

WYKŁAD 2

Architektura i budowa urządzeń mobilnych

Przedmiot: Programowanie aplikacji mobilnych

Studia: Informatyka

SoC · ARM · 5G · OLED · Bezpieczeństwo · Android/iOS

[WEB](#)

[APP](#)

[SoC: CPU, GPU, NPU, pamięć](#)

[Wyświetlacze i kamery](#)

[Łączność 5G, WiFi 7, UWB](#)

[Stos systemowy Android / iOS](#)

[Bezpieczeństwo i przyszłość](#)

Plan wykładu

SI. 1–3

Historia, ekosystem i klasyfikacja urządzeń mobilnych

SI. 6–7

CPU mobilny — ARM, big.LITTLE, ISA, predykcja gałęzi

SI. 10–11

Pamięć — LPDDR5X, UFS 4.0, PoP, Flash NAND

SI. 14–15

Kamery — sensor, ISP, OIS, computational photo

SI. 18–19

Bateria, PMIC, GaN i zarządzanie energią

SI. 22–23

Chain of Trust — bootloader, kernel, HAL, AIDL

SI. 26–27

Zarządzanie energią software — Doze, BGTask, thermal

SI. 30

Trendy, składane, AI Phone, 300W, Foundation Models

SI. 4–5

SoC — System on Chip, architektura i producenci

SI. 8–9

GPU i NPU — grafika, TBDR, AI akceleratory

SI. 12–13

Wyświetlacze — OLED, LTPO, ProMotion, HDR, AOD

SI. 16–17

Łączność — 5G, WiFi 7, BT 5.4, NFC, UWB, GPS

SI. 20–21

Bezpieczeństwo — Secure Enclave, TrustZone, TEE

SI. 24–25

Stos Android AOSP i iOS XNU — architektura

SI. 28–29

Termika, mechanika, produkcja TSMC 3nm

Historia urządzeń mobilnych: od PDA do AI Phone

Urządzenie mobilne = komputer kieszonkowy z łącznością bezprzewodową?
Rewolucja 2007 (iPhone) → 2023 (on-device AI) → 2025 (spatial computing).

1992	IBM Simon Pierwszy smartfon (touchscreen!). 1MB RAM. PCMCIA slot. 2400 baud modem. Waga 510g.	1996	Palm Pilot PDA + Graffiti handwriting. 128KB RAM. Infrared sync. 5M+ użytkowników. Definiuje erę PDA.
2000	Nokia 3310 Feature phone — 4MB, 2.5G GPRS. 400M+ sprzedanych. Masowa adopcja telefonii komórkowej.	2007	iPhone (1gen) Multi-touch, Safari, 3.5" 160dpi, Samsung ARM 620MHz, 128MB RAM. Rewolucja interfejsu.
2008	Android 1.0 T-Mobile G1 (HTC Dream). Open-source. ARM926 528MHz, 192MB RAM. Pierwsze cupcake.	2010	iPad (1gen) A4 SoC (Apple+Samsung). 256MB RAM, IPS 1024×768. Definiuje kategorię tabletów.
2013	64-bit mobile Apple A7 — pierwszy 64-bit SoC w smartfonie. 2× wydajność. Wymusiło migrację całej branży.	2019	5G era Snapdragon 855 + X50 modem. mmWave i sub-6GHz. 10 Gbit/s teorii. Nowa era łączności.
2022	AI on-device Apple A16 Neural Engine 17 TOPS. Stable Diffusion na telefonie. On-device LLM 3B params.	2025	AI Phone Snapdragon 8 Elite 80 TOPS NPU. Gemini Nano natively. Vision Pro spatial computing. 300W.

System on Chip (SoC): Architektura i kluczowi producenci

SoC to serce urządzenia mobilnego — CPU, GPU, NPU, modem, ISP i dziesiątki innych bloków IP na jednym krzemowym chipie.

Bloki funkcjonalne SoC (A18 Pro):

CPU Cluster

6 rdzeni ARM: 2× Everest (performance 4GHz) + 4× Sawtooth (efficiency 2.4GHz). big.LITTLE Async. Instrukcje NEON/SVE2. OOO 8-wide issue.

GPU (6-core Apple)

4.5 TFLOPS FP32. Metal API. Ray tracing hardware. AV1 decode. Mesh shaders. Tile-Based Deferred Rendering.

Neural Engine (16-core ANE)

38 TOPS. CoreML → ANE bytecode. Prywatna architektura Apple. Stable Diffusion < 10s. Nie dostępne przez Metal.

Image Signal Processor

Photonic Engine. 4K ProRes 120fps, HDR, Deep Fusion, computational RAW. Dedykowany real-time pipeline.

Secure Enclave (SEP)

Dedykowany koprocesor bezpieczeństwa. Klucze AES/RSA/ECC. Biometria Face ID. Odizolowany własny boot ROM.

Modem + RF combo

Apple C1 (iPhone 16e). Qualcomm X75 (16 Pro). Sub-6GHz + mmWave 5G. WiFi 7 + BT 5.4 combo chip.

Producenci SoC (2024–2025):

Apple A18 Pro (TSMC N3E)

6-core CPU, 6-core GPU, 16-core ANE 38 TOPS. 19 mld tranzystorów. Die ~82mm². Ekskluzywny — tylko iPhone 16 Pro. Najlepszy CPU single-core.

Snapdragon 8 Elite (TSMC N3E)

2× Oryon Prime @4.47GHz + 6× Oryon Perf. Adreno 830. Hexagon NPU 80 TOPS. All-big-core design. Flagship Android 2025.

Google Tensor G4 (Samsung 4nm)

Własna architektura. Dedykowany TPU dla AI features. Pixel 9 Pro. Priorytet: speech/ML on-device privacy.

MediaTek Dimensity 9400 (TSMC N3E)

All-big-core: 1+3+4. APU 890 — 50 TOPS. Imagiq 1090 ISP. On-device LLM 7B. Flagship performance w niższej cenie.

Samsung Exynos 2500 (SF3 GAA)

GAAFET 3nm. 10-core CPU. Xclipse 950 GPU (AMD RDNA 3.5). Pierwszy RDNA w telefonie. Galaxy S25 w wybranych rynkach.

CPU Mobilny: ARM ISA, big.LITTLE i architektury rdzeni

ARM ISA: instrukcje i rozszerzenia

```
# ARM64 (AArch64) – kluczowe zestawy instrukcji
# Base ISA ARMv8-A/v9:
#   31 rejestrów 64-bit X0-X30 + SP + PC
#   Fixed-width 32-bit encoding
#   ADRP/LDR: dostęp page-relative
#
# NEON (Advanced SIMD):
#   32 rejestry 128-bit (V0-V31)
#   FMLA V0.4S, V1.4S, V2.4S ; 4x FP32 FMA
#   Kluczowe: DSP, kodeki, ML inference
#
# SVE2 (Scalable Vector Extension v2):
#   Wektory 128-2048 bit (chip-defined width)
#   Apple A18: 128-bit SVE2
#   Qualcomm Oryon: 512-bit SVE2
#
# ARMv9.2 nowości (A18 Everest / Cortex-X4):
#   SME (Scalable Matrix Extension) – ML
#   MTE (Memory Tagging Extension) – CVE mitigation
#   BTI (Branch Target Ident.) – ROP protection
#   PACV2 – Pointer Authentication codes
#
# Cache hierarchy (Apple Everest):
#   L1i: 192KB, L1d: 128KB @ 4-cycle
#   L2: 16MB per cluster @ 12-cycle
#   L3 (SLC): 32MB shared @ 35-cycle
#   DRAM: LPDDR5X ~100ns
```

AArch64

Procesory mobilne używają architektur ARM (Advanced RISC Machine). Heterogeniczne klastry + DVFS = maksymalna wydajność przy minimalnym zużyciu energii.

Konfiguracje rdzeni 2024–2025

Apple A18 Pro

2× Everest @4.0GHz (P-cores) + 4× Sawtooth @2.4GHz (E-cores). 6.2 TFLOPS int8. OOO 8-wide. 192KB L1i per P-core.

Snapdragon 8 Elite

2× Oryon Prime @4.47GHz + 6× Oryon Perf @3.53GHz. Brak małych rdzeni (all-big). 40% perf vs 8 Gen 3. Qualcomm własna architektura (nie ARM Cortex).

Dimensity 9400

1× Cortex-X925 @3.62GHz + 3× X4 @3.28GHz + 4× A720 @2.4GHz. Tri-cluster big.LITTLE.L+. 3nm N3E TSMC.

Exynos 2500

1× Cortex-X5 @3.3GHz + 4× X4 @2.55GHz + 5× A725 @1.8GHz. 10-core total. GAAFET GAA transistor Samsung SF3.

DVFS w Linux (Android)

Governor schedutil: CPU util → freq mapowanie. ondemand (legacy). powersave. performance. PELT (Per-Entity Load Tracking) per-task.

big.LITTLE / DynamIQ

Heterogeniczne klastry w jednym DSU. EAS (Energy-Aware Scheduler): schedutil governor. DVFS per-cluster. 0.5V core voltage range. Krok freq co 50MHz.

OOO i Branch Prediction

8-wide issue (Apple Everest). ROB 600+ entries. TAGE hybrid predictor >99% hit. BTB 50k entries. Superscalar + OOO = IPC >5.

GPU Mobilne: Tile-Based Deferred Rendering i architektury

Mobilne GPU używają TBDR (Tile-Based Deferred Rendering) zamiast Immediate Mode — dzieli ekran na kafelki renderowane w szybkiej pamięci on-chip, oszczędzając DRAM BW.

TBDR: fazy renderowania

1. Vertex + Tiling pass

Wszystkie wierzchołki przetworzone. Ekran podzielony na kafelki 16×16 lub 32×32 px. Prymitywy przypisane do kafelków — lista na chip.

2. Hidden Surface Removal

HSR eliminuje niewidoczne fragmenty PRZED shader. Oszczędza ~50% ALU. PowerVR Imagination: wynalazca HSR 1993. Apple/IMG SoC.

3. Fragment shading (per-tile)

Kafelek renderowany w całości w TILE RAM (on-chip ~256KB). Fullscreen quads → cache-friendly access. Fill rate x4 vs IMR.

4. Memory writeback

Gotowy kafelek zapisywany do DRAM framebuffer. Tylko raz, bez Z-buffer readback. BW savings: 60–80% vs Immediate Mode Rendering.

producenci GPU mobilnych

Apple GPU (6-core, A18 Pro)

Custom TBDR. 4.5 TFLOPS FP32. Metal API. Hardware ray tracing (BVH traversal). Mesh shaders. AV1 HW decode. Najlepsza efektywność energetyczna.

Adreno 830 (SD 8 Elite)

Qualcomm TBDR. Vulkan 1.3, OpenGL ES 3.2. UBWC lossless compression. Predictive Rendering. HW ray tracing. 3.8 TFLOPS. +40% vs prev gen.

Xclipse 950 (Exynos 2500)

AMD RDNA 3.5 licencja. Pełne ray tracing hardware. FidelityFX Super Resolution. Vulkan 1.3. Pierwszy RDNA w telefonie (Galaxy S25 EU).

Mali G925 (ARM architecture)

Valhall 5 architektura. 16-core config. Asahi Linux driver open-source. OpenCL 3.0. Used mid-range MediaTek/Samsung. Imagination PowerVR powraca w Pixel.

Metal (iOS) i Vulkan (Android) to niskopoziomowe API GPU. Vulkan: explicit memory management, render passes = TBDR-friendly explicit tiling. Metal: podobny model z mniejszą verbosity.

NPU: Neural Processing Unit i akceleratory AI On-Device

Jak działa NPU, Systolic Array

```
# NPU – operacje i dataflow (uproszczony)
# Dominująca op: Conv2D = GEMM (matmul)
#   Output[N,H,W,Co] = sum(Input*Kernel)
Python

# Systolic Array (n×n MAC array):
#   Wagi preładowane → dane przepływają
#   Każdy PE: 1 MAC/cycle → n² MAC/cycle

# INT8 Quantization – klucz do TOPS:
#   FP32 (32-bit) → INT8 (8-bit)
#   4× mniejszy model, 4× szybsze MAC
#   QAT (Quantization-Aware Training): < 1% drop
#   Post-Training Quant (PTQ): szybsze, gorsze

# TOPS = GOPS×10-3 (tera operations/s INT8)
# Apple A18 Pro ANE: 38 TOPS INT8
# Efektywność: ~10 TOPS/W (NPU)
#               ~1-3 TOPS/W (GPU)
#               ~0.1 TOPS/W (CPU)

# CoreML deployment:
import coremltools as ct
model = ct.convert(torch_model,
  inputs=[ct.TensorType(shape=(1, 3, 224, 224))],
  compute_units=ct.ComputeUnit.ALL)
# ALL = ANE + GPU + CPU fallback
model.save("model.mlpackage")
```

NNAPI (Android Neural Networks API)

Kieruje inferencje na NPU/GPU/DSP automatycznie. Delegates: NNAPIDelegate, GPUDelegate, HexagonDelegate (DSP), XNNPackDelegate (CPU SIMD). TFLite wbudowane.

Efektywność NPU vs CPU vs GPU

NPU: ~10 TOPS/W · GPU: 1–3 TOPS/W · CPU: 0.1–0.5 TOPS/W. NPU 20–100× bardziej efektywne energetycznie niż CPU dla konwolucji.

NPU to dedykowany akcelerator ML: 10–100× efektywniejszy energetycznie niż CPU/GPU dla operacji macierzowych (GEMM/Conv2D). Standard w każdym flagowym SoC.

Porównanie NPU 2024–2025

Apple ANE — A18 Pro

38 TOPS

16-core ANE. CoreML wyłączny. Najlepsze TOPS/W dla iOS. Stable Diffusion < 10s.

Qualcomm Hexagon — 8 Elite

80 TOPS

Hexagon v75 + Tensor Accelerator. QNN SDK otwarty. Najwięcej surowych TOPS Android 2025.

Google TPU — Tensor G4

~20 TOPS

Dedykowany TPU: Call Screening, Photo Unblur, Magic Eraser. On-device privacy pierwszorzędna.

MediaTek APU 890

50 TOPS

Dimensity 9400. NeuroPilot SDK. On-device LLM 7B. Generative AI background generation.

Samsung MX NPU — Exynos 2500

~34 TOPS

MDNIE AI display, SceneOptimizer, Real-Time Eye Tracking AI. ARM Ethos-U komponent.

Pamięć mobilna: LPDDR5X, UFS 4.0, PoP i Flash NAND

Urządzenie mobilne używa kilku typów pamięci: RAM (LPDDR) do bieżącej pracy, Flash (UFS) do przechowywania. Organizacja PoP minimalizuje zajętość PCB i latencję.

LPDDR5X — RAM

136 GB/s

Szerokość szyny 64 lub 128-bit. BW do 136 GB/s (128-bit). Napięcie 0.5V core. 8H (8-High) stack → 16GB w 1 pakiecie. PoP: die bezpośrednio na SoC.

UFS 4.0 — pamięć masowa

4200 MB/s

Universal Flash Storage. M-PHY HS-G5 (2×11.6 Gbps linie). Seq. odczyt 4.2 GB/s, zapis 2.8 GB/s. Random 4K IOPS: 1M. Wewnętrznie TLC NAND (3 bity/cell).

eMMC 5.1 — budżet/midrange

400 MB/s

1 lane HS400. Seq. odczyt 400 MB/s. Brak CMD queue. Tańszy. Używany w telefonach <\$300. Jeden interfejs vs UFS (dwa równoległe).

PoP (Package on Package)

1 ns latencja

LPDDR die bezpośrednio na SoC die w jednym pakiecie. < 1mm odległość → minimalna latencja i parazytyczna pojemność. Obowiązkowy w mobilnym.

zRAM + wirtualny RAM

~3 GB extra

Android 11+: zRAM (kompresja LZ4/ZSTD ~60% skuteczna). Samsung/Xiaomi marketing 'virtual RAM'. Realnie: UFS swap = 5–10× wolniejszy od DRAM.

136 GB/s

LPDDR5X BW (128-bit)

4200 MB/s

UFS 4.0 seq. odczyt

Odczyt info o pamięci (Android)

```
$ adb shell cat /proc/meminfo Shell
MemTotal:      12218020 kB # 12GB LPDDR5X
MemAvailable:  4832156 kB
SwapTotal:     6291456 kB # 6GB zRAM

$ adb shell getprop ro.boot.hardware.ufs
samsung,ufs4 # UFS 4.0

$ adb shell df -h /data
256G  95G 161G 37% /data # eUFS 4.0 NAND

# LPDDR5X specyfika
# - PMIC zarządza VDD per rank (0.5V core)
# - DBI (Data Bus Inversion) → mniej przełączeń
# - Write leveling, CA training przy boot

# UFS 4.0 vs NVMe
# UFS: M-PHY transport, SCSI-based (UTP)
# NVMe: PCIe transport, NVMe protocol
# Porównywalne throughput, NVMe mniejsza latencja
```

LPDDR5X Die x8 (8H stack)

Interposer / Top Package

SoC Die (CPU+GPU+NPU+ISP)

PCB Substrate (BGA balls)

Wyświetlacze urządzeń mobilnych: OLED, LTPO, ProMotion i HDR

Wyświetlacz to największy konsument energii (40–60% baterii). Technologia panelu, odświeżanie i sterowanie PWM determinują zarówno jakość jak i żywotność baterii.

Technologie paneli

AMOLED / Super AMOLED

Active Matrix OLED. Każdy piksel = OLED dioda (R,G,B lub RGBW PenTile). Czarny = wyłączony = 0W. Kontrast ∞ . Samsung produkuje ~70% rynku OLED.

LTPO OLED (Low Temp Poly-Si Oxide)

Tranzystory LTPS (szybkie) + IGZO (do 1Hz odświeżanie). Dynamiczny refresh 1–120Hz. Samsung E7 panel: iPhone 16 Pro, Galaxy S25 Ultra.

Tandem OLED (iPad Pro M4)

2 warstwy OLED w stos: 2x jasność przy tym samym prądzie lub ta sama jasność przy połowie prądu → dłuższa żywotność. Pierwsze masowe tandem OLED.

IPS LCD (budżet/iPad mini)

In-Plane Switching. Stałe podświetlenie → wyższe zużycie (zawsze 100% BL). Brak true black. Tańszy, mniej burn-in. iPad mini 6, iPhone SE 3.

Parametry i ich znaczenie

PPI — rozdzielczość

460 ppi

iPhone 16 Pro: 460 PPI. Retina = >300 PPI z typowej odległości. Samsung Galaxy S25: 505 PPI (QHD+). 4K tablet: ~200 PPI (widziany dalej).

LTPO — adaptacyjny refresh

1–120 Hz

AOD przy 1Hz. ScrolluUI 120Hz. Video 60Hz. Oszczędność 30–40% energii vs stałe 120Hz. iOS ProMotion; Android High Refresh Rate UI.

Peak brightness i HDR

2000–4000 nit

HDR10+, Dolby Vision. Peak 2000–4000 nit outdoor. SDR 600–800 nit. Apple Super Retina: 2000 nit peak HDR.

Delta-E i gamut

$\Delta E < 1$, P3

$\Delta E < 1$: niezauważalna różnica kolorów dla oka. P3 Wide Color (25% więcej niż sRGB). Kalibracja fabryczna per-device na Apple.

PWM dimming i AOD

>1440 Hz

PWM <240Hz → migotanie widoczne przy niskiej jasności. Flagship: 1440Hz+ lub DC dimming powyżej 20%. AOD = 1Hz LTPO + wyłączone RGB = <5mW.

💡 LTPO E7 (Samsung) używa IGZO TFT — może utrzymać stan piksela bez odświeżania (charge retention). To umożliwia 1Hz AOD bez zużycia prądu przełączania.

System kamer: Sensor Stack, ISP, OIS i Computational Photography

Aparat to główny wyróżnik flagowych smartfonów. Kluczem nie jest sam sensor, to ISP i algorytmy computational photography decydują o jakości finalnego zdjęcia.

Stos systemu kamer

Optyka (soczewka, apertura, AF)

f/1.6 – f/4.9. 5–9 soczewek szklanych (ED, asferyczne). Laser AF + PDAF (phase detect). Peryskop: 5–10× optyczny. Mniejsza f-liczba = więcej światła.

Sensor CMOS (BSI, Stacked DRAM)

Sony IMX/Samsung GN. BSI (back-side Illum.): fotodiody bliżej soczewki → 35% więcej fotonów. Stacked: DRAM layer pod sensorem → szybki readout bez rolling shutter.

ISP (Image Signal Processor)

Hardware pipeline: BLC → Demosaic (Bayer→RGB) → NR → AWB → AE → AF → Sharpening → HDR → Encode. 4K60fps: 800 Mpix/s processing.

Computational Photography

Deep Fusion (Apple): wielokrotna ekspozycja + ML merge przed kompresją. Night Sight (Google): wiele klatek + align + NR. HDR+: tone mapping neural.

Kodek i zapis

HEIF (H.265 bazowany): 50% mniejszy vs JPEG przy tej samej jakości. Apple Log / HLG HDR video. ProRes RAW 12-bit 48MP. ProRes 4K120fps.

OIS i sensor systemów kamer

```
# OIS – Optical Image Stabilization (HW)
# Żyroskop IMU @8000Hz → drganie → korekta
# Aktuator magnetyczny: soczewka lub sensor
# Kompensacja: ±2–3° angular
# Latencja: < 10ms (hardware closed-loop)

# Sensor-Shift OIS (iPhone 13+):
# Sensor porusza się (nie soczewka) – 5000x/s
# Zakres: ±2mm – kompensuje ruchy ciała

# EIS (Electronic – software):
# Bufor 120% FOV → crop 100% (1.2x overhead)
# Gyro-fused per-frame warp: homografia
# Apple Action Mode = hybrid OIS+EIS

# ProRes RAW pipeline:
# 48MP RAW Bayer → minimal ISP (no NR)
# → lossless compression → .DNG/ProRes RAW
# Pełna kontrola post-production
```

Kotlin

Sony IMX989 (1-cal sensor)

Xiaomi 13 Ultra. 1" sensor, większy od pełnoramkowych kompaktów. ISO 6400 f/1.9. 8K video. Większy piksel = więcej fotonów = lepsze zdjęcia nocne.

Samsung 200MP HP9

0.56µm pixel. Nona-Binning (9→1): 200MP → 12.5MP w ciemności. ISOCELL DTI: isolation między pikselami → brak crosstalk.

Peryskop teleobiektyw

Fold: 5–10× optical. Huawei P60 Pro: 10× optical 300mm equiv. Ciągły zoom elektroniczny F1.4–F4.0 regulowana przesłona. OIS wbudowany.

LiDAR Scanner (iPhone Pro)

dToF: czas lotu fotonów IR. Zasięg 5m. AR plane detection < 1s. Portrety w ciemności (głębokość AI AF). Spatial 3D scanning aplikacje.

Łączność: 5G, WiFi 7, Bluetooth 5.4, NFC i UWB

Nowoczesny smartfon zawiera 7+ modułów bezprzewodowych. Zarządzanie ich współpracą (coexistence: BT+WiFi+5G na tej samej antenie) to złożony problem inżynierski.

5G NR (New Radio)

4 Gbit/s

📶 Sub-6GHz + mmWave 📶 < 1ms

3GPP Release 15–18. Sub-6: 700MHz–6GHz do 1 Gbit/s. mmWave: 24–100GHz, 10 Gbit/s, zasięg <200m. SA vs NSA. Modem X75 / Apple C1.

WiFi 7 (802.11be)

46 Gbit/s

📶 2.4 / 5 / 6 GHz 📶 < 5ms

Multi-Link Operation (MLO): jednoczesny odbiór na kilku pasmach. 4096-QAM. 320MHz kanały. HARQ retransmission. Wymaga WiFi 7 router.

Bluetooth 5.4 / LE Audio

2 Mbit/s

📶 2.4 GHz 📶 < 10ms

LE Audio: LC3 kodek, lepsza jakość przy 50% mniejszym rozmiarze. Auracast broadcasting 1→N odbiorców. BIS dla hearing aids standardowych.

NFC (Near Field Comm.)

424 kbit/s

📶 13.56 MHz 📶 < 0ms

ISO/IEC 14443. Passive i active mode. Zasięg 1–5cm. Apple Pay / Google Pay / NDEF tags. Secure Element + Host Card Emulation (HCE).

UWB (Ultra-Wideband)

27 Mbit/s

📶 6.5–10.6 GHz 📶 ns

IEEE 802.15.4z. Pomiar czasu lotu (ToF) z dokładnością < 10cm. Apple U2 chip / Samsung Uwing. CarKey, AirDrop direction, Precision Finding.

GPS / Multi-GNSS

n/a

📶 L1/L2/L5 📶 < 30s TTFF

GPS + Galileo + GLONASS + BeiDou. Dual-frequency L1+L5: ±1m (ionospheric). Snapdragon X75: L5 4-constellation. RTK extension via 5G NTRIP.

Bateria i zarządzanie energią: PMIC, GaN i Fast Charging

Bateria Li-Ion / Li-Po to jeden z najmniej zmienionych komponentów przez 15 lat. Postęp pochodzi z PMIC algorytmów ładowania oraz technologii GaN ładowarek.

Algorytm ładowania CC-CV i PMIC

```
# PMIC funkcje (Qualcomm PM8998 / Apple PMIC) Python
# 1. Buck Converter (DC-DC step-down):
# VIN = 3.7V batt → VOUT = 0.5V CPU
# Wydajność: >95% (PWM synchronous)
# Częst. przełączania: 2-8 MHz
# 2. LDO (Low-Dropout Regulator):
# Niski ripple → RF, audio, MIPI
# Wydajność = VOUT/VIN (może <80%)
# 3. Fuel Gauge (coulomb counter):
# SOC = ∫ I · dt (State of Charge)
# BMS: OVP, OTP, Short-circuit protection
# 4. CC-CV ładowanie:
# Phase 1: CC (Constant Current) → 1C rate
#           Xiaomi 300W: ~80A(!) przez 1min
# Phase 2: CV (Constant Voltage) → 4.35V
# Phase 3: Trickle (utrzymanie 100%)
# Cutoff: <0°C lub >45°C → STOP
# 5. Optimized Charging (iOS/Android):
# Uczy harmonogramu użytkownika
# Zatrzymaj na 80%, dobiegnij do 100% rano
# Cel: mniej cykli na 100% = dłuższa żywotność
```

GaN (Gallium Nitride) ładowarki

GaN vs Si: 10× mniejszy chip, 3× szybsze przełączanie, mniejsza strata ciepła.
65W GaN < połowa wielkości 45W Si. Anker Nano, Baseus GaN3 Pro.

Technologie szybkiego ładowania

USB Power Delivery 3.1

Standard JEDEC/USB-IF. Do 48V/5A = 240W EPR. iPhone 15 Pro: 20W PD.
MacBook: 140W USB PD. Certyfikat USB-IF wymagany.

Qualcomm Quick Charge 5

45-100W. Dual-cell + buck-boost. 0→50% w 5 minut (Xiaomi). Ochrona:
termometr per-cell + algorytm CC-CV. Temp cutoff 45°C.

Xiaomi HyperCharge (300W)

3 komory baterii równolegle + tri-port ładowanie. Temperatura < 43°C. 0→100%
w 5 minut. Dedykowany chip w kablu. Limitowane rynki.

MagSafe / Qi2

MagSafe: 15-25W z magnetyczną koilą. Qi2 = standard kompatybilny z MagSafe.
Reverse wireless: Pixel 8 → smartwatch 4.5W.

Bateria Silicon Anode (Li-Si)

Krzemowa anoda: 10× wyższa pojemność vs grafit. Problem: ekspansja 300%.
Rozwiązanie: nano-Si cząstki. Samsung SDI: +15% energy density 2025.

Bezpieczeństwo sprzętowe: Secure Enclave, TrustZone i TEE

Bezpieczeństwo mobilne zaczyna się w sprzęcie. Izolowane środowiska wykonania chronią klucze kryptograficzne i dane biometryczne nawet gdy OS jest skompromitowany.

ARM TrustZone: dual-world model

```
# ARM TrustZone - dual-world execution
# NORMAL WORLD (Rich OS - Android/iOS):
#   Linux kernel, apps, services
#   NS bit = 1 (Non-Secure)
#   Pełny dostęp do zasobów NS

# SECURE WORLD (TEE - Trusted Execution Env.):
#   Osobny OS: OP-TEE / Samsung Kinibi / Qualcomm QTEE
#   NS bit = 0 (Secure)
#   Izolowana pamięć (TrustZone DRAM protect)
#   Osobny interrupt controller (GICv3 S-IRQ)

# Przełączenie: SMC (Secure Monitor Call)
#   NW → SW: SMC #0 → EL3 monitor → TEE

# TEE use cases:
#   Klucze kryptograficzne (AES, RSA, ECDH)
#   Biometria (fingerprint template verify)
#   DRM (Widevine L1 → 4K Netflix offline)
#   Android Keystore → HSM-backed keys
#   FIDO2 / WebAuthn platform authenticator
#   eSIM provisioning (SGP.22 RSP)
```

Apple Secure Enclave (SEP)

Architektura SEP

Oddzielny koprocesor Apple. Własny boot ROM, kernel, RAM. Izolowany od Application Processor. Własny klucz UID (unikalny per-device, nieeksportowalny).

Biometria: Face ID / Touch ID

Szablon biometryczny NIGDY nie opuszcza SEP. Porównanie wewnątrz SEP → zwraca tylko bool do iOS. Żadna app ani iOS nie ma dostępu do surowych danych.

Hierarchia kluczy

UID → File Encryption Key (FEK) → File. Passcode chroniony w SEP: 10 błędnych prób → wipe. Usunięcie SEP = utrata wszystkich danych na zawsze.

Secure Boot Chain

Boot ROM (immutable) → LLB → iBoot → iOS kernel. Każdy etap podpisany kluczem Apple. Jailbreak = złamanie jednego ogniwa. Rollback prevention.

Android StrongBox + Titan M2

StrongBox HSM: certyfikat FIPS 140-2 Level 2+. Google Pixel Titan M2: dedykowany koprocesor. KeyAttestation: certyfikat kryptograficzny że klucz jest sprzętowy.

Chain of Trust Bootloader, AVB i sekwencja Bootowania

Od naciśnięcia przycisku zasilania do uruchomienia aplikacji. Każdy etap weryfikuje kolejny. Złamanie któregokolwiek ogniwa to zagrożenie bezpieczeństwa.

Sekwencja bootowania Android (Qualcomm)

01	ROM / PBL (Primary BL)	Immutable ROM w SoC. Weryfikuje XBL podpisem OEM. Inicjalizuje DRAM. Nie może być nadpisany. Fallback EDL mode (Qualcomm download).
02	XBL (Extensible Boot Loader)	Qualcomm UEFI. Weryfikuje ABOOT/ABL. Konfiguruje peryferia. Secure Boot enforcement. Tryb fastboot/EDL.
03	ABL / Android Boot Loader	Fastboot protocol. Weryfikuje boot.img (AVB 2.0 signature). dm-verity setup. Unlock bootloadera = nonce reset + czerwony ekran.
04	Linux Kernel + ramdisk	Dekompresja kernela. initramfs → init. Device tree loading. SELinux: permissive → enforcing. Montowanie partycji: system/vendor/product.
05	Android Init + Zygote → System	init.rc: property service, ueventd. Zygote: fork model dla apps. SystemServer: AMS, WMS, PMS. boot complete broadcast po ~30s.

💡 AVB 2.0 (Android Verified Boot): dm-verity chroni partycje system/vendor. Modyfikacja = czerwony ekran ostrzeżenia. Vbmeta digest w TEE → rollback protection przez anti-rollback index.

Architektura Android AOSP: 6 warstw od Kernela do aplikacji

Android AOSP to 6-warstwowy stos. Project Treble (Android 8.0) separuje vendor HAL od framework → szybsze aktualizacje bezpieczeństwa bez udziału OEM.

Aplikacje (APK/AAB)

SystemUI · Apps · Google Play Services · GMS (Google Mobile Services)
· WebView



Framework (Java/Kotlin)

ActivityManager · WindowManager · PackageManager · ContentProvider ·
BroadcastReceiver



Android Runtime (ART)

AoT + JIT compilation · Generational GC · JVMTI · Core Libraries
(OpenJDK 17)



Natywne biblioteki (C/C++)

Bionic libc · OpenGL ES (libEGL) · SQLite · WebKit (Chromium) ·
MediaCodec



HAL 2.0 (AIDL stable)

Camera HAL · Audio HAL · Sensor HAL · Bluetooth HAL · Graphics
(EGL/Vulkan)



Linux Kernel (GKI)

Binder IPC · ION/DMA-BUF · Wakelocks · cpufreq/schedutil · SELinux ·
eBPF · GKI modules

Treble: /system (Google update) i /vendor (OEM) osobno. AIDL stable HAL: wersjonowane interfejsy, binderized procesy.
GKI: jeden kernel image dla wszystkich SoC od Android 12.

Shell

Architektura iOS: XNU Kernel, Frameworks i Swift Runtime

iOS oparty na XNU (X is Not Unix): hybrid kernel z Mach microkernel + BSD UNIX. Zamknięty ekosystem = ścisła kontrola jakości i bezpieczeństwa.

XNU, hybrid kernel

```
# XNU = Mach + BSD + IOKit + libkern
# Architektura hybrydowa:
# BSD Layer (POSIX API):
#   VFS, Sockets, Signals, syscalls
#
# Mach Layer (microkernel core):
#   Mach Messages + Ports (IPC)
#   Virtual Memory (Mach VM)
#   Tasks, Threads, Scheduling
#
# IOKit (C++ device drivers):
#   DriverKit (userspace, iOS 16) - XPC drivers
#
# XPC (Cross-Process Communication):
#   Type-safe (NSDictionary/Codable)
#   Sandbox enforcement per XPC service
#   Zastępuje Mach messages dla apps
#
# dyld (dynamic linker):
#   dyld_shared_cache: pre-linked frameworks
#   dlopen() dla plugins
#   LC_LOAD_DYLIB → rezolucja symboli
#
# ARC (Automatic Reference Counting):
#   Kompilator wstawia retain/release
#   Swift: ARC + optional weak/unowned
```

iOS Framework Stack

Sandbox i App Container

Każda app: własny kontener ~/Documents. MAC (Mandatory Access Control): sandbox profile. Entitlements: lista uprawnień podpisana Apple. SIP (sys.integ.prot.).

Cocoa Touch (UIKit, SwiftUI)

UIApplication, UIViewController, UIView, CALayer, Core Animation. SwiftUI: declarative, state-driven, @Observable.

Media (AVFoundation, Metal)

AVPlayer, AVCaptureSession, Metal 3. Core Image GPU filters. ARKit, RealityKit, Vision (CoreML). Spatial Audio.

Core Services (Foundation)

NSURLSession, CoreData, CloudKit, CoreLocation, HealthKit, CryptoKit. Combine reactive framework.

Core OS (Darwin / XNU)

POSIX threads, BSD sockets, mmap, kqueue. libSystem. Grand Central Dispatch (GCD). DispatchSource.

Hardware Abstraction

IOKit drivers. SEP Interface. ANE via CoreML. GPU via Metal. BLE/NFC/UWB API. Core Haptics.

Swift Concurrency

async/await → Continuations na GCD. Actors: isolated mutable state. @MainActor: UI thread safety. Structured concurrency (async let, TaskGroup).

Software energy management: Android Doze, iOS Background

Software energy management jest równie ważny jak hardware. Systemy mobilne muszą agresywnie ograniczać tło bez degradacji UX — to wymaga precyzyjnych mechanizmów systemowych.

Android Doze Mode

```
Kotlin
# Android Doze – fazy i ograniczenia
# Warunek: screen OFF + batt + nieruchomy

# Light Doze: screen off, dowolna pozycja
#   X Network sync ograniczony
#   ✓ Alarmy normalne

# Deep Doze: screen off + nierucho. + ~30min
#   X Sieć (WiFi i cellular OFF)
#   X Wakelocks ignorowane
#   X AlarmManager (tylko EXEMPTED)
#   X GPS (LocationManager suspended)
#   ✓ FCM high-priority push (wyjątek!)
#   ✓ CHRE sensory (step counter wciąż)
#   Maintenance window: ~1min/kilka godzin

# WorkManager (poprawny sposób zadań):
val request = PeriodicWorkRequestBuilder<SyncWorker>(
    repeatInterval = 15, TimeUnit.MINUTES)
    .setConstraints(Constraints.Builder()
        .setRequiredNetworkType(CONNECTED)
        .setRequiresBatteryNotLow(true)
        .build())
    .build()
WorkManager.getInstance(ctx).enqueue(request)
# WorkManager respektuje Doze constraints
```

iOS Background Modes

Background App Refresh

OS budzi app gdy transfer gotowy. App nie kontroluje timingu. BGAppRefreshTask: 30s limit. Thermal + battery → OS może opóźnić indefinitely.

APNs + Silent Push

Apple Push Notification Service. Silent notification (content-available:1) → background fetch trigger. Priority 5 (throttled) vs 10 (immediate).

BGProcessingTask (iOS 13+)

Długie przetwarzanie gdy ładowanie + WiFi. OS decyduje kiedy — setEarliestBeginDate = hint. Max ~10 minut. CoreML training w tle.

Thermal State API

ProcessInfo.thermalState: nominal→fair→serious→critical. Poważny: obniż FPS, zatrzymaj heavy work. Krytyczny: OS może zakończyć app.

```
NotificationCenter.default.addObserver(
    forName: .thermalStateDidChange) { _ in
    let state = ProcessInfo.processInfo.thermalState
    if state == .serious { reduceSamplingRate() }
    if state == .critical { stopBackgroundWork() }
}
```

Swift

Mechanika i termika: chłodzenie, materiały i IP Rating

Urządzenie mobilne nie ma aktywnego chłodzenia. Zarządzanie ciepłem to problem materiałowy i systemowy — throttling to kompromis temperature vs performance.

Metody chłodzenia pasywnego

Vapor Chamber

Płaski hermetyczny pojemnik z cieczą (woda/etanol). Para od SoC → skrapla na zimnym końcu → kapilarą wraca. Przewodność >50× lepsza od miedzi. Samsung S25: 5,100mm² VC.

Graphite / Graphene Sheet

Arkusze grafitu 0.1mm. Anizotropowy: 700–1500 W/mK w płaszczyźnie (Cu: 400 W/mK), ale tylko 5 W/mK w osi Z. Między SoC a obudową. Tanie i cienkie.

TIM (Thermal Interface Material)

Między SoC a komorą: indium foil (5 W/mK) lub ciekły metal (70 W/mK — używa Apple w M-series laptopach). W telefonach: pasta termalna lub foil.

DTPM (Dynamic Thermal Power Management)

5–20 termistorów NTC w telefonie. Co 1°C wzrostu → redukcja CPU freq o 10%. Cel: <45°C na obudowie zewnętrznej. Thermal budget dzielony między SoC+modem+wyświetlacz.

Materiały obudowy i certyfikacja

Aluminium 7000 series

CNC machined. Anodyzacja (kolor + twardość Al₂O₃). Przewodnik ciepła. Waga 2.7 g/cm³. iPhone 15/16 base, MacBook. Tańszy od tytanu.

Tytan Grade 5 (Ti-6Al-4V)

iPhone 16 Pro: brushed titanium frame. 3× twardszy, 40% lżejszy niż stal. Nie magnetyczny (MagSafe OK). Drogi CNC. S25 Ultra też tytan.

Gorilla Glass Victus 3

Corning aluminosilicate. 1.5m drop na twardej powierzchni. Anti-smudge oleophobic. AGC Dragontrail (Sony). Ceramic Shield Apple: nano-ceramic 4× twardszy.

IP68 / IP69K sealing

IP6X: pełna ochrona przed pyłem. IPX8: zanurzenie > 1m OEM-defined. IPX9K (S25 Ultra): ciśnieniowe strumienie 8MPa. Uszczelki silikonowe, hydrophobic PCB.

MIL-STD-810H (rugged)

Military Standard: temperatura -40°C do +71°C, wibracje, upadki, wilgoć, ciśnienie. Zebra/CAT rugged phones. 26 różnych metod testowych.

Produkcja chipów, TSMC 3nm, fotolitografia EUV i pakowanie

Proces litograficzny, kroki

1. Wafer preparation

Krzem monokrystaliczny (Czochralski). Wafer 300mm. Czystość 99.9999999%. CMP polish do Ra < 0.1nm (atomowa gładkość).

2. Deposycja (CVD/ALD)

CVD: SiO₂, Si₃N₄. ALD (Atomic Layer Deposition): HfO₂ gate dielectric 5Å, mono-layer precyzja. High-K metal gate.

3. EUV fotolitografia

ASML EUV: λ=13.5nm. Tin droplet + laser → plasma → EUV. Reticle (mask) 4:1 reduction. 20+ warstw. Skanowanie 120 waferów/h.

4. Trawienie i implantacja

Plasma etch CF₄+O₂: anizotropowe ściany. Ion implantation: B/P/As doping. ALE (Atomic Layer Etch) mono-layer precision.

5. Test, dicing i pakowanie

E-test na waferze. KGD (Known Good Die). Laser dicing. PoP stacking. Yield ~70–80% dla N3E. Koszt = wafer / (dies × yield).

Produkcja mobilnych SoC to szczyt ludzkiej technologii. Tolerancje < 1nm, niewyobrażalna czystość klasy ISO 1 (< 10 cząstek/m³). Fabryka kosztuje >\$20 miliardów.

Porównanie węzłów technologicznych

Węzeł	Gęstość	Zużycie	Perf
TSMC N3E (3nm class)	19 mld/cm ²	-30% vs N5	+18%
TSMC N4P (4nm)	15 mld/cm ²	-22% vs N5	+11%
Samsung SF3 GAA (3nm)	17 mld/cm ²	-45% vs 5nm	+23%
TSMC N2 (2nm, 2025+)	~25 mld/cm ²	-25–30% vs N3	+10%

\$20B+

Koszt fabryki
TSMC fab 21

3.5 km

Ścieżka fotonów
EUV optical path

CoWoS (Chip-on-Wafer-on-Substrate) i InFO_PoP: TSMC integruje LPDDR + SoC w jednym pakiecie. To samo co PoP ale nowsza wersja. Używany w iPhone SoC od A10.

Studium przypadku: Apple iPhone 16 Pro (A18 Pro, 2024)

iPhone 16 Pro to szczyt integracji pionowej Apple.
Własny SoC, własny modem (C1 od 16e), własne oprogramowanie.
Każdy komponent zaprojektowany razem.

SoC — Apple A18 Pro

TSMC N3E. 6-core CPU (2P+4E). 6-core GPU. 16-core ANE 38 TOPS. 19 mld tranzystorów. Die ~82mm². 8GB LPDDR5X PoP. Razem na jednym pakiecie.

Kamera — 48MP + 48MP + 12MP

Główna 48MP f/1.78 OIS (sensor-shift 5th gen). Ultra-wide 48MP f/2.2 AF. Tele 12MP f/2.8 5× peryskop. LiDAR. 4K120fps ProRes Log.

Łączność

5G sub-6GHz + mmWave (US). WiFi 7 (802.11be). BT 5.3. NFC Apple Pay. UWB U2 chip. GPS+Galileo+BeiDou L1+L5 dual-band.

Wyświetlacz — Super Retina XDR

6.3" LTPO3 OLED 2622×1206 @460ppi. ProMotion 1–120Hz. 2000 nit HDR / 4000 nit outdoor. Always-On. Ceramic Shield szkło. 10-bit P3.

Bateria i ładowanie

3582 mAh LiPo. USB-C PD 20W. MagSafe 25W. Qi2 15W. 27h video playback. Apple Silicon efficiency. PMIC 3 rails.

Bezpieczeństwo

SEP koprocesor. Face ID TrueDepth infrared dot projector. Titanium chassis. IP68 (6m/30min). Emergency SOS via satellite Globalstar.

Studium przypadku: Samsung Galaxy S25 Ultra (SD 8 Elite, 2025)

Galaxy S25 Ultra, czyli flagowy Android 2025. Snapdragon 8 Elite globalnie (koniec Exynos w Ultra). 200MP + AI features + S-Pen ekosystem + tytan chassis.

SoC: Snapdragon 8 Elite

TSMC N3E. 2× Oryon Prime @4.47GHz + 6× Oryon Perf. Adreno 830. Hexagon NPU 80 TOPS. 16GB LPDDR5X. Brak małych rdzeni, all-big design.

Kamera: 200MP+50MP+10MP+50MP

200MP f/1.7 OIS HP9 Nona-Binning. Ultra-wide 50MP f/1.9. Tele 10MP f/2.4 3× + 50MP f/3.4 5× peryskop. ProVisual Engine ISP.

S-Pen i Galaxy AI

S-Pen latencja < 2.8ms. 4096 poziomów nacisku. Galaxy AI: Live Translate, Generative Edit, Note Assist. Gemini Nano on-device 80 TOPS certified.

Wyświetlacz: dynamic AMOLED 2X

6.9" LTPO E7 OLED 3088×1440 @505ppi. 1–120Hz. Vision Booster 2600 nit outdoor. AOD. Gorilla Glass Armor 2. Bez curvature (płaski ekran).

Bateria i ładowanie

5000 mAh. 45W SuperVOOC wired. 15W wireless Qi2. 4.5W reverse wireless. Vapor Chamber 5100mm². Cooltech+ 7-layer cooling.

Bezpieczeństwo i łączność

Samsung Knox Vault (StrongBox). Tytan chassis. IP68+IP69K. WiFi 7. BT 5.4. UWB. Satellite SOS via Iridium. Android 15 + One UI 7.

A18 Pro vs Snapdragon 8 Elite: benchmarki i analiza

Bezpośrednie porównanie Apple vs Qualcomm 2024–2025. Różne architektury, różne priorytety.
Apple: max single-core + efektywność energetyczna. Qualcomm: multi-core + NPU + 5G.

Test	Apple A18 Pro	Snapdragon 8 Elite	Lepszy
CPU Single-core (GB6)	3,561	2,810	🍏 Apple
CPU Multi-core (GB6)	14,000	10,400	🍏 Apple
GPU (Metal / Vulkan)	46,200	30,100	🍏 Apple
NPU (TOPS INT8)	38	80	🏠 Qualcomm
RAM Bandwidth	136 GB/s	68 GB/s	🍏 Apple
Thermal sustained (5min)	94%	72%	🍏 Apple
Battery life (video)	27h	23h	🍏 Apple
Modem 5G mmWave	C1 (brak mmWave w base)	X75 full mmWave	🏠 Qualcomm
AI benchmark (ETH AI)	~45	4850	🏠 Qualcomm
4K encode capability	ProRes RAW 4K120	8K@30fps H.265	– Remis

Apple dominuje CPU/GPU raw performance i efektywność energetyczną. Qualcomm: 2x więcej TOPS NPU, lepszy 5G modem mmWave i bardziej otwarty ekosystem AI tools (QNN SDK).

Wearables: Apple Watch, Galaxy Watch i kategorie specjalne

Wearables: ekstremalne ograniczenia — $< 1 \text{ cm}^3$, bateria $< 300 \text{ mAh}$, IP68, całodobowe noszenie. SoC i architektura całkowicie inne niż smartfon.

Apple Watch Ultra 2, architektura

SoC - Apple S9

64-bit dual-core. Neural Engine 4-core (60% szybszy vs S8). Ultra Wideband U2 chip. 64GB flash. LPDDR4X. Zużycie $< 200\text{mW}$ spoczynkowe.

Zdrowie (sensory)

EKG AFib clearance FDA. Optical PPG: SpO₂, HR continuous. Temperatura skóry noc. Akcelerometr crash detection 256g. Barometr.

Display LTPO OLED 1Hz

49mm 2000 nit OLED LTPO. 1Hz AOD. Zafirowe szkło (9 Mohs). GPS L1+L5 dual-band (Ultra). 36h+ bateria z optymalizacją.

watchOS i API

SwiftUI Watch API. HealthKit 100+ parametrów. Workout routes GPS. ECG waveform API. CoreMotion Watch. WKExtendedRuntimeSession background.

Kategorie wearables

TWS Earbuds (AirPods Pro 2)

Apple H2 chip. ANC: 2x szybszy procesor, 48kHz real-time. Spatial Audio: head tracking. Transparency mode. Adaptive Touch sterowanie.

Smart Glasses (Ray-Ban Meta)

Snapdragon AR1. Kamera 12MP. Meta AI voice. Bateria 154mAh → 6h. Open-ear głośnik. NFC charging. Waga 49g.

AR Headset (Apple Vision Pro)

M2 + R1 chip. R1: 12 kamer + 5 sensorów → display latencja 12ms. 12Mpx per eye. visionOS: Eye/hand gestures.

Fitness tracker (Garmin)

Ultra-low-power SoC. Bateria solar → 60+ dni. GPS multi-band. VO₂ max ML. Training Readiness. Mapy topograficzne 16GB.

Medical wearables (CGM)

Abbott FreeStyle Libre 3: elektrochemiczny sensor 14 dni. FDA cleared. BLE co 1 min. Withings ScanWatch: EKG/SpO₂ 30 dni.

Tablety, eReadery i specjalne kategorie urządzeń mobilnych

Tablet \neq duży smartfon. Inne SoC thermal envelope, USB4/Thunderbolt, Display Port. iPad Pro z M4 to de facto przenośny laptop.
Rugged, gaming i składane to są oddzielne kategorie.

iPad Pro 13" M4 (2024)

Apple M4 (TSMC N3E): 10-core CPU, 10-core GPU, 38 TOPS ANE. Tandem OLED 264ppi (2x OLED stack). Thunderbolt 4 (40Gbps). 16GB RAM. Najszybszy tablet.

Amazon Kindle Scribe (eReader)

E-Ink Carta 1300 (300dpi). 35% szybsze odświeżanie vs poprz. Mediatek low-power. Tygodnie bateria. Pismo odręczne (Pen). Ciepłe/zimne podświetlenie.

Gaming Phone (Asus ROG 8 Pro)

Snapdragon 8 Gen 3 + vapor chamber MASSIVE. 165Hz AMOLED. AeroActive Cooler 5 (aktywny wentylator). AirTrigger shoulder buttons. 6000mAh.

Samsung Galaxy Tab S10 Ultra

Snapdragon 8 Gen 3. 14.6" AMOLED 2X 120Hz. S-Pen. 12GB LPDDR5X. USB-C 3.2 Gen2 (10Gbps). DeX mode = PC experience. 11200mAh.

Rugged (Zebra TC57x / CAT S75)

MIL-STD-810H. IP68+IP69K. Gorilla Glass DX. Snapdragon industrial. Barcode scanner Zebra SE4770. Walkie-talkie PTT. Przemysłowy Android.

Składany (Galaxy Z Fold 6)

Snapdragon 8 Gen 3. Foldable UTG inner 7.6". Cover 6.3". IPX8 (brak IP dla pyłu). 200k cykli hinge. S-Pen w Fold 6 Slim edition.

HAL, AIDL i Project Treble: interfejsy sprzętu z systemem

HAL izoluje OS od konkretnego sprzętu. Project Treble (Android 8) separuje system framework od vendor HAL, umożliwiając aktualizacje OS bez udziału OEM.

AIDL Camera HAL: interfejs i implementacja

```
C++
# AIDL (Android Interface Def. Language)
# stable AIDL = HAL standard od Android 11

# ICameraProvider.aidl (interfejs):
interface ICameraProvider {
    CameraIdAndStreamCombination[]
        getCameraIdList();
    ICameraDevice getCameraDevice(
        in String cameraId);
    void setCallback(
        in ICameraProviderCallback callback);
}

# Implementacja w HAL (vendor partition):
class CameraProvider : public ICameraProvider {
    ndk::ScopedAStatus getCameraIdList(
        vector<CameraIdAndStreamCombination*> ids)
        override {
        // Wywołaj V4L2 / libcamera driver
        *ids = enumerateConnectedSensors();
        return ndk::ScopedAStatus::ok();
    }
};

# Rejestracja (vendor manifest.xml):
# android.hardware.camera.provider
# Binder RPC: /dev/binder → system isolation
```

Project Treble i modularyzacja

```
Shell
# Sprawdź HAL na urządzeniu
$ adb shell hwservicemanager
  android.hardware.camera.provider@2.7
  android.hardware.audio@7.0
  android.hardware.bluetooth@1.1
# Treble VTS test:
$ adb shell vts-tradefed run vts -m VtsHalCameraProviderV2_4Target
```

Project Treble (Android 8.0+)

Separacja /system (Google) od /vendor (OEM). HAL w osobnych procesach (binderized). System update BEZ rebuildowania vendor. CDD obowiązkowe.

Generic Kernel Image (GKI)

Android 12+: jeden kernel image dla wszystkich SoC. Vendor modules (.ko) ładowane dynamicznie. Szybsze Security Updates, OEM nie dotyka kernela.

APEX — modular system

Android 10+: system components jako APEX pakiety (jak APK dla systemu). Google Play aktualizuje ART, ICU, tzdata, OpenSSL bez pełnego OTA.

Mainline modules

Google kontroluje bezpośrednio: WiFi, Bluetooth, DNS resolver, NFC, neural networks. ~30 APEX modułów. Security patches co miesiąc.

Programowanie niskopoziomowe: NDK, JNI i Binder IPC

Android NDK = pisanie kodu C/C++ wywoływanego z Kotlin/Java przez JNI. Niezbędne dla silników graficznych, kodeków audio, ML inference, DSP i wydajności krytycznej.

NDK kluczowe biblioteki

Bionic libc, libandroid (assets), AAudio (zastąpiło OpenSL ES), Vulkan NDK, OpenCL-CLHPP. CMake lub ndk-build. ABI: arm64-v8a, x86_64.

Vulkan Compute (zastąpiło Renderscript)

Renderscript deprecated Android 12. Vulkan compute shaders (GLSL/SPIR-V): parallel GPU computation. OpenCL via extension. NNAPI dla ML inference.

JNI, Java Native Interface

```
C++
// Kotlin side - deklaracja native function
class AudioDSP {
    external fun applyFilter(
        input: FloatArray, sampleRate: Int
    ): FloatArray
    companion object {
        init { System.loadLibrary("audio_dsp") }
    }
}

// C++ side - jni/audio_dsp.cpp
#include <jni.h>
extern "C" JNIEXPORT jfloatArray JNICALL
Java_com_example_AudioDSP_applyFilter(
    JNIEnv* env, jobject thiz,
    jfloatArray input, jint sr) {

    jsize len = env->GetArrayLength(input);
    jfloat* data = env->GetFloatArrayElements(
        input, nullptr);
    // DSP w C++ - bezpośredni NEON SIMD access
    auto result = biquadFilter(data, len, sr);
    env->ReleaseFloatArrayElements(
        input, data, JNI_ABORT);
    jfloatArray out = env->NewFloatArray(len);
    env->SetFloatArrayRegion(out, 0, len, result.data());
    return out;
}
```

Binder IPC i System Services

```
Java
// Własny System Service (AIDL + Binder)
// 1. IMyService.aidl:
interface IMyService {
    int getThermalZone(in String zone);
    void registerCallback(IMyCallback cb);
}

// 2. Implementacja w SystemServer:
class MyServiceImpl extends IMyService.Stub {
    @Override
    public int getThermalZone(String zone) {
        // Odczyt /sys/class/thermal/
        return thermalManager.getTemp(zone);
    }
}

// 3. Rejestracja:
ServiceManager.addService("myservice",
    new MyServiceImpl());

// 4. Klient w App:
IBinder b =
ServiceManager.getService("myservice");
IMyService svc = IMyService.Stub.asInterface(b);
int temp = svc.getThermalZone("cpu-cluster0");

// Binder: zero-copy przez /dev/binder mmap
// Max payload: 1MB (Binder transaction limit)
```

Certyfikacja i standardy: IP, SAR, CE, FCC i produkcja

Przed sprzedażą urządzenie musi przejść dziesiątki certyfikacji. Brak certyfikacji = brak dostępu do rynku.
Każdy kraj ma własne wymagania.

IP Rating (IEC 60529)

Ochrona przed pyłem i wodą

IP6X: pełna ochrona przed pyłem. IPX8: zanurzenie >1m (OEM definiuje głębokość).
IPX9K: ciśnieniowe strumienie 8MPa@80°C. Test: 30min w komorze.

CE (Conformité Européenne)

Dyrektywy EU. bezpieczeństwo i EMC

RED (Radio Equipment Directive): RF emisje. ROHS: ograniczenie substancji niebezpiecznych. LVD: bezpieczeństwo niskiego napięcia. GDPR: dane personalne.

MIL-STD-810H / MIL-SPEC

Odporność mechaniczna i środowiskowa

-40°C do +71°C, wibracje, upadki, wilgoć, sol fog, ciśnienie. 26 metod testowych.
Zebra/CAT/Panasonic rugged. Certyfikat wymaga pełnych testów lab.

SAR (Specific Absorption Rate)

Promieniowanie RF wchłaniane przez ciało

EU: < 2.0 W/kg (głowa+tułów). US FCC: < 1.6 W/kg (1g tkanki). Test: antena przy ciele 5mm. SAR raportowany publicznie dla każdego urządzenia.

FCC (US Federal Comm. Comm.)

Emisje RF i certyfikacja USA

FCC ID: każde urządzenie RF w USA. Part 15B: emisje niezamierzone. Part 22/24/27: sieci komórkowe. Rejestracja OET: baza danych publiczna.

Widevine L1 / HDCP

DRM, cyfrowe prawa autorskie

Widevine L1: TEE-based DRM → 4K Netflix/Disney+. L3: software-only → max 720p. HDCP 2.3: szyfrowanie HDMI/DisplayPort dla 4K content.

Składane, Rollable i Nowe Form-Factory, technologie ekranów

UTG: Ultra Thin Glass

```
# UTG właściwości (Samsung/Schott UTG):  
# Grubość: 30-80 micrometrów (cienki jak papier)  
# Materiał: borosilicate lub alkali-alumino-silicate  
# Elastyczność: promień gięcia R = 1.4mm (Z Fold 6)  
# Twardość: ~7H (twarde, ale zarysowania łatwiejsze)  
# Transmisja optyczna: >95% w visible  
  
# Hinge technology:  
# Samsung WaterDrop hinge (S25 Fold/Flip):  
# - Teardrop cross-section przy zwinięciu  
# - Pozwala większy promień gięcia  
# - 200k cykli = 100x/dzień przez 5 lat  
# - Muffler: dźwięk "snap" celowy feedback  
  
# Rollable (LG patent, OPPO X 2021):  
# - OLED na gumowym substracie  
# - Rolka + motor → wysuwanie ekranu  
# - Wyzwanie: kurwatura naprężenia vs wrinkle
```

Shell

Składane smartfony to nowa kategoria od 2019. UTG (Ultra Thin Glass) + nowe zawiasy umożliwiają elastyczność. Technologia dojrzała, 200k+ cykli bez degradacji.

Rynek i ekosystem składanych

Samsung Galaxy Z Fold 6

Snapdragon 8 Gen 3. Wewnętrzny 7.6" LTPO AMOLED. Zewnętrzny 6.3". Hinge 200k. IPX8. S-Pen (bez gniazda w base). 12GB/256GB od €1,899.

Google Pixel 9 Pro Fold

Tensor G4. 8" inner. Grubość rozłożona 5.1mm (najcieńszy Fold). Kamera Pixel jakość. Pixel AI features. Android 15 day-one.

Motorola Razr 50 Ultra (Flip)

Snapdragon 8s Gen 3. Flip form. Cover screen pHaOLED 4". 6.9" inner FHD+. AI actions na cover display. 3500mAh 45W.

OPPO Find N3 Flip

Dimensity 9200. 3.26" cover AMOLED. 6.8" inner 120Hz. IPX4. Hasselblad camera collab. Dostępny w Chinach/EU.

Rynek składanych 2024-2025

15M+ składanych sprzedanych 2024 (4% smartfonów). Samsung ~80% rynku. Ceny spadają: Pixel 9 Fold od €1,799. Mainstream za 3-5 lat gdy <\$800.

Wyzwania składanych

1. Kreska w miejscu gięcia (crease). 2. Grubość złożona > smartfon. 3. IPX8 bez IP dla pyłu (hinge). 4. Cena 2-3x wyższa. Dojrzewanie generacja po generacji.

Flip vs Fold

Flip (Z Flip 6): kompaktowy, Cover screen 3.4". Social media. Fold (Z Fold 6): tablet 7.6" → phone 6.3". Produktywność. S-Pen. DeX mode.

Przyszłość: AI Phone, Foundation Models On-Device i 300W

Generatywne AI on-device

```
# On-device LLM deployment (2024–2025) Python
# Model: Gemini Nano (1.8B) / Llama 3.2 (3B)
# Runtime: ExecuTorch / ONNX Runtime Mobile

# Quantizacja – klucz do urządzeń mobilnych:
# FP32: 7B × 4B = 28GB (niemożliwe na phone)
# INT4 (4-bit): 7B × 0.5B = 3.5GB ✓
# INT4 AWQ: accuracy drop < 1% dla top-7B

# Android AICore (Android 14):
# GoogleAIEdge: HostsGeminiNano via system API
from ai_edge_torch.generative.layers
Import attention, ff, normalization

# Llama 3.2 1B na Snapdragon 8 Elite:
# Prefill: ~450 tokens/s (NPU accelerated)
# Decode: ~60 tokens/s (acceptable)
# RAM usage: ~800MB (INT4 quant)
# Latencja TTFT: ~200ms

# Apple Intelligence (iOS 18):
# On-device model: ~3B params, ANE
# Server model: Private Cloud Compute (Apple M4)
# Privacy: server nie przechowuje danych
```

Apple Intelligence (iOS 18)

On-device ~3B model na ANE. Private Cloud Compute: Apple M4 serwery, zero retention. Siri 2.0: deep app integration. Writing tools, Image Playground, Memory.

Samsung / Google Galaxy AI

Gemini Nano on-device. Circle to Search. Live Translate. Generative Edit (inpainting). Note Assist. Real-time interpreter. Photo Unblur.

2025–2030: smartfon staje się platformą AI.
Foundation models na urządzeniu (1–7B param),
300W ładowanie, satelitarna łączność
i biometryczna tożsamość.

Trendy sprzętowe 2025–2028

300W Hyper Charging

Xiaomi 300W: 0→100% w 5 min. Tri-cell bateria. Temperatura < 43°C przez chip w kablu. GaN ładowarka 300W = rozmiar paczki kart. Przewidywany standard premium ~2027.

2nm SoC (TSMC N2)

TSMC N2: produkcja 2025. Apple A19 (iPhone 17 Pro). 25 mld tranzystorów. -25–30% energii vs N3E. +10–15% perf. SRAM density +5%.

Satellite 2-way (snapdragon sat)

Qualcomm Snapdragon Satellite: dwukierunkowa łączność przez Iridium. SOS + messaging + data w 2025. Nie wymaga osobnego modemu, wbudowane w X75/X80.

In-display Face ID + fingerprint

Qualcomm 3D Sonic Max: ultrasonic fingerprint pod całym ekranem. Qualcomm 3D Depth Sensing: Face ID pod ekranem 2025–2026. Brak notch w przyszłości.

SoC z HBM3E dla AI

TSMC CoWoS: HBM3E (memory bandwidth 1TB/s) + SoC. Dla mobilnych AI workloadów. Podobnie jak Apple M-series → przeniesione do phone SoC ~2027.

Pytania

Które problemy architektoniczne są szczególnie istotne przy projektowaniu aplikacji mobilnych w porównaniu z aplikacjami desktopowymi?

- a) brak wielozadaniowości systemu operacyjnego
- b) brak systemów plików w urządzeniach mobilnych
- c) niestabilność połączenia sieciowego
- d) ograniczona dostępność energii

Które czynniki mają największy wpływ na zużycie energii przez aplikację mobilną?

- a) liczba bibliotek Gradle
- b) liczba klas w projekcie
- c) intensywne użycie GPU
- d) częste operacje sieciowe

Które elementy są typowymi komponentami architektury aplikacji mobilnej opartej na Clean Architecture?

- a) warstwa kernel
- b) warstwa HAL
- c) warstwa data
- d) warstwa domain

Które czynniki mają największy wpływ na fragmentację platformy Android z punktu widzenia projektowania aplikacji?

- a) otwartość kodu źródłowego systemu Android
- b) obecność wielu języków programowania
- c) różnorodność konfiguracji sprzętowych urządzeń
- d) różnorodność producentów sprzętu i konfiguracji hardware

Które cechy architektury offline-first są kluczowe dla aplikacji mobilnych?

- a) blokowanie UI w przypadku braku połączenia z siecią
- b) przechowywanie danych wyłącznie w pamięci RAM
- c) mechanizmy synchronizacji konfliktów danych
- d) lokalna baza danych synchronizowana z serwerem

Które

- a) ...
- b) ...
- c) ...
- d) ...

Które elementy architektury aplikacji mobilnej zmniejszają sprzężenie między warstwą UI, a logiką biznesową?

- a) bezpośrednie wywoływanie zapytań do bazy danych z Activity
- b) umieszczanie logiki biznesowej w klasach widoku
- c) zastosowanie architektury MVVM
- d) wykorzystanie warstwy repozytorium (repository pattern)

Które czynniki wpływają na decyzję o wyborze native development zamiast cross-platform?

- a) brak interfejsu użytkownika w aplikacji
- b) brak potrzeby publikacji w sklepach aplikacji
- c) maksymalizacja wydajności aplikacji
- d) potrzeba dostępu do zaawansowanych API sprzętowych

...

- a) ...
- b) ...
- c) ...
- d) ...

Które mechanizmy systemu Android umożliwiają komunikację między komponentami aplikacji lub między aplikacjami?

- a) ViewModel
- b) Fragment transactions
- c) Binder IPC
- d) Intents

Które elementy procesu CI/CD są szczególnie istotne dla projektów mobilnych?

- a) ograniczona pamięć ROM
- b) brak wielowątkowości w systemie operacyjnym
- c) operacje sieciowe o wysokiej latencji
- d) automatyczne budowanie aplikacji dla wielu architektur CPU

...

- a) ...
- b) ...
- c) ...
- d) ...

Pytania

Które komponenty są zazwyczaj zintegrowane w nowoczesnym System on Chip (SoC)?

- a) zasilacz impulsowy CPU
- b) ekran dotykowy
- c) CPU
- d) GPU

Które elementy są częścią łańcucha zaufania (chain of trust) podczas uruchamiania urządzenia mobilnego?

- a) aplikacje użytkownika
- b) GPU driver
- c) Bootloader
- d) Boot ROM

Które elementy systemu Android są częścią warstwy Application Framework?

- a) Linux kernel
- b) bootloader
- c) Activity Manager
- d) Window Manager

Które mechanizmy architektury ARM big.LITTLE wpływają na oszczędność energii?

- a) dynamiczne przełączanie między rdzeniami wysokiej i niskiej wydajności
- b) wykonywanie wszystkich procesów wyłącznie na rdzeniach wysokiej wydajności
- c) schedulowanie zadań zależnie od ich charakterystyki obciążenia
- d) dynamiczne przełączanie między rdzeniami wysokiej i niskiej wydajności

Które technologie są wykorzystywane do izolacji i ochrony danych kryptograficznych w smartfonach?

- a) Binder
- b) HAL
- c) Secure Enclave
- d) ARM TrustZone

Które trendy technologiczne w architekturze urządzeń mobilnych wpływają bezpośrednio na projektowanie aplikacji?

- a) zmniejszenie liczby sensorów w urządzeniach
- b) zwiększenie liczby portów USB
- c) wzrost wydajności GPU
- d) integracja akceleratorów AI w SoC

Które komponenty SoC są najczęściej wykorzystywane do przyspieszania obliczeń AI?

- a) modem 5G
- b) kontroler pamięci DRAM
- c) NPU
- d) GPU

Które elementy architektury Android odpowiadają za komunikację między procesami?

- a) GPU driver
- b) HAL scheduler
- c) Binder IPC
- d) system services

....

- a) ...
- b) ...
- c) ...
- d) ...

Które cechy pamięci LPDDR są kluczowe dla urządzeń mobilnych?

- a) brak potrzeby kontrolera pamięci
- b) mechaniczna odporność na wstrząsy
- c) wysoka przepustowość
- d) niskie zużycie energii

Które zadania są typowo wykonywane przez GPU w systemach mobilnych?

- a) zarządzanie procesami systemu operacyjnego
- b) obsługa stosu TCP/IP
- c) przetwarzanie równoległych obliczeń numerycznych
- d) renderowanie grafiki 3D

...

- a) ...
- b) ...
- c) ...
- d) ...

Podsumowanie i trendy , czyli przyszłość architektury mobilnej

AI Phone Era

On-device LLM 1–7B, Apple Intelligence, Gemini Nano. NPU > 50 TOPS standard. Foundation models zastępują task-specific ML.

TSMC 2nm (2025+)

Apple A19, Snapdragon 8s Elite. +10–15% perf, -25% power. CoWoS z HBM3E dla AI inference BW.

300W + Silicon Anode

Ładowanie 0→100% w 5 min. Li-Si anoda +15% pojemność. GaN ładowarki ultra-kompaktowe.

Składane mainstream

Samsung Fold/Flip. UTG 30μm. 200k cykli. Cena spada do \$800 do 2027. 15% rynku premium.

Satelitarna łączność

Snapdragon Sat 2-way. Apple Emergency SOS. Starlink Direct-to-Cell (T-Mobile). Zawsze połączony.

In-display biometria

3D Sonic fingerprint cały ekran. Face ID pod ekranem 2026. Brak notch/hole-punch. Czysty front.

Kluczowe wnioski wykładu

- SoC integruje CPU+GPU+NPU+ISP w jednym chipie, heterogeneous computing to standard mobilny, nie przyszłość
- OLED LTPO z adaptacyjnym odświeżaniem 1–120Hz i bezpieczeństwo sprzętowe (SEP/TrustZone) to fundamenty flagowców
- Project Treble i AIDL HAL umożliwiają szybkie aktualizacje bezpieczeństwa, architektura androidowa ważna dla programisty
- On-device AI (NPU 38–80 TOPS) zmienia paradygmat aplikacji mobilnych, AI nie wymaga chmury w 2025+

Koniec