

# Sieci bezadresowe jako sposób sterowania „inteligentnymi” urządzeniami domowymi

Jarogniew Rykowski, Wojciech Światała, Tomasz Jenek

## 1. Wstęp

W ostatnim okresie obserwujemy bardzo duży wzrost zainteresowania nie tyle samymi urządzeniami elektronicznymi, co możliwością ich współpracy w ramach sieci wymiany danych. Łączność na bliską odległość (rzędu kilku metrów, czyli *de facto* w ramach jednego pomieszczenia) zaczyna się pojawiać nie tylko w zastosowaniach przemysłowych, ale także w naszych domach. Nikogo już nie dziwi smartfon przekazujący telewizorowi zdjęcia do wyświetlenia lub dostępu do drukarki.

Sieci transmisji danych zaczynają się pojawiać także w takich miejscach, które do tej pory były ostoją urządzeń niezależnych. Do takich miejsc należy nowoczesna kuchnia. Jeszcze kilka lat temu takie urządzenia, jak lodówka, czajnik, kuchenka mikrofalowa czy też płyta indukcyjna, były traktowane jako niezmiennie byty, o funkcjonalności niemal niezmiętej od dziesięcioleci, powiązane w zasadzie tylko faktem, że są używane w jednym pomieszczeniu. Jednak ostatnio zaczęły pojawiać się rozwiązania, które z takiej grupy niezależnych urządzeń tworzą konglomerat współdziałających i wzajemnie kontrolujących się elementów większej całości – sieci. Takie rozwiązania znamy już np. z samochodów, gdy odebranie rozmowy telefonicznej powoduje automatyczne ściszenie muzyki odsłuchiwanej w tle z głośników, wyjście z pojazdu wyłącza radio i oświetlenie kabiny, szybsza i przez to głośniejsza jazda powoduje zwiększenie głośności telefonu i odtwarza ją itp.

O podobnym rozwiązaniu możemy pomyśleć w kuchni. Na przykład telewizor automatycznie zwiększy głośność, gdy woda w czajniku zacznie się gotować, powodując hałas. Okap kuchenny włączy wentylację, gdy temperatura potrawy w garnku podgrzewanym przez płytę

indukcyjną stanie się na tyle wysoka, że z tego garnka zaczną rozchodzić się „kuchenne” zapachy, które należy wyeliminować. Smartfon odliczy czas i automatycznie wyłączy automat do jajek lub toster itp. Możemy także w takim współdziałaniu pójść nieco dalej – np. w przypadku słabego zasilania energochłonne urządzenia „podzielić” się mocą albo zmniejszając np. intensywność grzania, albo przesuwając momenty uruchomienia w czasie. Urządzenia mogą też wzajemnie żądać wykonania pewnych pomocniczych akcji – np. włączenia wentylacji, jak w przykładzie powyżej, a także tak zwyczajnych, jak synchronizacja zegarów, podświetlenia przycisków w tym samym czasie i kolorze itp.

Głównym elementem odróżniającym kuchnię i samochód, rozpatrywanych jako potencjalne miejsce stosowania sieci transmisji danych, jest zmienność i incydentalność interakcji. Urządzenia pokładowe samochodu niemal się nie zmieniają, a najczęściej stanowią podstawowe wyposażenie pojazdu, obecne od momentu jego zakupu do złomowania w niemal niezmiętej formie (pomijając oczywiście takie sytuacje, jak awarie i naprawy). Natomiast urządzenia kuchenne rzadko są wszystkie kupowane w momencie wprowadzenia się do domu i trwają w niezmiętej formie przez wiele lat. Odwrotnie, najczęściej stopniowo doposażamy kuchnię oraz często wymieniamy te elementy, które się zużyły albo zwyczajnie opatrzyły. Ze względu na rozłożenie zakupów w czasie raczej nie kupujemy do kuchni urządzeń tego samego producenta, zwykle jest to mieszanka typów i modeli. Urządzenia takie prawie nigdy nie są produkowane w dłuższych seriach i ulegają ciągłym zmianom – nawet urządzenie tego samego producenta za rok będzie wyglądać i zachowywać się inaczej. Dodatkowo

**Streszczenie:** W artykule opisano nowy sposób realizacji niewielkich sieci lokalnych, który wykorzystuje adresowanie na bazie typu urządzenia, a nie adresu fizycznego węzła sieci. Taka sieć nie wymaga rejestracji nowych urządzeń, nieustannego sprawdzania obecności i aktywności urządzeń, katalogowania ich możliwości i parametrów dostępowych, pobierania i ustalania dynamicznych adresów w momencie pojawienia się węzłów dynamicznych typu smartfon itp. Zarządzanie siecią jest zdecentralizowane, nie istnieje żaden stały punkt sieci, który periodycznie gromadzi informacje o dołączonych urządzeniach i sprawdza ich stan. Nie ma potrzeby utrzymywania centralnej bazy danych urządzeń. Zestaw urządzeń pracujących w sieci jest dynamiczny, co umożliwia także korzystanie *ad-hoc* z urządzeń personalnych typu smartfon.

Idea przedstawiona w artykule została zaimplementowana z wykorzystaniem urządzeń AGD produkowanych przez firmę Amica SA z siedzibą we Wronkach. Do implementacji wykorzystano transmisję w standardzie WiFi oraz BLE, w trybie mesh, wykorzystując popularne mikrosterowniki firm Nordic Semiconductor i Espressif.

nie wykorzystujemy wszystkich urządzeń jednocześnie i w przemyślaną z góry sposób, a raczej w miarę potrzeb. Zatem można zaryzykować twierdzenie, że w praktyce jedynym punktem wspólnym dla wszystkich tych urządzeń jest służyć człowiekowi – to on pełni rolę synchronizatora i kontrolera, odpowiednio (ręcznie) sterując i wybierając

funkcje, w ten sposób niejako unifikując elementy wyposażenia kuchni.

W klasycznym podejściu do łączenia urządzeń w sieć każdemu urządzeniu nadajemy unikalny identyfikator (może to być np. adres IP lub MAC). Następnie albo łączymy urządzenia w pary lub większe grupy, rejestrując w ich danych konfiguracyjnych identyfikatory „sąsiadów”, albo instalujemy w jakimś komputerze sterującym (PC lub smartfon) oprogramowanie, które umożliwi zarządzanie siecią z zewnątrz. Takie podejście jest w przypadku kuchni bardzo kłopotliwe, gdyż (1) wymaga specjalistycznej wiedzy, zwykle niedostępnej dla szeregowego użytkownika, nawet jeśli dysponuje on dokładną instrukcją instalacji, (2) wymaga przeprogramowania po każdej zmianie urządzenia i (3) nie wykorzystuje wszystkich możliwości urządzeń w kuchni rozumianych jako jedna całość (np. każde urządzenie musimy włączyć osobno, jedno po drugim, każde też musimy osobno wyregulować lub nastawić). Dodatkowo nowej generacji urządzenia, które są wyposażone w możliwości niedostępne dla poprzedniej generacji, pozostają w dużej mierze niewykorzystane, gdyż muszą się często ograniczyć do wcześniejszego zestawu poleceń, aby zachować zgodność.

Celem artykułu jest zaproponowanie alternatywnego sposobu adresowania urządzeń w takiej sieci lokalnej, z wykorzystaniem tak zwanego trybu bezadresowego i transmisji rozplływowej. Zaproponowany sposób rozwiązuje wszystkie opisane powyżej problemy, dodatkowo daje nowe możliwości synchronizacji pracy urządzeń, które zaczynają działać jako zespół, jednocześnie nie rezygnując ze swojej indywidualności.

Organizacja artykułu jest następująca. W drugiej sekcji opisano klasyczne metody adresowania urządzeń w sieci lokalnej, wykazując ich niedoskonałości w kontekście niewielkich sieci tworzonych *ad-hoc* i z dostępem mobilnym. Trzecia sekcja jest poświęcona zastosowaniu transmisji rozplływowej i sieci bezadresowej jako alternatywy dla sieci klasycznej, do sterowania urządzeniami AGD i RTV w zamkniętych i ograniczonych obszarowo pomieszczeniach typu kuchnia. W tej części tekstu opisano hierarchię typów urządzeń

i jej wykorzystanie do celów sterowania. W sekcji czwartej opisano wymagania organizacyjno-techniczne dla sieci testowej, a w piątej pokazano przykłady zastosowań nowego rozwiązania w praktyce, w podziale na sterowanie pracą sieci przez człowieka oraz pracę automatyczną. Ostatnia sekcja podsumowuje wnioski wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych prac i wskazuje kierunki dalszego rozwoju systemu.

## 2. Klasyczna sieć adresowa

W klasycznej sieci transmisji danych każdy węzeł tej sieci (czyli *de facto* każde urządzenie) jest opatrzony unikalnym identyfikatorem. Często taka jednoznaczna identyfikacja dotyczy też funkcji i zasobów udostępnianych przez dane urządzenie, na przykład każdemu plikowi w komputerze nadajemy nazwę, która w połączeniu z nazwami katalogów prowadzących do tego pliku jest unikalna (w ramach systemu plików tego komputera). Jednoznaczność adresowania każdego elementu sieci jest z jednej strony dużą zaletą, gdyż umożliwia deterministyczną pracę sieci (adresowanie staje się procesem jednoznacznym i powtarzalnym). Jednak z drugiej strony to rozwiązanie ogranicza obszar wykorzystania tylko do takich zastosowań, w których wszystkie komunikujące się węzły wzajemnie się znają, więcej, musiały się poznać, zanim rozpoczęły komunikację. Wymaga to poprzedzenia okresu wykorzystywania sieci okresem nauki, w którym węzły rozpoznają swoich „sąsiadów”. Taki okres nauki trzeba powtórzyć po każdej zmianie topografii sieci, gdyż nigdy nie ma pewności, że po zmianach dane identyfikatory są nadal w sieci wykorzystywane. Okres nauki może być uaktywniany okresowo, w ten sposób można w pewnym stopniu dynamicznie dopasowywać metody współpracy urządzeń do ewolucji sieci.

Okres nauki może być w ogólności uaktywniony na dwa sposoby: za pomocą parowania i katalogowania. Parowanie urządzeń to łączenie ich w grupy (najczęściej pary, stąd nazwa metody) i rejestracja identyfikatora urządzenia kooperującego w ramach grupy przez pozostałych jej członków. Dla przykładu, wyłącznik światła może „nauczyć się” identyfikatora lampy, którą

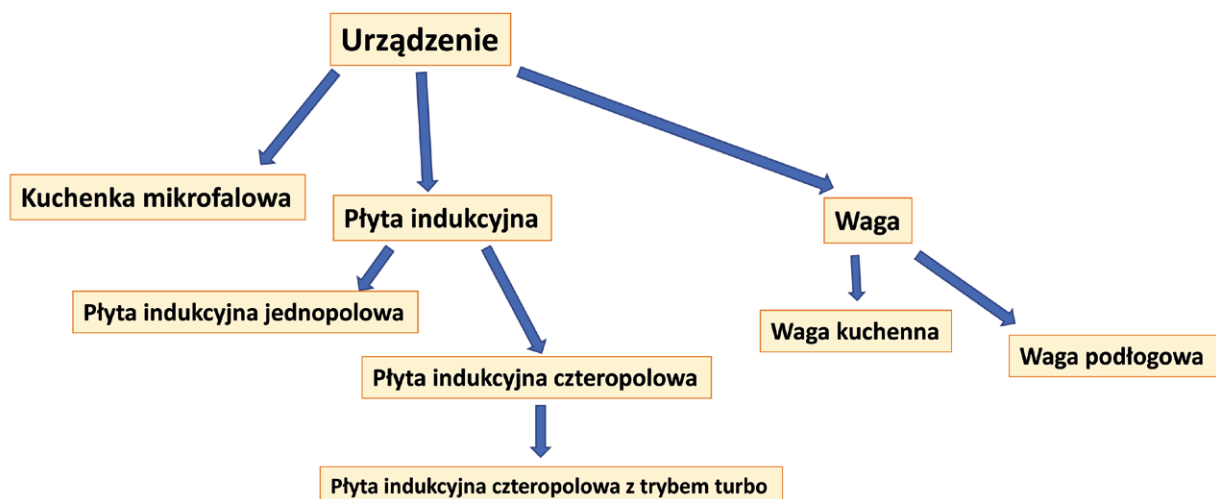
ma sterować. Parowanie z reguły jest procesem manualnym lub co najwyżej półautomatycznym – to człowiek decyduje, które urządzenia ze sobą powiązać. Powiązanie jest „sztywne” – do momentu ponownego powiązania nie może zostać zmienione, w efekcie przestaje działać, gdy krytyczne elementy grupy zostaną z niej usunięte. Na przykład w przypadku wyłącznika opisanego powyżej po uaktywnieniu będzie on nadal starał się włączyć przypisaną mu wcześniej lampę, nawet jeśli zostanie ona usunięta lub zastąpiona nowym urządzeniem.

Okres nauki może także skutkować uaktualnieniem danych w pewnym katalogu. Katalog to miejsce, w którym są przechowywane, w sposób zcentralizowany, dane na temat identyfikatorów i opisów urządzeń dostępnych w sieci. Katalog może być tworzony i zarządzany jednorazowo (np. na etapie instalacji i pierwszego uruchomienia sieci) lub okresowo, z uaktualnianiem na podstawie cyklicznego odpytywania i wyszukiwania urządzeń podłączonych do sieci. Jest to zatem narzędzie znacznie bardziej dynamiczne, ale też generujące znacznie większy ruch sieciowy i przez to zwiększające zużycie energii. Z tego względu w urządzeniach zasilanych bateryjnie jest rzadko stosowane, dominuje raczej w instalacjach zasilanych kablami. Katalog wymaga także silnej jednostki centralnej w postaci rozbudowanego mikrosterownika lub nawet komputera, z własną pamięcią oraz oprogramowaniem sterującym. Takie urządzenie z konieczności pracuje w sposób ciągły, co także wiąże się ze zwiększonym zużyciem energii.

Katalog jest najczęściej wspólny dla wszystkich urządzeń, usług i zasobów sieci, dlatego jego personalizacja lub wykorzystanie kontekstowe jest trudne, najczęściej wymaga dodatkowej warstwy filtrów, które w parametrach wyszukiwania opisują wymagania lub kontekst. Wymaga to też rejestracji i identyfikacji samych użytkowników, którzy, podobnie jak węzły sieci, muszą podlegać silnej i sztywnej identyfikacji.

## 3. Sieć bezadresowa i transmisja rozplływowa

Nasuwa się pytanie, czy wykorzystywanie silnych identyfikatorów węzłów



Rys. 1. Przykładowa hierarchia typów urządzeń

w połączeniu z silnymi identyfikatorami usług i zasobów jest konieczne. Człowiek przecież się nimi bezpośrednio nie posługuje – chce uruchomić czajnik, a nie urządzenie o nazwie np. „MAC 33:27:2D:26:11:35”, którą to nazwę musi odszukać w katalogu, szukając *de facto* funkcji gotowania wody. Zatem z punktu widzenia sterowania jest to nadmiarowy etap – pytanie, czy można z niego zrezygnować, to znaczy, czy można bezpośrednio wyszukać element o nazwie „czajnik”, przekazując do sieci tylko abstrakcyjną nazwę tego elementu, a nie identyfikator urządzenia, które jest skojarzone z tą nazwą. Odpowiedź na to pytanie, twierdząca, jest zawarta w poniższej propozycji nowego rodzaju sieci, w której identyfikatory węzłów zostały zastąpione nazwami funkcji (usług) oferowanych przez urządzenia.

### 3.1. Założenia funkcjonalne

Zakładamy, że opisywane w artykule rozwiązanie znajdzie zastosowanie w niewielkich sieciach, obejmujących urządzenia różnych producentów i w różnych odmianach, ale o pewnej określonej funkcjonalności (np. zestaw: czajnik, lodówka, kuchenka mikrofalowa, płyta indukcyjna oraz okap filtrująco-wentylacyjny), która to funkcjonalność jest w miarę stała w czasie. Zakładamy też, że podstawowym narzędziem do wydawania poleceń i kontroli sieci jest dołączony do niej smartfon. W artykule nie rozważamy takich szczegółów technicznych, jak typ transmisji radiowej, jej

zasięg, szybkość przesyłu danych oraz przepustowość, bezpieczeństwo i szyfrowanie, połączone także z ochroną prywatności itp.

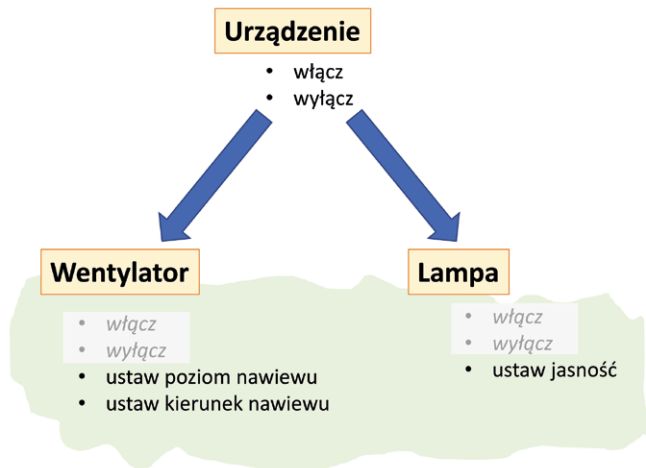
Najważniejszym założeniem jest ograniczenie funkcjonalności sieci do pewnego stałego zestawu funkcji, zwanych usługami, realizowanego przez abstrakcyjne urządzenia o określonych typach. Każdy typ jest charakteryzowany przez zestaw usług, które może realizować, jest także identyfikowany jednoznacznie przez nazwę. Typy są zhierarchizowane, to znaczy urządzenie należące do typu bardziej szczegółowego realizuje wszystkie funkcje nad-typu (rys. 1). Najbardziej ogólnym typem jest typ o nazwie „urządzenie” i minimalnej funkcjonalności, w zasadzie sprowadzającej się do funkcji włączenia i wyłączenia urządzenia.

Dla przykładu, hierarchia płyt indukcyjnych może je dzielić w zależności od liczby pól grzewczych i możliwości pracy w trybie zwiększonej mocy (ang. *boost*). Hierarchia oświetlenia może obejmować typ „urządzenie”, typ „lampa”, podtyp „lampa – regulowana jasność” oraz inną klasyfikację, np. w podziale na lampy sufitowe, stojące i ścienne. Każdy podtyp ma zakres funkcji, które realizuje. Urządzenie może należeć jednocześnie do wielu typów (np. wentylator może być wyposażony w dodatkową lampę), wtedy jego zakres funkcjonalny jest sumą wszystkich typów najbardziej specjalizowanych oraz wszystkich ich nad-typów (rys. 2). Zakres funkcjonalny jest przeszukiwany od typów najbardziej

specjalizowanych do korzenia hierarchii – w przypadku pierwszej wykrytej zgodności jest realizowana zidentyfikowana w hierarchii funkcja, a dalsze przeszukiwanie hierarchii nie jest kontynuowane.

O ile identyfikatory typów są unikalne, o tyle nazwy funkcji przypisanych do danego typu mogą się powtarzać w opisie funkcjonalności innego typu, choć w ramach jednego typu są oczywiście unikalne. W szczególności dotyczy to funkcji podstawowych dla typu „urządzenie”, czyli „włącz” i „wyłącz”<sup>1</sup>, które mogą się objawiać różnym działaniem urządzeń (np. włączy się podświetlenie klawiatury, zostanie uaktywniony ekran, włączy się lampa lub wentylator, jak w przykładzie na powyższym rysunku itp.). Intuicyjnie działanie tych funkcji odpowiada wciśnięciu włącznika głównego danego urządzenia. Podobnie intuicyjnie można rozumieć inne funkcje, np. „ogrzej”, „zważ”, „policz”, „ustaw temperaturę” itp.

Zakładamy, że w ramach jednej sieci komunikują się urządzenia zaufane, których celem jest pomóc człowiekowi, i że te urządzenia są poprawnie skonstruowane (nie popełniają błędów). To założenie oznacza, że nie musimy sprawdzać poprawności semantycznej poleceń na poziomie urządzeń – jeżeli dane urządzenie odbierze polecenie i jego wykonanie leży w zakresie jego możliwości, to przystąpi do jego realizacji. Każde niepoprawne zachowanie powinno być zgłaszane producentowi urządzeń w celu dokonania stosownych



Rys. 2. Ustalenie zakresu funkcjonalnego urządzenia typu „wentylator z lampą” jako sumy funkcji przynależnych do wszystkich jego typów

poprawek. Jednak ta tematyka wykracza poza zakres niniejszego artykułu, w którym skoncentrowano się na opisie transmisji danych, a nie ich interpretacji.

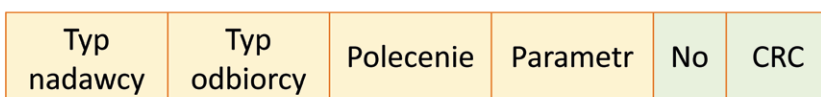
### 3.2. Adresowanie urządzeń na podstawie typu i funkcji

Jak wspomniano wcześniej, w transmisji danych zrezygnowano z adresowania na podstawie unikalnych nazw węzłów. W zamian w niniejszym rozwiązaniu wykorzystuje się adresowanie typów oraz funkcji, to ostatnie może być sparametryzowane (np. „ustaw temperaturę” z parametrem „100” podgrzeje wodę do punktu wrzenia). Skoro nie chcemy indywidualnie zaadresować węzłów sieci jako odbiorców danego komunikatu, to znaczy, że transmisja w sieci jest realizowana wyłącznie w trybie rozptylowym (beadresowym – stąd nazwa sieci proponowana w artykule), kierowanym z założenia do wszystkich węzłów sieci. Nie powoduje to opóźnień w działaniu sieci, gdyż zakładamy, że jest to sieć radiowa, a zatem o współdzielonym i ograniczonym medium komunikacyjnym, wykorzystywanym na wyłączność dla celów tylko jednej transmisji<sup>2</sup>. W tym przypadku potencjalnie każda transmisja radiowa blokuje pasmo. Nawet jeśli byłaby ona przeznaczona tylko dla

jednego węzła, to z konieczności „słuchają” jej zawsze wszystkie pozostałe. Zatem rezygnacja z transmisji indywidualnej na rzecz rozptylowej nie zmienia przepustowości sieci ani konieczności nasłuchiwania całej transmisji przez wszystkie węzły. Odwrotnie, można skorzystać z faktu jednoczesnego odbioru danej wiadomości do celów realizacji transmisji grupowej, gdy wszystkie zainteresowane węzły odbiorą wiadomość dokładnie w tym samym czasie i przez to otrzymają możliwość dokładnej synchronizacji swoich działań.

Transmisja jest realizowana z wykorzystaniem ramek danych o ściśle określonym formacie. Ponieważ w transmisji uczestniczą urządzenia będące *de facto* mikrosterownikami, o ograniczonej możliwości przetwarzania danych i niewielkiej pamięci, w rozwiązaniu zaproponowano nieskomplikowaną strukturę ramki (rys. 3). Ramka składa się z czterech głównych pól oraz dwóch pól pomocniczych:

- typ nadawcy wiadomości;
- typ odbiorcy wiadomości;
- polecenie do zrealizowania;
- parametr polecenia (jeśli jest potrzebny);
- pola pomocnicze: numer wiadomości po stronie nadawcy i suma kontrolna.



Rys. 3. Struktura ramki danych w transmisji rozptylowej

Typ nadawcy charakteryzuje urządzenie, które żąda wykonania pewnej usługi (polecenia) od innych urządzeń. W trybie podstawowym jest to jedynie dana informacyjna, jej dodatkowe wykorzystanie zostanie opisane w dalszej części tekstu.

Typ odbiorcy adresuje węzły sieci, które mają być bezpośrednimi adresatami polecenia. Może to być typ szczegółowy lub ogólniejszy, co skutkuje odfiltrowaniem niektórych węzłów sieci. Najogólniejszy typ „urządzenie” podany jako wartość tego pola, opisany wcześniej, określa wiadomość skierowaną do wszystkich urządzeń. Takie wiadomości najczęściej służą do „obudzenia” i „uśpienia” kuchni oraz synchronizacji pracy wszystkich urządzeń (np. ustalenia aktualnej daty i czasu).

Polecenie jest identyfikatorem szczegółowej funkcji, która ma być wykonana przez urządzenie. Jak wspomniano, nazwy poleceń mogą się powtarzać dla różnych typów urządzeń, niekoniecznie oznaczając podobną w skutkach akcję urządzenia. Polecenie może być sparametryzowane, do tych celów służy następne pole. *Parametr* może być typu liczbowego lub znakowego, w zależności od charakteru polecenia (np. „włącz wentylator”+”bieg nr 3” lub „gotuj”+”5 minut”). Pole to może pozostać puste.

Pola pomocnicze służą do celów technicznych. Unikalny numer wiadomości w połączeniu ze standardową procedurą szyfrowania transmisji powoduje, że atak typu „nagraj i odtwórz” staje się niemożliwy, a także pozwala na odrzucenie duplikatów wiadomości, nadesłanych przez wiele węzłów na skutek opisanej w dalszej części artykułu procedury mapowania różnych kanałów transmisji radiowej (np. Bluetooth i WiFi) oraz wynikającej z powtarzania poleceń w przypadku dużych zakłóceń w komunikacji. Zadaniem *sumy kontrolnej* jest wykrywanie błędów transmisji i ocena poprawności (spójności) danych przesłanych w wiadomości.

W powyższym opisie pominięto szczegóły techniczne, na przykład liczniki długości poszczególnych pól, preambułę transmisji, wynikającą z zastosowanego protokołu fizycznej transmisji radiowej itp.

### 3.3. Rozszerzenia transmisji w trybie rozplýwowym

W ogólności transmisja jest realizowana w trybie bezpołączeniowym, to znaczy węzły odbiorcy w żaden sposób nie sygnalizują, że odebrały, zaakceptowały i zinterpretowały wiadomość. W celu zwiększenia pewności poprawnego odbioru danego komunikatu można go wysłać do sieci kilka razy. Pierwsze poprawne odebranie takiego komunikatu przez dane urządzenie będzie skutkowało tym, że następne jego kopie będą odrzucane, jako że są identyczne z odebrany jako pierwszy. Jednocześnie, jeśli będziemy chcieli w przyszłości wydać jeszcze raz to samo polecenie skierowane do tych samych typów urządzeń, to będzie ono sparametryzowane kolejnym numerem transmisji, a zatem nie zostanie odrzucone.

Możemy także wprowadzić transmisję dwukierunkową jako połączenie dwóch niezależnych transmisji rozplýwowych. W poprzedniej sekcji wspomniano o istnieniu pola określającego typ nadawcy wiadomości. Można to pole wykorzystać jako adresata odpowiedzi, w komunikacie zwrotnym zamieniając niejako miejscami pola nadawcy i odbiorcy wiadomości (rys. 4). W przykładzie zamieszczonym na tym rysunku urządzenie użytkownika (smartfon) chce się dowiedzieć, jaka jest aktualna temperatura urządzeń grzewczych. Jeżeli w sieci jest choć jedno urządzenie tego typu (w przykładzie są to czajnik, kuchenka mikrofalowa i płyta indukcyjna), to do smartfonu dotrze odpowiednie polecenie rejestracji temperatury, ze wskazaniem, którego typu urządzenie tę temperaturę raportuje.

Zwróćmy uwagę na dwa fakty. Po pierwsze, urządzeń, które będą mogły zmierzyć i raportować temperaturę, może być potencjalnie więcej. Jest dość prawdopodobne, że takie urządzenia rozpoczęłyby nadawanie odpowiedzi w tym samym czasie, potencjalnie powodując konflikt w dostępie do medium (pasma transmisji radiowej). Z tego względu każde urządzenie czeka pewien losowy czas, zanim wygeneruje odpowiedź, co rozkłada takie transmisje w czasie i zmniejsza liczbę kolizji.

Po drugie, dane urządzenie może być przypisane do różnych typów. Zasadą

Rys. 4. Przykładowe raportowanie aktualnej temperatury przez urządzenia (zachowano bazową strukturę ramki, gwiazdką oznaczono nieistotną sumę kontrolną)



jest, że urządzenie zawsze się przedstawia (jako nadawnik) typem najbardziej specjalizowanym. Zatem transmisja skierowana do każdego „piekarnika” może spowodować, że odpowie kilka takich urządzeń, ale każde przedstawi się w odpowiedzi inaczej (np. „piekarnik elektryczny” i „gazowy”). W szczególności umożliwia to wykrycie wszystkich urządzeń podłączonych do sieci i sklasyfikowanie ich typów – wystarczy w tym celu wysłać wiadomość „przedstaw się” skierowaną do typu „urządzenie” – każde z urządzeń odeśle w niezależnej transmisji swój najbardziej szczegółowy typ i nazwę. Można też w ten sposób odpytywać urządzenia danego ogólnego typu – na przykład dowiedzieć się, ile jest lamp w kuchni.

Dodatkowo możemy zauważyć, że nie ma żadnego problemu w fakcie, że dane urządzenie dynamicznie zmienia swój typ. Na przykład robot wielofunkcyjny na moment staje się „sokowirówką”, by zaraz potem przedstawiać się jako „mikser”, w zależności od założonych modułów wykonawczych. Pozwala to na tanią i efektywną implementację urządzeń-kameleonów, które, wyposażone tylko w jedną jednostkę bazowo-sterującą, mogą świadczyć różne funkcje w zależności od potrzeb.

### 3.4. Wielokanałowość łączności

W sieciach domowych, obejmujących smartfony i inne urządzenia personalne, w zakresie transmisji radiowej przyjęły się *de facto* dwa standardy: Bluetooth i jego odmiana Bluetooth Low Energy oraz WiFi<sup>3</sup>. Każdy z tych standardów umożliwia efektywną komunikację nawet przy ograniczonych zasobach (pamięć i moc obliczeniowa), zatem w projekcie sieci dla kuchni przyjęto, że oba mogą współistnieć w jednej instalacji. Zakładamy,

że w sieci istnieją węzły, które potrafią się komunikować z wykorzystaniem więcej niż jednego standardu. W takim przypadku zachodzi konieczność przenoszenia komunikatów rozplýwowych z jednego rodzaju sieci do innych. Dla węzłów pośredniczących w takiej operacji (ang. *gateway* lub *bridge*) obowiązuje zasada, że komunikat rozplýwowy odebrany w jednym standardzie łączności jest automatycznie wysyłany wszystkimi pozostałymi kanałami. Czyli np. wiadomość przesłana do smartfonu za pomocą sieci rozległej jest przesyłana do węzłów podłączonych do sieci WiFi, które, jeśli mają taką możliwość, przesyłają tę wiadomość także do sieci Bluetooth. Z drugiej strony, jeśli ta sama wiadomość zostanie odebrana więcej niż jeden raz (bo została rozesłana wieloma kanałami lub powtórzona przez wiele węzłów), jej kolejne kopie będą ignorowane na zasadach opisanych w poprzedniej sekcji. Ignorowanie wiadomości oznacza także, że nie jest ona dalej przekazywana w innym kanale łączności.

### 4. Środowisko testowe

Środowisko testowe zrealizowano z wykorzystaniem rzeczywistych urządzeń kuchennych, produkowanych i dystrybuowanych przez firmę Amica SA z siedzibą we Wronkach. W urządzeniach tych uzupełniono typowe sterowniki o węzły sieci lokalnej. Węzły sieciowe otrzymały możliwość wydawania poleceń dla każdego z dołączonych urządzeń oraz odczytu ich aktualnego stanu. Wykorzystano w tym celu standardowe łącza transmisji szeregowej (UART i 1-Wire).

Środowisko testowe przygotowano na podstawie wymagań, częściowo opisanych już wcześniej:

- sieć jest niewielka, składa się z kilku urządzeń popularnych typów (czajnik, lampa, telewizor, radio, waga, kuchenka mikrofalowa, płyta indukcyjna, okap kuchenny);
- pierwszym dołączeniem (instalacją) urządzeń do sieci steruje człowiek za pomocą odpowiedniej aplikacji w swoim smartfonie; w późniejszej interakcji aplikacja korzysta z takich udogodnień, jak sterowanie głosowe, gestowe, autoprogramowanie w funkcji czasu itp.;
- w sieci nie ma duplikatów urządzeń danego typu szczegółowego;
- urządzenia nie znają swoich „sąsiadów”, lista aktualnie zainstalowanych urządzeń znajduje się wyłącznie w smartfonie użytkownika; jednakże na życzenie każdy węzeł sieci, wydając odpowiednie polecenie, jest w stanie stwierdzić obecność „sąsiada” wybranego typu;
- smartfon zna nie tylko listę urządzeń, ale także ich przybliżoną lokalizację (mierzy siłę odebranego sygnału radiowego, o ile urządzenie takowy nadaje) i dzięki temu wie, które z urządzeń jest „najbliżej”; wykrycie urządzenia „w pobliżu” może skutkować automatycznym uruchomieniem aplikacji sterującej dla tego urządzenia, a przechodzenie od urządzenia do urządzenia może takie aplikacje przełączać między sobą; wykorzystywana w projekcie technologia pozwala na określenie odległości z dokładnością do ok. pół metra.

Jak widzimy, wymagania są ukierunkowane na zarządzanie małą siecią o stosunkowo sztywnej funkcjonalności, ale dynamicznym doborze urządzeń – czyli zachowujemy dużą powtarzalność zachowania sieci jako całości przy jednocześnie dużej zmienności modeli i producentów urządzeń. W sieci dominują polecenia sterowania konkretnym typem urządzenia, z minimalnymi potrzebami zbierania i wymiany danych, nie jest także potrzebna duża precyzja i szybkość przetwarzania informacji. Głównymi celami sieci są (1) zapewnienie sterowania wszystkimi elementami przez człowieka, z wykorzystaniem jego urządzenia personalnego typu smartfon, oraz (2) automatyczna synchronizacja pracy urządzeń w trybie bezpośrednio

niedostrzegalnym dla człowieka – widzi lub czuje on tylko skutki takiej kooperacji, np. wspomniane wcześniej zmiany głośności po wykryciu hałasu lub innych zakłóceń.

Ze względów implementacyjnych i organizacyjnych, a także biorąc pod uwagę koszty i zużycie energii przez mikrosterowniki, w opracowanym środowisku testowym przyjęto pewne założenia upraszczające strukturę sieci. Po pierwsze, założono, że głównym urządzeniem kontaktowym z siecią jest smartfon, wyposażony w moduł łączności z siecią rozległą (sieć domowa lub np. LTE/5G) oraz komunikację WiFi w sieci lokalnej i moduł Bluetooth Low Energy. O ile komunikacja w pierwszych dwóch kanałach jest standardowa, o tyle łączność BLE wymaga pewnych dodatkowych wyjaśnień. W rozwiązaniu przyjęto, że do celów implementacji zostanie wykorzystana sieć BLE Mesh, umożliwiająca wysyłanie krótkich komunikatów w tzw. kanale reklamowym BLE (ang. *marketing channel*). Założono też, że w smartfonie jest zainstalowana aplikacja, która umożliwia sterowanie taką siecią, łącznie z rejestracją nowych urządzeń (ang. *provisioning*). Sieć BLE Mesh jest wykorzystywana wyłącznie w trybie rozpląwowym, to znaczy nie są wykorzystywane indywidualne adresy węzłów tej sieci (nawet jeśli zostały nadane i zarejestrowane przez smartfon podczas instalacji danego urządzenia). Sieć BLE Mesh zapewnia odpowiedni poziom bezpieczeństwa i ochrony prywatności – cała komunikacja jest szyfrowana i niedostępna dla urządzeń z zewnątrz, które nie zostały autoryzowane przez smartfon. Raz dołączonych do takiej sieci urządzeń nie można też „przejąć”, włączając je do innej sieci.

W środowisku testowym wykorzystano moduły BLE Mesh dwóch wiodących światowych producentów: Nordic Semiconductor (seria nRF528\*\*) oraz Espressif (seria ESP32). Drugie z wymienionych sterowników są dwusystemowe – są wyposażone zarówno w moduły BLE, jak i WiFi. Wybrane sterowniki są wykorzystywane jako bramki wejściowo/wyjściowe do sieci. Takie bramki mogą nie tylko przekierowywać komunikaty między węzłami sieci, ale także odpowiadać za łączność z siecią rozległą, gdy

nie jest w pobliżu wykrywany smartfon (np. w celu zdalnej kontroli dowolnego urządzenia działającego w sieci, nie tylko takiego, które jest wyposażone w moduł łączności z siecią rozległą).

Wszystkie urządzenia wyposażone w możliwość transmisji BLE cyklicznie (mniej więcej jednokrotnie na sekundę) emitują wiadomość zawierającą opisujące je dane: typ urządzenia kuchennego, na potrzeby którego działają, jego podstawowy stan (np. informację, czy urządzenie jest włączone i aktywne), adres IP (o ile urządzenie jest dwusystemowe i dołączone do sieci WiFi) wraz z numerem portu komunikacyjnego, a także parametr określający moc nadawnika, umożliwiający odbiorcy ustalenie odległości między odbiornikiem i urządzeniem. Sygnał ten jest uwzględniany przez niektóre urządzenia oraz, przede wszystkim, przez smartfon, o ile ten ostatni znajduje się w zasięgu transmisji radiowej. W efekcie właściciel smartfonu po wejściu do kuchni otrzymuje aktualną informację o zainstalowanych tam urządzeniach i ich typach, a także ich adresy IP do komunikacji przez WiFi. Zauważmy, że sam smartfon pozostaje całkowicie bierny – to urządzenia się do niego zgłaszają, a nie odwrotnie. Użytkownik może wybrać tryb pracy aplikacji – albo automatyczne uruchamianie interfejsu dla danego typu urządzenia po podejściu do niego, albo uruchomienie ekranu zawierającego katalog wszystkich urządzeń razem ze wskazaniem ich stanu. W tym drugim trybie użytkownik może przejść do interakcji z wybranym urządzeniem.

Smartfon może wysłać komunikat do sieci na dwa sposoby. W pierwszym trybie może wykorzystać adresy IP urządzeń, które raportują, że są wyposażone w moduły komunikacyjne WiFi. Wybiera w tym celu adres tego urządzenia, które jest najbliżej (w sensie odległości fizycznej) i przesyła do niego wiadomość. Wiadomość jest automatycznie powtarzana przez to urządzenie w sieci BLE Mesh. Jeśli dotrze ona do dowolnego urządzenia o zgodnym typie (może to być także urządzenie wybrane do transmisji WiFi), to jest przez takie urządzenie interpretowana. Taki sposób komunikacji dotyczy smartfonów, które nie są wyposażone w oprogramowanie do obsługi sieci

BLE Mesh w trybie aktywnym, ale ciągle mogą odczytywać komunikaty rozgłaszane w kanale marketingowym BLE (dotyczy to np. smartfonów firmy Apple).

W drugim trybie (zarezerwowanym dla systemów Android i telefonów z modułami BLE w wersji 4.x i 5.x) smartfon może wysłać wiadomość rozplýwową bezpośrednio w sieci BLE Mesh. W tym przypadku urządzenia dwusystemowe nie propagują rozplýwowo komunikatu w sieci WiFi, gdyż ten sposób transmisji nie zawsze jest dostępny w domowych punktach dostępowych WiFi. Mimo że jest to dość znaczne uproszczenie, to przy założeniu, że każdy węzeł sieci jest wyposażony w moduł transmisyjny BLE Mesh, a tylko niektóre (najczęściej jeden) w oba moduły, nie jest to ograniczeniem funkcjonalnym sieci.

### 5. Przykłady wykorzystania

Rozważmy kilka typowych sytuacji interakcji urządzeń i smartfonu w ramach systemu testowego. W pierwszym przykładzie rozwiązano powszechny i niestety dość uciążliwy problem – synchronizacji zegarów. Coraz więcej urządzeń kuchennych wyświetla i nadzoruje aktualny czas. Jeśli jest to realizowane ręcznie, to nigdy nie udaje się tego zrobić dokładnie, a dodatkowo przy każdym urządzeniu trzeba spędzić kilka minut, wielokrotnie naciskając przyciski nastawy czasu. Proponowany w artykule system „z marszu” rozwiązuje ten problem. Smartfon, pojawiając się w kuchni, odbierze po maksymalnie sekundzie informacje o aktywnych urządzeniach (nie muszą to być urządzenia sygnalizujące „włączenie”). Jeśli wykryje choć jedno takie urządzenie, nada dwa komunikaty z poleceniem „ustaw czas”<sup>4</sup>, opatrzonym parametrem określenia godziny i minuty (np. w formacie „HH:MM”) i „ustaw\_datę” z parametrem „DD/MM/YY”. Od momentu odebrania tej wiadomości wszystkie urządzenia przedstawiają się na ten czas i są tym samym idealnie zsynchronizowane.

Do ustawienia czasu możemy także wykorzystać jeden z modułów dwusystemowych. Każdy z takich modułów odlicza czas od momentu ostatniej synchronizacji. Jeśli upłynął odpowiednio długi czas (w testowanej sieci było to około 15 minut), to moduł pobiera aktu-

alne dane z ustalonego zewnętrznego serwera czasu, a następnie, jeśli otrzymany czas różni się od jego czasu lokalnego, zmienia ten ostatni i wysyła komunikat rozplýwowy do sieci z nowymi danymi. Odebranie tego komunikatu zeruje odliczanie czasu w każdym z modułów. Po upływie następnego okresu czasu „budzi się” losowo kolejny moduł, sprawdza i synchronizuje czas itp. Zauważmy, że wstawienie nowego urządzenia do kuchni spowoduje, że ono także się automatycznie zsynchronizuje z pozostałymi po czasie maksymalnie kilkunastu minut.

Smartfon może także w momencie pojawienia się w kuchni ustalić język (narodowy) komunikacji z urządzeniami, jeśli są one wyposażone w wyświetlacze tekstowe lub graficzne. Wystarczy, że w tym celu wyśle komunikat „ustaw\_język” z parametrem wyboru języka narodowego i miejsca (kraju) interakcji, np. znany z wielu języków programowania ciąg znaków „pl\_PL”. W ciągu ułamka sekundy wszystkie urządzenia przestawią się na ten nowy język, o ile ich interfejs jest na tyle bogaty, że stosowanie języka jest uzasadnione. Zauważmy, że jeśli po pewnym czasie do kuchni wejdzie inna osoba, która posługuje się innym językiem, to jej smartfon zadba o to, żeby wszystkie urządzenia zaczęły się komunikować w tym nowym języku. W obecnej implementacji (testowej) uwzględniono tylko kilka języków (polski, angielski, niemiecki, francuski i hiszpański), ale rozbudowa interfejsów urządzeń pod kątem zwiększenia ich zdolności „lingwistycznych” nie jest dużym problemem.

Osoba, która weszła do kuchni ze smartfonem i włączyła się do sieci, może teraz sterować urządzeniami. Na przykład po włączeniu czajnika smartfon może cyklicznie pobierać z tego urządzenia informacje o aktualnej temperaturze i przewidywanym czasie zakończenia gotowania wody, powiadamiając użytkownika odpowiednimi sygnałami (np. dźwiękowymi) o zmianach stanu albo np. wyświetlając na ekranie klasyczny pasek postępu. Możemy też wprowadzić dodatkowe funkcje zwiększające komfort korzystania z czajnika. Np. zbyt duży hałas generowany przez to urządzenie w końcowej fazie gotowania może

przeszkadzać w słuchaniu muzyki. Jeśli użytkownik sobie tego zażyczy, to smartfon może dynamicznie sterować mocą gotowania, aby taki hałas ograniczyć, wykorzystując w tym celu swój mikrofon do pomiaru i weryfikacji poziomu hałasu. Czajnik może też w końcowej fazie gotowania wysłać polecenie zwiększenia głośności – jeśli w pomieszczeniu znajduje się radio lub telewizor i są one akurat aktywne, to zaczną one odtwarzać dźwięki nieco głośniej. Odpowiednie polecenie od czajnika po zagotowaniu wody przywróci poprzedni poziom głośności.

Jeśli właściciel smartfonu chce ugotować jajko lub przyrządzić tost, to smartfon może stać się automatycznym automatem do jajek lub zegarem dla tostera, który włączy i wyłączy grzałkę za pomocą odpowiednich poleceń w zadanym czasie. Smartfon może też samodzielnie wykrywać np. włożenie chleba do tostera i sterować całym procesem całkowicie automatycznie, na podstawie wcześniej zadeklarowanych przez użytkownika parametrów. Podobnie można sterować automatem do kawy/herbaty, przy czym aktywacja procesu gotowania kawy może być np. zainicjowana podniesieniem smartfonu ze stołu (po obudzeniu), czujką ruchu (która jest dołączona jako jedno z urządzeń do sieci kuchennej), otwarciem drzwi po przyjeździe z pracy do domu itp.

Urządzenia można też uaktywnić we wspomnianym wcześniej trybie komunikacji M2M (ang. *Machine-to-machine*, czyli między urządzeniami). Na przykład po osiągnięciu temperatury 50°C podczas gotowania obiadu na płycie indukcyjnej może ona wysłać komunikat „włącz\_wentylację” z parametrem „50%”. Jeśli w kuchni znajduje się okap, to włączy się on na połowę mocy. Zwiększenie temperatury potrawy zwiększy odpowiednio intensywność wentylacji, aż do maksimum. Takie działanie nie wymaga obecności smartfonu w kuchni – cała komunikacja zamyka się w lokalnej sieci BLE Mesh.

Jeśli kuchnia dysponuje ograniczonym pod względem mocy przyłączem elektrycznym, to urządzenia wysokoprądowe działające przez krótki czas (np. czajnik) mogą przed włączeniem na poziom maksymalny wysyłać komunikat

do sieci o potrzebie takiej akcji. Odbierające taki komunikat inne urządzenia mogą tymczasowo ograniczyć pobieraną przez siebie moc, zwiększając ją z powrotem po komunikacie „odwołującym” zapotrzebowanie na energię. Dotyczy to w szczególności urządzeń działających przez dłuższy czas i o dużej bezwładności, np. lodówek oraz wszelkiego typu grzejników, piekarników i piecyków, dla których chwilowe ograniczenie mocy jest praktycznie bez znaczenia.

## 6. Wnioski i kierunki dalszych prac

W artykule opisano nowy sposób realizacji sieci, który wykorzystuje adresowanie na bazie typu urządzenia, a nie adresu fizycznego węzła sieci. Taka sieć nie wymaga rejestracji nowych urządzeń, nieustannego sprawdzania obecności i aktywności urządzeń, katalogowania ich możliwości i parametrów dostępnych, pobierania i ustalania dynamicznych adresów w momencie pojawienia się węzłów dynamicznych typu smartfon itp. Zarządzanie siecią jest zdecentralizowane, nie istnieje żaden stały punkt sieci, który periodycznie gromadzi informacje o dołączonych urządzeniach i sprawdza ich stan. Nie ma potrzeby utrzymywania centralnej bazy danych urządzeń. Zestaw urządzeń pracujących w sieci jest dynamiczny, co umożliwia także korzystanie *ad-hoc* z urządzeń personalnych typu smartfon.

W sieci rozpyłowo (czyli bezadresowo) są przesyłane komunikaty sterujące pracą urządzeń, które są parametryzowane nie adresem węzła, tylko typem urządzenia, do którego są kierowane. Obowiązuje hierarchia predefiniowanych typów urządzeń, od najbardziej ogólnego typu, z funkcjonalnością ograniczoną do włączenia i wyłączenia (typ „urządzenie”), po typy specjalizowane, odpowiadające typowym urządzeniom kuchennym (lodówka, kuchenka mikrofalowa, piekarnik, płyta indukcyjna, czajnik, także urządzenia „domowe” typu radio, telewizor, lampy w podziale na stołowe, ścienne, sufitowe itp.). Na polecenie wskazujące dany typ reagują wszystkie urządzenia, które mają taki typ zadeklarowany w danych swoich sterowników, bezpośrednio albo jako wynikający z hierarchii typów i reguł

dziedziczenia (w szczególności każdy węzeł należy do najbardziej ogólnego typu „urządzenie”).

Do implementacji sieci wykorzystano transmisję danych w ramach sieci BLE Mesh oraz WiFi. Niektóre węzły sieci są dołączone wyłącznie do sieci BLE, podczas gdy wybrane pracują w obu systemach transmisji. Takie dwusystemowe węzły potrafią przenosić komunikaty rozpyłowe z jednego typu sieci do drugiego. W efekcie wystarczy skierować transmisję do dowolnego węzła sieci (na przykład najbliższego), żeby polecenie dotarło do każdego innego węzła. Sieć BLE Mesh dodatkowo realizuje transmisję typu *multi-hop*, co umożliwia także przesyłanie wiadomości między węzłami, które nie znajdują się w bezpośrednim zasięgu transmisji radiowej. Sieć ta jest także odpowiedzialna za automatyczną eliminację duplikatów wiadomości, potencjalnie przesyłanych wieloma drogami za pośrednictwem losowych węzłów.

Sieć umożliwia przesyłanie wiadomości w dwóch podstawowych trybach: pod kontrolną człowieka (ang. *Human-to-machine*, H2M) i automatycznym (ang. *Machine-to-machine*, M2M). W trybie H2M podstawowym interfejsem kontaktowym z siecią jest specjalizowana aplikacja instalowana w smartfonie. Aplikacja kieruje polecenia do sieci i nie ma możliwości bezpośredniego adresowania węzłów – użytkownik w zamian może wskazać typ urządzenia, którym pragnie sterować. Takie podejście ułatwia zarządzanie i zmiany w sieci – bierzemy pod uwagę abstrakcyjne typy urządzeń kuchennych, a nie ich konkretne modele, producentów, standardy komunikacji itp. Ułatwia to też implementację sterowników urządzeń, które stają się uniwersalne w części komunikującej się ze światem zewnętrznym.

W artykule omówiono tylko podstawy adresowania urządzeń w sieci bezadresowej, pomijając w tym opisie szczegóły organizacyjne i techniczne. W szczególności nie omówiono metod unifikacji i standaryzacji typów oraz poleceń i ich parametrów, a aktualna implementacja jest ograniczona do urządzeń produkowanych przez firmę Amica SA.


W artykule nie omówiono także dostępu zdalnego do urządzeń, który jest

jak najbardziej możliwy, jeśli tylko co najmniej jedno urządzenie jest wyposażone w dwusystemowy moduł łączności, sparowany z domowym punktem dostępowym WiFi. Taki dostęp wymaga jednak wykorzystania specjalizowanego serwera jako pośrednika (ang. *proxy*) w dostępie do sieci z zewnątrz i ze względu na obszerność tematyki musiałyby zostać opisane w ramach innej publikacji.

Opisane w artykule badania zostały sfinansowane w ramach umowy o współpracy między Uniwersytetem Ekonomicznym w Poznaniu i firmą Amica SA z siedzibą we Wronkach.

## Przypisy

1. Dla uproszczenia opisu posługujemy się identyfikatorami typów urządzeń i funkcji przyjaznymi dla człowieka. W rzeczywistej implementacji są to liczby, co znacznie upraszcza implementację oraz protokoły transmisji danych, opisane w dalszej części artykułu.
2. Abstrahujemy tutaj od fizycznego podziału pasma i możliwości transmisji w szczelinach czasowych lub częstotliwościowych, co w pewnym stopniu pozwala na zrównoleglenie wielu transmisji – jest to jednak szczegół techniczny, gdyż *de facto* i tak każda szczelina jest rezerwowana na wyłączność.
3. Pomijamy tu technologie niejako zarezerwowane dla mikrosterowników, takie jak ZigBee, Lora, zWave itp., skupiając się tylko na tych standardach, które są powszechnie dostępne z poziomu typowego smartfonu. Jednak tok myślenia pokazany w tej sekcji możemy zastosować praktycznie do dowolnego standardu, pod warunkiem wykorzystywania w sieci co najmniej jednego sterownika, który ma możliwość komunikacji w takiej sieci obok standardowych łączy typu BT/BLE lub WiFi.
4. Posługujemy się tu nazwami intuicyjnymi, przeznaczonymi dla czytelnika tego tekstu. W rzeczywistości identyfikatory typów i poleceń, a także formaty ich parametrów są inne, ze względu na konieczność skondensowania informacji w kanale marketingowym BLE Mesh.

 Jarogniew Rykowski – Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, e-mail: rykowski@kti.ue.poznan.pl; Wojciech Światała – Amica SA; Tomasz Jenek – Amica SA