

Standardy i protokoły komunikacyjne w Internecie rzeczy

Streszczenie. Gwałtowny rozwój Internetu rzeczy dokonujący się na przestrzeni ostatnich lat jest efektem postępu technologicznego, wzrostu zapotrzebowania na aktualne informacje i rosnącej mody na inteligentne rozwiązania. Jednym z kluczowych czynników napędzających postęp w dziedzinie IoT jest ewolucja technologii komunikacyjnych, przede wszystkim bezprzewodowych. Na całym świecie prowadzone są intensywne prace mające na celu opracowanie nowych rozwiązań w zakresie łączności na potrzeby IoT. W artykule przedstawiono, najważniejsze z punktu widzenia Internetu rzeczy, standardy i protokoły komunikacyjne.

Abstract. The rapid development of the Internet of Things in the recent years results from technological advancements, the growing demand for real-time information, and the increasing trend towards smart solutions. One of the key drivers of IoT progress is the evolution of communication technologies, primarily wireless. Intensive research is being conducted worldwide to develop new IoT communication solutions. This article presents the most important communication standards and protocols from the perspective of the Internet of Things. (**Communication standards and protocols for the Internet of Things**).

Słowa kluczowe: Internet rzeczy, standardy komunikacyjne, protokoły komunikacyjne.

Keywords: Internet of Things, communication standards, communication protocols.

Wstęp

Komunikacja jest to proces wymiany informacji, warunkujący funkcjonowanie określonego zbioru współdziałających elementów. Funkcjonowanie i rozwój otaczającego nas świata stały się możliwe przede wszystkim dzięki przekazywaniu informacji w różnorodny sposób między elementami każdego ekosystemu. Komunikacja może dokonywać się na poziomie lokalnym, np. poprzez układ nerwowy człowieka, jak i globalnym, np. obserwacja fazy księżyca. Oczywiście procesy komunikacyjne nie dotyczą tylko świata naturalnego, ale również świata maszyn, urządzeń i przede wszystkim komputerów. Kluczowym zagadnieniem w procesie komunikacji jest wzajemne zrozumienie. Porozumiewające się strony powinny znać zbiór zasad, wyznaczających pewne ramy komunikacji. Komunikacja międzyludzka jest możliwa, jeżeli znamy język, słownictwo, zasady gramatyczne. W przypadku stosunków międzynarodowych problemem we wzajemnym zrozumieniu mogą być nie tylko różnice językowe, ale i kulturowe. Ustalenie ogólnych zasad protokołu dyplomatycznego i ich przestrzeganie pozwala na zminimalizowanie wpływu zwyczajów narodowych w komunikacji i ułatwia wzajemne zrozumienie. Podobne zasady obowiązują w świecie maszyn, urządzeń elektronicznych. Do przesyłania informacji między komputerami również niezbędne jest określenie zestawu reguł definiujących sposób komunikacji – protokołu komunikacyjnego. Niewątpliwie rewolucja jaka dokonała się wraz z powstaniem i rozwojem sieci Internet nie byłaby możliwa, gdyby nie zestaw protokołów TCP/IP. Burzliwy rozwój Internetu wynika z kilku ważnych czynników. Najważniejszym z nich jest otwartość wspomnianych protokołów, niezależność ich implementacji od użytego sprzętu, systemu operacyjnego czy fizycznej warstwy komunikacyjnej. Dzięki temu w sieci Internet mogą funkcjonować różnorodne urządzenia: począwszy od telefonów komórkowych na ogromnych maszynach obliczeniowych kończąc. Pozostałe istotne czynniki sprzyjające globalizacji sieci Internet to: niezależność od fizycznych właściwości sieci oraz zunifikowany sposób adresowania urządzeń.

Wymienione wyżej cechy protokołów TCP/IP stały się fundamentem, na którym opiera się Internet rzeczy (IoT – Internet of Things)[1]. Jednoznacznie określone i

zlokalizowane w sieci urządzenia mogą efektywnie przysyłać dane między sobą, przy czym praktycznie nieistotna jest odległość między komunikującymi się urządzeniami. Dzięki temu można tworzyć inteligentne, rozproszone systemy zmieniające nasze życie i pracę.

Komunikacja na poziomie globalnym w Internecie rzeczy jest zatem zdeterminowana przez powszechnie znany zestaw protokołów TCP/IP. W przypadku komunikacji lokalnej, np. między czujnikami a jednostką centralną lokalnego systemu pomiarowego stosują się bardzo dużo różnych rozwiązań, co czasami powoduje chaos informacyjny. W niniejszym opracowaniu przedstawione zostaną najważniejsze protokoły i standardy komunikacyjne wykorzystywane w komunikacji lokalnej Internetu rzeczy. Pojęcia protokół i standard są często używane zamiennie, jednak z formalnego punktu widzenia protokół definiuje precyzyjny zbiór zasad, zgodnie z którymi urządzenia się komunikują, a standard jest pojęciem szerszym, które może obejmować zagadnienia nie tylko techniczne, ale i organizacyjne. Standard komunikacyjny może zatem obejmować wiele protokołów.

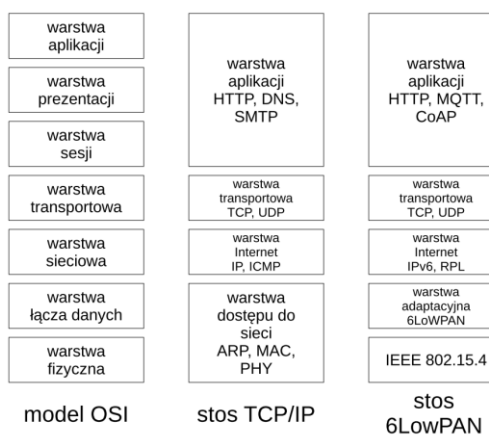
Postęp technologiczny w dziedzinie urządzeń IoT zachęca do stosowania najnowszych rozwiązań, wśród których wiodącą rolę odgrywają układy mikroprocesorowe, wyposażane w coraz nowsze technologie komunikacyjne [2]. Sprzyja to przenikaniu technologii Internetu rzeczy do coraz nowszych gałęzi zastosowań, np. elektroniki noszonej [3].

Niniejszy artykuł stanowi próbę uporządkowania wiedzy na temat protokołów i standardów używanych w Internecie rzeczy. Przedstawiono i krótko opisano najważniejsze rozwiązania komunikacyjne bliskiego i średniego zasięgu stosowane w urządzeniach IoT, w tym przede wszystkim rozwiązania warstwy fizycznej połączenia. Pominęto szeroko opisywane technologie telefonii komórkowej.

Model warstwowy

Wymienione wcześniej nazwy protokołów i standardów funkcjonują w przestrzeni publicznej i są powszechnie znane. Jednak precyzyjne określenie ich znaczenia w procesie komunikacji wymaga usystematyzowanego podejścia do problemu. Najłatwiej wytłumaczyć rolę poszczególnych protokołów w oparciu o model warstwowy systemu komunikacyjnego OSI (Open Systems Interconnection). Takie podejście umożliwia uporządkowanie i zrozumienie funkcjonowania komunikacji między urządzeniami w złożonych systemach. Podział na warstwy

upraszcza projektowanie, implementację i bieżące utrzymanie systemów komunikacyjnych. W modelu OSI można wyróżnić siedem warstw: aplikacji, prezentacji, sesji, transportową, sieciową, łącza danych i fizyczną (rys. 1).



Rys. 1. Porównanie warstwowych modeli komunikacyjnych.

Do najważniejszych zalet modelu OSI można zaliczyć: modularność – dzięki czemu poszczególne etapy procesu komunikacji mogą być rozpatrywane oddzielnie, a każda z warstw może być modyfikowana niezależnie od innych; abstrakcja – wyższe warstwy mogą wykorzystywać niższe bez szczególnej wiedzy na temat ich działania; standaryzacja – wspólny język i precyzyjnie określone zasady działania pozwalają na tworzenie współdziałających różnorodnych systemów, urządzeń i aplikacji. Model OSI stanowi teoretyczną podstawę funkcjonowania komunikacji w sieci Internet, często w praktyce stosuje się jednak uproszczony model komunikacyjny TCP/IP.

Protokoły stosowane w Internecie rzeczy zostaną omówione z uwzględnieniem przyporządkowania do poszczególnych warstw modelu OSI (TCP/IP). Z oczywistych powodów w opracowaniu pominięto opis powszechnie znanych i dokładnie opisanych protokołów z rodziny TCP/IP.

Protokoły i standardy niższych warstw

Koncepcja Internetu rzeczy, tj. połączenia różnorodnych obiektów fizycznych z ogólnosiątkową siecią stała się możliwa do zrealizowania głównie dzięki rozwojowi technologii komunikacji bezprzewodowej. Klasyczne przewodowe połączenie urządzeń sieciowych z wykorzystaniem standardu Ethernet w wielu przypadkach stanowi znaczne ograniczenie rozwoju infrastruktury komunikacyjnej. Warstwa fizyczna jest zatem kluczowym elementem kanałów komunikacyjnych w Internecie rzeczy, a mnogość rozwiązań w tej warstwie sprzyja rozwojowi tej koncepcji komunikacji. W zależności od potrzeb, specyfiki łączonych obiektów, wybierana jest odpowiednia technologia czy protokół z warstwy fizycznej. Do najważniejszych czynników decydujących o wyborze sposobu łączenia należy zaliczyć: zużycie energii, przepustowość, zasięg i bezpieczeństwo. Należy zauważyć, że najbardziej intensywne prace rozwojowe Internetu rzeczy dotyczą nowych rozwiązań w najniższych warstwach sieciowych.

Wi-Fi

Najbardziej powszechnym sposobem bezprzewodowej komunikacji w lokalnych sieciach komputerowych są obecnie połączenia z wykorzystaniem standardów Wi-Fi, w których warstwa fizyczna jest realizowana za pomocą fal radiowych, czyli bezprzewodowego nośnika informacji. Punktem centralnym typowej sieci bezprzewodowej WLAN jest tzw. punkt dostępowy – access point, czyli urządzenie zapewniające dostęp do sieci poszczególnym hostom drogą

radiową. Najczęściej urządzenie będące punktem dostępowym pełni również funkcję routera, stanowiącego bramę do sieci WAN. W skład typowej sieci Wi-Fi mogą wchodzić komputery osobiste, serwery, telefony, ale również urządzenia Internetu rzeczy. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem w sieciach domowych są inteligentne wyłączniki, gniazdko, czujniki połączone do sieci globalnej poprzez punkt dostępowy Wi-Fi. Skrót Wi-Fi® jest znakiem towarowym, którego właścicielem jest organizacja non-profit Wi-Fi Alliance, zrzeszająca wielu producentów sprzętu elektronicznego [4]. Z praktycznego punktu widzenia Wi-Fi jest to zestaw protokołów wykorzystujących standardy IEEE 802.11, określających sposób bezprzewodowego przesyłania danych [4]. W tabeli 1 zestawiono najbardziej popularne wersje standardów 802.11.

Tabela 1. Zestawienie standardów IEEE 802.11 [4]

Standard IEEE 802.11	Data	Częstotliwość [GHz]	Maksymalna przepustowość [b/s]	Maksymalny zasięg [m]
802.11	1997	2,4	2 M	20 w./100 z.
b	1999	2,4	11 M	35 w./140 z.
a	1999	5	54 M	35 w./120 z.
g	2003	2,4	54 M	38 w./140 z.
n (Wi-Fi 4)	2009	2,4/5	600 M	70 w./250 z.
ac (Wi-Fi 5)	2013	5	6,9 G	35 w.
ax (Wi-Fi 6)	2021	2,4/5/6	9,6 G	30 w./120 z.
bn (Wi-Fi 7)	2024	2,4/5/6	46,1 G	10 w./100 z.
bx (Wi-Fi 8)	2028*	2,4/5/6	100 G	30 w./120 z.

* standard w opracowaniu

Połączenia wykorzystujące sieci Wi-Fi charakteryzują się szeregiem zalet. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: mobilność, prostotę instalacji, brak połączeń kablowych, wielozadaniowość i łatwą dostępność oraz przede wszystkim wysoką przepustowość w porównaniu do innych technologii bezprzewodowych. Stosując sieci Wi-Fi należy jednak pamiętać o wadach, z których najistotniejsze to: stosunkowo mały zasięg i mała odporność na zakłócenia, mniejsze przepustowości w porównaniu do połączeń przewodowych, podatność na ataki (szczególnie dla starszych wersji standardów) – konieczne jest stosowanie odpowiednich zabezpieczeń oraz duży pobór mocy przez urządzenia końcowe. Urządzenia Internetu rzeczy powszechnie wyposażone są w moduł Wi-Fi, najczęściej w standardzie co najmniej 802.11n. Najnowsze moduły mikroprocesorowe obsługują już nowsze wersje standardu 802.11, np. Raspberry Pi 5 – 802.11 ac, a ESP32-C6 – 802.11 ax [5].

Bluetooth

Zestawienie połączenia bezprzewodowego między urządzeniami osobistymi, tj. smartfonem, smartwatchem, komputerem przenośnym, zestawem słuchawkowym, klawiaturą czy myszą bezprzewodową najczęściej nie wymaga stosowania połączenia poprzez sieć Internet, tak jak to ma miejsce w przypadku sieci Wi-Fi. W większości przypadków wystarczy połączenie bliskiego zasięgu. Do najważniejszych i najbardziej popularnych standardów technologii bezprzewodowej bliskiego zasięgu należy zaliczyć Bluetooth®. Nazwa Bluetooth jest zastrzeżona jako symbol towarowy przez Bluetooth Special Interest Group (SIG), organizację zrzeszającą ponad 35000 firm członkowskich z dziedziny telekomunikacji, czy elektroniki użytkowej [6].

Nazwa Bluetooth obejmuje zestaw specyfikacji opisujących metody połączenia krótkiego zasięgu urządzeń

stacjonarnych i mobilnych. Technologia Bluetooth ma architekturę warstwową, ale nie jest w pełni kompatybilna z modelem OSI. Można oczywiście wyodrębnić warstwę fizyczną charakterystyczną dla Bluetooth, w której opisany jest sposób przekształcenia sygnału cyfrowego na sygnał radiowy, a także podane są parametry transmisji oraz warstwę łącza danych zarządzającą procesem ustanawiania połączenia i kontrolującą poprawność przesyłanych danych. Wyższe warstwy są charakterystyczne tylko dla Bluetooth i nie mają bezpośrednich odpowiedników w modelu OSI (rys. 1). W porównaniu do Wi-Fi Bluetooth wykorzystuje urządzenia nadawcze o znacznie mniejszej mocy, co znacząco wpływa na ograniczenie zasięgu połączenia, ale jednocześnie zmniejsza prawdopodobieństwo zdalnej ingerencji w połączenie. Technologia ta umożliwia zatem budowanie sieci osobistych (PAN – Personal Area Network). Technologia Bluetooth wykorzystuje standard 802.15.1 w warstwie fizycznej i łącza danych. Urządzenia Bluetooth pracują w pasmie częstotliwości od 2,402 do 2,48 GHz, a typowy zasięg nie przekracza 10 m. Począwszy od 1998 roku Bluetooth SIG publikuje uaktualnione wersje specyfikacji technologii, przy czym zachowana jest wsteczna kompatybilność wersji. Większość nowych urządzeń, w tym nowe moduły mikroprocesorowe, obsługuje wersję Bluetooth 5 (5.4), a we wrześniu 2024 r. opublikowano specyfikację Bluetooth 6 [6].

Technologia Bluetooth w Internecie rzeczy znajduje zastosowanie do połączeń lokalnych umożliwiających dołączenie do sieci urządzeń przenośnych, np. smartwatchy opasek monitorujących stan parametrów zdrowotnych człowieka oraz małych sensorów. W takich przypadkach wykorzystywana jest specyfikacja Bluetooth Low Energy (BLE), wprowadzona od wersji 4.0 [6].

ZigBee

W Internecie rzeczy wiele czujników funkcjonuje autonomicznie, wykorzystując zasilanie bateryjne. Kluczową cechą w takich przypadkach jest niski pobór energii przez moduł czujnika, przy zachowaniu dobrych parametrów łączności. Na potrzeby rozwiązań tego typu opracowano standard ZigBee, umożliwiający tworzenie sieci urządzeń charakteryzujących się bardzo małym zużyciem energii przy stosunkowo niewielkiej przepustowości, do 250 kb/s. Ważną cechą ZigBee jest możliwość tworzenia sieci mesh, w których każde urządzenie może komunikować się z sąsiednimi, pracując jako repeater i przekazując dalej informację, dzięki czemu zasięg jest znacznie większy niż przy połączeniu Bluetooth i może osiągać 100 m, nawet przy przypadku występowania przeszkód. Nazwa technologii pochodzi od zygakowatego łańcucha pszczoł, przekazujących w ulu informację o lokalizacji źródła pożywienia. Technologia ZigBee jest oparta na standardzie technicznym IEEE 802.15.4, określającym warstwę fizyczną łącza oraz warstwę łącza danych (MAC – Medium Access Control). Podobnie jak w przypadku Bluetooth wyższe warstwy są specyficzne dla danej technologii i nie mają dokładnych odpowiedników w modelu OSI. Warstwa fizyczna łącza definiuje i realizuje łączność na częstotliwości 2,4 GHz oraz dodatkowo w zależności od regionu, wykorzystując pasma nielicencjonowane (868 MHz w Europie), stosując przy tym topologię gwiazdy, drzewa oraz wspomnianą wcześniej topologię siatki (mesh). Komunikacja w sieci urządzeń ZigBee jest zabezpieczona 128-bitowymi kluczami szyfrowania. Opiekę nad standardem sprawuje organizacja Connectivity Standards Alliance (CSA) (dawniej ZigBee Alliance) zrzeszająca aktualnie ponad 500 firm [7]. Technologia ZigBee jest bardzo ważna dla Internetu rzeczy gdyż umożliwia podłączenie do sieci wielu, praktycznie

bezbosługowych czujników, stosowanych np. w automatyce domowej.

Z-Wave

Protokół Z-Wave jest jednym z najstarszych protokołów dedykowanych do bezprzewodowej komunikacji między urządzeniami automatyki domowej. Jego najważniejszymi cechami są niezawodność i duży zasięg. Podobnie jak w przypadku ZigBee każde urządzenie może pełnić funkcję repeatera, tworząc sieć o topologii siatki (mesh). Warstwa fizyczna i warstwa łącza danych wykorzystują standard Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego ITU-T G.9959. Z-Wave oferuje szybkość transmisji do 100 kb/s oraz zasięg do 50 m w pomieszczeniach i do 200 m w terenie otwartym. Marka i technologia Z-Wave jest aktualnie własnością Silicon Labs, a firmy zajmujące się rozwojem technologii są zrzeszone w organizacji Z-Wave Alliance [8]. Z-Wave jest standardem zamkniętym i pełna specyfikacja nie jest publicznie dostępna. Ogranicza to w pewnym stopniu możliwości rozwoju technologii a producenci urządzeń są zależni od firmy zarządzającej standardem. Z-Wave jest jednak ceniony ze względu na wysoką stabilność działania i dojrzałość.

LoraWAN

Jedną z istotnych trudności związanych z wdrażaniem Internetu rzeczy jest dostępność technologii komunikacyjnych w danej lokalizacji. Dobrym przykładem takiego problemu jest pozyskiwanie danych środowiskowych z rozległych obszarów, np. z pól uprawnych, terenów mało zurbanizowanych, gdzie jest ograniczona dostępność do sieci GSM. Do realizacji takich połączeń potrzebne są sieci LPWAN (Low Power Wide Area Network), czyli sieci rozległe małej mocy, w której urządzeniami końcowymi mogą być np. czujniki o zasilaniu bateryjnym. Na potrzeby łączności dalekiego zasięgu firma Cycleo (przejęta przez Semtech) opracowała i opatentowała technologię łączności radiowej dalekiego zasięgu, przy bardzo małym poborze mocy, LoRa® (Long Range) [9]. Dodatkowo opracowano protokół komunikacyjny LoRaWAN, który definiuje sposób komunikacji urządzeń LoRa między sobą. LoRa definiuje zatem warstwę fizyczną połączenia, a LoRaWAN – wyższe warstwy sieciowe. Semtech jest liderem stowarzyszenia LoRa Alliance zrzeszającego wiele firm informatycznych czy telekomunikacyjnych. LoRaWAN jest oficjalnym standardem Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego ITU-T Y.4480. Sieci LoRaWAN mają topologię gwiazdy, w której bramki przekazują informację pomiędzy serwerem centralnym a urządzeniami końcowymi. Szybkość transmisji danych w sieci urządzeń LoRa, ze względu na zastosowaną modulację CSS i ograniczenie poboru mocy, zawiera się w przedziale 0,3 kbps do 50 kbps, co wyklucza raczej komunikację w czasie rzeczywistym. Szyfrowana transmisja jest realizowana na częstotliwościach zarezerwowanych dla urządzeń nielicencjonowanych, w Europie jest to pasmo 868 MHz. Zasięg zapewniany przez LoRa może wynosić kilka kilometrów w obszarach silnie zurbanizowanych, a na terenach otwartych – nawet kilkanaście kilometrów. Sieci LPWAN można realizować również przy użyciu innych technologii. Do najpopularniejszych należą: Sigfox, NB-IoT, LTE-M.

Thread

Wraz z rozwojem Internetu rzeczy pojawiają nowe koncepcje łączności i technologie sieciowe, dedykowane do łączności urządzeń IoT. Jedną z takich technologii jest Thread [10] – otwarta technologia bazująca na standardzie IEEE 802.15.4 (warstwa fizyczna i łącza danych). W porównaniu do standardów ZigBee czy Z-Wave protokół

Thread oferuje dużą przepustowość i niską latencję, może być zatem stosowany do systemach wymagających szybkiej reakcji, np. w systemach alarmowych. Głównymi założeniami dla sieci Thread są bezpieczeństwo, niezawodność i energooszczędność komunikacji pomiędzy urządzeniami Internetu rzeczy. Dodatkowo urządzenia Thread mogą łączyć się automatycznie ze sobą, tworząc rozbudowaną, wielopunktową sieć mesh. Dzięki temu instalacja sieci Thread jest znacznie prostsza w porównaniu do innych rozwiązań. Moduły mikroprocesorowe najnowszej generacji (np. ESP32-C6) obsługują standard IEEE 802.15.4, mogą zatem pracować w sieciach Thread.

Protokoły i standardy wyższych warstw

6LoWPAN

Za adresowanie pakietów danych w sieci Internet odpowiada warstwa sieciowa, czyli protokoły IPv4 i IPv6. Rozwój Internetu rzeczy spowodował wzrost zapotrzebowania na adresy IP. Ogromna liczba urządzeń IoT (ponad 20 miliardów w roku 2024) wymusza przechodzenie na protokół IPv6, który teoretycznie umożliwia utworzenie ponad 10^{38} adresów. Protokół IPv6 zwiększa zatem rozmiar przesyłanych pakietów, które mogą stać się zbyt duże, szczególnie dla technologii łączności charakteryzujących się małą przepustowością. Stowarzyszenie IETF (Internet Engineering Task Force) [11] zaproponowało protokół, który odpowiada za adaptację pakietów z warstwy sieciowej IPv6 do wymagań niższych warstw, wykorzystujących standard IEEE 802.15.4 (rys. 1). Nazwa 6LoWPAN pochodzi od nazwy grupy roboczej IETF, zajmującej się tą problematyką (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks). Enkapsulacja i kompresja nagłówka pakietu umożliwia wykorzystanie protokołu IPv6 w Internecie rzeczy nawet przez najprostsze urządzenia o małej zdolności przetwarzania danych.

Matter

Jednym z najnowszych rozwiązań w dziedzinie standardów komunikacyjnych jest Matter, zaprezentowany oficjalnie przez Connectivity Standards Alliance w listopadzie 2022 roku [7]. Standard Matter został zaprojektowany aby unifikować sposób komunikacji w systemach IoT, głównie w zakresie automatyki domowej, poprzez stworzenie możliwości wymiany informacji między urządzeniami wykorzystującymi różne standardy i protokoły niższych warstw sieciowych, np. Wi-Fi, Thread, Bluetooth czy Ethernet oraz IPv6. Jako protokół Matter jest zlokalizowany w wyższych warstwach modelu OSI, pomiędzy warstwą aplikacji a warstwą transportową. Standard Matter stanowi zatem spoiwo łączące różne technologie komunikacyjne, dzięki czemu możliwe jest używanie rozwiązań smart różnych producentów w tym samym systemie domowej automatyki. Dodatkowymi założeniami przyjętymi przez twórców Matter było uproszczenie procedury parowania urządzeń oraz zwiększenie bezpieczeństwa i prywatności poprzez zastosowanie najnowszych algorytmów szyfrujących. Standard Matter jest otwarty co daje nadzieję na dalszy szybki rozwój Internetu rzeczy.

Protokoły warstwy aplikacji

Warstwa aplikacji w modelu komunikacyjnym stanowi bramę do zasobów Internetu. Najbardziej znanym protokołem z tej warstwy jest oczywiście powszechnie znany protokół http. Internet rzeczy stawia jednak inne wymagania protokołom warstwy aplikacji niż klasyczna łączność internetowa. Najważniejsze z nich to: lekkość – ze względu na ograniczoną przepustowość i moc obliczeniową urządzeń IoT, możliwość obsługi wielu urządzeń, wysoki poziom

bezpieczeństwa, łatwość integracji w różnych systemach. Najbardziej popularne w Internecie rzeczy protokoły to: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – lekki protokół wykorzystujący TCP jako warstwę transportową, CoAP (Constrained Application Protocol) – specjalistyczny protokół wykorzystujący UDP, AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) – bardziej zaawansowany niż MQTT czy CoAP i oferujący wysoką niezawodność przesyłu informacji oraz zaawansowane funkcje jak kolejki wiadomości.

Podsumowanie

Internet rzeczy tworzą fizyczne urządzenia komunikujące się na poziomie globalnym dzięki sieci Internet i tym samym wykorzystujące zestaw protokołów TCP/IP. Na poziomie lokalnym mogą funkcjonować różne rozwiązania jednakże i w tym przypadku konieczna jest unifikacja sposobów wymiany informacji między elementami systemów. Dominującym trendem z powodu nieporównywalnie większej elastyczności jest stosowanie łączności bezprzewodowej, pomimo oczywistych wad, np. większej podatności na zakłócenia, czy teoretycznie mniejszym poziomie bezpieczeństwa w porównaniu do łączności przewodowej. Mnogość urządzeń, sensorów, elementów wykonawczych podłączanych do sieci stała się tak ogromna, że konieczne stało się ujednoczenie protokołów i standardów komunikacyjnych. Przyjęcie przez ogólnoswiatową społeczność określonych standardów umożliwi komunikację między urządzeniami różnych producentów, pozwala na łatwą rozbudowę i zapewnia określony przez specyfikację poziom bezpieczeństwa danych. Ponadto standardy narzucają producentom spełnianie wymagań jakościowych dotyczących oferowanych produktów i tym samym podnoszą poziom zaufania do danej technologii. Oczywiście wspomniana różnorodność urządzeń Internetu rzeczy jak dotąd utrudnia opracowanie uniwersalnego standardu zapewniającego pełną interoperacyjność. Podejmowane są jednak próby, takie jak standard Matter, które mają na celu integrowanie różnych protokołów. W przyszłości należy spodziewać się dalszego rozwoju standardów, przy czym najważniejsze kierunki to: wykorzystanie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego w urządzeniach IoT, zwiększanie bezpieczeństwa i wiarygodności przesyłanych danych oraz dalsza unifikacja standardów.

Autor: dr inż. Jacek Rymaszewski, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18, 90-537 Łódź, E-mail: jacek.rymaszewski@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] Rymaszewski J., Układy mikroprocesorowe w Internecie rzeczy, *Przegląd Elektrotechniczny* 100 (2024), nr 6, 156-159
- [3] Korzeniewska E., Zawiślak R., Przybył S., Sarna P., Biłska A., Mączka M., Prototype of Data Collector from Textronic Sensors, *Sensors* 23 (2023), 9813
- [4] Wi-Fi Alliance, <https://www.wi-fi.org/>, data dostępu: 21.10.2024
- [5] Espressif Systems: Wireless SoCs, Software, Cloud and AIoT, <https://www.espressif.com/>, data dostępu: 21.10.2024
- [6] Bluetooth® Technology Website, <https://www.bluetooth.com/>, data dostępu 21.10.2024
- [7] Connectivity Standards Alliance: CSA-IOT, <https://www.csa-iot.org/>, data dostępu: 22.10.2024
- [8] Z-Wave Alliance, <https://z-wavealliance.org/>, data dostępu: 22.10.2024
- [9] LoRa Alliance, <https://lora-alliance.org/>, data dostępu: 22.10.2024
- [10] Thread Group, <https://www.threadgroup.org/>, data dostępu: 22.10.2024
- [11] IETF | Internet Engineering Task Force, <https://www.ietf.org/>, data dostępu: 23.10.2024