

Systemy wbudowane

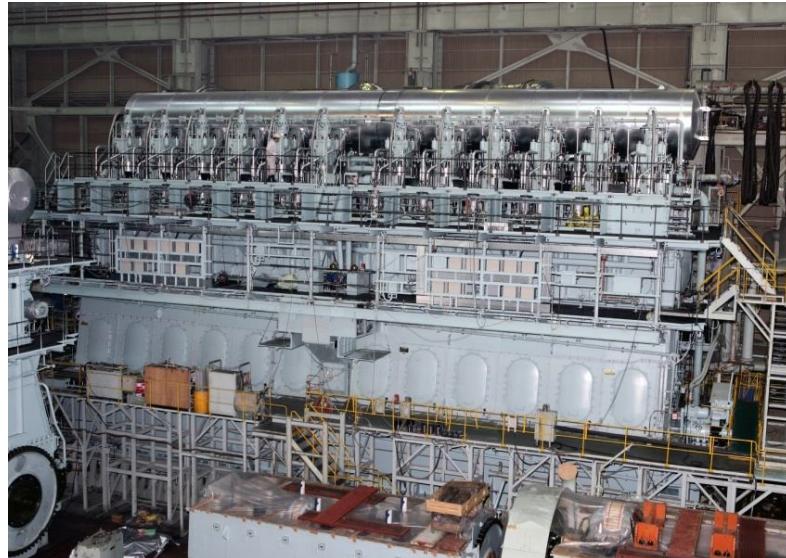
KSON WETI PG

Co to jest system wbudowany?

- komputer (CPU, pamięć, I/O)
- wykonuje skończoną liczbę zadań, w skończonym czasie, w większym systemie (który zwykle nie jest komputerem)



Co to jest system wbudowany?



- Komputer jest częścią większego systemu
 - ... i zwykle nie wygląda jak komputer
 - steruje innymi urządzeniami
- Niezawodność jest często najważniejsza (krytyczna)
 - “if the system fails someone might die”
- Ograniczone zasoby
- Odpowiedź w czasie rzeczywistym

Co to jest system wbudowany?

- O jakich systemach mówimy?
 - Czytniki kodów kreskowych
 - Kamera
 - Robot linii produkcyjnej
 - Telefon kmórkowy
 - Odtwarzacz CD
 - Kontroler trwałego dysku
 -
 -
 - Pompa insulinowa
 - Sztuczny satelita
 - Autonomiczny pojazd podwodny
- Fuel injector controls
- Medical equipment monitors
- PDAs
- Printer controllers
- Sound systems
- Rice cookers
- Telephone switches
- Water pump controllers
- Welding machines
- Windmills
- Wrist watches
- ...



Co to jest system wbudowany?

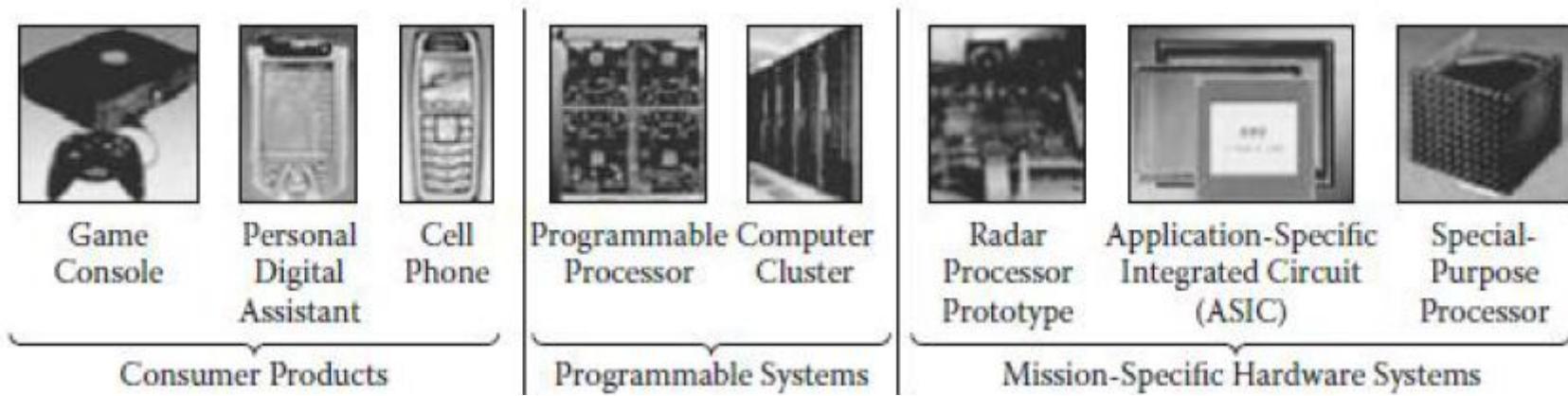
- Przewidywalność
- Zarządzanie zasobami
 - Pamięć!
- Dostęp do sprzętu
 - Adresowanie bezwzględne
- Standardy programistyczne



Co to jest system wbudowany?

Systemy wbudowane

HPEC



HPEC - High Performance Embedded Computing

- wysoki poziom funkcjonalności systemów przetwarzania sygnałów i obrazów
- Systemy do zastosowań militarnych

Systemy HPEC



Source: Martinez, D. R., Bond, R.A., Vai, M.M., High Performance Embedded Computing Handbook: A Systems Perspective, CRC Press 2008

System wbudowany

- Dobrze zaprojektowany system zapewnia jednocześnie wymagane **opóźnienia i przepustowość** minimalizując:

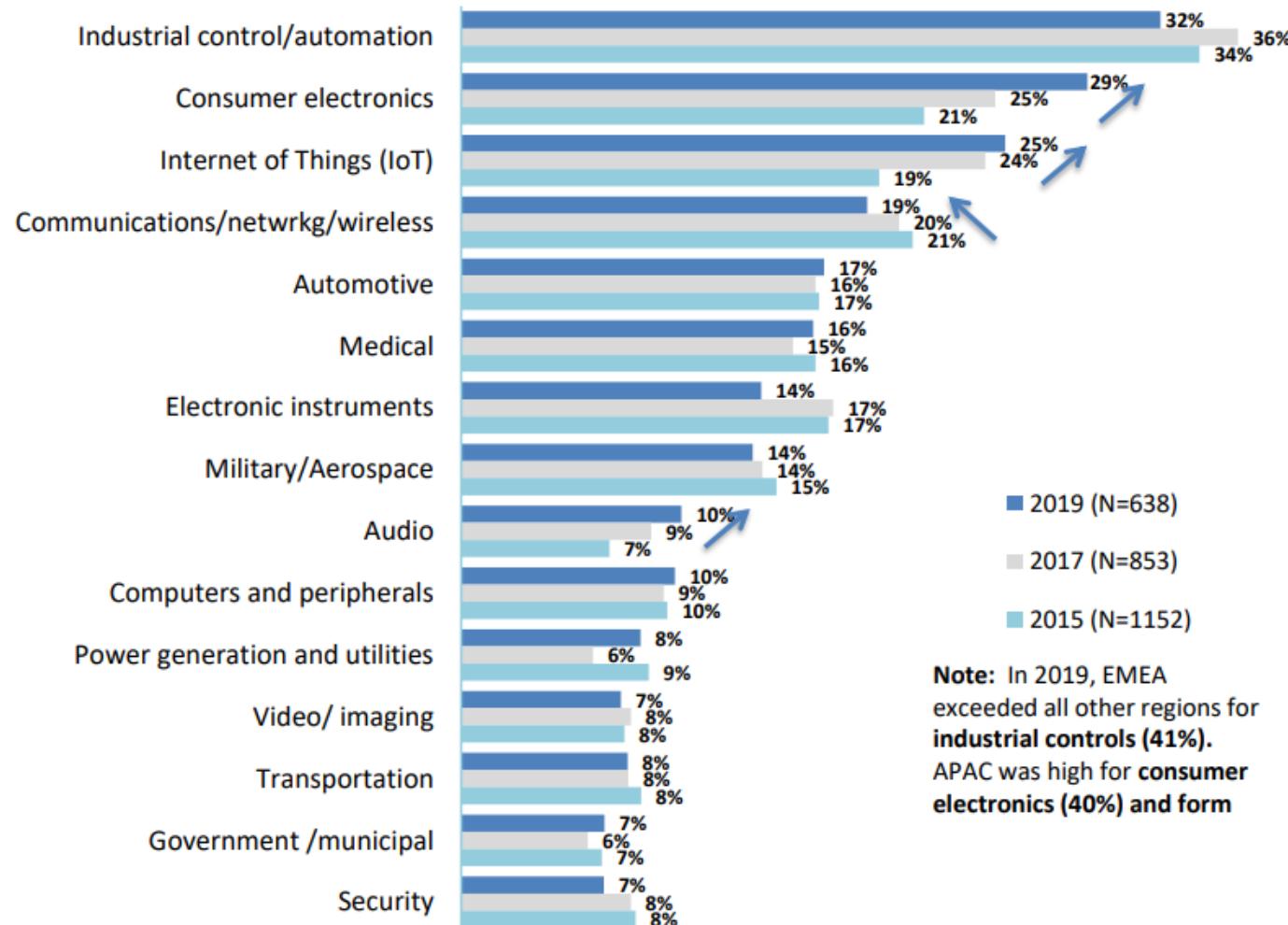
Zasoby sprzętowe

Złożoność
oprogramowania

Rozmiar

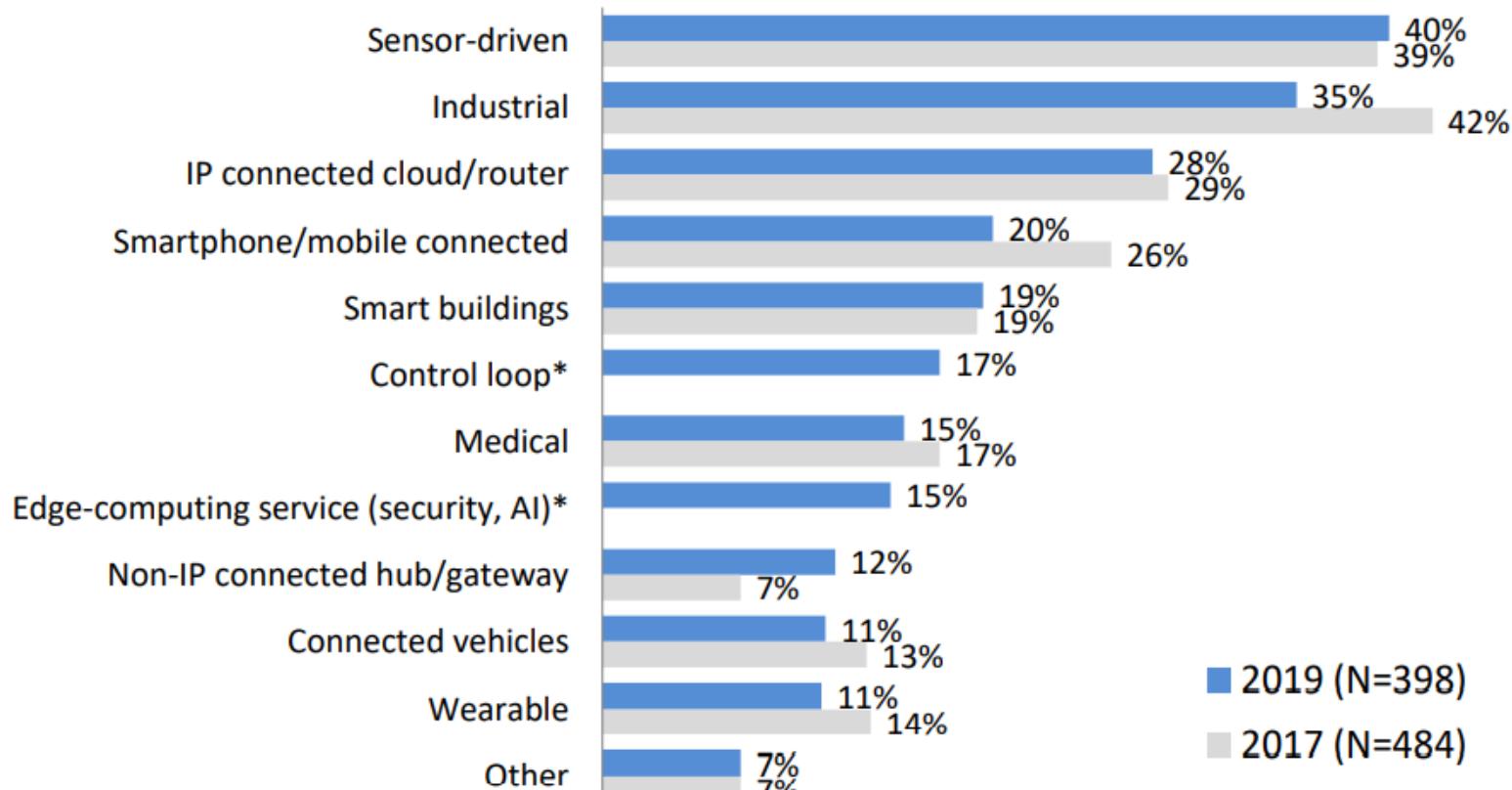
Pobór mocy

For what types of applications are your embedded projects developed?



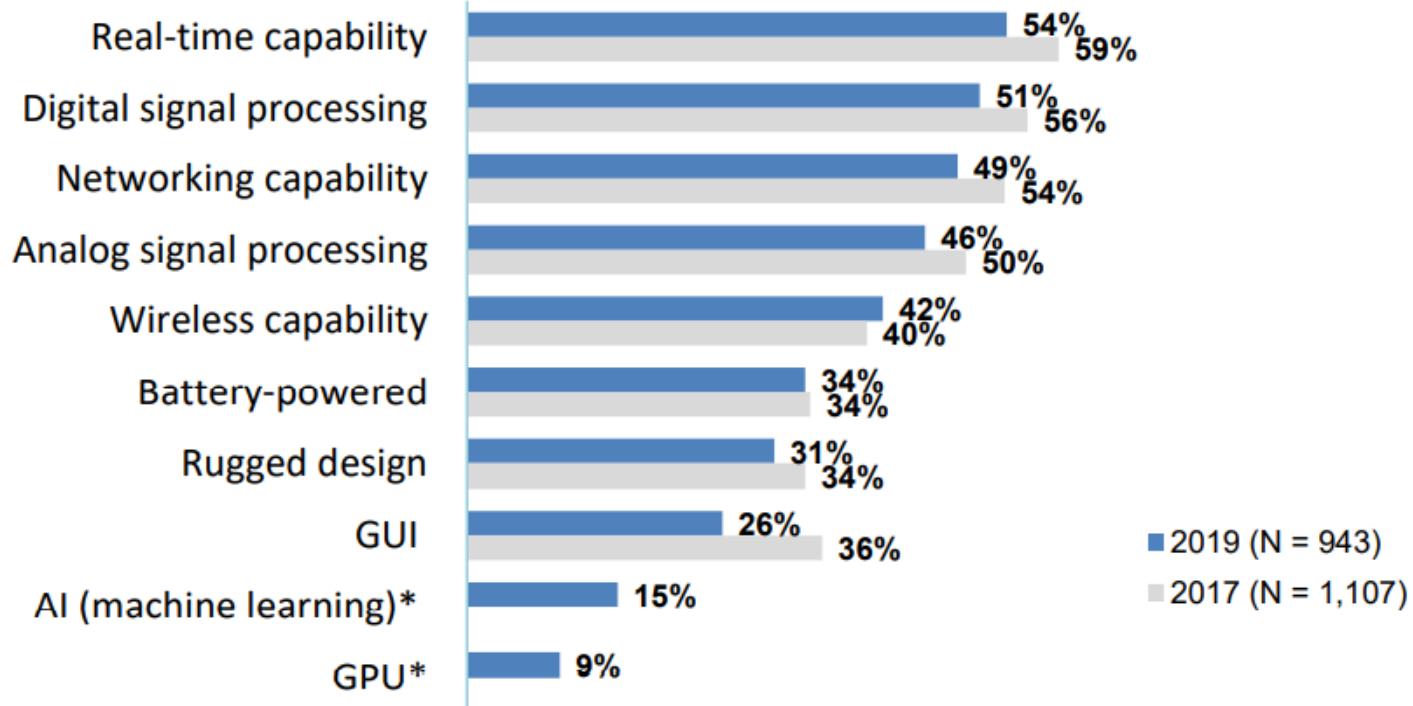
Źródło: https://www.embedded.com/wp-content/uploads/2019/11/EETimes_EMBEDDED_2019_EMBEDDED_MARKETS_STUDY.pdf

If you are developing Internet of Things (IoT) applications, please indicate the type of application.



* Added in 2019.

Which of the following capabilities are included in your current embedded project?



*AI and GPU were added in 2019.

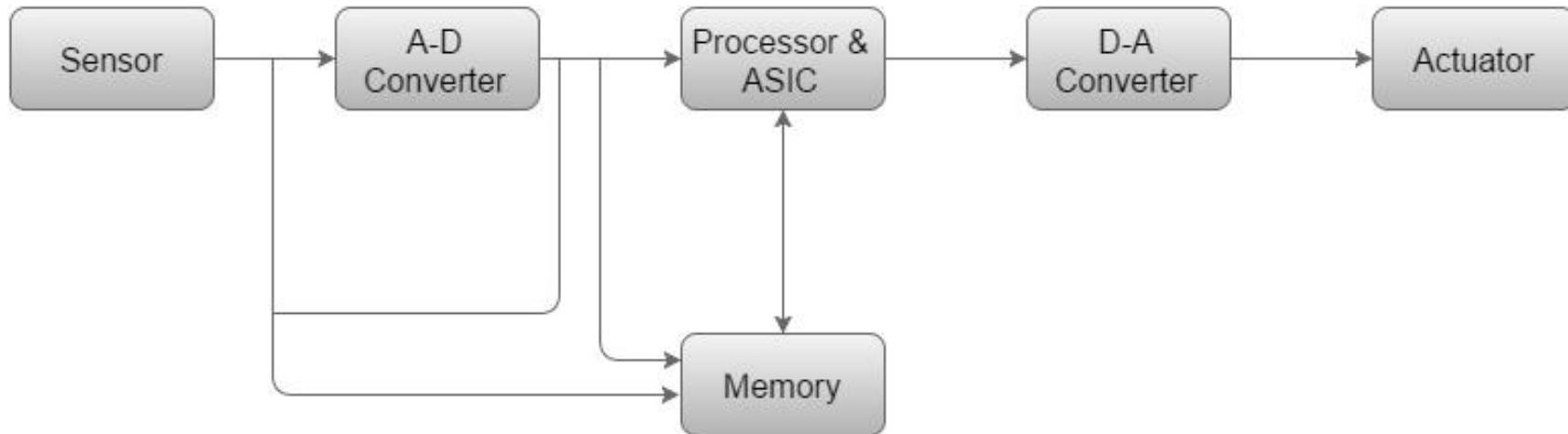
System wbudowany

- programista musi dobrze rozumieć architekturę sprzętu
 - ograniczone zasoby: szybkość CPU, pamięć, objętość, waga, pobór mocy
 - projektant, konstruktor i programista SW ciągle pamięta o kosztach (każdy dodatkowy cykl maszynowy kosztuje!)
- Trzy kategorie w zależności od potrzeb energetycznych:
 - **zasilane baterią** (np. przenośne urządzenia audio) – maksymalizacja długości życia baterii, minimalizacja rozmiaru
 - **stałej mocy** (np. aparaty telefoniczne) - maksymalizacja wydajności przy stałej, ograniczonej mocy,
 - **systemy *high-density*** (np. systemy wysokiej wydajności obliczeniowej i systemy wieloprocesorowe) - maksymalizacja wydajności energetycznej (ciepło!)

System wbudowany

- System czasu rzeczywistego – wymagania „**twarde**”
 - Odpowiedź systemu w ścisłe określonym czasie
- System czasu rzeczywistego – wymaganie „**miękkie**”
 - W większości przypadków odpowiedź systemu w ścisłe określonym czasie
- **Przewidywalność** przede wszystkim!
- „Correctness is even more important than usual” – B. Stroustrup.
"Poprawność" nie jest pojęciem abstrakcyjnym!

Podstawowa struktura SW



źródło: https://www.tutorialspoint.com/embedded_systems

- **Sensor** – mierzy wielkość fizyczną i konwertuje ją na sygnał elektryczny; zapisuje zmierzoną wartość w pamięci
- **Konwerter C/A (A-D Converter)** – zamienia sygnał analogowy na sygnał cyfrowy
- **Jednostka obliczeniowa (Processor & ASICs)** – przetwarza dane i zapisuje je do pamięci
- **Konwerter C/A (D-A Converter)** – zamienia sygnał cyfrowy na sygnał analogowy
- **Element wykonawczy (Actuator)** – urządzenie mechaniczne występujące w układach regulacji, które na podstawie sygnału sterującego wypracowuje sygnał wejściowy do obiektu regulacji; porównuje wyjście z konwertera C/A z wartością oczekiwana

Jednostka obliczeniowa

- Mikrokontroler
- Mikroprocesor
- Procesor CISC/RISC
- Procesor DSP
- System on a Chip (SoC)
- Układy konfigurowalne



Mikrokontrolery

Mikrokontrolery

- ▶ pochodne procesorów ogólnego przeznaczenia, “najnowszych wczoraj”
 - ▶ moc obliczeniowa wystarczająca do prostych aplikacji sterujących
 - ▶ bardzo tanie (np. Motorola 68HC12, Intel 8051)
- ▶ podobieństwa do procesorów ogólnego przeznaczenia:
 - ▶ są programowalne,
 - ▶ mają dostęp do urządzeń peryferyjnych
- ▶ różnice:
 - ▶ pracuje ze znacznie wolniejszym taktowaniem,
 - ▶ ma znacznie mniejszą przestrzeń adresową pamięci,
 - ▶ oprogramowanie nie może być zmieniane przez konsumenta.

Procesory CISC i RISC

- ▶ **CISC** - Complex Instruction Set Computer (np. 6502, 8088)
 - ▶ duży zbiór instrukcji,
 - ▶ instrukcje o różnej złożoności; niektóre kilku-bajtowe
 - ▶ minimalizuje liczbę instrukcji potrzebnych do wykonania zadania (oszczędność RAM)
- ▶ **RISC** - Reducted Instruction Set Computer
 - ▶ mały zbiór instrukcji,
 - ▶ instrukcje są proste - potrzeba mniej tranzystorów, niż w CISC,
 - ▶ do realizacji zadania potrzeba więcej wywołań instrukcji niż w CISC, ale:
 - ▶ pamięć jest coraz tańsza i lepiej upakowana
 - ▶ kompilatory są coraz bardziej wydajne
 - ▶ każda instrukcja mieści się w pojedynczym słowie binarnym (kod instrukcji + adres + dane)
 - ▶ wykonanie każdej instrukcji zajmuje tyle samo czasu
 - ▶ przetwarzanie potokowe (Pipelining) - kiedy jedna instrukcja jest wykonywana, następna jest odczytywana z pamięci

Procesory SPARC

Architektura SPARC (**S**calable **P**rocessor **A**RChitecture) – architektura mikroprocesorów RISC

- ▶ Zaprojektowana przez firmę Sun Microsystems (1985), od 1989 r. rozwijana przez organizację SPARC International.
- ▶ Wersje:
 - ▶ 32-bitowa (SPARC version 8)
 - ▶ 64-bitowa (SPARC version 9)
- ▶ Architektura otwarta
 - ▶ model programowy mikroprocesora (Instruction Set Architecture, ISA) jest publicznie dostępny (dokumentacja).
 - ▶ otwarta implementacja (GNU LGPL) - kod w języku VHDL procesora LEON.
- ▶ Zastosowania:
 - ▶ wysokowydajne serwery,
 - ▶ stacje robocze,
 - ▶ systemy wbudowane

Procesory SPARC

Architektura SPARC

- ▶ Cechy:
 - ▶ omijanie wielokrotnych pętli mnożenia i dzielenia
 - ▶ duży zestaw rejestrów ogólnego przeznaczenia (64 do 528 – 64-bitowych rejestrów) dostępnych poprzez „okna rejestrów”
 - ▶ instrukcje warunkowego przesyłania danych zamiast instrukcji skoku
 - ▶ instrukcje prefetch (wstępne pobranie danych)
 - ▶ architektura jest typu big-endian, ale może obsługiwać dane jako little-endian (zmiana rejestru stanu procesora PSTATE)

System on a Chip (SoC)

- ▶ Pojedynczy układ scalony, zawierający wszystkie układy potrzebne do realizacji określonej funkcjonalności
- ▶ Układ bardziej złożony, o większej ilości zasobów (np. pamięć rzędu MB), niż mikrokontroler
- ▶ Może składać się z kilku procesorów, każdy z własnym zegarem i przestrzenią pamięci
- ▶ Przykład: router może mieć kilka procesorów RISC (Reduced Instruction Set Computing), które obsługują ruch komunikacyjny i procesor CISC (Complex Instruction Set Computing) do konfiguracji i zarządzania samym routera.
- ▶ Szybsze, mniejsze, bardziej niezawodne i zużywają mniej energii niż kilka układów, które zastępują.
- ▶ Koszt produkcji może być wyższy niż mikrokontrolerów (większa specjalizacja)

Procesory ARM

- ▶ 1981 - początek komputerów PC
 - ▶ IBM: 16-bitowym procesorem Intel 8088
 - ▶ Acorn: 8-bitowy mikroprocesor 6502 (MOS Technology)
- ▶ Lata 80 - wzrost popularności IBM, spadek sprzedaży Acorn
- ▶ 1990 - powstaje firma Cambridge Advanced RISC Machines (ARM) for short.
- ▶ ARM postanawia sprzedawać własność intelektualną (Intellectual Property, IP) zamiast gotowych procesorów
- ▶ Obecnie - ARM Holdings; procesory ARM produkowane są przez różne firmy.
- ▶ Cortex Core
 - ▶ Mikroprocesor ARM Cortex - 32-bitowy
 - ▶ Przetwarzanie potokowe (pipelining)
 - ▶ Pamięć nie jest częścią rdzenia Cortex core
 - ▶ Bank rejestrów jednostki ALU

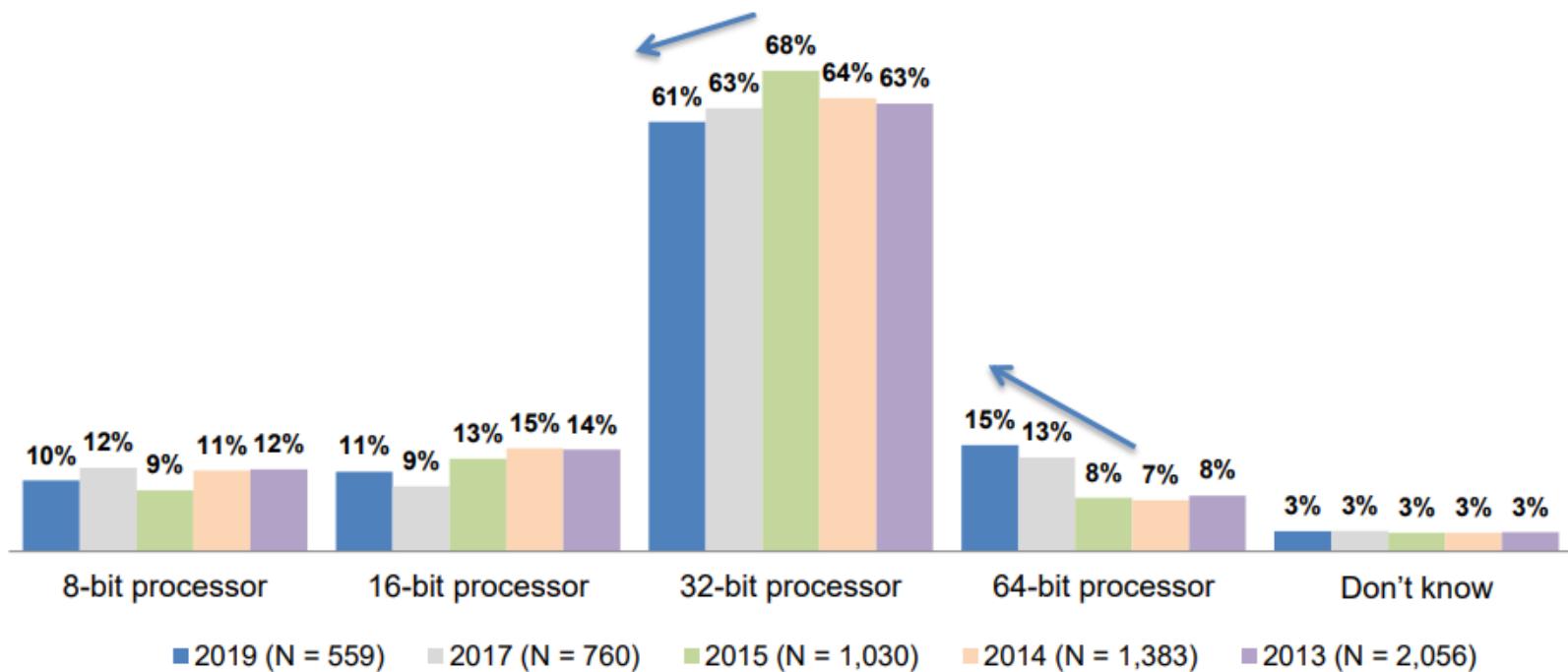
Układy konfigurowalne

PLD - Programmable Logic Device - gdy szybkość i rozmiar nie są priorytetem

- ▶ Programmable Array Logic (PAL),
- ▶ Programmable Logic Arrays (PLA),
- ▶ Field-Programmable Gate Arrays (FPGA).

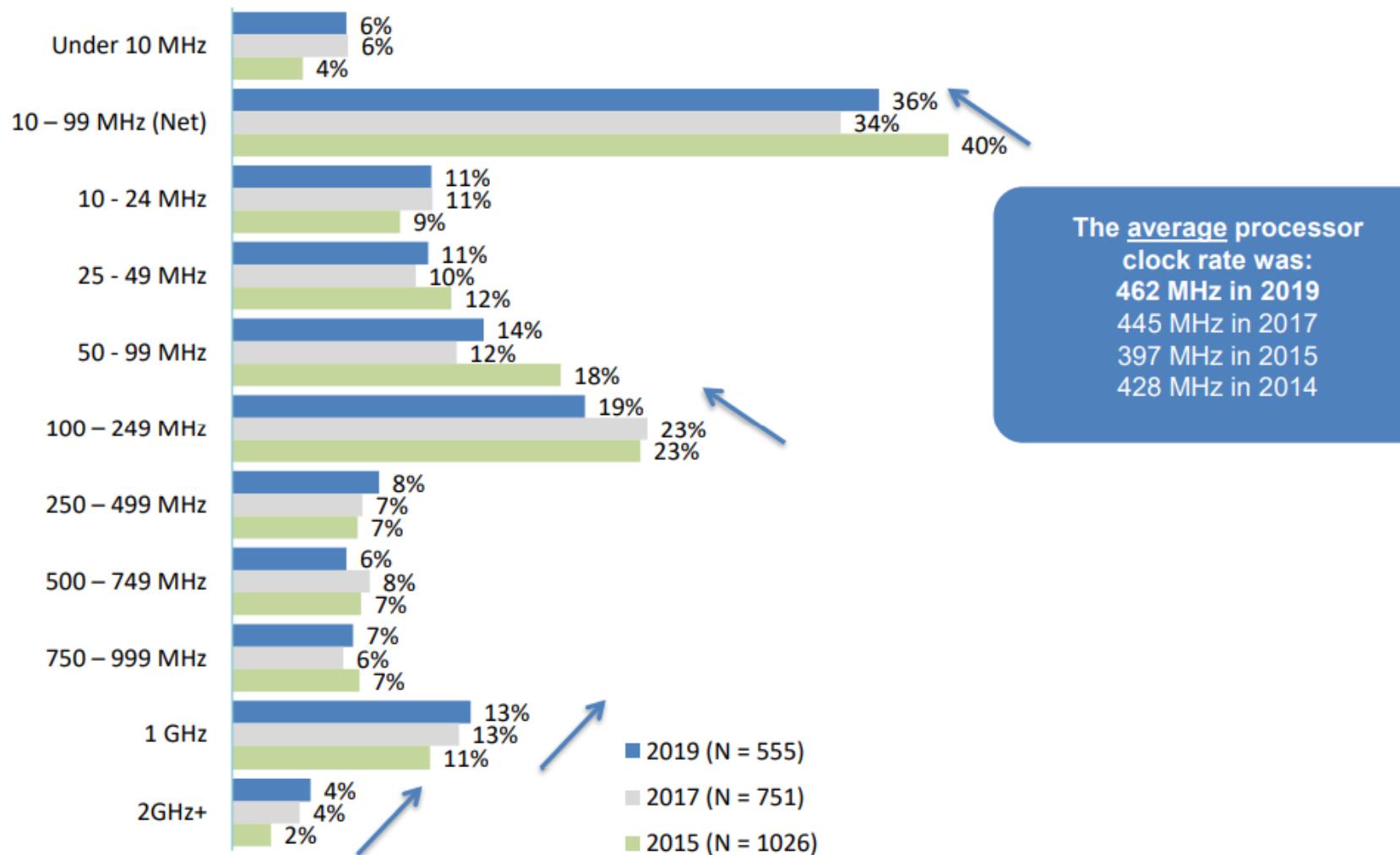
SW - Procesory

My current embedded project's main processor is a:



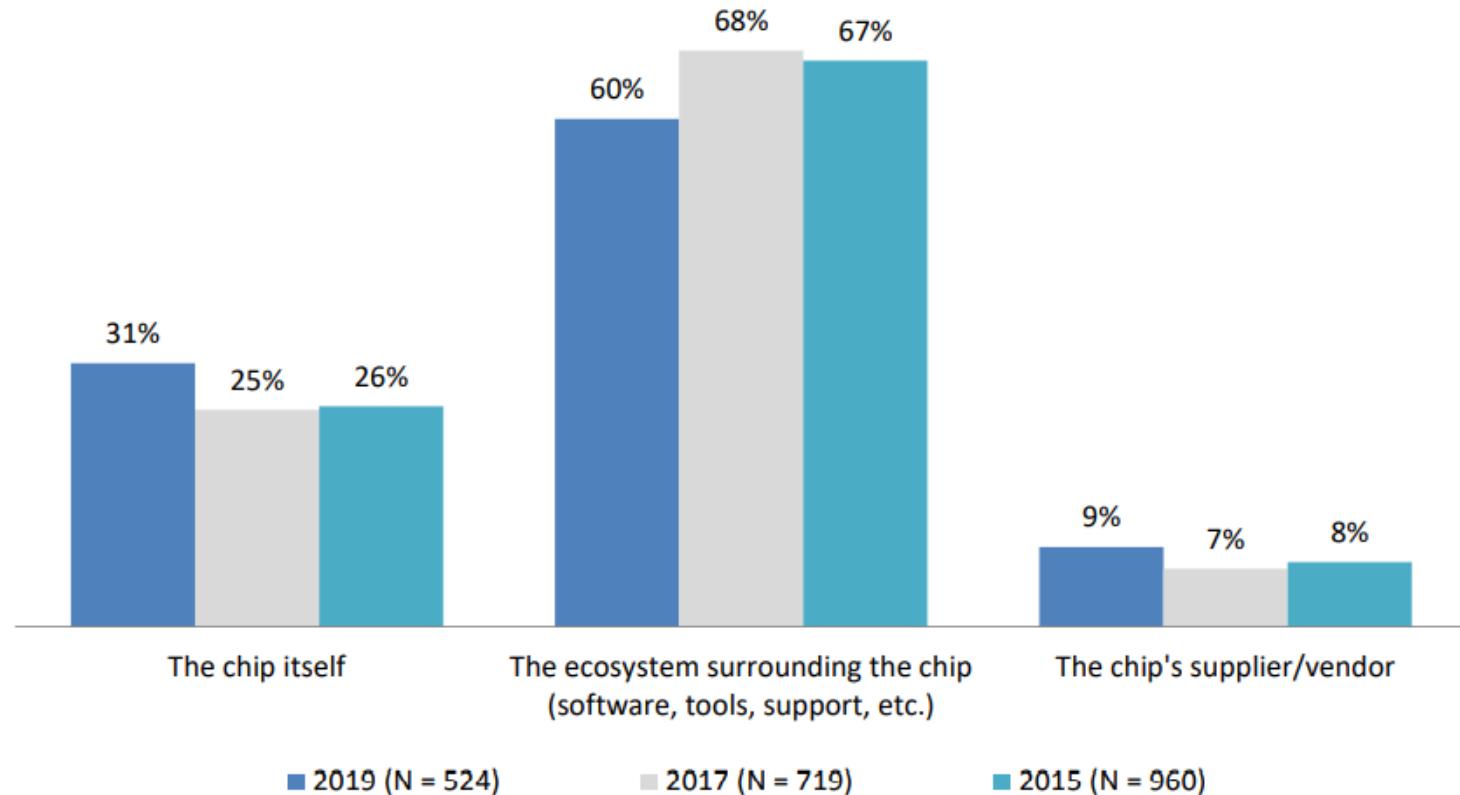
SW - Procesory

My current embedded project's main processor clock rate is:

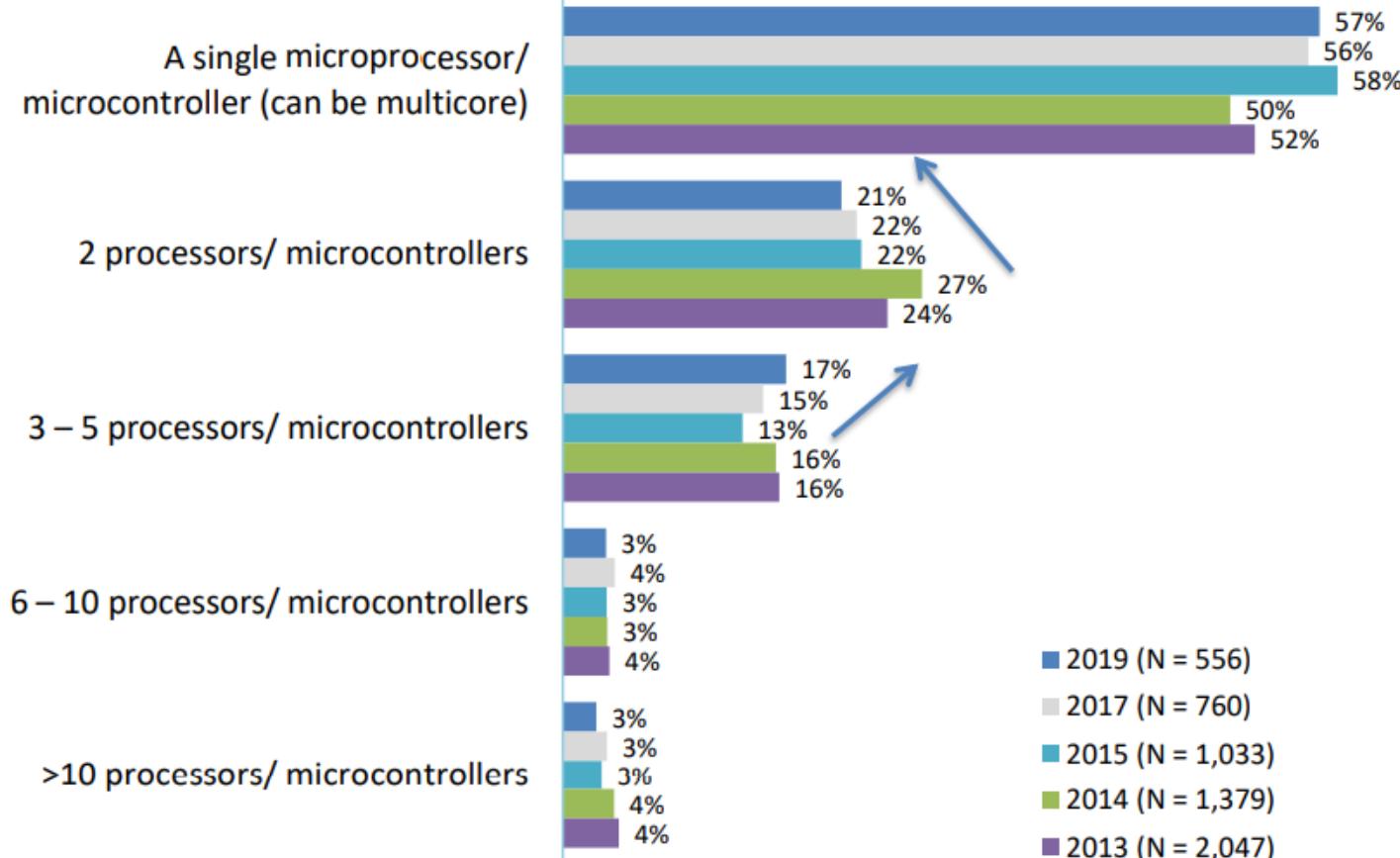


SW – procesory

What's most important when choosing a microprocessor?



My current embedded project contains:



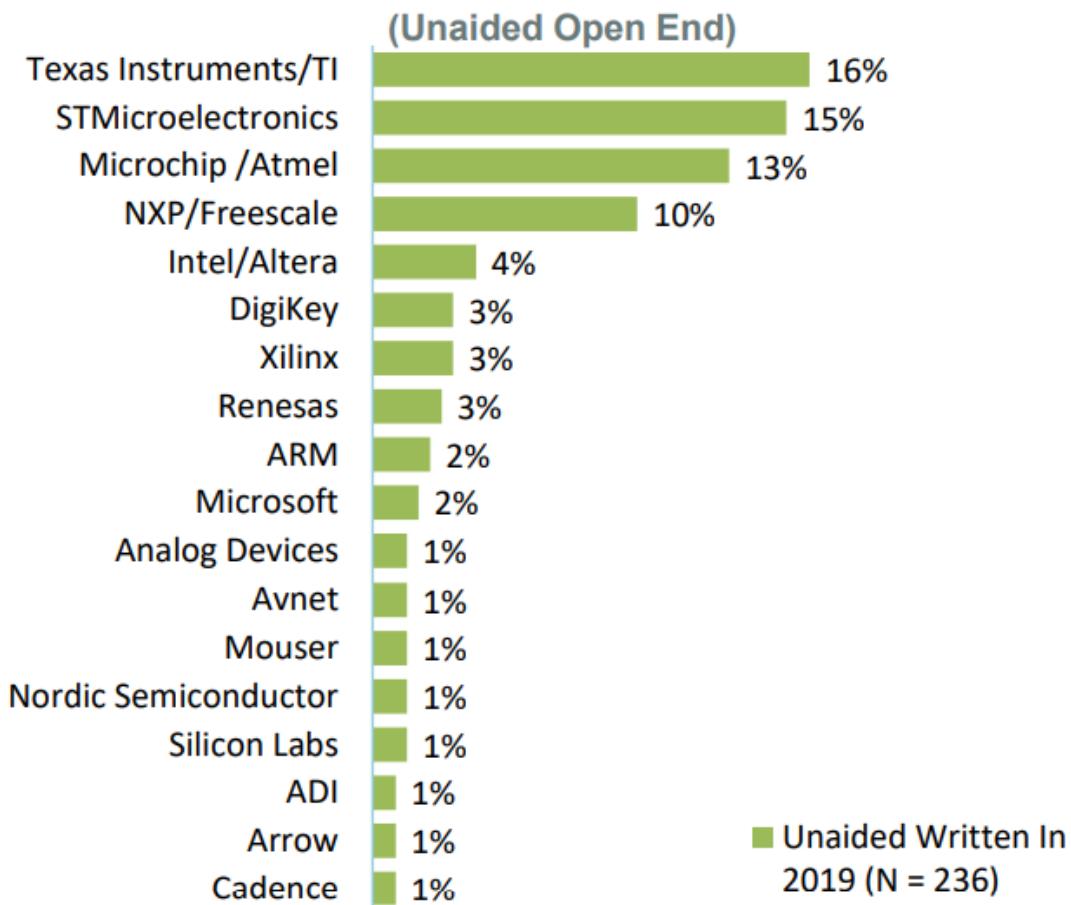
65% of EMEA
designs contained
a single processor.

The average number
micropocessor/micro
controllers
per project was:

- 2.2 in 2019
- 2.3 in 2017
- 2.1 in 2015
- 2.4 in 2014
- 2.4 in 2013

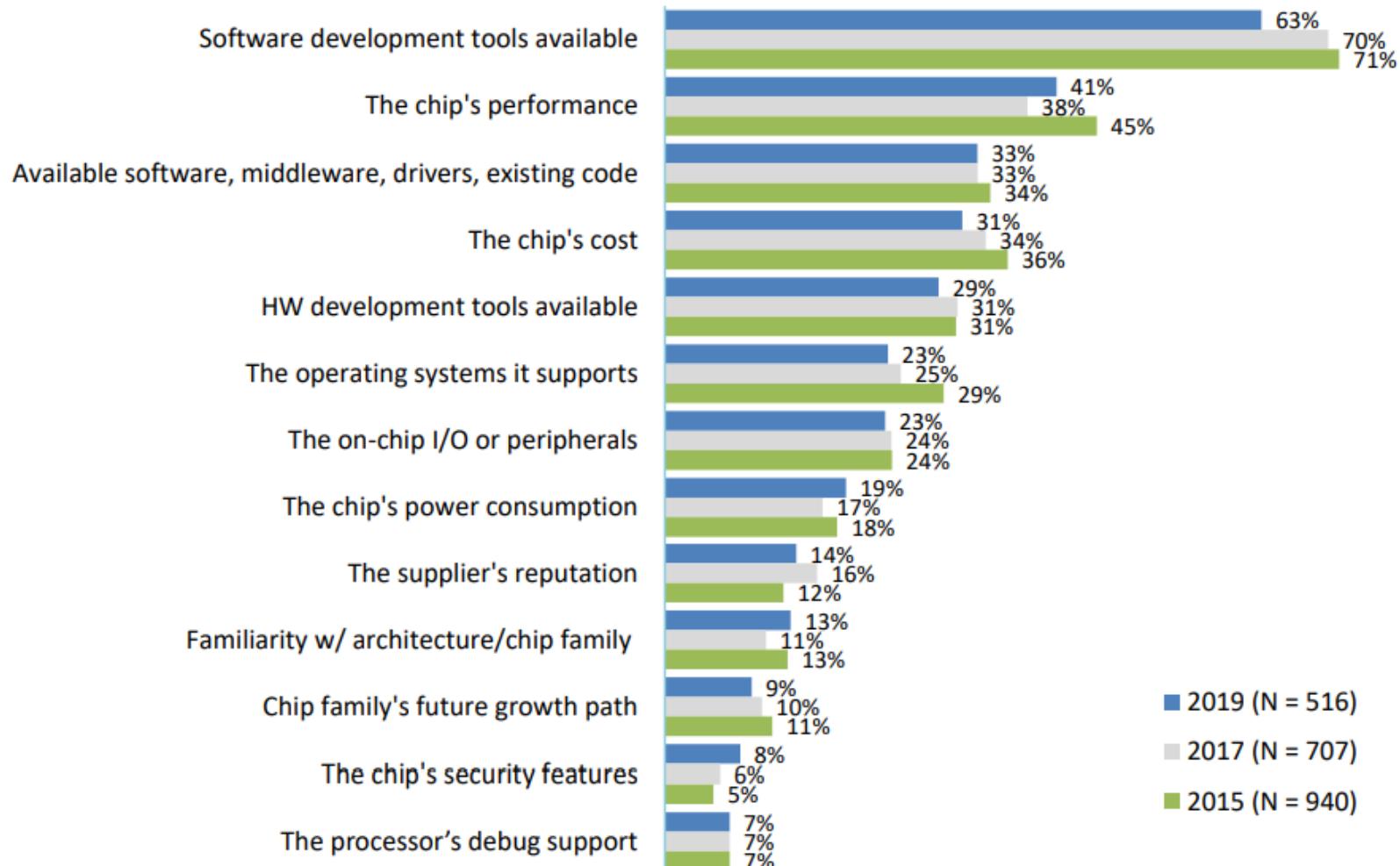
SW – procesory

Which vendor has the best ecosystem for your needs?



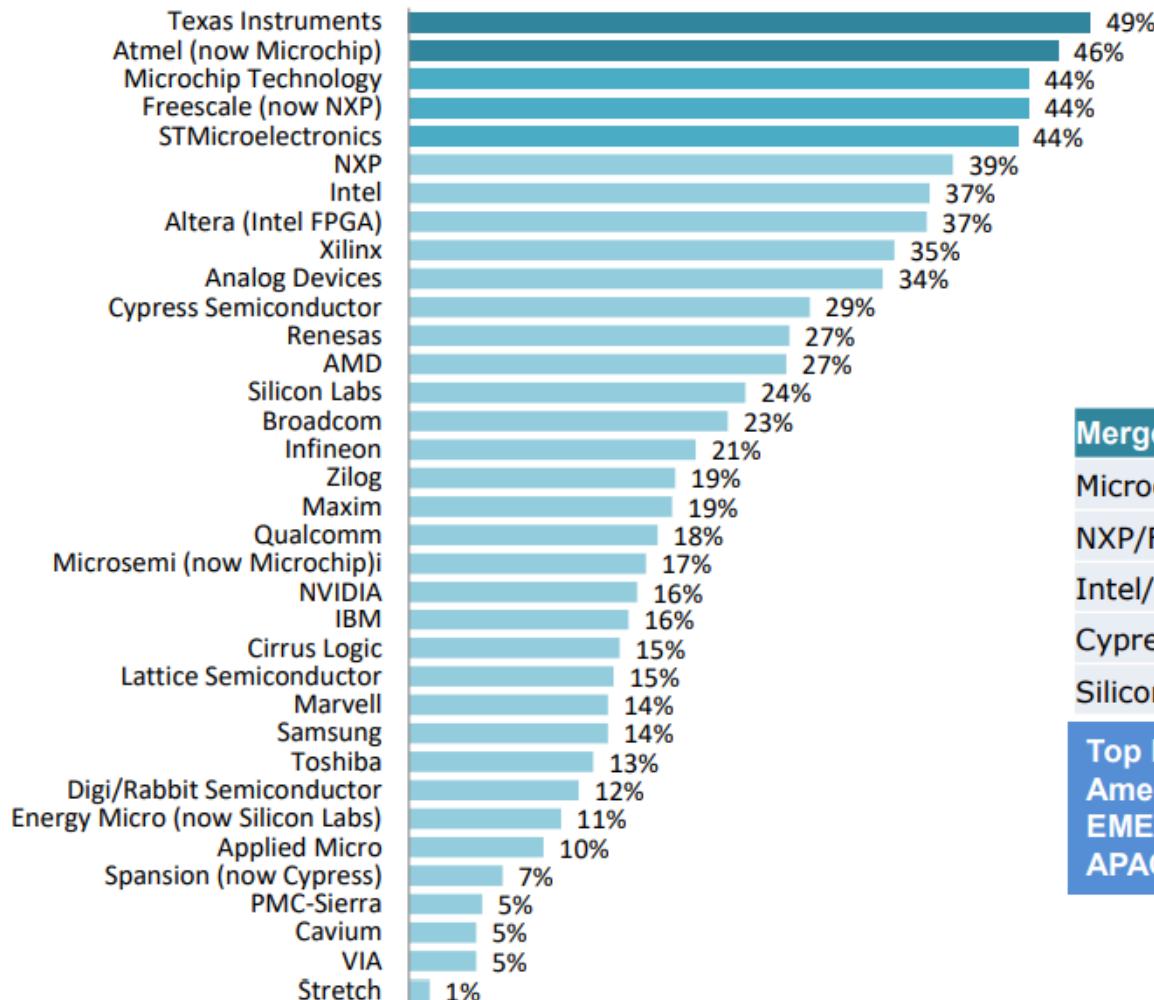
SW – procesory

What are the most important factors in choosing a processor?



SW – procesory DSP

Please select the processor vendors you are familiar with.



| Merged Brands Combined | % |
|---------------------------------|----|
| Microchip/Atmel/Microsemi (Net) | 63 |
| NXP/Freescale (Net) | 56 |
| Intel/Altera (Net) | 56 |
| Cypress/Spansion (Net) | 30 |
| Silicon Labs/Energy (Net) | 25 |

Top Four Brands by Region:
Americas: TI, Microchip, Atmel, Freescale.
EMEA: STMicro, Atmel, TI, NXP
APAC: TI, Atmel, NXP, Microchip

2019 (N = 478)

Projektowanie systemu wbudowanego

- ▶ System czasu rzeczywistego? Na jakie opóźnienia można sobie pozwolić?
- ▶ Koszty materiałów (bill-of-materials) dla prototypu i wersji produkcyjnej
- ▶ Zużycie mocy
- ▶ Wymiary, waga
- ▶ Czas wytwarzania systemu
- ▶ Koszt narzędzi wytwarzania systemu
- ▶ Porównanie kosztów z ceną porównywalnego systemu Off-the-Shelf

Prototypowanie – komputery jednoukładowe

Komputer jednoukładowy (Single Board Computer) - kompletny komputer mieszczący się na niewielkiej płytce, zawierający co najmniej mikroprocesor(y), pamięć, interfejsy I/O.

- ▶ Zastosowanie:
 - ▶ wersje demonstracyjne systemów wbudowanych (**prototypowanie**)
 - ▶ edukacja
 - ▶ kontrolery w systemach wbudowanych
- ▶ Standardowe interfejsy
- ▶ Procesory RISC i SPARC
- ▶ Karty pamięci (brak HDD)

Raspberry Pi

Raspberry Pi – komputer jednoukładowy

- ▶ Skonstruowany przez Raspberry Pi Foundation, premiera 2012 r.
- ▶ Model A, B, A+, B+: Układ Broadcom BCM2835 SoC
- ▶ Model RPi2: Układ Broadcom BCM2836 SoC
- ▶ System operacyjny
- ▶ Złącze kart SD
- ▶ Brak zegara czasu rzeczywistego
- ▶ Waga: ok. 40g
- ▶ Zasilanie (pobór mocy przy odłączonych urządzeniach):
 - ▶ Model A: 5V DC, 500-700mA (2.5W)
 - ▶ Model B: 5V DC, 700-1500mA (3.5W)
 - ▶ Model 2: 5V DC, 800mA+ (4W)



Intel Galileo

Intel Galileo - komputer jednoukładowy firmy Intel

- ▶ 32-bitowy, jednordzeniowy procesor Intel Quark SoC X1000, 400 MHz, 16 KB pamięci podręcznej L1
- ▶ Pierwszy SBC na procesorze Intel x86
- ▶ Kompatybilność z Arduino Uno R3
- ▶ System operacyjny
- ▶ 8 MB wbudowanej pamięci wewnętrznej,
- ▶ 512 KB pamięci SRAM i 256 MB RAM DDR3.
- ▶ Zegar czasu rzeczywistego (zasilany baterią 3V)
- ▶ Karta microSD
- ▶ Brak karty graficznej
- ▶ Zasilanie 5V, 400 mA (2W)



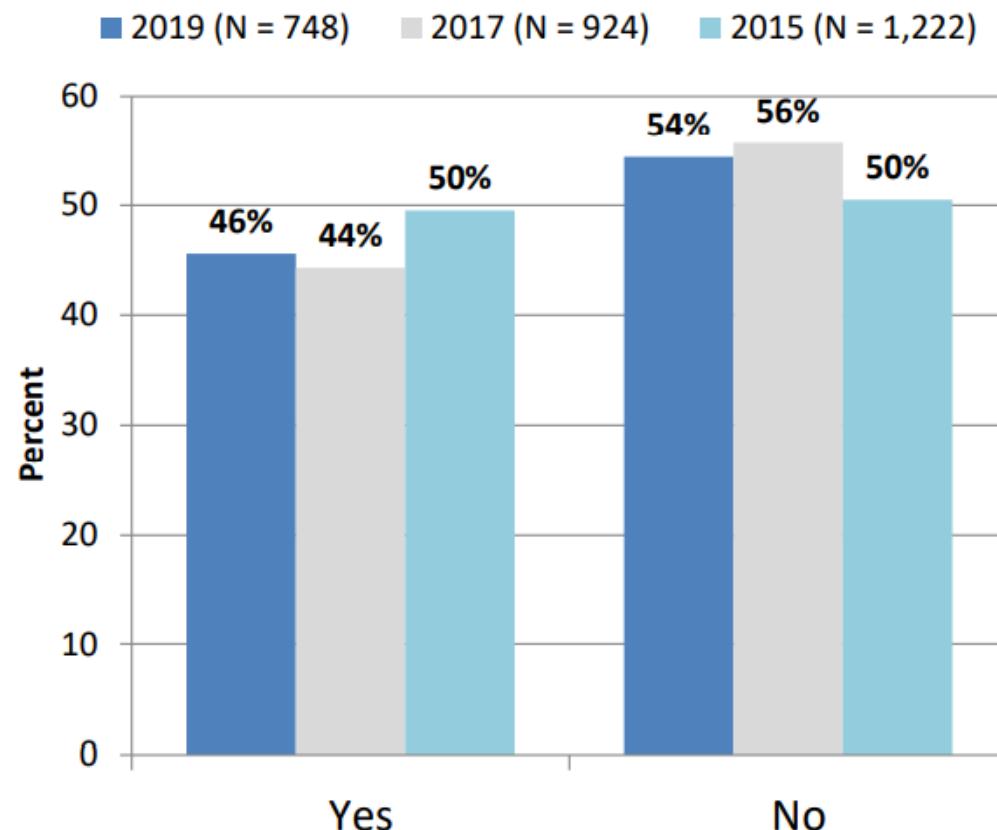
GPIO

General Purpose Input Output

- ▶ Kilkanaście pinów (standardowy rozstaw 0.1 cala/2.54 mm) różnie konfigurowanych dla różnych urządzeń
- ▶ Obok uniwersalnych pinów GPIO - piny zasilające (3.3V i 5 V), masa oraz wtyki dla magistralach komunikacyjnych.
- ▶ Mogą być skonfigurowane zarówno jako wejścia, jak i wyjścia,
- ▶ Niektóre piny łącznie tworzą obwody skonfigurowane jako interfejsy komunikacyjne (UART, I2C, SPI).
- ▶ prąd płynący w pinach nie może przekraczać kilkunastu mA,
- ▶ zwykle nie posiadają dodatkowych zabezpieczeń przeciw zwarciom lub przepięciom,
- ▶ piny oznaczone skrótem PWM mają możliwość transmisji sygnału z modulacją szerokości impulsu

SW – Projektowanie

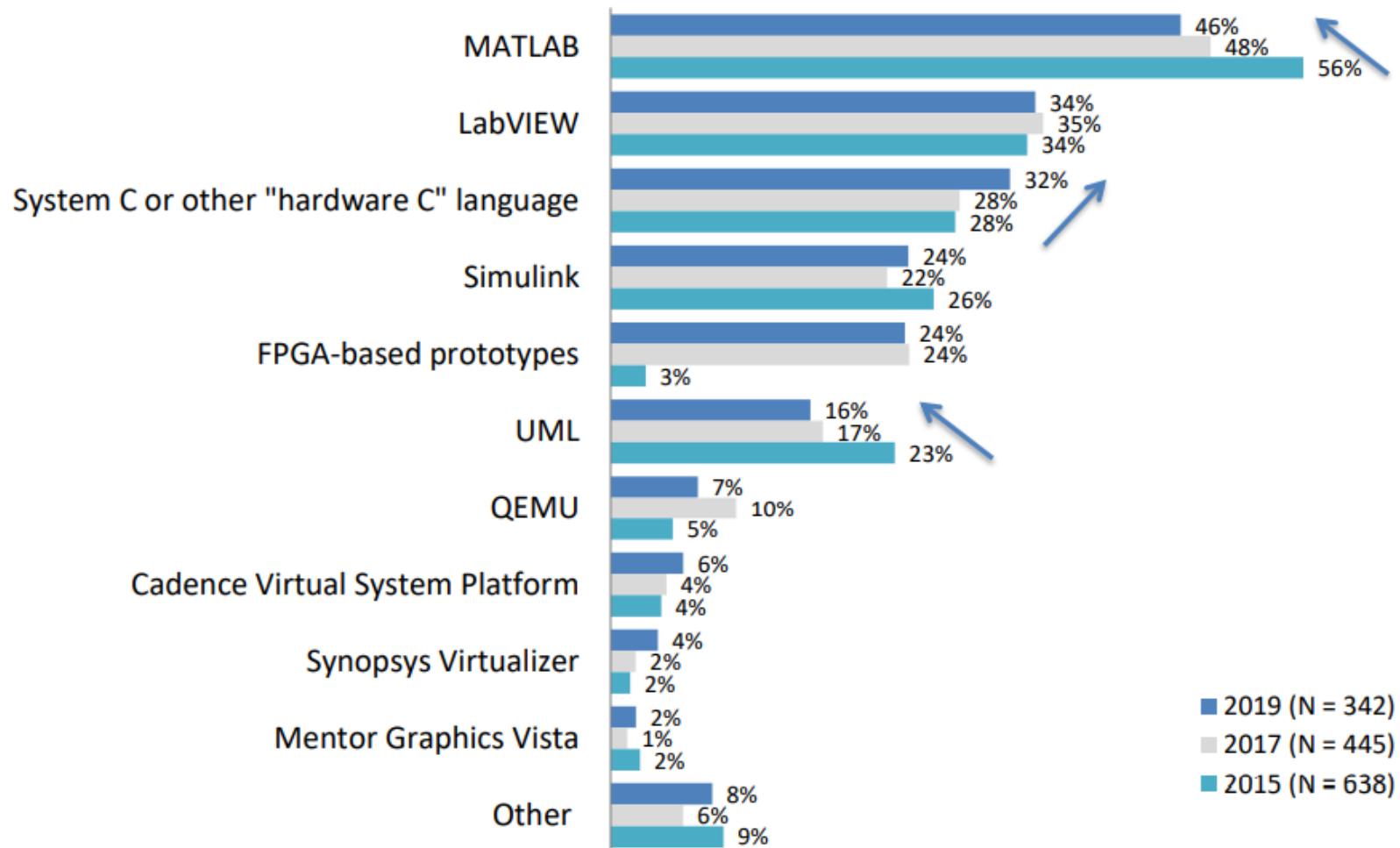
Did you start your current embedded design with a development board?



| Development Board Started With (Write-in recall answers only) | N=281 | % |
|--|-------|-------|
| STMicroelectronics | 43 | 15.3% |
| TI | 30 | 10.7% |
| NXP | 20 | 7.1% |
| Raspberry Pi | 19 | 6.8% |
| Microchip | 14 | 5.0% |
| Arduino | 13 | 4.6% |
| Xilinx | 13 | 4.6% |
| Atmel | 11 | 3.9% |
| Espressif ESP-32 | 7 | 2.5% |
| Renesas | 7 | 2.5% |
| Silicon Labs | 6 | 2.1% |
| Nordic | 5 | 1.8% |
| Digilent | 4 | 1.4% |
| Nucleo Board | 4 | 1.4% |
| ZedBoard | 4 | 1.4% |
| Analog Devices | 3 | 1.1% |
| Beaglebone Black | 3 | 1.1% |
| Cypress | 3 | 1.1% |
| AdaFruit 'Feather' Cortex-M4 | 2 | 0.7% |
| ARM | 2 | 0.7% |
| Atmega | 2 | 0.7% |
| Avnet Picozed | 2 | 0.7% |

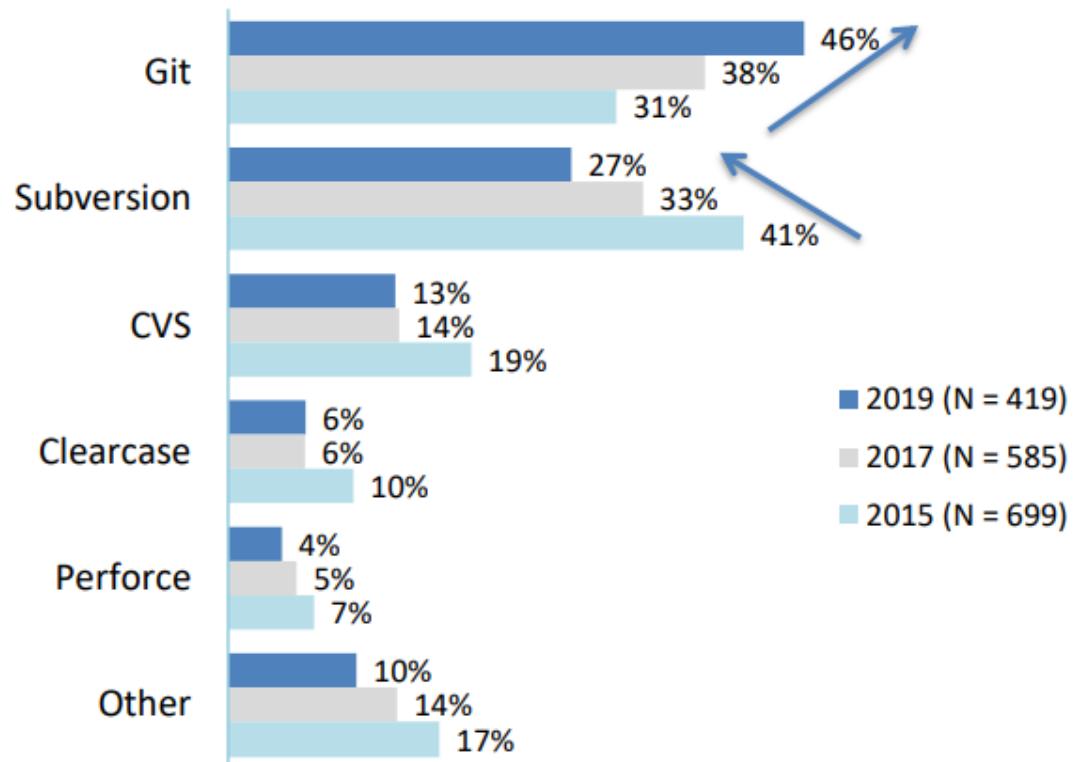
SW – Projektowanie

What system level design tools do you or your organization currently use?



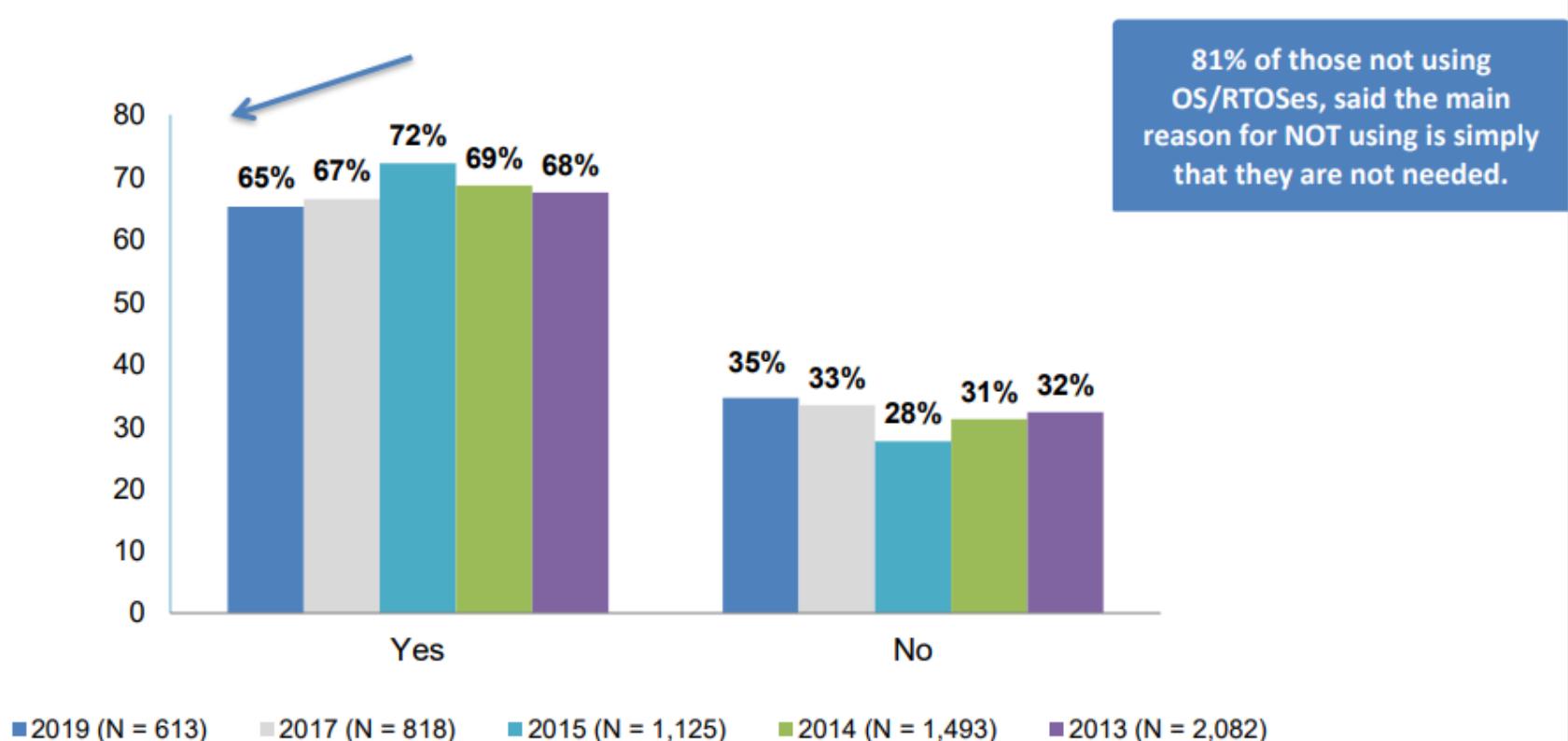
SW – Projektowanie

Which of the following Version Control software systems do you currently use?



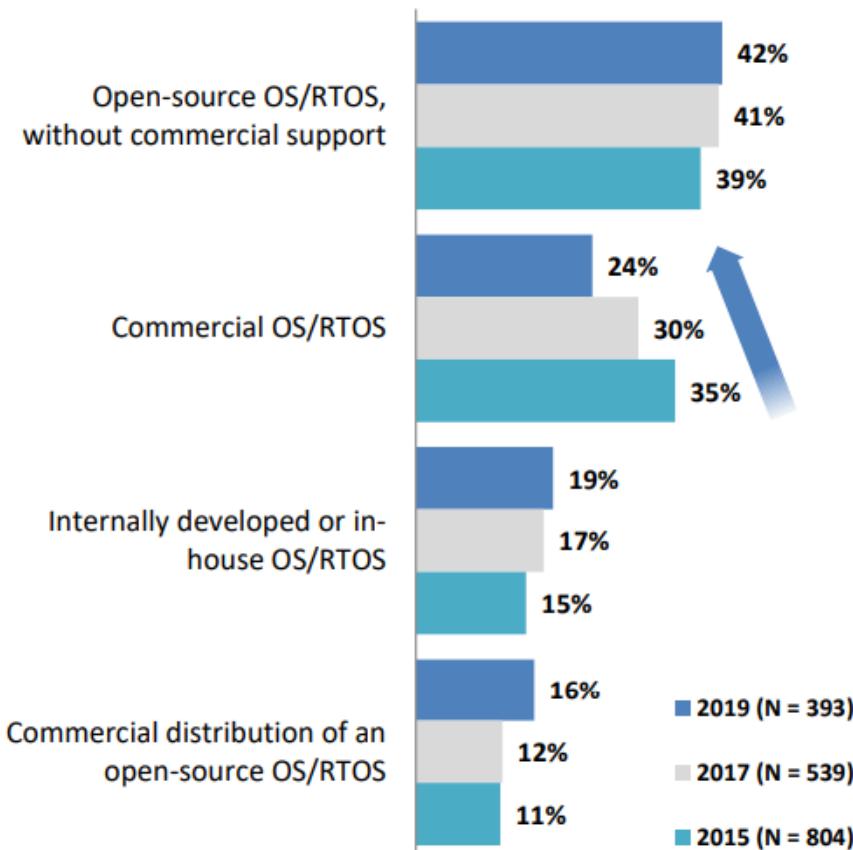
SW – systemy operacyjne

Does your current embedded project use an operating system, RTOS, kernel, software executive, or scheduler of any kind?

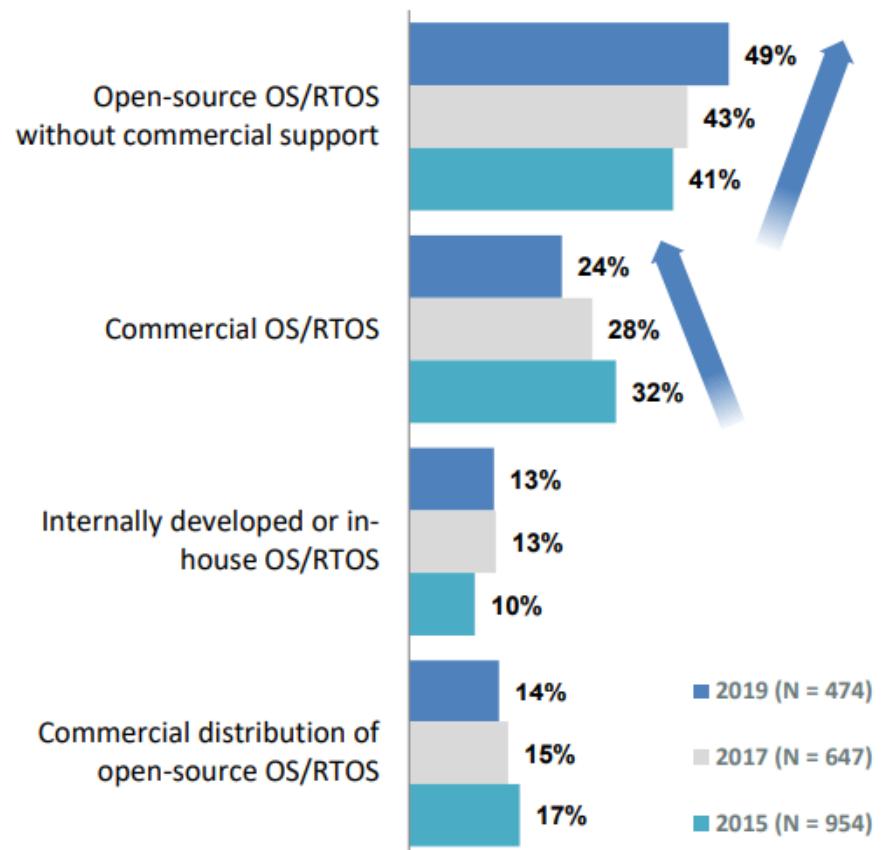




My current embedded project uses:

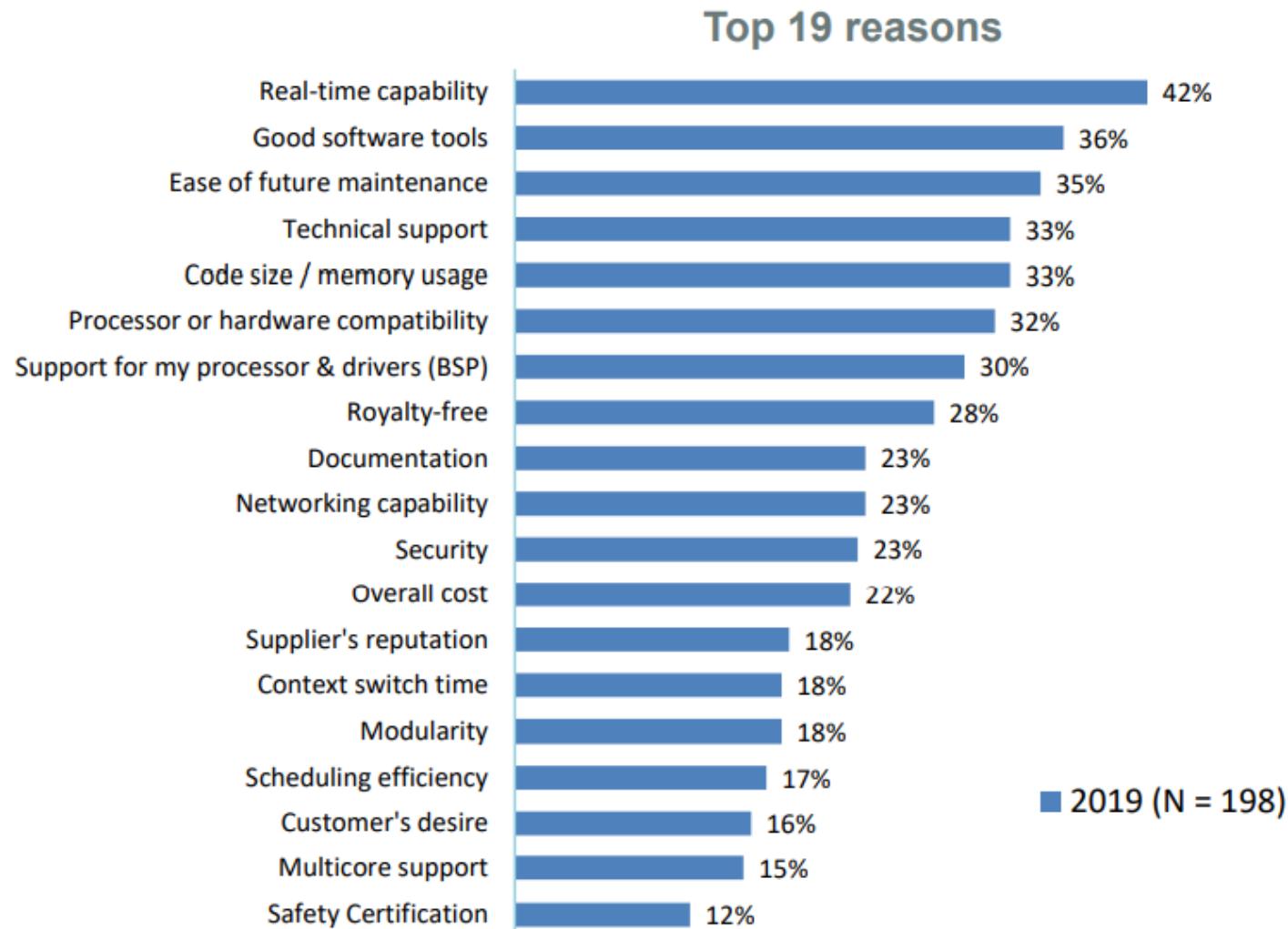


My next embedded project will likely use:

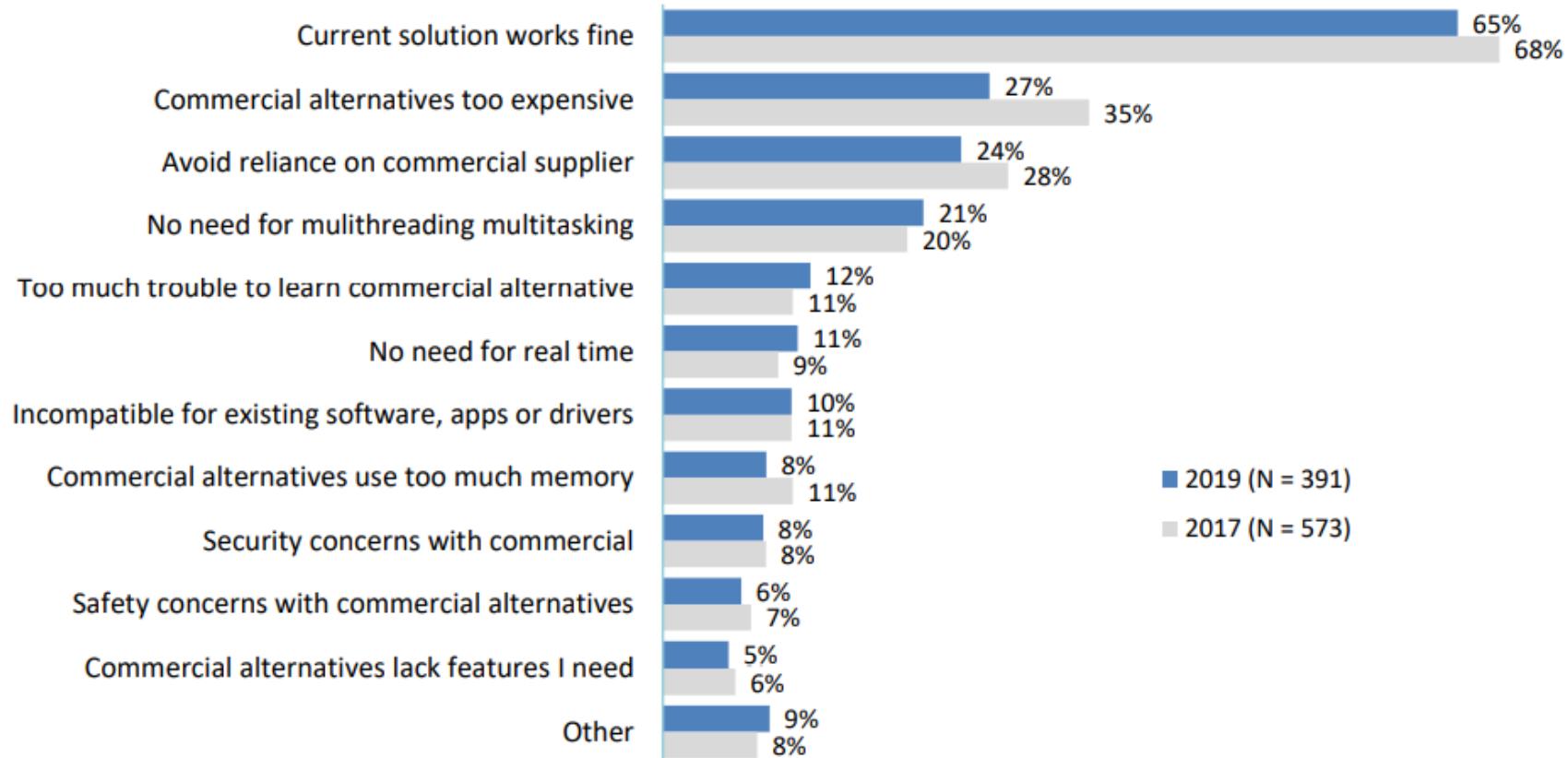


SW – systemy operacyjne

Which factors most influenced your decision to use a commercial operating system?

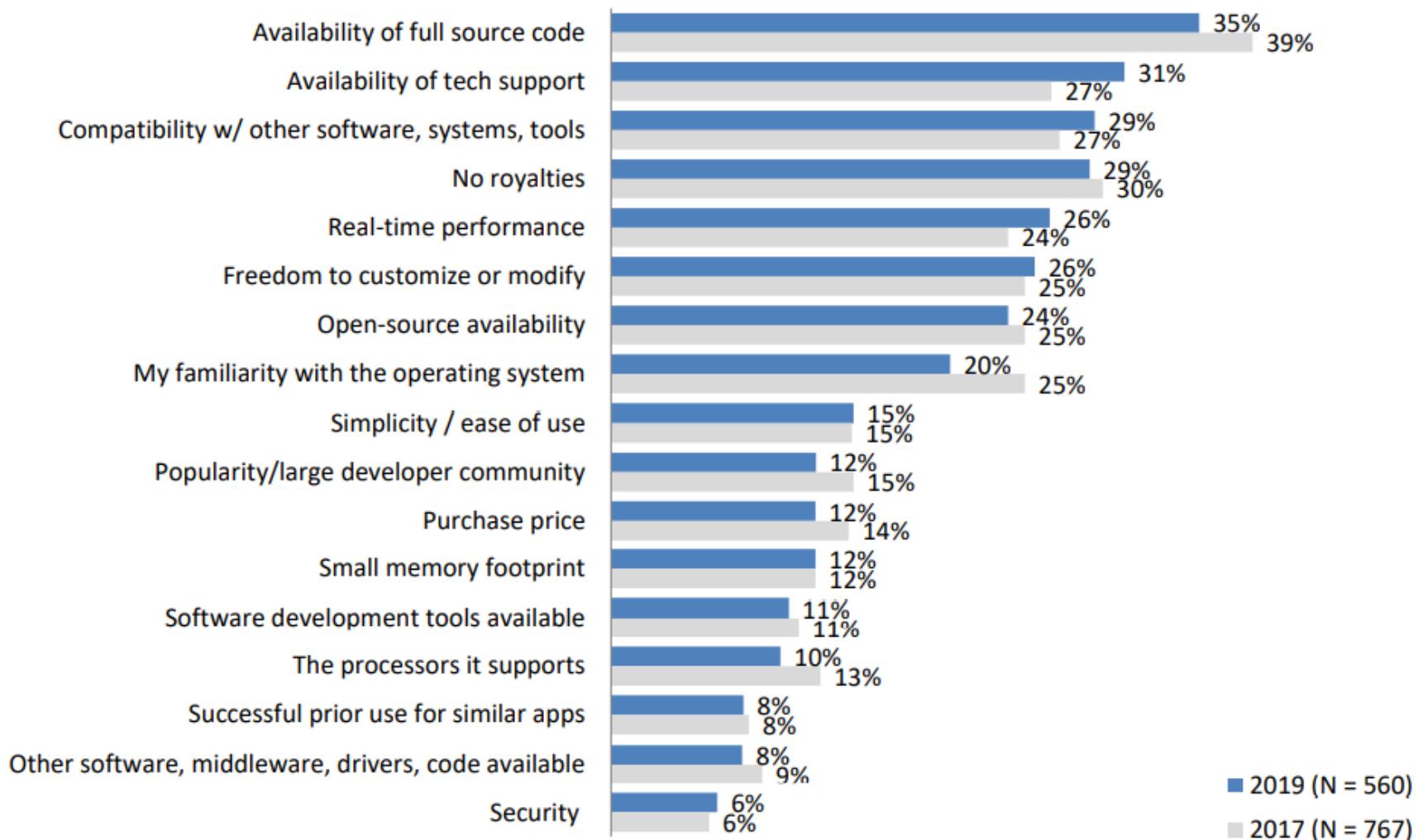


What are your reasons for not using a commercial operating system?



SW – systemy operacyjne

What are the most important factors in choosing an operating system?

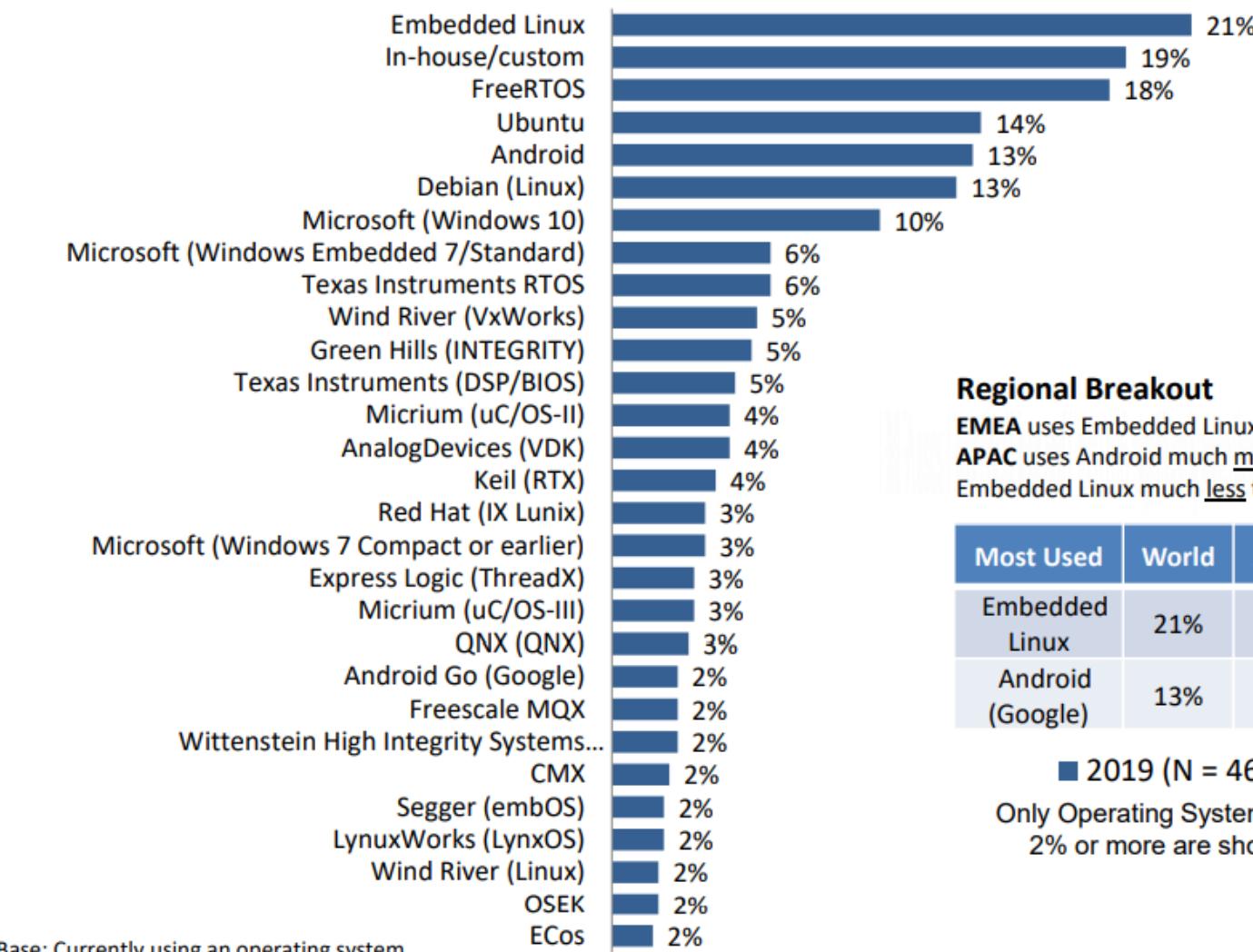


Źródło: https://www.embedded.com/wp-content/uploads/2019/11/EETimes_EMBEDDED_2019_Embedded_Markets_Study.pdf

SW – systemy operacyjne



**Please select ALL of the operating systems
you are currently using.**



Regional Breakout

EMEA uses Embedded Linux much more than other regions.
APAC uses Android much more than other regions and uses
Embedded Linux much less than others.

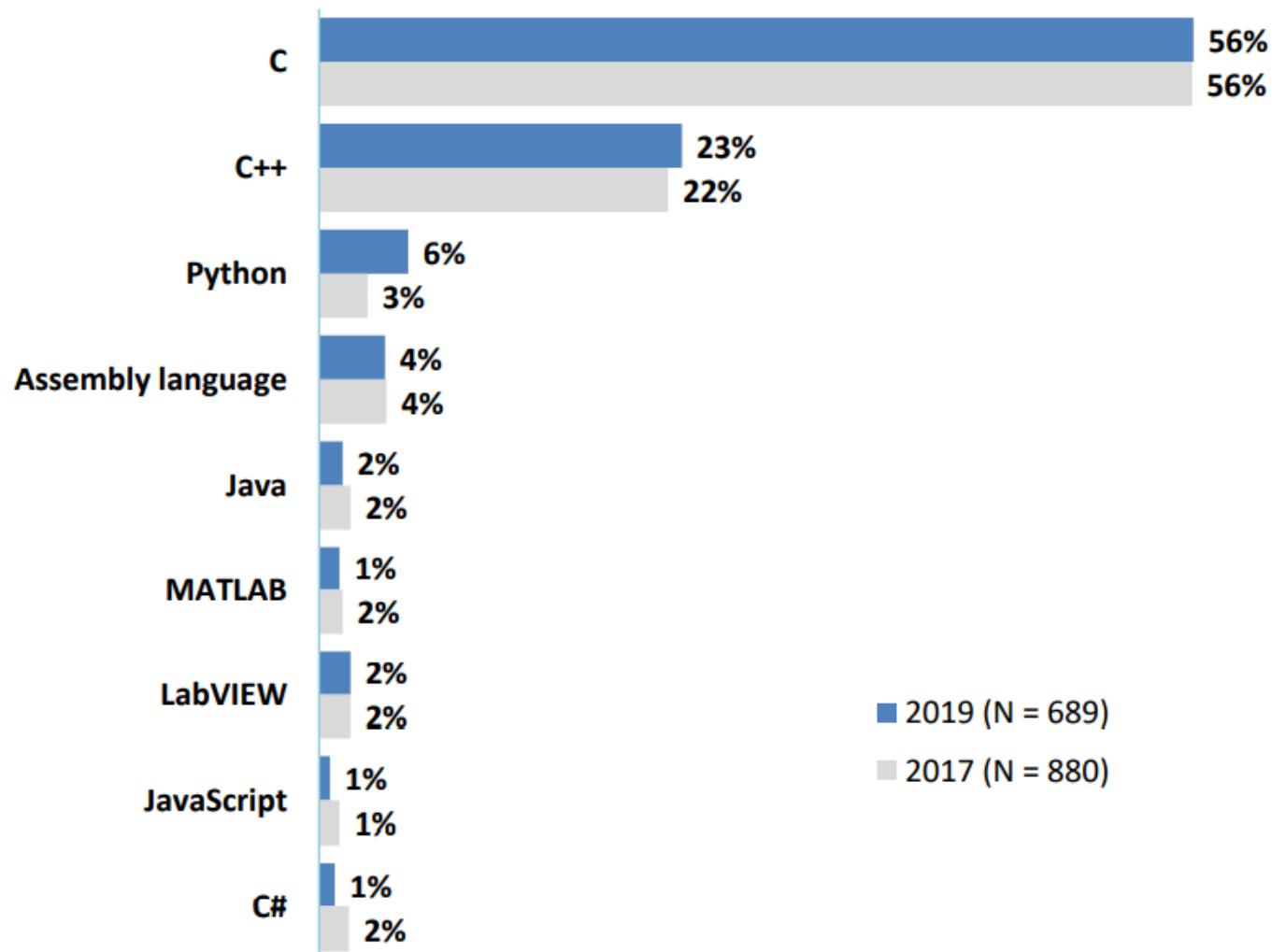
| Most Used | World | Americas | EMEA | APAC |
|------------------|-------|----------|------------|------------|
| Embedded Linux | 21% | 21% | 30% | 15% |
| Android (Google) | 13% | 9% | 14% | 27% |

■ 2019 (N = 468)

Only Operating Systems with
2% or more are shown.

SW – język programowania

My current embedded project is programmed mostly in:



Specyfika oprogramowania SW

- Przewidywalność
 - Operacje C++ wykonywane są w stałym, przewidywalnym i mierzalnym czasie
 - Wyjątki: alokacja pamięci (**new**), obsługa wyjątku (**throw**). Zwykle nie używane w systemach czasu rzeczywistego!
- Prostota i czytelność!
 - Mile widziany wysoki poziom abstrakcji
 - Assembler – niekoniecznie
 - Czytelny kod wyrażający pomysł projektanta
 - Nie optymalizuj, dopóki nie musisz
 - Prawa Johna Bentley-a:
 - Pierwsze prawo: Don't do it
 - Drugie prawo (tylko dla ekspertów): Don't do it yet

Błędy oprogramowania SW

- Liczba usterek oprogramowania systemów wbudowanych rośnie!
 - “Internet of Things”
 - Programowanie na coraz wyższym poziomie abstrakcji
 - Złożone algorytmy (machine learning)
 - Integracja kodu programów
- Problemy
 - Kod pisany przez programistów, którzy nie są projektantami sprzętu
 - Kierownicy nie rozumieją problemów programistów i projektantów sprzętu
 - Błędy o bardzo małym prawdopodobieństwie (ale katastrofalnych skutkach)

thermostat bug plunges customers into cold



By James Billington

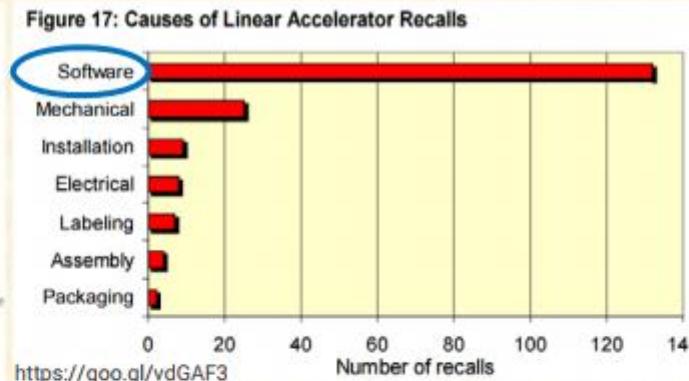
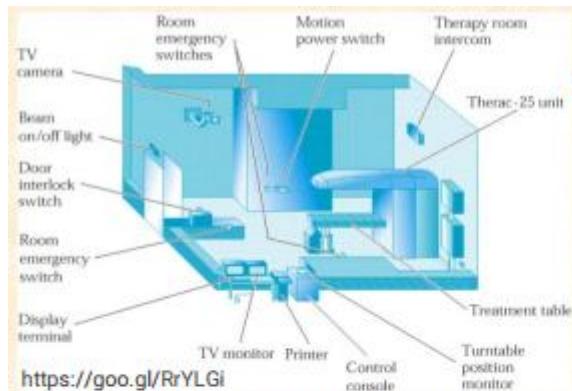
January 14, 2016 14:27 GMT

<https://goo.gl/RPv9V6>



Smart thermostat has been leaving customers cold after suffering from a software bug that drained its battery.

Błędy oprogramowania SW



To keep a Boeing Dreamliner flying,
reboot once every 248 days

by Edgar Alvarez | @abcdeedgar | May 1st 2015 At 6:34pm



Knight Capital Says Trading Glitch Cost It \$440 Million AUGUST 2, 2012 9:07 AM Runaway Trades Spread Turmoil Across Wall St.



Repurposed Bit activates testing mode

Bezpieczeństwo oprogramowania SW

Hack attack causes 'massive damage' at steel works

<https://goo.gl/CDsbV2>



The hack attack led to failures in plant equipment and forced the fast shut down of a furnace.

A blast furnace at a German steel mill suffered "massive damage" following a cyber attack on the plant's network, says a report.

Hackers caused power cut in western Ukraine

12 January 2016



<https://goo.gl/rYgWff>

Ukraine has been forced to turn to back-up power sources in recent months following a spate of power cuts.

A power cut in western Ukraine last month was caused by a type of hacking known as "spear-phishing", says the US Department of Homeland Security (DHS).

■ Attacks can affect the physical world

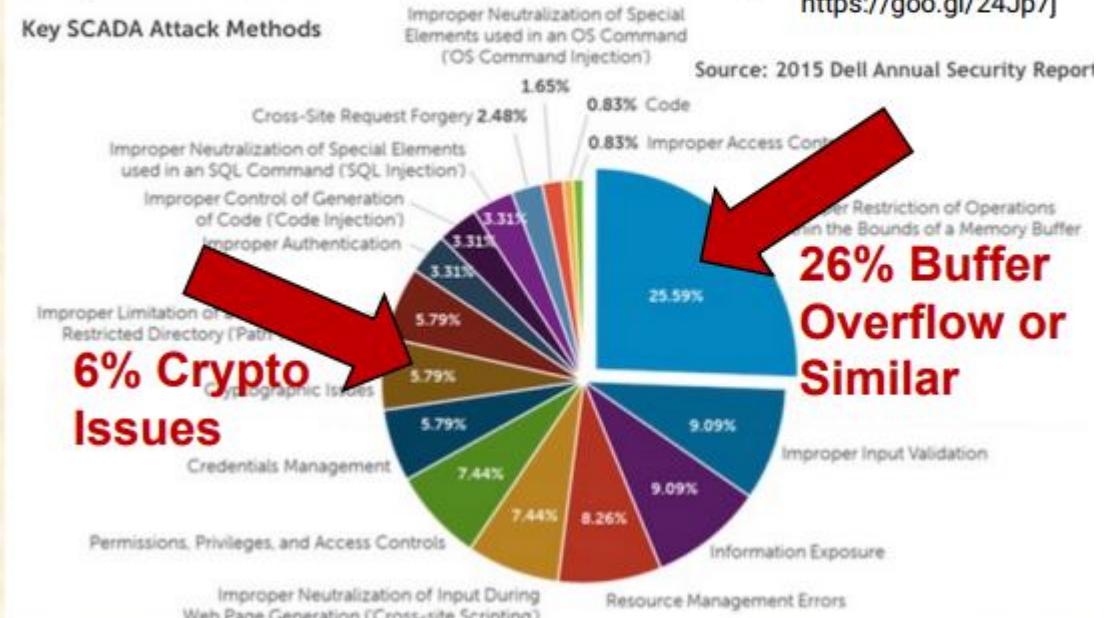
Attacks Against SCADA Systems Doubled in 2014: Dell

By Mike Lennon on April 13, 2015

Dell SonicWALL saw global SCADA attacks increase against its customer base from 91,676 in January 2012 to 163,228 in January 2013, and 675,186 in January 2014.

<https://goo.gl/24Jp7j>

Key SCADA Attack Methods



© 2016 Edge Case Research LLC

4

Jakość kodu źródłowego

Automotive Engine Control Code Quality



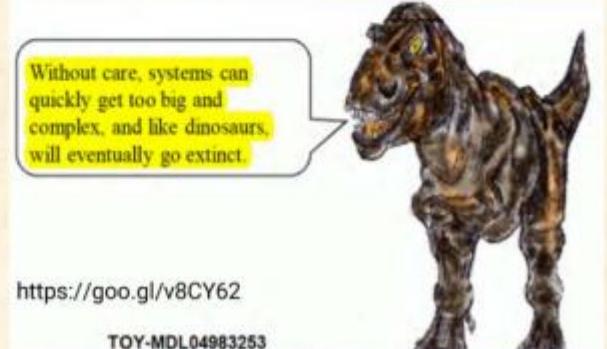
Edge Case Research

- **\$\$\$\$B Toyota Unintended Acceleration Fiasco: 2010-...?**
 - "Reckless disregard" Jury verdict in one death
 - Hundreds of death and injury settlements (still ongoing)
- **Code quality overview (256K SLOC in C):**
 - Throttle angle routine: MCC of 146 (MCC above 50 is "untestable")
 - 80,000 MISRA C violations
 - Uninitialized variables, condition side effects, unsafe type casting
 - 2272 global variable declaration type mismatches
 - 10,000 read/write global variables
 - Missing concurrency locks; confirmed race condition bug
 - Recursion with essentially full stack; no stack protection
 - Ineffective watchdog (kicked from HW timer)
 - No configuration management, no bug tracking, real time scheduling overload, minimal peer reviews

Because structure design is not being implemented, a "spaghetti" state arises; both TMC and suppliers struggle to confirm overall situation

<https://goo.gl/v8CY62>

TOY-MDL04983219



Without care, systems can quickly get too big and complex, and like dinosaurs, will eventually go extinct.

<https://goo.gl/v8CY62>

TOY-MDL04983253

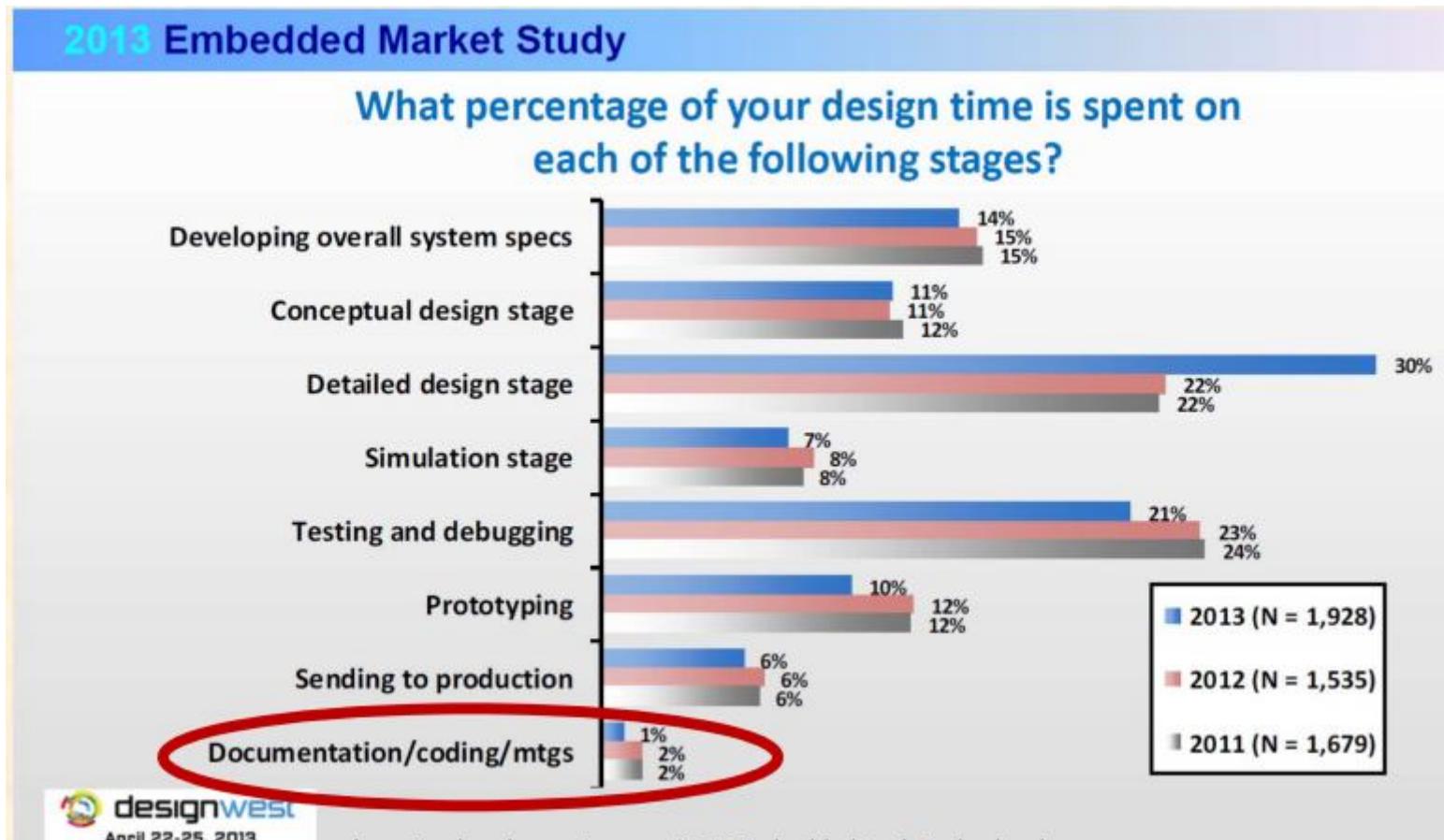
© 2016 Edge Case Research LLC

6

For more, web search: "Koopman Toyota"

Źródło: https://users.ece.cmu.edu/~koopman/pubs/issre2016_keynote_slides.pdf

Ile czasu pisze się kod źródłowy SW?



Źródło: https://users.ece.cmu.edu/~koopman/pubs/issre2016_keynote_slides.pdf

Standardy programowania

- **C90** - „ISO/IEC 9899:1990 Programming Language C”.
- **C99** - “ISO/IEC 9899:1999 Programming Language C”.
- **C11** - “ISO/IEC 9899:2011 Programming Language C”.
- **C++** - „ISO/IEC 14882:2003 Programming language C++”.
- **MISRA C – standard języka C zdefiniowany przez The Motor Industry Software Reliability Association (MISRA) w Wielkie Brytanii**
 - MISRA C:1998
 - MISRA C:2004
 - MISRA C:2012