ESP8266EX zintegrowano m.in.: 32-bitowy procesor RISC Tensilica L106, mogący pracować z częstotliwością taktowania do 160 MHz; pamięć RAM (32kB+80kB); moduł WiFi (802.11 b/g/n); 17 portów wejścia/wyjścia, w tym interfejsy SPI/SDIO/UART/I<sup>2</sup>C i 10-bitowy przetwornik A/C oraz układ zarządzania energią, umożliwiający wejście w tryb głębokiego uśpienia (pobór prądu rzędu 8  $\mu$ A) [5]. Wszystkie komponenty mieszczą się w obudowie wielkości 5x5 mm (rys. 4). Bliźniaczy układ ESP8285 posiada dodatkowo wbudowaną pamięć programu (flash) -1 MB.

W roku 2016 firma Espressif wprowadziła na rynek udoskonaloną serię chipów - ESP32 [5]. W strukturze ESP32 można wyróżnić jedno lub dwurdzeniowy 32-bitowy procesor Tensilica LX6, taktowany zegarem do 240 MHz; pamięć RAM - 520kB, pamięć ROM – 448 kB, pamięć flash - zależnie od wersji 0, 2 MB, 4 MB; moduł WiFi obsługujący standardy 802.11 b/g/n/e/i; moduł Bluetooth v.4.2, mogący pracować w trybie standardowym i low energy BLE; 34 porty wejścia/wyjścia, w tym interfejsy: 4xSPI, 2xI<sup>2</sup>S, 2xI<sup>2</sup>C, 3xUART, CAN, PWM, 12-bitowy przetwornik A/C, 2 8-bitowe przetworniki DAC. Układ ESP32 posiada także m.in. sprzętowe wsparcie szyfrowania danych i układ zarządzania energią, zapewniający w trybie głębokiego uśpienia pobór prądu poniżej 10  $\mu$ A. Wszystkie wymienione elementy mieszczą się w obudowie wielkości 5x5 mm, a więc zbliżonej wymiarami do ESP8266, ale o większej liczbie wyprowadzeń (48). ESP32 stanowi zatem kompletny układ mikroprocesorowy wystarczający do większości zastosowań peryferyjnych IoT. O skali możliwości układu ESP32 świadczyć może szacowana moc obliczeniowa jednostki centralnej 600 DMIPS, porównywalna do mocy obliczeniowej procesorów Pentium pierwszych generacji, używanych w komputerach klasy desktop pod koniec lat 90-tych XX wieku. Należy dodać, że od 2023 Espressif zaleca zastępowanie układów ESP8266 nowymi układami z serii ESP8684 o możliwościach zbliżonych do ESP32.

Firma Espressif zapewniła bogate wsparcie dla swoich produktów w postaci oficjalnego zestawu narzędzi SDK (Software Development Kit). Dzięki marketingowi szeptanemu powstało wiele innych narzędzi Open Source wspierających programowanie układów ESP w różnych językach, np. ESP-Open-SDK. Rodzina układów ESP jest również obsługiwana w Arduino, dzięki czemu mogą być one programowane tak jak każda płytka Arduino.



Rys. 5. Przykładowy moduł z układem ESP32 [7]

Nie byłoby sukcesu rodziny ESP gdyby nie dostępność gotowych modułów z tymi procesorami. Espressif oferuje

moduły z serii WROOM [5], ułatwiające praktyczne aplikacje układowe. Również inni dalekowschodni producenci np. Ai-Thinker [6], Lilygo [7] mają w swojej ofercie szereg gotowych modułów zawierających układy ESP wraz z różnymi elementami peryferyjnymi, np. z wyświetlaczem (rys. 5), układami komunikacji GSM, itp.

Bardziej wymagające zadania w Internecie rzeczy można zrealizować przy użyciu komputerów jednopłytkowych (SBC – Single Board Computer). Koncepcja SBC zakłada integrację na jednej płycie drukowanej wszystkich elementów funkcjonalnych komputera, m.in. mikroprocesora, pamięci, układów wejścia/wyjścia, interfejsów komunikacyjnych oraz procesora graficznego, umożliwiającego podłączenie typowego monitora. Aktualnie najbardziej popularną rodziną komputerów jednopłytkowych jest Raspberry Pi [8], szczególnie z punktu widzenia zastosowań w Internecie rzeczy. Wiele komputerów osobistych, czy przede wszystkim przenośnych, też można zakwalifikować do klasy SBC, jednak cechą decydującą o potencjalnych zastosowaniach są wymiary płytki. W założeniach twórców wymiary Raspberry Pi miały być porównywalne z wymiarami karty kredytowej. Dodatkową cechą szczególną komputerów Raspberry Pi jest magistrala wejść/wyjść - GPIO (General Purpose Input Output), umożliwiająca podłączenie elementów peryferyjnych, np. czujników, elementów wykonawczych, itp.



Rys. 6. Komputer jednopłytkowy Raspberry Pi B [8]

Podobnie do Arduino, projekt Raspberry Pi, zainicjowany przez fundację o tej samej nazwie, początkowo miał na celu nauczanie podstaw informatyki w szkołach w Wielkiej Brytanii [8]. Sukces projektu zaowocował powstaniem firmy Raspberry Pi (Trading) Ltd, która wraz z firmą Broadcom Semiconductors, zajęła się rozwojem platformy i marketingiem. Pierwsza powszechnie dostępna wersja komputera Raspberry Pi model B została wypuszczona na rynek w 2012 roku (rys. 6).

Raspberry Pi model B zawierał układ BCM2835 (Broadcom), wykonany w technologii SoC, w którym zintegrowano w jednej strukturze jednorzeniowy procesor ARM1176JZF-S (zegar 700 MHz), układ graficzny VideoCore IV oraz 256 lub 512 MB pamięci SDRAM. Ponadto na płycie umieszczono złącza wideo do podłączenia monitora (HDMI oraz Composite RCA), gniazdo jack do podłączenia słuchawek bądź głośnika (złącze 3,5 mm jack), dwa porty USB 2.0, złącze RJ45 do sieci Ethernet (10/100), złącze microUSB do podłączenia zasilania 5 V, złącze karty SD oraz liczące 26 pinów złącze magistrali GPIO. Komputer Raspberry Pi musi pracować pod kontrolą systemu operacyjnego wgranego na kartę SD. Najbardziej popularnym systemem używanym w takich komputerach jest Raspberry Pi OS, nazywany wcześniej Raspbian. Jest to zmodyfikowana na potrzeby tego urządzenia wersja Debiana, tj. jednej z najpopularniejszych dystrybucji Linuxa.



Najnowsza wersja Raspberry Pi 5 została zaprezentowana we wrześniu 2023 roku (rys. 7) [8]. Na płycie o tych samych wymiarach co pierwowzór znalazł się układ SoC Broadcom BCM2712, w którym zintegrowano m.in. czterordzeniową jednostkę centralną Arm Cortex-A76, taktowaną zegarem 2,4 GHz, z 512 kB na rdzeń pamięci cache L2 oraz 2 MB cache L3, procesor graficzny VideoCore V3D VII, sprzętowy dekodery 4Kp60 HEVC. W nowym modelu można także wyróżnić układ pamięci SDRAM (4 lub 8 GB), dwa złącza HDMI z obsługą technologii HDR, dwa porty USB 3.0 i dwa porty USB 2.0, złącze RJ45 w standardzie Gigabit Ethernet, złącze zasilania USB-C, układ zegara czasu rzeczywistego RTC, dwuzakresowy moduł WiFi 802.11ac, moduł Bluetooth 5.0 (BLE), złącze PCIe 2.0, slot na kartę microSD i 40-pinowe złącze magistrali GPIO.



Rys. 7. Komputer jednopłytkowy Raspberry Pi 5 [8]

Szybkie porównanie możliwości wskazuje na ogromny postęp jaki dokonał się na przestrzeni 11 lat. Raspberry Pi najnowszych generacji może pełnić rolę hosta sieci Internetu rzeczy, ale może również stać się z powodzeniem komputerem osobistym, po wyposażeniu go w monitor, mysz i klawiaturę. We wspomnianym okresie powstała także ogromna społeczność sympatyków i użytkowników takich komputerów. Podobnie jak w przypadku Arduino, o popularności platformy zdecydowało wiele czynników t.j.: niska cena, małe wymiary, możliwość stosowania jako system operacyjny różnych dystrybucji Linuxa oraz Windowsa IoT, bogaty zestaw dostępnych oprogramowania (Open Source), łatwość programowania (Python, C++, Java), możliwość dołączania płytek rozszerzeń funkcjonalnych HAT (Hardware attached on top), mnogość interfejsów i oczywiście wspomniana magistrala GPIO. Wymienione cechy spowodowały też, że komputery Raspberry Pi są coraz częściej stosowane w rozwiązaniach przemysłowych, zastępując np. kosztowne sterowniki PLC.

Obecnie rodzina Raspberry Pi składa się z opisanej wcześniej głównej linii komputerów SBC (od pierwszej do piątej generacji) wielkości karty kredytowej; linii Raspberry Pi Zero, którą tworzą modele o mniejszych wymiarach i ograniczonych możliwościach funkcjonalnych, w tym zredukowanej liczbie interfejsów (np. Raspberry Pi Zero 2W) oraz linii Raspberry Pi Pico, tj. płytek deweloperskich z procesorem RP2040 o możliwościach porównywalnych do płytek Arduino (np. Raspberry Pi Pico W) [8]. Dostępna jest także bogata oferta oficjalnych i nieoficjalnych modułów rozszerzających HAT. Komputery Raspberry Pi najnowszych generacji charakteryzują się stosunkowo dużą mocą obliczeniową jednostki centralnej. Wiąże się to ze stosunkowo dużym poborem energii (Raspberry Pi 5 wymaga zasilacza 5V/5A) i koniecznością dobrego odprowadzania ciepła z głównego układu SoC. Wynika z tego określona architektura sprzętowa aktualnych rozwiązań Internetu rzeczy. Komputery Raspberry Pi pełnią raczej funkcję lokalnych serwerów agregujących dane z

czujników podłączonych do modułów mikrokontrolerów, np. ESP, tworzących rozproszoną sieć.

## Podsumowanie

Postęp technologiczny w dziedzinie mikroelektroniki sprawia, że w codziennym użytkowaniu pojawiają się rozwiązania, które jeszcze kilkanaście, czy nawet kilka lat temu były dostępne dla nielicznych odbiorców lub znajdowały się w sferze fantastyki naukowej. Sukcesywny spadek cen komponentów elektronicznych, w tym przede wszystkim mikroprocesorów, oraz ich miniaturyzacja generuje nowe zastosowania, szczególnie w dziedzinie Internetu rzeczy. Oczywiście na rynku rozwiązań układów mikroprocesorowych istnieje wiele rozwiązań nie opisanych w artykule, ale zaprezentowane przykładowe rozwiązania są niewątpliwie najbardziej popularne.

Znaczna część końcowych użytkowników Internetu rzeczy często nie jest nawet świadoma tego, że wykorzystywane przez nich tzw. inteligentne urządzenia są częścią ogólnoswiatowego systemu, ale docenia ich nowe możliwości. Szacuje się, że w 2025 roku liczba urządzeń podłączonych do Internetu (IoT) przekroczy 38 miliardów, zaś wartość rynku urządzeń IoT może osiągnąć 11 bilionów dolarów [9].

Przyszłość Internetu rzeczy to także zastosowania w takich dziedzinach jak przemysł (IIoT – Industrial Internet of Things), medycyna czy branża motoryzacyjna. Większość firm, które świadomie wdrożyły rozwiązania IoT raportuje zmniejszenie kosztów funkcjonowania, znaczne zwiększenie możliwości kontroli procesów produkcyjnych czy wcześniejsze zapobieganie problemom. Urządzenia medyczne IoT umożliwiają np. zdalną kontrolę stanu pacjenta przez personel medyczny, dzięki czemu można znacznie skrócić czas do rozpoczęcia udzielenia pomocy.

Oczywiście jak każda nowa technologia, Internet rzeczy ma słabe punkty. Pesymiści twierdzą nawet, że może, wraz ze sztuczną inteligencją, stać się przyczyną końca świata jaki znamy, jednak niewątpliwie korzyści jakie przynosi ludzkości Internet rzeczy zdecydowanie przewyższają ewentualne zagrożenia z nim związane.

**Autor:** dr inż. Jacek Rymaszeński, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18, 90-537 Łódź, E-mail: jacek.rymaszeński@p.lodz.pl

## LITERATURA

- [1] Atzori L., Iera A., Morabito G., The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*, 54 (2010), No. 15, 2787 – 2805
- [2] Korzeniewska E., Krawczyk A., Łada-Tondyra E., Plewako J., Technologia 5G jako etap rozwoju komunikacji bezprzewodowej, *Przegląd Elektrotechniczny* 95 (2019), nr 12, 144-147
- [3] Pawlak R., Lebioda, M., Tomczyk, M., Rymaszeński, J., Korzeniewska, E., Walczak, M., Modelling and applications of conductive elements on textile materials, *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 37 (2018), 1645-1656
- [4] Arduino, <https://www.arduino.cc/en/hardware>, data dostępu: 20.11.2023
- [5] Espressif Systems: Wireless SoCs, Software, Cloud and AIoT, <https://www.espressif.com/>, data dostępu: 21.11.2023
- [6] Ai-Thinker Co., Ltd, <http://aithinker.com/>, data dostępu 21.11.2023
- [7] Committed To The Research & Development Of IoT – LILYGO®, <https://www.lilygo.cc/>, data dostępu: 21.11.2023
- [8] Raspberry Pi, <https://www.raspberrypi.com/>, data dostępu: 22.11.2023
- [9] Internet of Things (IoT) - statistics & facts, <https://www.statista.com/topics/2637/internet-of-things/>, data dostępu: 23.11.2023