

Elektronika

wkład merytoryczny do strategii oraz założeń

Polska Encyklopedia Nauki

dr hab. inż. Piotr Bilski, prof. uczelni

e-mail: pbilski@ire.pw.edu.pl

Instytut Radioelektroniki i Techniki Multimedialnych

Politechnika Warszawska

Warszawa, 2019 r.

Spis treści

1. Wstęp	2
2. Rys historyczny	3
3. Mikro- i nanoelektronika	5
4. Optoelektronika	7
5. Systemy pomiarowe	8
6. Radioelektronika, telekomunikacja i techniki mikrofalowe	10
7. Układy i systemy elektroniczne	12
8. Inżynieria biomedyczna	13
Wybrana literatura	14

1. Wstęp

Współczesna elektronika jest jedną z najważniejszych dziedzin techniki, umożliwiającą rozwój innych domen i intensywnie w nich wykorzystywaną. Stosunkowa pochodna fizyki przyczyniła się do stworzenia współczesnej cywilizacji technicznej, ułatwiając rewolucję informacyjną, która miała miejsce pod koniec XX oraz na początku XXI wieku. Elektronika została wyodrębniona z nieco starszej dziedziny, tj. elektrotechniki. Obie dziedziny mają wiele cech wspólnych (jedną z nich jest wykorzystanie przepływu prądu elektrycznego jako nośnika informacji), jednak obecnie wyróżnić również można cechy charakterystyczne każdej z nich. Niezwykle intensywny rozwój przyczynił się do powstania wielu obszarów specjalistycznych, obejmujących konkretną grupę zagadnień. Poniżej przedstawiono poszczególne grupy zagadnień oraz aktualny stan wiedzy w każdej z nich.

Elektronika jako samodzielna dziedzina jest rozpatrywana od lat 20. XX wieku, kiedy to pojawiły się elementy umożliwiające sterowanie przepływem prądu elektrycznego (a co za tym idzie, przesyłaniem informacji): lampy elektronowe (diody, triody i kolejne, bardziej skomplikowane konstrukcje). Znalazły one zastosowanie w ówczesnie projektowanych urządzeniach (np. odbiornikach radiowych, czy pierwszych maszynach liczących). Od tamtego czasu wprowadzono liczne usprawnienia, szczególnie jeśli chodzi o miniaturyzację oraz pola zastosowań. Prawdziwy rozkwit elektroniki był jednak możliwy dzięki wykorzystaniu do ich konstrukcji materiałów półprzewodnikowych, z których zbudowano tranzystory, a później układy scalone. Aktualnie elektronika obecna jest we wszystkich dziedzinach techniki, stanowiąc nieodłączną część urządzeń, maszyn i procesów. Bez wątpienia to jej zawdzięczany jest postęp technologiczny w drugiej połowie XX wieku, umożliwiający stworzenie nowych aparatów diagnostycznych w medycynie, czy loty kosmiczne. Nośnikiem informacji są tutaj ładunki elektryczne – elektrony, których przepływ w półprzewodniku może być sterowany. Dzięki temu możliwe jest budowanie na tej bazie prostszych lub złożonych systemów komputerowych.

Ponieważ elektronika jest kluczową dziedziną techniki, niezbędną do rozwoju innych domen, konieczne jest w ramach przygotowywanej encyklopedii usystematyzowanie ogromnej wiedzy z nią związanej oraz przedstawienie kluczowych zagadnień, szczególnie istotnych z punktu widzenia dalszego rozwoju oraz jego wsparcia finansowego i organizacyjnego przez instytucje państwowe i międzynarodowe.

W następnych punktach, po krótkim wprowadzeniu historycznym, zostaną przedstawione główne dziedziny elektroniki, których dokładniejszy opis znajdzie się w kolejnych tomach Polskiej Encyklopedii Nauki. Oprócz krótkiego przedstawienia istoty każdej dziedziny zostaną omówione najważniejsze osiągnięcia oraz trendy rozwojowe. Najważniejsze działy elektroniki obejmują zatem **mikroelektronikę, radioelektronikę, optoelektronikę, systemy pomiarowe, inżynierię biomedyczną**

oraz **układy i systemy elektroniczne**. Tym samym przewidywane jest sześć tomów, opisujących przedstawione zagadnienia.

2. Rys historyczny

Ze względu na ogromną pojemność dziedziny, krótka jej historia siłą rzeczy zawierać musi fakty dobrane subiektywnie, powinny one jednak dawać pojęcie na temat ogromnej rewolucji technologicznej, jaka się dzięki elektronice dokonała. Początków współczesnej elektroniki należy szukać w drugiej połowie XVIII oraz XIX wieku, kiedy to doszło do kilku znaczących odkryć dotyczących pierwiastków, do dzisiaj służących do masowej produkcji elementów elektronicznych, w szczególności krzemu (zidentyfikowanego przez Lavoisiera w 1787r.) oraz germanu (odkrytego przez Winklera w 1886 r.). Pierwsze układy elektroniczne wykorzystywały jednak lampy próżniowe, których pierwszy przedstawiciel, tj. dioda (wyposażona w dwie elektrody) został opracowany w 1904 r. Elementy te szybko znalazły zastosowanie w szeregu dziedzin, takich jak radio, telewizja, radiolokacja, techniki zapisywania i odtwarzania dźwięku itp. Pierwsza połowa XX wieku oznaczała dominację tych elementów w układach elektronicznych, wliczając w to nawet pierwsze komputery, np. ENIACA (którego konstrukcja obejmowała ok. 17 tys. lamp próżniowych). Już jednak w latach 30. Opracowano koncepcję tranzystora, który po raz pierwszy wytworzono w 1947 r. (za to odkrycie Amerykanie, John Bardeen oraz Walter Brattain uzyskali nagrodę Nobla z fizyki). Elementy te szybko weszły do masowej produkcji, zastępując lampy elektronowe w większości zastosowań (szczególnie jeśli chodzi o radio i telewizję). Należy podkreślić, że były to tranzystory bipolarne, wykorzystywane głównie jako elementy wzmacniające w analogowych obwodach elektronicznych. Rewolucja związana z upowszechnieniem się komputerów była możliwa dzięki opracowaniu w 1959 r. tranzystorów polowych (tzw. MOSFET – Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), które można było wykorzystać jako przełączniki, decydujące o przepływie (lub nie) prądu. Ten typ tranzystora do dzisiaj wykorzystywany jest jako budulec cyfrowych układów elektronicznych (takich jak kalkulatory lub komputery) i pełni wiodącą rolę w większości urządzeń. Dążenie do zwiększenia mocy obliczeniowej układów przy zachowaniu rozmiaru maszyn zostało zwieńczone opracowaniem pierwszych układów scalonych (tzn. stanowiących całość, bez możliwości wyróżnienia elementów dyskretnych w ich strukturze). Pierwsze dwa takie układy (jeden na bazie krzemu, drugi - germanu) powstały w 1957 r. Warto tutaj wspomnieć o osiągnięciu Jana Czochralskiego, którego metoda uzyskiwania monokryształów krzemu stała się jednym z głównych narzędzi wykorzystywanych do produkcji układów scalonych. Za swoje osiągnięcia, polski uczyony został w 2019 r. uhonorowany tzw. kamieniem milowym organizacji IEEE. Połączenie nowej technologii z tranzystorami polowymi zaowocowało pierwszym mikroprocesorem (czyli jednostką centralną komputera, której wszystkie elementy znajdują się w jednym kawałku materiału), wyprodukowanym w firmie Intel w 1971 r. Autorem projektu był Ted Hoff, zaś układ (oznaczony jako

Intel 4004) zawierał 2250 tranzystorów. Od tego momentu rozpoczął się wyścig pomiędzy firmami specjalizującymi się w produkcji układów tego typu (głównie potentatów Doliny Krzemowej, tj. firm typu Intel, AMD, Cyrix, czy IBM), trwający zresztą do dziś. Jego celem jest stworzenie najbardziej skomplikowanego procesora przy zachowaniu ustalonych rozmiarów fizycznych. Obecnie, dzięki postępom miniaturyzacji, cyfrowe układy scalone odpowiadają za praktycznie wszystkie obliczenia wykonywane przez maszyny w tak szerokich zastosowaniach, jak transport, medycyna, przetwórstwo spożywcze, czy przemysł odzieżowy.

Znaczące osiągnięcia elektroniki dotyczą jednak nie tylko systemów komputerowych, ale również (a może przede wszystkim) technologii komunikacyjnych, wykorzystujących transmisję fal elektromagnetycznych o stale rosnących częstotliwościach. Ich rozwój (wliczając w to globalną sieć komputerową – Internet, ale również sieci bezprzewodowe, takie jak standard WiFi, czy sieci telekomunikacji mobilnej, takie jak GSM, czy LTE) miał miejsce w drugiej połowie XX w. i trwa do dziś. Podwaliny globalnej sieci komputerowej powstały w 1973 roku w firmie Xerox, gdzie powstał standard Ethernet, do dzisiaj wykorzystywany w komputerowych sieciach przewodowych. Z kolei sieci bezprzewodowe na częstotliwościach RF (ang. Radio Frequency) 2.4 GHz oraz 5 GHz zostały wprowadzone w 1998 r. Z kolei komórkowe sieci telefoniczne były implementowane już od 1981 r. w krajach skandynawskich (tzw. pierwsza generacja), choć pierwsze propozycje wprowadzenia tej technologii miały miejsce tuż po 2. Wojnie Światowej. W 1987 r. rozpoczęto implementację sieci komórkowej drugiej generacji (GSM), zaś od 1998 r. rozpoczęto implementację telefonii trzeciej generacji – UMTS. Jej następcą jest LTE (wprowadzany od 2008 r.), zaś obecnie oczekiwane jest wprowadzenie sieci telefonii piątej generacji (na razie znanej pod nazwą 5G). Kolejne generacje różniły się przede wszystkim możliwościami przesyłu danych komputerowych, obecnie telefon komórkowy (bardziej znany jako smartfon) pełni nie tylko funkcję tradycyjnego aparatu do prowadzenia rozmów głosowych, ale przede wszystkim komputera udostępniającego mobilny dostęp do Internetu. Z drugiej strony projektowano urządzenia zdolne do komunikacji za pośrednictwem opisanych sieci. Pierwszy smartfon powstał w 1992 r., jednak już w 2010 r. sprzedaż tych urządzeń na świecie przekroczyła 500 mln egzemplarzy. Ocenia się, że obecnie liczba smartfonów w użyciu jest większa, niż klasycznych komputerów (zarówno stacjonarnych, jak i mobilnych).

Rozwój technik transmisyjnych dotyczył również przesyłania danych za pomocą światła. Zjawisko refrakcji, dzięki któremu możliwe jest przesyłanie informacji przez fotony, zostało odkryte już w 1840 r. Na praktyczne wykorzystanie światłowodów – specjalnych włókien szklanych – trzeba było poczekać ponad sto lat, do lat pięćdziesiątych XX w. Pierwszy system transmisji danych za pomocą tego wynalazku został zaimplementowany w 1965 r. Od tego czasu nastąpiła seria udoskonaleń, mająca na celu zwiększenie zasięgu światłowodów oraz prędkości przesyłania informacji. Ze światłowodami

związany jest również inny wynalazek optoelektroniczny, tj. laser. Umożliwił on bowiem skupienie wiązki światła na tyle, aby można było wprowadzić ją z jednej strony do światłowodu oraz odebrać na drugim końcu. Ponadto lasery stosowane są powszechnie do odczytu i zapisu danych na dyskach optycznych (standard CD-Audio z 1980 r. lub DVD z 1995 r.), czy w medycynie (w dermatologii, chirurgii itp).

Innym ważnym odkryciem, tym razem w dziedzinie radiowej był radar, opracowany w formie patentu już w 1904 r. Jego wojskowe zastosowanie miało miejsce podczas I Wojny Światowej jako systemu wczesnego ostrzegania przed lotnictwem przeciwnika. Kolejne wynalazki pozwalały na zwiększenie zasięgu oraz precyzji tych urządzeń, wykorzystywanych już nie tylko w celach militarnych, ale również cywilnych (meteorologia, żegluga pasażerska, lotnictwo cywilne itp.).

3. Mikro- i nanoelektronika

Mikroelektronika jest obszarem elektroniki zajmującym się zmniejszaniem geometrycznych rozmiarów układów i elementów elektronicznych. W szczególności dotyczy to podstawowych elementów, takich jak tranzystor (zarówno bi-, jak i unipolarny). Od lat 50. XX wieku obwody elektroniczne występują w postaci układów scalonych, tj. wykonanych w postaci jednego kawałka materiału, traktowanego jako całość. Praktycznie wszystkie urządzenia zawierające obecnie elementy elektroniczne posiadają je w tej właśnie postaci. Mikroelektronika jest odpowiedzialna za pojawienie się oraz ciągły rozwój technologii wytwarzania układów coraz mniejszych i szybszych, czego dowodem jest ciągły postęp w dziedzinie procesorów komputerowych. Istotne osiągnięcia w tej dziedzinie dotyczą przede wszystkim kolejnych poziomów technologicznych umożliwiających produkcję coraz bardziej upakowanych układów. Pomimo znaczących zasług elektroniki analogowej do rozwoju telekomunikacji i technik obliczeniowych, aktualny rozwój związany jest głównie z elektroniką cyfrową, która umożliwiła stworzenie szybkich maszyn liczących. Elektronika analogową zajmuje szereg nisz, takich jak np. urządzenia audiofilskie (wiele z nich, bardzo kosztownych, wciąż wykorzystuje wzmacniacze lampowe). Obecne osiągnięcia mikroelektroniki obejmują przede wszystkim uzyskiwanie kolejnych poziomów procesów technologicznych, dzięki którym powstają najbardziej zaawansowane procesory (takie, jak Intel Core lub IBM Power). Aktualnie standardem staje się proces 10nm, wiele firm próbuje zaś osiągnąć poziom 7nm. Wraz ze zbliżaniem się do barier fizycznych (wielkości pojedynczych atomów) działania te stają się trudniejsze. Z tego powodu coraz częściej stosuje się rozwiązania na poziomie pojedynczych atomów lub cząstek, a zatem układów wielkości rzędu pojedynczych nanometrów. Jednym z najnowszych osiągnięć jest zastosowanie węglowych nanorurek (ang. carbon nanotube) do budowy procesorów, czego najnowszym przykładem jest 16-bitowy układ RV16XNano,

charakteryzujący się niespotykaną dotąd skalą scalenia elementów elektronicznych w układzie cyfrowym [1].

Dodatkowo efektem rozwoju mikroelektroniki jest upowszechnienie się prostszych systemów obliczeniowych, które jednak wydzielają mało ciepła oraz wymagają prądu zasilającego o niewielkim natężeniu, są zatem energooszczędne. Dzięki temu rozwinęła się dziedzina systemów wbudowanych, umożliwiając sterowanie dowolnym systemem (urządzeniem, układem lub procesem) za pomocą specjalizowanych systemów komputerowych, takich jak mikrokontroler, czy programowalny sterownik logiczny (ang. Programmable Logic Controller). Możliwości najbardziej zaawansowanych komputerów tego typu obejmują przetwarzanie tysięcy sygnałów jednocześnie, pełną rekonfigurowalność umożliwiającą wybór rodzaju wielkości mierzonych oraz niezawodność pozwalającą na nieprzerwaną pracę przez kilka lat.

W obrębie zainteresowań mikroelektroniki znajdują się również badania materiałów, z których wykonywane są elementy elektroniczne. Jak wcześniej przedstawiono, podstawowymi półprzewodnikami są krzem i german, często jednak wykorzystuje się do tego celu stopy różnych metali, z których najbardziej znaczący jest arsenek galu (wykorzystywany do produkcji np. procesorów dla wysokowydajnych komputerów, np. Intel Itanium). Pomimo iż produkcja takiego układu jest znacząco droższa, właściwości materiału zawiązką ją rekompensują – szacuje się bowiem, iż układy zbudowane z tego stopu będą w stanie pracować nawet z częstotliwościami rzędu 250GHz (co przy obecnie uzyskiwanych wynikach procesorów krzemowych rzędu 4-5GHz byłoby ogromnym postępem). Ponadto, ze względu na zbliżanie się do ograniczeń fizycznych dla procesu miniaturyzacji oraz dążąc do minimalizacji wydzielania energii w postaci ciepła, poszukuje się innych materiałów, wydajniejszych pod wymienionymi względami. Do takich zalicza się np. grafen (będący płaską strukturą zbudowaną z atomów węgla), ale również germanen (analogiczna struktura dla atomów germanu) [2]. Obecnie znane są metody taniej produkcji takich materiałów, otwarta jednak pozostaje ścieżka dla ich wykorzystania w nanoelektronice.

Innym istotnym aspektem mikroelektroniki są techniki produkcji układów scalonych. Obecnie powszechnie stosuje się do tego celu np. wiązanie cząsteczkowe (ang. molecular bonding), a jednym z ważniejszych osiągnięć, wykorzystywanym powszechnie podczas tworzenia systemów komputerowych, stał się montaż powierzchniowy. Obecnie procesy wytwórcze układów scalonych są niezwykle skomplikowane, umożliwiając jednak tworzenie złożonych układów wielowarstwowych, wliczając w to komputery jednoukładowe (mikrokontrolery), czy układy typu System on a Chip (SoC).

Ostatnim aspektem współczesnej mikroelektroniki są systemy wbudowane, czyli miniaturowe systemy komputerowe, charakteryzujące się niskimi wymaganiami pobieranej energii oraz wysokim stopniem

integracji elementów komputera w jednym układzie scalonym. Istnieją już zatem komputery wykorzystujące do działania baterie słoneczne, będąc zdolne do wykonywania prostych zadań pomiarowo-sterujących.

4. Optoelektronika

Jest to dziedzina elektroniki, w której głównym celem badań jest połączenie klasycznych układów elektronicznych z elementami optycznymi, takimi jak światłowody, czy lasery. Nośnikiem informacji jest tutaj światło, które w przeciwieństwie do prądu elektronowego jest bardziej odporne na szумы. Dzięki temu możliwe jest przesyłanie większej ilości informacji w tym samym czasie. Łącza światłowodowe są wykorzystywane przede wszystkim do tworzenia globalnej infrastruktury komunikacyjnej Internetu, zapewniając prędkości rzędu (w zależności od odległości, na której odbywa się komunikacja) nawet 100Gb/s – jest to wielokrotnie więcej, niż oferują dotychczas wykorzystywane standardy sieci komputerowej (miedziane przewody skręcone w kilka par – od jednej do czterech). Łącza światłowodowe sukcesywnie zastępują inne przewodowe połączenia lokalnej i metropolitalnej sieci komputerowej, stając się standardem dla sieci rozległych. Należy przy tym zauważyć, że technologie światłowodowe zapewniają większą prędkość, niż wszelkie obecnie stosowane rozwiązania w zakresie komunikacji bezprzewodowej (wliczając w to najnowsze standardy IEEE802.11ac).

Drugim istotnym obiektem badań optoelektroniki jest konstrukcja i konfiguracja laserów. Urządzenia te są w stanie emitować skupioną wiązkę fotonów, które mogą być wykorzystywane zarówno do przesyłania informacji, jak i np. cięcia wybranych powierzchni. Istotnym celem rozwoju technologii laserowych jest stworzenie urządzeń generujących światło o odpowiednim skupieniu wiązki oraz wybranej długości fali. To ostatnie jest szczególnie istotne np. w konstrukcji komputerowych pamięci optycznych (odczyt i zapis w napędach typu CD, DVD oraz BluRay).

Lasery wykorzystywane mogą być również do innych dziedzin techniki, takich jak fotogrametria. Jednym z najnowszych urządzeń służących do mapowania otoczenia jest LIDAR, czyli urządzenie będące odpowiednikiem radaru, wykorzystując jednak widzialne światło lasera. Charakteryzuje się ono wysoką dokładnością (m.in. dzięki zastosowaniu precyzyjnych laserów azotowych, czy ekscymerowych), która może zostać wykorzystana do tworzenia mapy terenu, w którym radary nie mogą zostać wykorzystane (np. w sieci tuneli w kopalni).

Innym urządzeniem optoelektronicznym powszechnie wykorzystywanym w licznych dziedzinach życia są elementy świecące, takie jak diody elektroluminescencyjne (ang. Light Emitting Diode - LED), czy wyświetlacze ciekłokrystaliczne (ang. Liquid Crystal Display - LCD). Są one powszechnie wykorzystywane w urządzeniach wykorzystywanych w domu, takich jak np. telewizory. Te ostatnie

wykorzystują zaawansowane matryce zbudowane z ciekłego kryształu, zapewniające większą rozdzielczość i jakość obrazu, niż ich wcześniejsze, zarówno analogowe, jak i cyfrowe odpowiedniki.

Pochodną prac nad połączeniem klasycznych układów elektronicznych oraz optycznych jest również idea komputera optycznego, czyli maszyny liczącej zbudowanej wyłącznie przy pomocy elementów przetwarzających światło. Do budowy takiego komputera potrzebne są trzy komponenty, wszystkie już opracowane jako niezależne urządzenia: tranzystor optyczny, pryzmat oraz pamięć holograficzna. Obecnie prowadzone są prace nad połączeniem ich w większe systemy. Ze względu na możliwość rozszczepiania promienia świetlnego do miliardów wiązek przetwarzanych równolegle, komputer taki mógłby charakteryzować się masową równoległością obliczeń, czym nie mogą szczyścić się żadne ze współcześnie produkowanych komputerów [3].

Obecnie prowadzone są również intensywne badania nad pamięciami holograficznymi jako niezależnymi układami pamięci, które mogłyby być wykorzystane przez współczesne komputery. Najbardziej obiecującą technologią jest obecnie Holographic Versatile Disk, czyli potencjalny następca nośników BluRay, górujący nad nimi pojemnością, która sięgać może nawet 6TB (w porównaniu z maksymalnie 17GB oferowanymi przez napędy BD).

Dodatkowo elementy optyczne i przetwarzające światło stanowią potencjalnie kluczową technologię do budowy komputerów kwantowych, które charakteryzować się będą znacząco większą efektywnością obliczeń od maszyn budowanych obecnie [4].

5. Systemy pomiarowe

Z elektroniką związane są od samego początku procesy pomiarów elektrycznych (również obejmując pomiary wielkości nieelektrycznych). Ponieważ technologie elektroniczne stały się standardem wykorzystywanym we wszystkich dziedzinach życia, wszelkiego rodzaju pomiary również wymagają wykorzystania elementów elektronicznych. W szczególności intensywnie rozwijają się komputerowe systemy pomiarowe, które wykorzystują systemy mikroprocesorowe do akwizycji, przechowywania oraz przetwarzania mierzonych wielkości. Do najważniejszych trendów rozwojowych należą tutaj cztery osiągnięcia:

- a. Czujniki pomiarowe. Rozwój technologii umożliwił intensywny rozwój małych, niezwykle dokładnych oraz wszechstronnych układów pomiarowych. Wykorzystanie efektu piezoelektrycznego pozwoliło na stworzenie niezwykle małych urządzeń, które mogą być umieszczone na dowolnych przedmiotach, np. butelkach z wodą, czy ubraniach. Wiodącym trendem są obecnie czujniki inteligentne (ang. smart sensors), które charakteryzują się nie tylko możliwością pomiaru dowolnej wielkości fizycznej, ale również przedstawienia jej w postaci

cyfrowej, możliwej do przesyłania za pomocą sieci komputerowej. Uzyskanie niewielkich rozmiarów urządzeń pomiarowych było możliwe dzięki zastosowaniu technologii MEMS (ang. Micro Electro Mechanical Systems), prowadzącej do uzyskiwania czujników przyspieszenia (tzw. akcelerometrów), ciśnienia, przepływomierzy, czy żyroskopów. Dobrym przykładem możliwości tego typu układów jest zastosowanie ich we współczesnych smartfonach, np. do realizacji mikrofonów. Czujniki są obecnie intensywnie rozwijane w wielu kierunkach. Najważniejsze to (oprócz już wymienionych czujników inteligentnych) czujniki wykorzystujące LIDAR, tworzenie komitetów głosujących zestawu czujników (ang. sensor fusion), a także implementacja nowych biosensorów, wykorzystywanych np.: w służbie zdrowia. Ciekawym zastosowaniem czujników, np. wykorzystujących hybrydowe złącza magnetyczno-piezoelektryczne do pozyskiwania energii z otoczenia (ang. energy harvesting), co może być wykorzystane np. w trakcji elektrycznej do odzyskiwania energii elektrycznej użytkowanej przez lokomotywy.

- b. Rozproszone systemy pomiarowe. Upowszechnienie się sieci komputerowych umożliwiło rozszerzenie obszaru działania komputerowych systemów pomiarowych z pojedynczego pomieszczenia na dowolną lokalizację przemysłową, nie wyłączając Internetu. System rozproszony składa się co najmniej z dwóch węzłów połączonych medium komunikacyjnym. Dzięki temu możliwe jest dokonywanie pomiarów przez specjalizowane urządzenia w wielu miejscach, zbieranie tych informacji i przetwarzanie ich i podejmowanie decyzji np. w centralnym węźle zarządczym. Możliwości wbudowania w każde urządzenie karty sieci komputerowej (przewodowej lub bezprzewodowej) sprawiły, że ogromna liczba urządzeń (niekoniecznie pomiarowych, również przeznaczonych dla użytkowników końcowych, takich jak produkty AGD typu lodówka, pralka, czy telewizor) jest na stałe podłączona do Internetu. Technologia Internet of Things (IoT) umożliwi masowe przetwarzanie informacji przez każdy taki moduł w sposób zautomatyzowany, bez udziału człowieka.
- c. Wirtualne przyrządy pomiarowe są rezultatem rozwoju komputerów ogólnego przeznaczenia, które można wyposażyć w zaawansowany, specjalizowany sprzęt do akwizycji danych w postaci kart rozszerzeń lub zewnętrznych modułów. Przyrząd taki stanowi połączenie sprzętu (konfigurowanego i dobieranego przez projektanta) oraz oprogramowania, którego możliwości zależą od inwencji programisty. Tym samym możliwe jest stworzenie rekonfigurowalnego systemu pomiarowego, którego możliwości zależą głównie od napisanego programu.
- d. Wbudowane systemy pomiarowe – ze względu na miniaturyzację sprzętu do akwizycji danych oraz mikroprocesorów, możliwe stało się wprowadzenie systemów pomiarowych do struktury urządzeń oraz procesów. Dzięki wykorzystaniu systemów cyfrowych wysokiej skali integracji (takich jak mikrokontrolery, czy procesory wbudowane) możliwe jest wykorzystanie komputerowych systemów do pomiarów oraz automatycznego sterowania. Technologie

cyfrowe praktycznie zastąpiły wcześniejsze metody realizacji zadań pomiarowych. Dobrym przykładem jest rozwój maszyn elektrycznych sterowanych cyfrowo. Z drugiej strony, ze względu na zwiększenie świadomości na temat szkodliwości nadmiernego zużycia energii elektrycznej rozwijane są systemy pomiarowe przeznaczone do instalacji w mieszkaniach w celu monitorowania, kiedy poszczególne urządzenia są włączane i wyłączane oraz dokonujące na podstawie analizy zagregowanych przebiegów prądu i napięcia ich identyfikacji oraz szacowania zużycia energii elektrycznej (tzw. Non-Intrusive Appliance Load Monitoring - NIALM). Do realizacji zadania potrzebne są szybkie układy próbkujące sygnały elektryczne oraz małych rozmiarów układy cyfrowe, zdolne do realizacji obliczeń [5].

6. Radioelektronika, telekomunikacja i techniki mikrofalowe

Jednym z najbardziej zaawansowanych zastosowań elektroniki jest przesyłanie informacji za pomocą fal elektromagnetycznych (nazywanych najczęściej falami radiowymi -RF). Radioelektronika jest jedną z najstarszych z omawianych tu dziedzin, ponieważ efekty jej rozwoju stosowane były do konstrukcji nadawczo-odbiorczych aparatów radiowych i telewizyjnych (wówczas jeszcze wyposażonych w lampy próżniowe, później jednak zastąpione tranzystorami), ale także radarów, służących najczęściej do wykrywania obiektów lecących po niebie (choć wykorzystywane są również np. przez geotechników i geologów do skanowania podłoża gruntu - tzw. georadary). Najistotniejsze kierunki badań radioelektroniki obejmują:

- a. Rozwój zastosowań telekomunikacyjnych. Obecnie niezwykle intensywnie pracuje się nad kolejnymi generacjami sieci telefonii komórkowej. Aby zrealizować ten cel, konieczne jest wykorzystywanie fal o rosnącej częstotliwości, co związane jest z konstrukcją anten nadawczo-odbiorczych, ale również opracowywaniu metod przesyłania informacji w kanale Rayleigha, czyli w przypadku braku bezpośredniej widoczności pomiędzy nadawcą i odbiorcą (tzw. line of sight). W celu maksymalizacji efektywności przesyłania danych cyfrowych istotne jest również opracowywanie metod modulacji i kodowania informacji, tzn. doboru takiego zbioru sygnałów nośnych, aby szansa na poprawną identyfikację danych była jak największa. Przykładem takiej zaawansowanej, nowoczesnej metody jest modulacja 256-QAM, pozwalająca na przesyłanie ośmiu bitów jednocześnie. Z drugiej strony rozwijane są systemy MIMO (ang. Multiple Input-Multiple Output), które pozwalają na przesyłanie informacji za pomocą kilku sygnałów generowanych przez wiele anten jednocześnie. Niewątpliwie, rozwój technologii telekomunikacyjnych jest jednym z głównych obszarów mających krytyczne znaczenie dla rozwoju ludzkości (upowszechniając mobilny dostęp do globalnej infrastruktury sieciowej i komunikacyjnej). Efektem dotychczasowych prac jest propozycja standardu sieci komórkowej

piątej generacji (5G), która uzupełni oraz zastąpi obecnie wykorzystywane standardy GSM oraz LTE.

- b. Opracowywanie coraz bardziej zaawansowanych układów antenowych. Celem prac jest stworzenie anten pracujących na wymaganym paśmie częstotliwości (a zatem obsługujących fale elektromagnetyczne o określonej długości) o maksymalnym zysku energetycznym, tzn. promieniujących sygnał w pożądanym kierunku i, jeśli to możliwe, w żadnym innym. Istotne jest tutaj także projektowanie inteligentnych szkieletów antenowych, czyli zestawów anten wyposażonych w zaawansowane algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów. Dzięki ich zastosowaniu system radiokomunikacyjny jest bardziej odporny na zakłócenia, ma większy zasięg, a także umożliwia przesyłanie sygnałów wieloma ścieżkami jednocześnie (tzw. propagacja wielodrogowa). Anteny takie adaptują się zarówno do warunków środowiskowych, jak i źródeł sygnałów, co czyni je istotnym elementem nowoczesnego systemu komunikacyjnego, minimalizującego straty przesyłu informacji oraz maksymalizującego szybkość transmisji danych. Co ciekawe, anteny mogą być również wykorzystywane do komunikacji na małych odległościach. Przykładem takiego zastosowania jest technologia RFID (ang. Radio Frequency Identification), służąca do wymiany informacji pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem w bezpośrednim sąsiedztwie. W tym celu najczęściej stosowane są anteny paskowe, które mogą zostać przyłączone do dowolnego przedmiotu. Podobnie, w aktualnie stosowanych paszportach biometrycznych układ RFID przechowuje zabezpieczone informacje na temat właściciela (dane osobowe, zdjęcie twarzy, czy wzorce odcisków palców).
- c. Konstrukcje radarowe. Pomimo iż samo urządzenie ma już ponad sto lat, wciąż opracowywane są nowe urządzenia tego typu, których zadaniem jest zwiększenie dokładności oraz zasięgu. Kluczem do realizacji zadania jest implementacja technik wielkich częstotliwości (układów mikrofalowych), tj. zdolnych do generacji fal o zakresie częstotliwości od ok. 300MHz do kilkuset GHz. Oprócz samego wykrycia celu (na lądzie, wodzie lub w powietrzu), konieczne jest wyposażenie ich w systemy identyfikacji (ang. Identification Friend or Foe). Dodatkowo, w związku z rozwojem powietrznych pojazdów bezzałogowych (tzw. dronów) opracowywane są urządzenia do wykrywania tak małych pojazdów.
- d. Rozwój technologii mikrofalowych, wykraczających poza zastosowania radarowe. Niezwykle liczne potencjalne zastosowania fal radiowych z określonego przedziału pozwoliły na zaproponowanie takich rozwiązań jak maser (odpowiednik lasera, jednak wykorzystujący inny zakres częstotliwości promieniowania), czy radioteleskopy (służące do obserwacji kosmosu, np. w celu poszukiwania pozaziemskich form życia). Do takich zastosowań zaliczana jest również łączność satelitarna.

- e. Technologie terahercowe są jednym z najnowszych wynalazków, ich zastosowania są jednak dopiero rozwijane [6]. Chodzi tutaj o promieniowanie z zakresu od 100GHz do 30THz. Może ono być użyteczne, ponieważ przenika cieńsze powierzchnie, jednak jest odbijane od grubszych obiektów (co zależy również od rodzaju materiału, z którego zbudowany jest analizowany obiekt). Pozwala to np. na poszukiwanie ukrytych przez podróżnych przedmiotów w tzw. bramkach terahercowych, stosowanych w portach lotniczych. Zdolność do bezpiecznego prześwietlania ludzkiego ciała (nie jest to promieniowanie jonizujące) sprawia, że technologia może zostać wykorzystana w medycynie (np. tomografia terahercowa). Technologia ta ma również znaczący potencjał do wykorzystania w komunikacji i szybkiej transmisji dużej ilości danych.

7. Układy i systemy elektroniczne

Ta dziedzina jest odpowiedzialna za projektowanie nowych układów elektronicznych, które mogłyby zostać wykorzystane w praktyce. Chodzi tu w szczególności o wciąż wykorzystywane układy analogowe, ale także powszechnie wykorzystywane układy cyfrowe. Dziedzina ta miała ogromne znaczenie w pierwszej połowie XX w., kiedy od poprawnego projektu układu zależała jego cena oraz jakość. Obecnie projektowanie nowych układów elektronicznych dotyczy w szczególności specyficznych zastosowań (np. obwody mikrofalowe), czy też układy elektroniczne dla wysoko wyspecjalizowanego sprzętu audio (zawierającego dyskretne elementy, takie jak wzmacniacze lampowe). Obecnie większe jest znaczenie obwodów elektrycznych, wykorzystywanych np. w silnikach elektrycznych, czy w energetyce.

Istotnym aspektem rozpatrywanym podczas projektowania układów elektronicznych jest zapewnienie ich niezawodności oraz możliwości natychmiastowego wykrywania uszkodzeń (które negatywnie wpływają na zachowanie systemu). Diagnostyka urządzeń i systemów jest ważną i również intensywnie rozwijaną dziedziną elektroniki. Efektem badań są m.in. układy samotestujące (ang. Built-In Self Test - BIST), które stosowane są w przypadku, gdy awaria musi zostać wykryta i zidentyfikowana możliwie szybko. Jest to szczególnie istotne w przypadku układów scalonych, do których elementów składowych nie można się dostać z zewnątrz, konieczna jest zatem analiza przez wbudowany moduł wewnętrzny.

Poza oczywistymi zastosowaniami praktycznymi analiza i projektowanie obwodów elektrycznych i elektronicznych ma istotne znaczenie teoretyczne. Dla przykładu, duże znaczenie ma tzw. obwód Chuy (zaproponowany w 1983 r. przez Leona Chue), będący przykładem systemu chaotycznego [7].

8. Inżynieria biomedyczna

Ta dziedzina elektroniki jest zwykle rozpatrywana oddzielnie, ponieważ wykorzystuje wszystkie z wcześniej wymienionych zagadnień. Ponieważ medycyna ma krytyczne znaczenie dla przetrwania rodzaju ludzkiego, wprowadzenie do zagadnień przez nią poruszanych elementów i algorytmów charakterystycznych dla elektroniki pozwoliło rozwiązać szereg problemów, obejmujących:

- a. Diagnostykę, która obejmuje zarówno wprowadzenie nowych urządzeń do analizy, jak i metod przetwarzania danych pozyskanych w wyniku procesu pomiarowego. Do wynalazków, które zmieniły oblicze współczesnej medycyny, należą przede wszystkim tomografia komputerowa oraz rezonans magnetyczny. Są to metody obrazowania fragmentów ciał organizmów żywych, umożliwiające stworzenie trójwymiarowego modelu o wysokiej rozdzielczości i dokładności. Proces diagnostyczny przebiega przeważnie z udziałem lekarza specjalisty (radiologa), opracowywane są jednak obecnie zautomatyzowane metody wyszukiwania określonych obiektów na uzyskanych obrazach (tzw. segmentacja). Podobnym urządzeniem, choć o nieco innej zasadzie działania, jest gammakamera.
- b. Regeneracja i rekonstrukcja tkanek, obejmująca projektowanie sztucznych narządów oraz interfejsów komunikacji pomiędzy układami elektronicznymi i mechanicznymi oraz żywą tkanką organizmu. Obecnie prowadzone są badania, które umożliwią podłączenie sztucznych organów do żywego układu nerwowego pacjenta. Do konstrukcji sztucznych organów konieczna jest również wiedza z zakresu robotyki oraz neuroelektroniki (czyli dziedziny opisującej zasady przepływu prądu elektrycznego przez system nerwowy oraz metod łączenia klasycznych układów elektronicznych z materią żywą).
- c. Badanie możliwości odczytu sygnałów elektrycznych generowanych w mózgu (sygnałów EEG) oraz ich poprawnej interpretacji. Techniki te mogą zostać wykorzystane np. do sterowania urządzeniami czy maszynami za pomocą myśli, pozwolą również lepiej zrozumieć budowę i zasadę działania mózgu.

Wybrana literatura

- [1] Elizabeth Gibney, "Biggest carbon-nanotube chip yet says 'Hello, World!'," *Nature*, August 2019, doi: 10.1038/d41586-019-02576-7.
- [2] Gautam Gaddemane ; William G. Vandenberghe ; Massimo V. Fischetti, "Theoretical study of electron transport in silicene and germanene using full-band Monte Carlo simulations," 2016 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), 6-8 Sept. 2016, Nuremberg, Germany, doi: 10.1109/SISPAD.2016.7605219.
- [3] Debabrata Goswami, "Optical computing," *Resonance*, Vol. 8, No. 6, July 2003, pp. 56-71, doi: 10.1007/BF02837869
- [4] Neil Savage, „Building Quantum Computers With Photons," *IEEE Spectrum*, 2018, online: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/building-quantum-computers-with-photons>
- [5] Mikko Tuomisto, "Non-intrusive Appliance Load Monitoring (NIALM) System with the Possibility for Users to Follow the Consumption of Individual Electricity Appliances from the Calendar," *International Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 5, No. 3, June 2016, pp. 129-132.
- [6] Thomas Skotnicki ; Wojciech Knap, "Terahertz Technologies and Applications," 2019 MIXDES - 26th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 27-29 June 2019, Rzeszów, Poland, doi: 10.23919/MIXDES.2019.8787160.
- [7] T. Matsumoto, "A Chaotic Attractor from Chua's Circuit." *IEEE Trans. CAS* 31, 1984, pp. 1055-1058.