

**Univerzita Hradec Králové**  
**Fakulta informatiky a managementu**  
**Katedra informačních technologií**

**Architektury mikroprocesorů**  
Bakalářská práce

Autor: Jan Gregovský  
Studijní obor: Aplikovaná Informatika

Vedoucí práce: prof. RNDr. Peter Mikulecký, PhD.

Hradec Králové

Duben 2021

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci zpracoval/zpracovala samostatně a s použitím uvedené literatury.

V Hradci Králové dne 29.4.2021

Jan Gregovský

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. RNDr. Peterovi Mikuleckému, PhD.  
za metodické vedení práce a za veškerou pomoc při její tvorbě.



## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá popisem fungování nejrozšířenější rodiny desktopových procesorů x86. Čtenář je na základě historického přehledu postupně seznámen se základní problematikou procesorů a principy, na kterých fungují dnešní nejmodernější procesory. V další části práce jsou uvedeny možné budoucí trendy a práce obsahuje i část, která se věnuje problematice porovnávání procesorů mezi sebou s použitím testů, které jsou k tomuto účelu běžně využívány.

**Klíčová slova:** AMD, Intel, CPU, mikroprocesor, procesor, benchmark

## **Annotation**

### **Title: Microprocessor Architectures**

The purpose of this bachelor thesis is to describe the most important development features of both the main x86 microprocessor manufactures Intel and AMD as well as to characterize possible future development trends. Based on a historical overview, the reader is gradually acquainted with the principles on which today's state-of-the-art processors operate. This thesis also contains a part that deals with the issue of comparing various processors with each other by describing several tests (benchmarks) that are commonly used for this purpose.

**Keywords:** AMD, Intel, CPU, microprocessor, processor, benchmark

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Základní pojmy.....	3
3.1	Von Neumannova architektura.....	3
3.2	Mikroprocesor .....	4
3.3	Šířka slova .....	4
3.4	Šířka přenosu dat .....	4
3.5	Cache .....	5
3.6	Zřetěžené zpracování instrukcí (pipelining) .....	5
3.7	Čipová sada a komunikace mikroprocesoru s okolím .....	6
3.8	CISC, RISC .....	8
4	Historický přehled vývoje mikroprocesorů firmy Intel .....	9
4.1	Intel 4004 .....	9
4.2	Intel 8008 .....	9
4.3	Intel 8080 .....	10
4.4	Intel 8086 .....	10
4.5	Intel 80286.....	10
4.6	Intel 80386.....	11
4.7	Intel 80486.....	11
4.8	Intel Pentium.....	11
4.9	Intel Pentium MMX.....	13
4.10	Intel Pentium Pro .....	14
4.11	Intel Pentium II .....	14
4.12	Intel Pentium III.....	15
4.13	Intel Pentium IV.....	15

4.14	Pentium M.....	16
4.15	Intel Itanium .....	16
4.16	Pentium D.....	17
4.17	Intel Core 2 .....	18
4.18	Koncepty zásadní pro moderní procesory .....	20
4.18.1	Škálovatelnost .....	20
4.18.2	Binning .....	20
4.18.3	Segmentace.....	20
4.18.4	Tick-Tock.....	21
4.18.5	Utajení, marketing a složitost moderních procesorů .....	22
4.19	Současné procesory Intel Core .....	23
4.19.1	Nehalem (0.Generace).....	23
4.19.2	Westmere (1.generace).....	24
4.19.3	Sandy Bridge (2.generace).....	24
4.19.4	Ivy Bridge (3.Generace) .....	25
4.19.5	Haswell (4.Generace).....	26
4.19.6	Broadwell (5.Generace) .....	26
4.19.7	Skylake (6.Generace) .....	27
4.19.8	Kaby Lake (7.Generace).....	27
4.19.9	Coffee Lake (8.Generace) .....	28
4.19.10	Coffee Lake-refresh (9.Generace) .....	29
4.19.11	Comet Lake (10.Generace) .....	29
4.19.12	Rocket Lake (11.Generace).....	29
5	Historický přehled vývoje mikroprocesorů firmy AMD.....	30
5.1	Am2900.....	30
5.2	AMD 8086, Am286, Am386, Am486, Am5x86 a další.....	31

5.3	AMD K5.....	31
5.4	AMD K6.....	31
5.5	Athlon (K7) .....	32
5.6	Athlon64 (K8).....	32
5.7	Athlon64 X2 (K8).....	33
5.8	AMD K10 (Phenom, Phenom II a Athlon II) .....	34
5.9	Llano a Bobcat .....	34
5.10	Bulldozer (AMD FX) .....	35
5.11	Současné procesory firmy AMD .....	36
5.11.1	Zen/Zen+ .....	36
5.11.2	Zen2.....	38
5.11.3	Zen3.....	39
6	Možný budoucí vývoj.....	41
6.1	Processing In Memory (PIM).....	41
6.2	ARM: Nástupce x86?.....	42
6.3	RISC-V.....	43
6.4	Miničiplety .....	43
6.5	3D Vrstvení čipů a hybridní procesory.....	44
6.6	Další zmenšování tranzistorů a potenciální náhrada křemíku .....	45
7	Porovnávání dnešních procesorových řad.....	46
7.1	Přehled vybraných dílčích testů redakce Gamers Nexus.....	47
7.1.1	Škálování frekvence v aplikaci Cinebench.....	47
7.1.2	Blender benchmark .....	48
7.1.3	Testování spotřeby energie.....	48
7.1.4	Testy výkonu v počítačových hrách .....	49
7.1.5	Sloupcový graf snímků za sekundu .....	50



7.1.6	Ostatní testy.....	52
8	Závěr.....	53
9	Seznam použité literatury.....	54
10	Přílohy.....	61

## Seznam obrázků

Obr. 1 Diagram Von Neumannovy architektury .....	3
Obr. 2 Diagram procesoru s 16bitovou adresací a 8bitovou šířkou přenosu dat.....	5
Obr. 3 Diagram funkce zřetěženého zpracování.....	6
Obr. 4 Diagram tradiční čipové sady Intel.....	7
Obr. 5 Intel 4004 .....	9
Obr. 6 IMB PC.....	10
Obr. 7 Diagram předvídání větvení u Pentia (BTB).....	12
Obr. 8 Diagram SIMD-MMX: Multiple ADD .....	13
Obr. 9 Pentium II .....	14
Obr. 10 Intel Itanium 1. generace s externí „L3“ cache .....	17
Obr. 11 Pentium D po odstranění integrovaného tepelného rozvaděče .....	18
Obr. 12 Snímek mikroprocesoru Core 2 .....	19
Obr. 13 Značení procesorů Intel .....	21
Obr. 14 Intel Tick-Tock.....	22
Obr. 15 Snímek mikroprocesoru Nehalem .....	23
Obr. 16 Mikroprocesor Westmere obsahující grafický čip .....	24
Obr. 17 Snímek mikroprocesoru Sandy Bridge.....	25
Obr. 18 Process-Architecture-Optimization model.....	27
Obr. 19 8086 vs i7 8086K.....	28
Obr. 20 Grafický akcelerátor používající čipy z rodiny Am2900.....	30
Obr. 21 Diagram režimů mikroprocesorů s rozšířením X86-64 .....	33
Obr. 22 Blokový diagram architektury Bulldozer s 8 jádry.....	36
Obr. 23 Modulární architektura AMD Zen .....	38
Obr. 24 Diagram MCM architektury Zen2 .....	39
Obr. 25 Struktura CCD v Zen2 a Zen3 .....	40
Obr. 26 UPMEM PIM DRAM .....	41
Obr. 27 Potenciální budoucí architektura Intelu využívající miničiplety .....	44
Obr. 28 Intel LakeField .....	45
Obr. 29 Graf škálování frekvence v aplikaci Cinebench.....	47
Obr. 30 Graf výsledků v Blender benchamrk.....	48

Obr. 31 Graf testování spotřeby energie.....	49
Obr. 32 Graf konzistence vykreslování snímků hry .....	50
Obr. 33 Sloupcový graf snímků za sekundu.....	51

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 Přehled vývoje mikroprocesorů Intel.....	61
--	----

# 1 Úvod

Vynález tranzistoru patří mezi jeden z nejdůležitějších pokroků lidstva. Někteří dokonce tvrdí, že je pro lidstvo stejně přelomový jako ovládnutí ohně.

Před tímto revolučním vynálezem se počítače skládaly z velkého množství elektronek a zabíraly celé místnosti. Elektronky však byly velké, měly velkou spotřebu energie a často u nich docházelo k poruchám, při kterých bylo potřeba celou elektronku nahradit.

Jsou to právě tranzistorové procesory, které nám otevřely úplně novou éru. Éru informací.

V této nové době je naprosto běžné, že každý člověk má hned několik malých a výkonných počítačů, díky nimž si může během chvíle vyhledat jakoukoliv informaci či sdílet své vlastní znalosti s celým světem.

Každý člověk může také využít této výpočetní síly při usnadnění jeho každodenních povinností či komunikovat v reálném čase s jiným člověkem, který se nachází třeba i na opačné straně světa.

Dostupnost malé a výkonné výpočetní techniky dále pomohla značně vylepšit i již existující věci jako jsou například automobily či letadla, která dnes aktivně vyhodnocují data z velkého množství senzorů a přizpůsobují tomu dynamicky svůj chod. Dále jsme schopni detailně navrhovat a vizualizovat nové a revoluční inovace ještě před samotnou výrobou a dokážeme i obrovskou škálu dalších věcí, které byly ještě před samotným vynálezem tranzistoru naprosto nepředstavitelné.

Tranzistorové procesory tedy v dnešním světě hrají opravdu zásadní roli a tato práce se zaměřuje na přiblížení toho, jak fungují a z čeho se skládají mikroprocesory nejrozšířenější PC architektury x86.

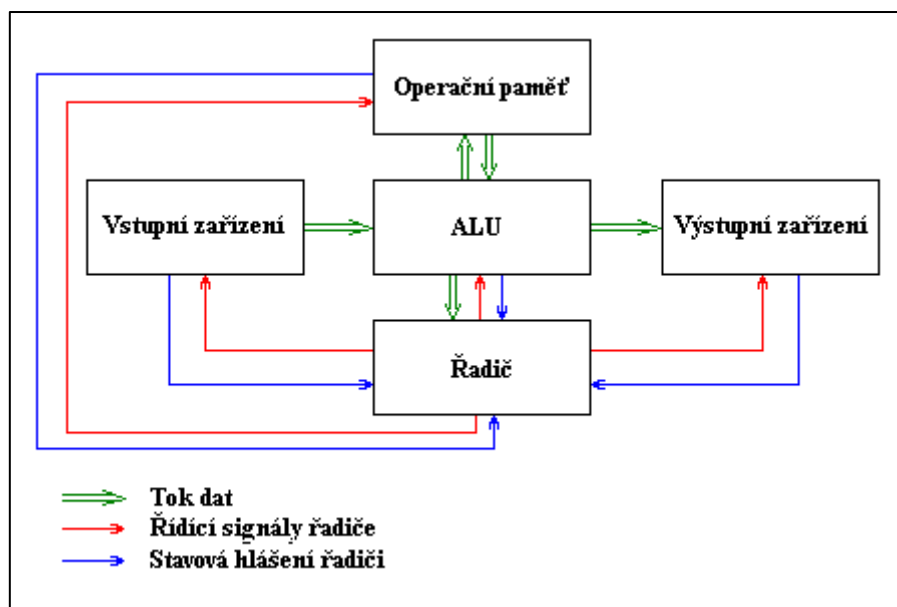
## 2 Cíl práce

Cílem práce je popsat nejdůležitější rysy vývoje mikroprocesorových řad x86 producentů Intel a AMD a poskytnout tak čtenáři přehled toho nejdůležitějšího, co se ve vývoji architektur mikroprocesorů obou hlavních výrobců stalo. Důraz je namísto striktní historické přesnosti a detailního výpisu přesných specifikací jednotlivých mikroprocesorů kladen na přiblížení nejdůležitějších změn v každé generaci a na vysvětlení, co tyto změny přináší pro následující generace procesorů. Cílem je dále charakterizovat možné budoucí trendy vývoje mikroprocesorů a představit aktuálně používané techniky porovnávání různých mikroprocesorů mezi sebou.

## 3 Základní pojmy

### 3.1 Von Neumannova architektura

Von Neumannova architektura označuje model samočinného počítače, u kterého je jeho struktura nezávislá na zpracovávaném problému. Konkrétní řešení je zajištěno podle „návodu“ zvaného program, který je uložen v operační paměti společně s daty, která tento program při své práci využívá. Kromě operační paměti, vstupního a výstupního zařízení toto schéma dále obsahuje bloky aritmeticko-logické jednotky (ALU) a řídicí jednotky (řadič). ALU zajišťuje samotné výpočty, zatímco řadič vydává povely a slouží k řízení činností všech částí počítače. (1)



Obr. 1 Diagram Von Neumannovy architektury

Zdroj: (1)

Později bylo Von Neumannovo schéma modifikováno na tzv. Harvardskou architekturu, která má paměť dat a paměť programu oddělenou. Nemůže se tedy stát, že by vlivem chyby, která může být způsobena např. instrukcí skoku, odkazující na špatné místo v paměti, došlo k tomu, aby počítač začal chybně zpracovávat data v paměti jako by to byl program nebo obráceně. Díky tomu, že jsou paměti oddělené není rovněž možné, aby program zavedený v paměti začal přepisovat sám sebe. Oddělení dat a programu od sebe přináší i výkonnostní výhody, protože ke každé paměti je vedena vlastní sběrnice, což znamená, že počítač může k oběma přistupovat zároveň.

Další specifickou charakteristikou je také to, že paměť programu bývá nejčastěji realizována jako nezávislá na napájení a je z ní po většinu času pouze čteno.

Nelze říct, která ze jmenovaných architektur je lepší. Von Neumannova je kvůli snadnému zavádění programů do paměti vhodná pro běžné osobní počítače, zatímco harvardská je vhodná pro takové využití, ve kterém se prováděný program mění jen velmi zřídka. Tedy zejména tzv. embedded neboli vestavěné systémy. (2)

### **3.2 Mikroprocesor**

Mikroprocesor je integrovaný obvod, který dohromady zajišťuje funkce řadiče a ALU dle Von Neumannova schématu. Jak již samotný název napovídá, tak jednotlivé tranzistory, ze kterých se mikroprocesor skládá jsou menší než několik desítek mikrometrů.

Mikroprocesor dále obsahuje rychlá paměťová místa malé kapacity nazývané registry, které slouží pro uložení dat bezprostředně nutných pro jeho funkci. (3) Mezi nejznámější registry se řadí například AX, který slouží pro uložení dat, se kterými je právě pracováno či IP, který slouží jako ukazatel do paměti na aktuálně prováděnou instrukci.

### **3.3 Šířka slova**

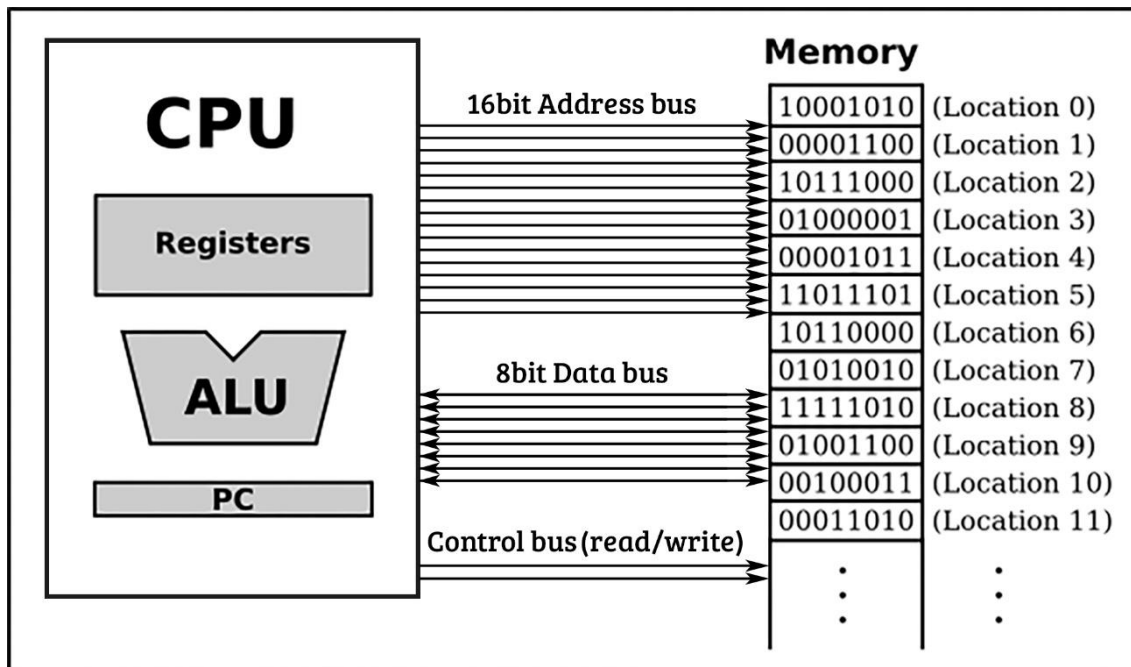
Šířka slova označuje parametr mikroprocesoru, který určuje, jaké největší číslo je možné zpracovávat v jednom taktu. Čísla širší, než je maximální šířka slova daného mikroprocesoru, je potřeba rozdělit a zpracovat během několika taktů.

8bitový mikroprocesor tedy obsahuje ALU, která dokáže pracovat s 8bitovými čísly a zároveň 8bitové registry ze kterých je možné číst operandy a dále do nich ukládat výsledky operací. (3)

### **3.4 Šířka přenosu dat**

*„Bez ohledu na to, jaké je maximální číslo zpracovatelné jednou instrukcí, musí být data přesouvána z/do procesoru. Šířka přenosu dat určuje, jaké maximální číslo může být během jedné operace přeneseno. Udává se podobně jako šířka slova v bitech a je dána velikostí datové sběrnice procesoru. Je-li šířka datové sběrnice větší, je i šířka přenosu větší a tím je možné za kratší dobu přenést větší množství dat.“ (3)*

Vedle šířky přenosu dat dále rozlišujeme šířku adresace paměti, která udává maximální možnou adresu, ze které je možné číst či zapisovat do ní data. Procesory mohou mít tyto dva parametry stejné. Nejedná se však o neporušitelné pravidlo.



**Obr. 2 Diagram procesoru s 16bitovou adresací a 8bitovou šířkou přenosu dat**

Zdroj: <http://math.hws.edu/javanotes/c1/s1.html> (upraveno)

### 3.5 Cache

Cache je paměť, ve které se vyhledává podle klíče namísto adresy (tzv. asociativní paměť). Tato paměť v počítači slouží jako vyrovnávací mezi pomalejší RAM (nejčastěji realizováno jako DRAM) a rychlejším procesorem. Cache paměť je nejčastěji realizována jako SRAM, ale v širším slova smyslu může být cache brána i jako vyrovnávací paměť mezi jinými částmi počítače a podle toho je i zvolena použitá technologie. (Například SSD často využívají vestavěnou DRAM cache).

V této práci je pod názvem cache výhradně odkazováno na vyrovnávací paměť mezi mikroprocesorem a operační pamětí.

### 3.6 Zřetěžené zpracování instrukcí (pipelining)

Pipelining je metoda zefektivnění práce mikroprocesoru, která vychází z myšlenky rozdělení prováděné instrukce na několik fází. Tyto fáze mohou být například:

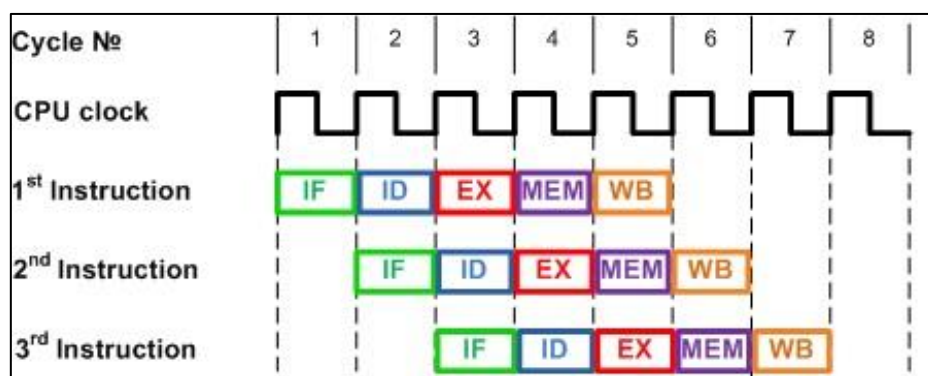


1. Instruction Fetch (IF): Načtení instrukce
2. Instruction Decode (ID): Dekódování instrukce
3. Execute (EX): Provedení instrukce
4. Memory Access (MEM): Přístup do paměti
5. Writeback (WB): Zápis výsledků.

Každá z těchto fází může být díky tomu provedena samostatnou jednotkou mikroprocesoru, která po dokončení své práce výsledek předá jednotce specializující se na fázi následující. Předchozí jednotka poté pokračuje ve své práci nad další instrukcí.

Díky tomu je možné, aby mikroprocesor dokázal po provedení první instrukce v každém dalším taktu dokončit jednu instrukci a jednu další začal rozpracovávat.

Při využívání zřetěženého zpracování instrukcí však může docházet i k některým problémům, z nichž nejdůležitějším je problém podmíněného skoku, při kterém mikroprocesor neví, jakou část podmínky má dopředu rozpracovávat. Pokud k takovému skoku dojde, tak je nutné provést tzv. pipeline flush, při kterém je instrukční fronta pipeline vyprázdněna a spuštěna znovu v novém místě. (3)



**Obr. 3 Diagram funkce zřetěženého zpracování**

Zdroj: <https://open4tech.com/microprocessor-instruction-pipelining/>

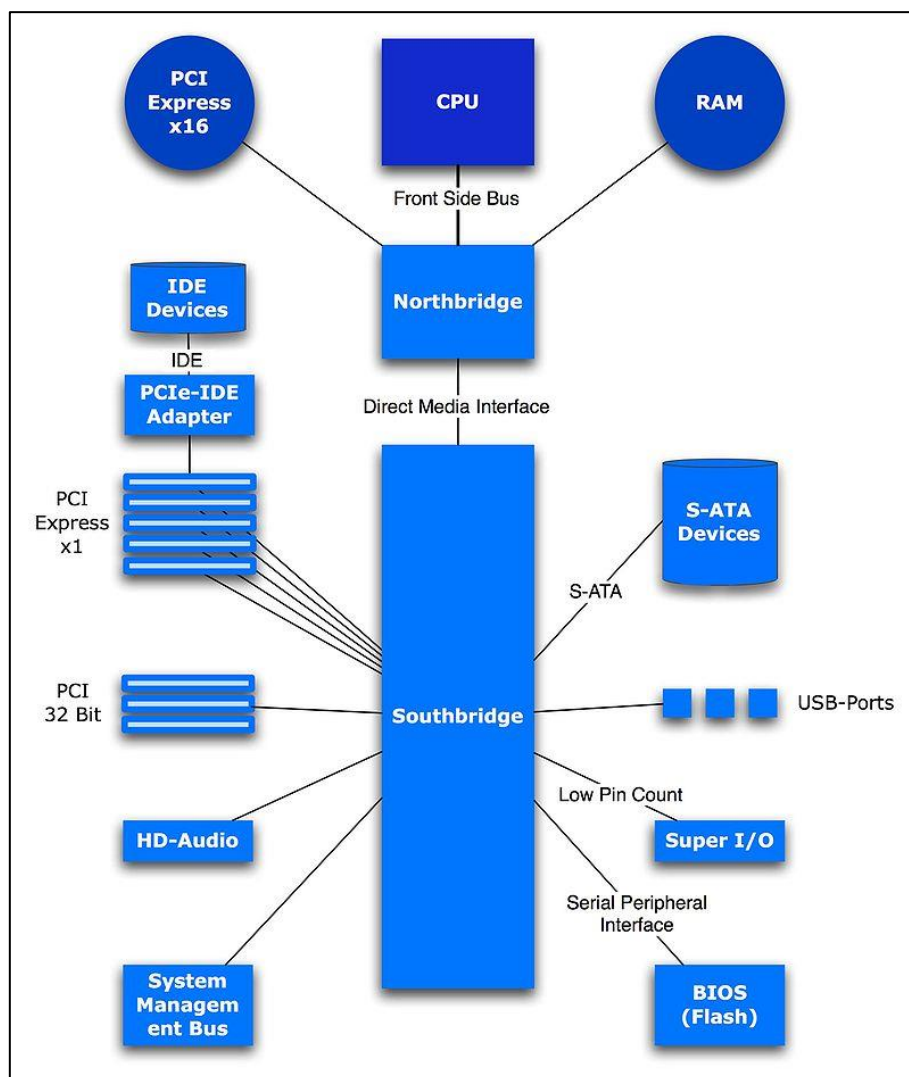
### **3.7 Čipová sada a komunikace mikroprocesoru s okolím**

Čipová sada (chipset) označuje sadu podpůrných obvodů, ke kterým je mikroprocesor připojen přes základovou desku. Mikroprocesor tyto obvody/čipy potřebuje pro svou práci a komunikaci s okolím.

Čipová sada se tradičně skládá z tzv. severního a jižního můstku. Jižní můstek slouží k připojení relativně pomalejších zařízení (zejména I/O) zatímco severní můstek je vyhrazen pro připojení nejrychlejších zařízení, a to zejména operační paměti a grafické karty.

Severní můstek byl dříve k procesoru připojen přes velmi rychlou obousměrnou sběrnici. Rychlost této sběrnice často značně ovlivňovala rychlost počítače jako celku. Data k jižnímu můstku procházela přes severní můstek.

U dnešních mikroprocesorů došlo k postupné integraci těchto obvodů přímo do procesoru a dnes již může být moderní mikroprocesor provozován bez severního i jižního můstku. Jižní můstek se ale na základních deskách v drtivé většině stále nachází z důvodu rozšíření I/O funkcí mikroprocesoru. (4)



**Obr. 4 Diagram tradiční čipové sady Intel**

Zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cipov%C3%A1\\_sada](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cipov%C3%A1_sada)

### **3.8 CISC, RISC**

Filozofie CISC (Complex Instruction Set Computer) je spojena s prvními mikroprocesory řady x86. Architekti těchto mikroprocesorů se snažili zvyšovat jejich výkon postupným přidáváním nových instrukcí. Idea byla taková, že každá nová instrukce představuje neoptimálnější způsob pro provedení konkrétní operace, a kvůli tomu budou programy psané za využití těchto stále novějších a specifitějších instrukcí velmi rychlé a budou vyžadovat pro svou funkci relativně málo paměti.

Tato myšlenka se však bohužel v praxi nepotvrdila. Nové instrukce se v programech objevovaly pouze velmi zřídka a vzhledem k požadavku, aby mikroprocesory byly kompatibilní se svými předchůdci docházelo k nevyhnutelnému růstu jejich složitosti.

Odpovědí k těmto problémům se stala filozofie RISC (Reduced Instruction Set Computer), která byla od základu navržena ke zmenšení složitosti procesorů a k usnadnění zřetěženého zpracování.

Mikroprocesory využívající této filozofie mají ve své instrukční sadě pouze omezené množství jednoduchých instrukcí, přičemž složitější úkony jsou prováděny jako posloupnost více instrukcí triviálních. RISC dále využívá stejně velké instrukce, kde většina z nich vyžaduje ke svému provedení předem daný konstantní počet hodinových cyklů což zásadně usnadňuje sestavení fronty pipeline. Další výhodou RISC je i relativně velké množství registrů, kterými takové mikroprocesory disponují. (5 str. 152 až 183)

Díky jednoduchosti instrukcí filozofie RISC je také množství tranzistorů, ze kterých se mikroprocesor skládá menší a tyto mikroprocesory jsou poté více energeticky efektivní a vydávají méně tepla. Jednodušší procesory jsou dále levnější na návrh, což snižuje cenu pro koncového zákazníka.

## 4 Historický přehled vývoje mikroprocesorů firmy Intel

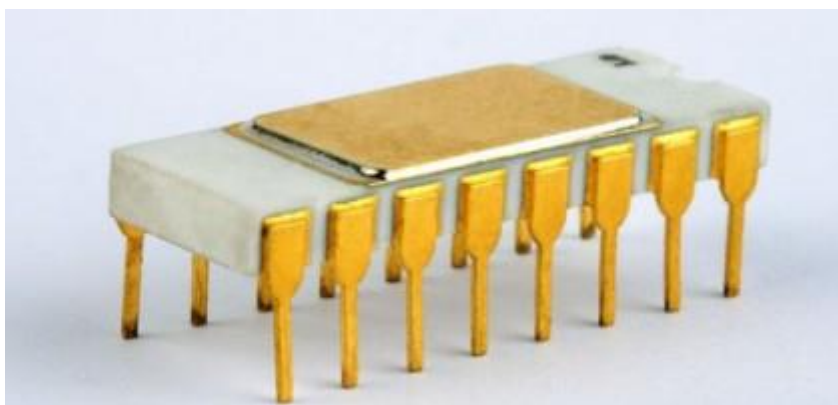
Společnost Intel vznikla v roce 1968. Ve svých počátcích se zabývala výrobou pamětí. Poté se však její pozornost přesunula k vývoji mikroprocesorů a firma se rychle stala v této oblasti lídrem a nyní ovládá většinu trhu mikroprocesorů řady x86.

Intel se dále zaměřuje i na vývoj síťových rozhraní, pamětí a od roku 2018 firma znovu vstoupila i do sektoru dedikovaných grafických čipů. (6)

### 4.1 Intel 4004

V roce 1971 představila firma Intel mikroprocesor Intel 4004, který byl vyvinut na zakázku od japonského výrobce kalkulačků Busicom. Jednalo se o vůbec první mikroprocesor kompletně integrovaný do jednoho pouzdra.

Intel 4004 byl 4bitový a jeho taktovací frekvence se postupným vylepšováním vyšplhala až na 740kHz. Zapouzdřen byl do pouzdra DIL16, které mělo 8 pinů na každé straně. (7)



**Obr. 5 Intel 4004**

Zdroj: (7)

### 4.2 Intel 8008

Intel 8008 vznikl v roce 1972 a představuje první 8bitový mikroprocesor. I přes to, že tento procesor dokázal zpracovávat data po 8bitech, tak zvýšení rychlosti nebylo natolik zásadní, aby přilákalo velké množství zájemců. Bylo to zejména kvůli konzervativně zvolené taktovací frekvenci, která pro tento procesor činila až 800kHz. (8)

### **4.3 Intel 8080**

V roce 1974 byl vydán 8bitový mikroprocesor 8080. Na rozdíl od 8008 obsahoval mnoho zásadních vylepšení. Byly přidány nové instrukce a mikroprocesor byl vyráběn novým a o mnoho lepším výrobním procesem, což umožnilo více než zdvojnásobit taktovací frekvenci. (8)

### **4.4 Intel 8086**

Intel 8086 byl navržen v roce 1978 a jednalo se o 16bitový mikroprocesor s 20bitovou adresací paměti. Režim, ve kterém procesor fungoval se později začal označovat jako „reálný“.

Intel 8086 představuje zásadní milník ve vývoji mikroprocesorů. Byl totiž vybrán pro počítače IBM PC, které se poté rychle staly dominantními, což přineslo Intelu 8086 značnou popularitu. Vznikla tak rodina procesorů x86, která zaručovala vzájemnou zpětnou kompatibilitu. (9) (10)



**Obr. 6 IBM PC**

Zdroj: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ibm\\_px\\_xt\\_color.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ibm_px_xt_color.jpg)

### **4.5 Intel 80286**

Další generace počítačů IBM PC nazvaná IBM PC/AT využívala mikroprocesor Intel 80286 který, byl navržen v roce 1981 jako 16bitový s 24bitovou adresací paměti.

Tento mikroprocesor přinesl zásadní vylepšení v podobě nového chráněného režimu, který odstranil nevýhodu Von Neumanovy architektury s ochranou paměti a umožnil zdánlivě současný běh více programů (multitasking). Této iluze bylo dosaženo velmi rychlým přepínáním mezi právě zpracovávanými úlohami. Tato inovace přinesla zásadní zlepšení pro uživatele, cenou za to však byla velká komplikovanost mikroprocesoru.

Pro kompatibilitu s mikroprocesor 8086 umožňoval Intel 80286 běh v reálném režimu, ve kterém nebyl multitasking dostupný a bylo možné adresovat pouze 1 MB paměti. (10)

#### **4.6 Intel 80386**

V roce 1986 uvedla firma Intel na trh první plně 32bitový mikroprocesor řady x86. Podobně jako jeho předchůdce umožňoval i tento procesor běh programů napsaných pro reálný režim. Na rozdíl od mikroprocesoru 80286 ale mohl být reálný režim emulován, což znamenalo, že restart počítače kvůli spuštění programu, pro reálný režim nebyl nutný. Intel 80386 také přinesl podporu pro stránkování což vyřešilo problém fragmentace paměti. (10) (11)

#### **4.7 Intel 80486**

Další zásadní posun ve vývoji mikroprocesorů představuje Intel 80486, který byl uveden na trh v roce 1989. Jako první totiž obsahuje integrovanou cache a ve variantě DX integruje i matematický koprocessor FPU (jednotku provádějící výpočty v plovoucí desetinné čárce). Posunutí těchto komponent až do mikroprocesoru zásadně snižuje latenci při komunikaci s nimi a tím je dosaženo výrazného zvýšení rychlosti procesoru.

Intel 80486 je stále plně 32bitový a dokáže pracovat ve stejných třech režimem jako jeho předchůdci. (8) (10)

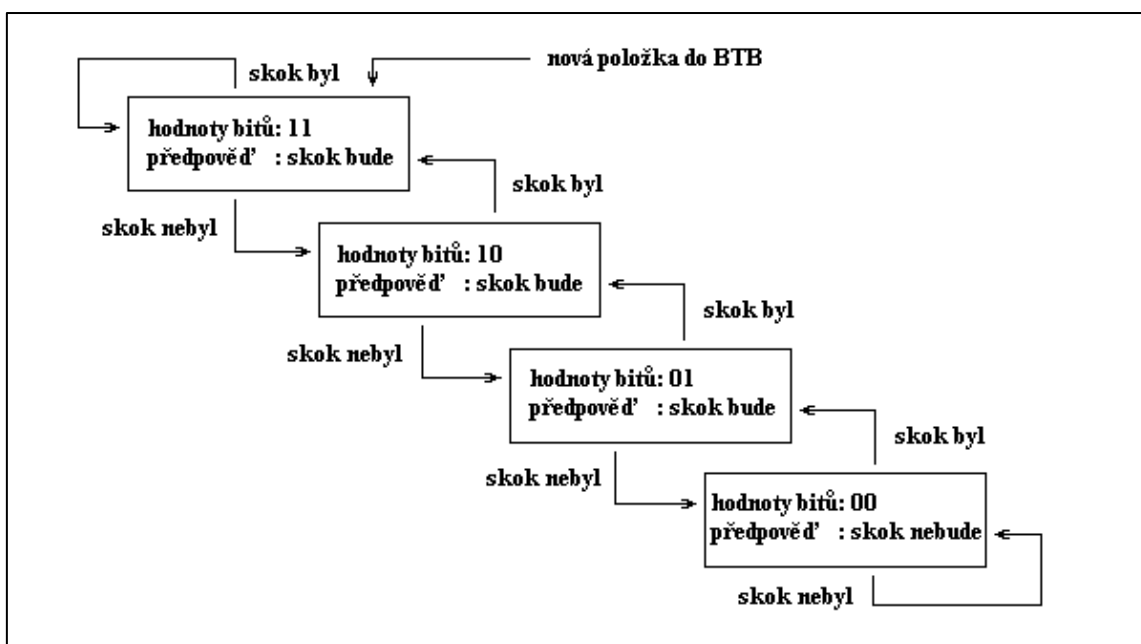
#### **4.8 Intel Pentium**

Intel Pentium byl představen v roce 1993 a přináší s sebou řadu zásadních změn. Jednou z těchto změn je nové zpracování instrukcí. Uvnitř mikroprocesoru je totiž kombinována filozofie RISC i CISC. Složitě CISC instrukce jsou za použití

tzv. mikrokódu překládány na jednodušší instrukce RISC, kterými je pak možné plnit instrukční frontu. (12 stránky 63,64)

Pentium je dále revoluční tím, že představuje první superskalární mikroprocesor firmy Intel. Jedná se tedy o procesor, který má více než jednu frontu pipeline pro zřetězené zpracování instrukcí<sup>1</sup>. Díky tomu dosahuje vyššího výkonu než jeho předchůdce, a to i při stejné taktovací frekvenci. Aktivní plnění obou instrukčních front má ale několik zákonitostí. Instrukce, které jsou prováděny paralelně musí být na sobě nezávislé (druhá instrukce nesmí využívat výsledek té první), nesmí sdílet společné prostředky (např. registr) a musí být jednoduché. (12 str. 67 až 69) (10)

Díky vícero instrukčním frontám se u Pentia také zvyšuje problém podmíněného skoku při předzpracování instrukcí. Pokud program totiž takový skok obsahuje, tak mikroprocesor neví, která větev podmínky má být předzpracována. Tento procesor proto obsahuje jednoduchou metodu pro předvídaní výsledku podmínek. Tato metoda je znázorněna na obrázku 7. (10)



**Obr. 7 Diagram předvídaní větvení u Pentia (BTB)**

Zdroj: (10)

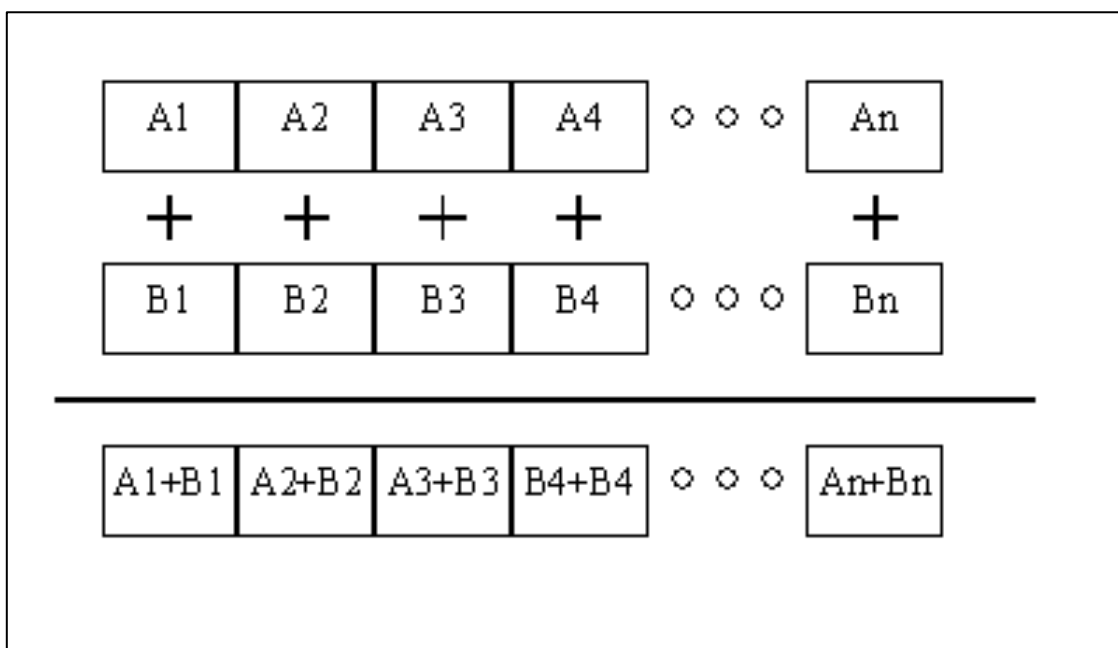
---

<sup>1</sup> Moderní superskalární procesory mají zdvojeny jen některé části instrukční fronty (typicky ALU, FPU apod.).

## 4.9 Intel Pentium MMX

Rozšířením mikroprocesoru Pentium o novou sadu instrukcí založenou na myšlence SIMD (Single Instruction Multiple Data) vzniká Pentium MMX (MultiMedia eXtention). Tyto nové instrukce umožňují mikroprocesoru zpracovávat větší množství dat za pomoci pouze jedné instrukce. Mikroprocesor může například do jednoho 64bitového<sup>2</sup> registru vložit 8 operandů velikosti jeden byte a použitím pouze jedné instrukce všechny sečíst a dostat 8 výsledků (uložených opět v jednom 64bitovém registru). Podobným způsobem lze provádět i jiné vektorové výpočty. (10) (13)

Jak název napovídá, tak se tento typ instrukcí velmi hodí při zpracovávání grafických či signálových dat.



**Obr. 8 Diagram SIMD-MMX: Multiple ADD**

Zdroj:

[https://www.researchgate.net/publication/247134525\\_Performance\\_Characteristics\\_of\\_an\\_Intelligent\\_Memory\\_System](https://www.researchgate.net/publication/247134525_Performance_Characteristics_of_an_Intelligent_Memory_System)

<sup>2</sup> Pentium MMX je stále 32bitový, ale MMX instrukce využívají registry matematického koprocesoru, které jsou 64bitové



#### **4.10 Intel Pentium Pro**

Mikroprocesor Pentium Pro byl na trh uveden v roce 1995. Podobně jako jeho předchůdci obsahuje zabudovanou jednotku FPU a interní cache paměť. Přináší však vylepšení v podobě nové cache paměti L2, která není zabudována přímo v mikroprocesoru, ale pouze v jeho pouzdře. Tato paměť dosahuje vyšší kapacity než L1, přístup do ní je však pro procesor pomalejší.

Nově také Pentium Pro provádí instrukce spekulativně, což mu umožňuje vykonávat je mimo pořadí. Instrukce, které například potřebují načíst data z pomalejší operační paměti je možné odložit do doby, než tato data budou načtena. Procesor tedy nemusí čekat na operační paměť. Podobně je možné postupovat i v případě závislosti instrukcí nebo větvení programu. (10)

#### **4.11 Intel Pentium II**

V roce 1997 představil Intel procesor Pentium II, který koncepčně vychází z Pentia Pro. Významnou změnou je, že cache L2 již není pouze ve stejném pouzdru, ale je integrovaná přímo do procesoru.

Zvláštností Pentia II byl způsob připojení k základnové desce. Tento mikroprocesor byl totiž zapojován pomocí konektoru vizuálně podobného sběrnici PCI. (8)



**Obr. 9 Pentium II**

Zdroj:

[https://linustechtips.com/main/uploads/monthly\\_2016\\_09/IMG\\_1198.JPG.fb0e6a0e0a88a3a7c6156769573c7d44.JPG](https://linustechtips.com/main/uploads/monthly_2016_09/IMG_1198.JPG.fb0e6a0e0a88a3a7c6156769573c7d44.JPG)

### **4.12 Intel Pentium III**

Pentium III navazuje na Pentium II (a tedy i na starší Pentium Pro). Na tomto mikroprocesoru se nově objevuje technologie SSE, která vylepšuje sadu instrukcí MMX a tím reaguje na konkurenci v podobě AMD 3DNow!, SSE i 3DNow! vycházejí ze stejné myšlenky jako MMX, ale operace je nově možné provádět i s čísly v plovoucí desetinné čárce.

Za pozornost stojí i Pentium III, které ve variantě Coppermine jako první procesor od Intelu překračuje taktovací frekvenci 1Ghz. Tato symbolická hranice ale byla již dříve překročena firmou AMD. (8)

### **4.13 Intel Pentium IV**

Mikroprocesor Intel Pentium IV byl uveden na trh v roce 2000 a přináší s sebou úplně novou architekturu NetBurst. Cílem této architektury bylo co nejvíce zvýšit taktovací frekvenci procesoru a tím i jeho výkon. Intel se toho snažil docílit prodloužením instrukční fronty pipeline na 20 a později i na 31 kroků. Takto dlouhá instrukční fronta však s sebou přináší i zásadní nevýhody, kterými je hlavně zvýšená latence uvnitř mikroprocesoru a velmi obtížné předzpracování instrukcí (Při dvaceti stupňové pipeline je totiž nutné, aby mikroprocesor rozpracoval dalších 20 instrukcí před tím, než se jedna dokončí. To je ale obtížné zejména kvůli závislosti instrukcí problému podmíněných skoků).

Taktovací frekvenci se však u Pentii IV skutečně zvyšovat dařilo a tyto procesory dosahovaly na svou dobu velmi vysokých taktů. Brzy se ale objevily problémy s vysokou spotřebou energie a silným zahříváním, což zastavilo další agresivní nárůst frekvence. (8)

Mikroprocesor také obsahoval dvě aritmeticko-logické jednotky, které pracují na dvojnásobné frekvenci jádra. Intel tuto vlastnost nazval jako „Rapid Execution Engine“. (14)

Pozdější verze Pentia IV byla vylepšena o funkci HyperThreading (obecně známou i pod zkratkou SMT), která umožňuje jednomu procesoru zpracovávat dva na sobě nezávislé proudy instrukcí současně (tzv. vlákna). Pentium IV tedy na rozdíl od předchozích procesorů umožňuje skutečný multitasking, ve kterém je teoreticky

možné mít více spuštěných programů, aniž by mezi nimi bylo aktivně přepínáno.<sup>3</sup>  
(12 str. 202)

#### **4.14 Pentium M**

Pentium M vzniklo v roce 2003 jako alternativa k architektuře NetBurst, která byla notoricky známa vysokou spotřebou energie. V notebooku je na rozdíl od stolního počítače spotřeba energie jedním z nejdůležitějších parametrů, a to dělalo NetBurst naprosto nevhodnou architekturou pro taková zařízení. Pentium M bylo namísto architektury Pentia IV založeno na Pentiu III. (8)

#### **4.15 Intel Itanium**

Dalším logickým krokem ve vývoji architektur byl přechod od 32bitových mikroprocesorů k 64bitovým. Tento přechod zvětšil šířku dat, se kterými mikroprocesor dokázal zároveň pracovat a také zvětšil množství adresovatelné paměti. Velkým omezením 32bitových mikroprocesorů bylo totiž množství maximálně adresovatelné paměti, které činilo pouze 4GB paměti, a to začalo být čím dál více nepraktické a omezující.

Tohoto přirozeného přechodu Intel využil a společně s firmou HP uvedl v roce 2001 novou rodinu mikroprocesorů nazvanou „Itanium“. Procesory této rodiny byly 64bitové a disponovaly úplně novou architekturou s označením IA64, která měla postupně nahradit starší x86. Tato nová a revoluční architektura využívala výpočetní model EPIC (Explicitly Parallel Instruction Computing), který byl založen na myšlence VLIW (Very Long Instruction Word). Ta spočívá v použití instrukčního slova, které v sobě sdružuje více jednotlivých instrukcí určených k paralelnímu provedení. Množství instrukcí v jednom slově je dáno počtem paralelně pracujících výkonných jednotek. Plánování či předvídání skoku bylo tedy přenecháno kompilátoru a místo na čipu, které se tímto ušetřilo mělo být využito pro další jádra, která paralelně zpracovávala další instrukce.

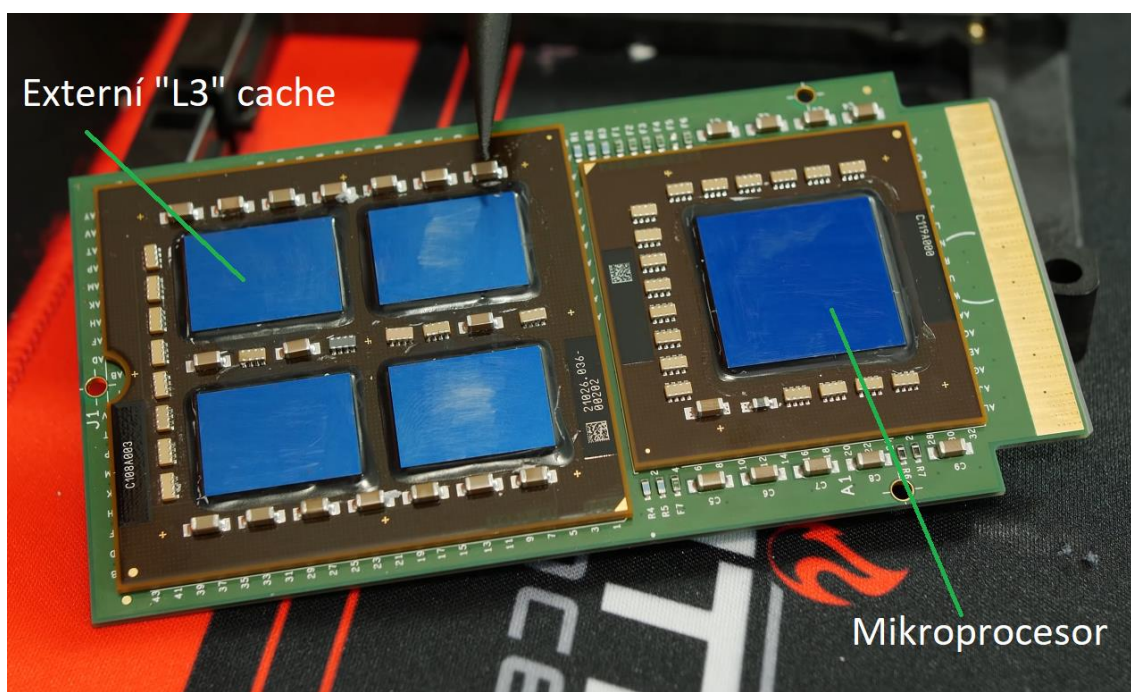
---

<sup>3</sup> Skutečnost je o něco složitější a počet vláken určených k současnému zpracování je běžně vyšší než 2, takže je stále nutné mezi spuštěnými programy přepínat a tím jim přidělovat strojový čas.

Architektura IA64 se ale nakonec uchytila krátce a pouze v omezené míře na serverech. Důvodem bylo to, že pro ni bylo velmi těžké psát programy a zároveň na ní nebylo možné spustit jakékoliv aplikace psané pro starší procesory. Dalším zásadním problémem například bylo, že čas vybavení dat z operační paměti je nedeterministický a kompilátor kvůli tomu pouze velmi těžko dokáže efektivně rozhodovat o pořadí provedených instrukcí.

Z těchto důvodů se Intel postupně rozhodl tuto architekturu opustit a licencoval si namísto toho 64bitové rozšíření architektury x86 od AMD. Toto rozšíření se později objevilo na pozdních mikroprocesorech založených na architektuře NetBurst a poté i na následujících generacích procesorů Intel.

Projekt Itanium stál Intel i HP obrovské množství finančních prostředků, a právě kvůli jeho neslavnému konci se na něj často odkazuje jako na „Itanic“ dle slavné zaoceánské lodi. (15) (16)



**Obr. 10 Intel Itanium 1. generace s externí „L3“ cache**

Zdroj: <https://www.youtube.com/watch?v=NTxXTbOHG7Q> (upraveno)

#### **4.16 Pentium D**

V roce 2005 uvedl Intel na trh první dvoujádrový procesor. Tento procesor vycházel z Pentia IV a architektury NetBurst. Pentium D bylo ale velmi úspěšné. Hlavním

cílem Intelu totiž bylo za každou cenu vydat první dvoujádrový procesor a předběhnout tak AMD.

Pentium D se skládalo ze dvou procesorů Pentium IV, které byly navzájem propojeny. Tento procesor byl velmi kritizován zejména kvůli tomu, že se u něj projevovaly všechny nevýhody architektury NetBurst, a to ještě ve větší míře. Už jedno Pentium IV dokázalo mít velmi vysokou teplotu i spotřebu energie. Pentium D v sobě schovávalo 2 takové problémové procesory. (8)



**Obr. 11 Pentium D po odstranění integrovaného tepelného rozvaděče**

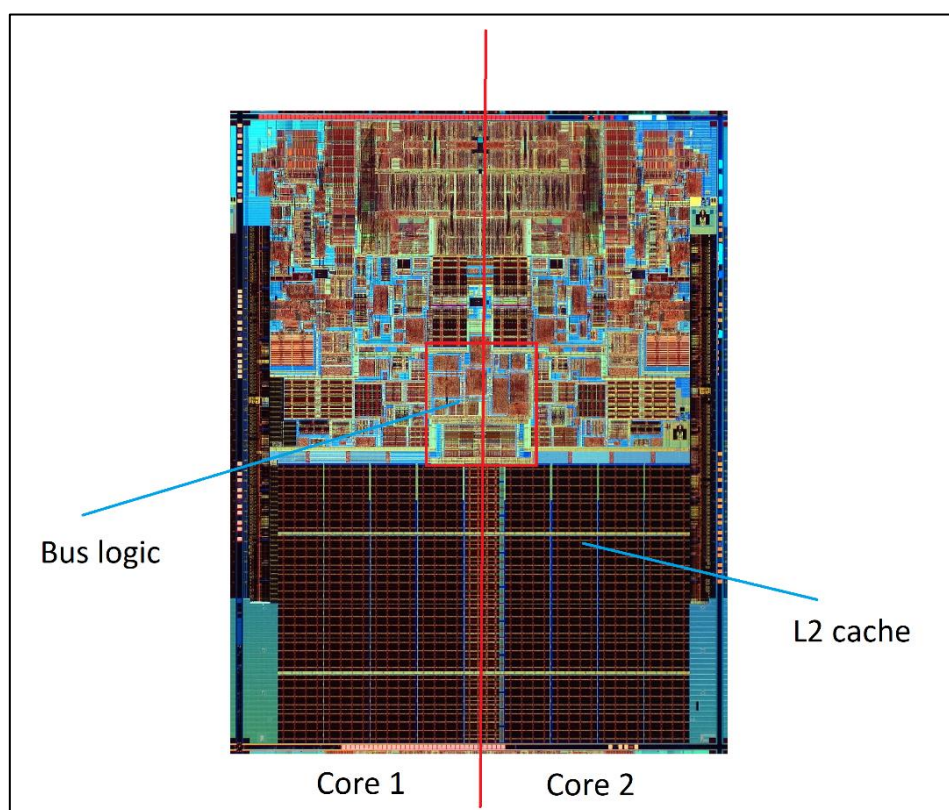
Zdroj: <https://www.overclock.net/forum/5-intel-cpus/1450649-delidding-soldered-ihs.html>

#### **4.17 Intel Core 2**

Rodina procesorů Intel Core 2 byla představena v roce 2006 (17) a architektonicky vycházela z Pentia M (které vycházelo z Pentia III). Architektura Core 2 tedy představuje odklon od předcházející architektury NetBurst a návrat k architektuře vycházející z Pentia Pro. (18)

Pentium M se ukázalo být velmi úsporné a přesto výkonné, což bylo v silném kontrastu s předchozí architekturou NetBurst. Techniky původně určené pro snížení elektrického příkonu v noteboocích našly uplatnění i v procesorech Core 2. Jedná se například o technologii Intel Enhanced SpeedStep, která umožňovala procesoru dynamicky přecházet mezi různými výkonnostními režimy(P-States) a tím umožnila procesoru, aby šetřil energii. (19)

Velkou změnou oproti Pentiu D je i uspořádání jader. Pořád se jedná o dva procesory v jednom pouzdře, ale narozdíl od Pentia D jsou nyní tyto procesory integrovány do jednoho čipu.<sup>4</sup>



**Obr. 12 Snímek mikroprocesoru Core 2**

Zdroj: <https://infomars.fr/kyro/die/Conroe%20-%20Core%202%20Duo%20-%2065nm.png> (upraveno podle: [http://www.chip-architect.com/news/DC\\_65nm\\_compare\\_2007\\_01\\_27\\_720.jpg](http://www.chip-architect.com/news/DC_65nm_compare_2007_01_27_720.jpg))

---

<sup>4</sup> Mikroprocesory Core 2 ve verzi Quad, ale představují výjimku. Skládají se totiž ze dvou dvoujádrových modulů, které jsou spojeny podobně jako v případě Pentia D. (8)

## **4.18 Koncepty zásadní pro moderní procesory**

### **4.18.1 Škálovatelnost**

Škálovatelnost znamená návrh mikroprocesorových architektur tak, aby bylo možné mikroprocesory se stejnou architekturou dodávat pro celou řadu různých použití. Takovýto přístup šetří náklady na vývoj architektur a tím i finální cenu produktů, protože není potřeba pro každý typ zařízení navrhovat úplně celý procesor.

Mikroprocesory stejné generace je tedy možné najít v úsporných notebookech i nejvýkonnějších serverech. Mikroprocesory pro různé použití se často liší v klíčových aspektech (příkon, velikost cache paměti, fyzická velikost, absence některých technologií atd.), ale architektura zůstává stejná.

### **4.18.2 Binning**

Binning (volně přeloženo jako „rozdělování do košíků“) označuje proces, při kterém výrobce mikroprocesorů odděluje kvalitnější procesory od těch méně kvalitních. Při jejich výrobě totiž mohou nastat malé defekty v určitých jejich částech a podle závažnosti těchto defektů je pak určeno, co se s takovým procesorem má stát. Pokud se defekt nachází v některé důležité části, tak procesor bývá recyklován. Pokud se defekt projevuje pouze nefunkčností nebo výrazně menším výkonem některého z jader, tak se výrobce může rozhodnout postižená jádra deaktivovat a prodat procesor za nižší cenu.

Takže např. dvoujádrový procesor Intel Core i3 mohl být klidně zamýšlen jako čtyřjádrový Core i5, ale při výrobě došlo k chybě a procesor je prodán pod jiným označením. Znamená to tedy, že pokud si zákazník koupí procesor s určitým počtem jader, tak na samotném čipu může být fyzicky přítomno jader více, ale některá z nich jsou deaktivována. Podobně lze postupovat i pro jiné části procesoru (např. pro integrovaný grafický čip). (20)

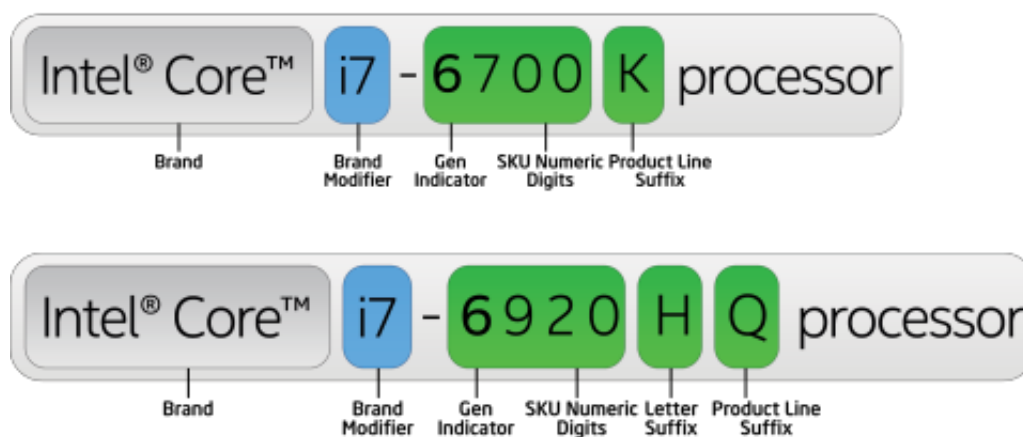
### **4.18.3 Segmentace**

Rodina procesorů Intel Core přináší úplně nové značení, které má za cíl rozdělit procesory do různých výkonnostních a cenových segmentů. Pro výkonné

spotřebitelské procesory byly založeny značky i3, i5, i7 a později i i9. Serverové procesory pak nesou značku Xeon a vyznačují se podporou ECC<sup>5</sup> pamětí a zvýšeným počtem jader.

Dalším faktorem segmentace může být i rozdělení procesorů se stejným označením pomocí písmen přidaných na konec tohoto označení. Písmeno K například značí procesor, u kterého se zákazník může na vlastní riziko pokusit o zvýšení taktovací frekvence nad oficiální specifikaci. Písmeno U značí úsporné procesory a písmeno F typicky označuje procesory bez integrovaného grafického čipu.

Segmentace může být dána návrhem čipu (serverové procesory typicky preferují počet jader před jejich frekvencí), binningem poškozených procesorů nebo i umělá, kdy výrobce záměrně deaktivuje některé části funkčního procesoru tak, aby procesor mohl být prodán do jiného segmentu trhu a za jinou cenu. (21)



**Obr. 13 Značení procesorů Intel**

Zdroj: [https://www.techconsumerguide.com/wp-](https://www.techconsumerguide.com/wp-content/uploads/2019/02/intel-processor-number-meanings.png)

[content/uploads/2019/02/intel-processor-number-meanings.png](https://www.techconsumerguide.com/wp-content/uploads/2019/02/intel-processor-number-meanings.png)

#### **4.18.4 Tick-Tock**

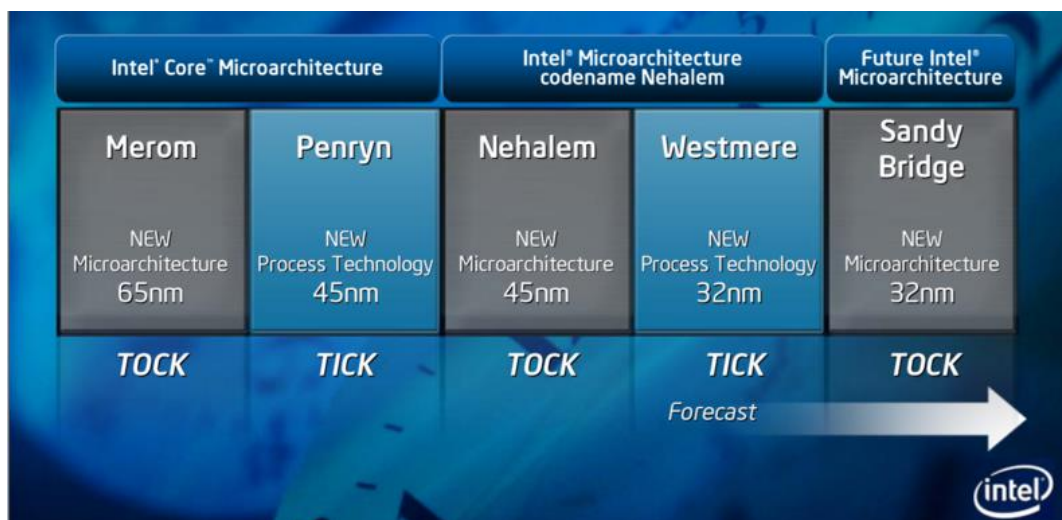
Vývoj mikroprocesorů Intel se nově řídí dvoufázovým vývojovým modelem, který Intel nazval Tick-Tock. Firma také začíná vydávat novou generaci svých procesorů každý rok.

---

<sup>5</sup> Error CoreCtion memory. Paměti s automatickou opravou chyb. Tento typ paměti je nezbytný pro použití v systémech, které jsou v provozu 24 hodin denně.



1. **Fáze tick:** staví na architektuře minulé generace a snaží se docílit vylepšení energetické efektivity miniaturizací tranzistorů uvnitř procesoru (a následně zvýšení výkonu taktovací frekvence).
2. **Fáze tock:** plně využívá výhod vylepšeného výrobního procesu, který přinesla minulé fáze a přináší novou architekturu obsahující nové a zásadní myšlenky.



**Obr. 14 Intel Tick-Tock**

Zdroj: [https://miro.medium.com/max/1596/1\\*SfZfLHjwA57n0GU0pVV-Qw.png](https://miro.medium.com/max/1596/1*SfZfLHjwA57n0GU0pVV-Qw.png)

#### 4.18.5 Utajení, marketing a složitost moderních procesorů

Mikroprocesory se od osmdesátých let staly velmi složité a návrhem konkrétní architektury se nezabývá už jen hrstka vědců, ale desítky až stovky hardwarových inženýrů. Každé dílčí vylepšení procesorů bývá přísně střeženým tajemstvím a zjišťování funkce konkrétních částí procesorů pomocí reverzního inženýrství se stává velmi těžkým či prakticky nemožným úkolem. Je nutné se tedy spoléhat na informace od výrobců a je zásadní důsledně oddělovat jejich proklamace od skutečností. Oficiální specifikace se často od skutečnosti mírně liší nebo jsou uplatnitelné pouze pod velmi specifickými podmínkami. Pro objektivní posouzení výkonu mikroprocesorů je tedy nutné využít benchmarky třetích stran.

Informace od výrobců zároveň mohou být jen velmi jednoduché a mohou se pouze omezovat na to, že jejich nové produkty jsou „prostě rychlejší“. Proto je obtížné v každé generaci přesně určit všechny architektonické změny.

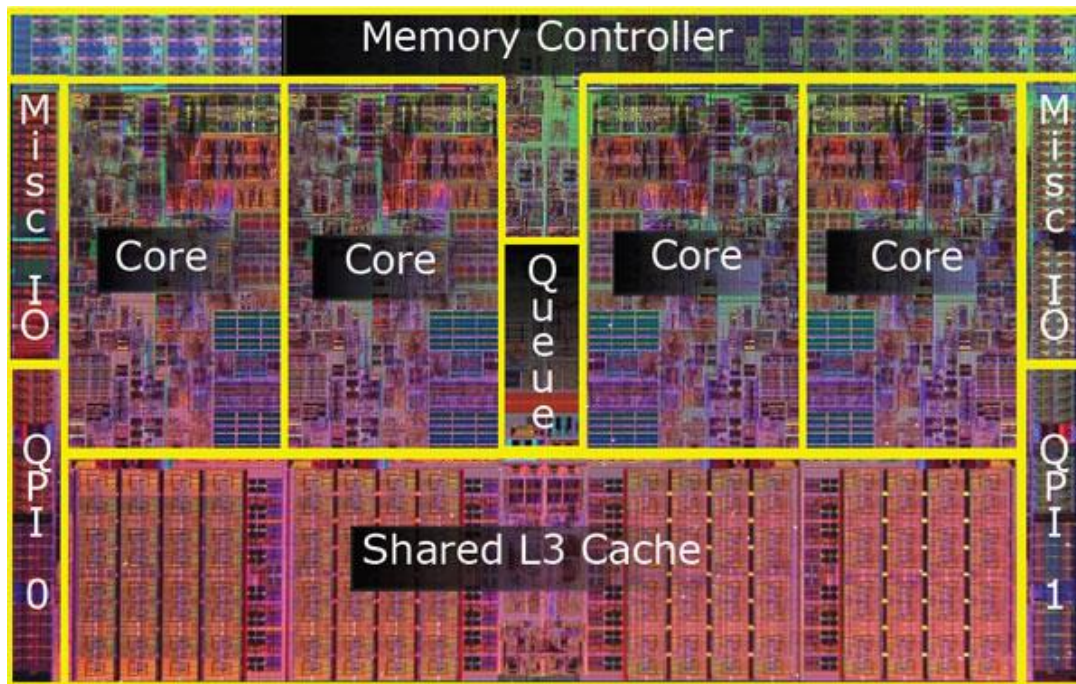
## 4.19 Současné procesory Intel Core

### 4.19.1 Nehalem (0.Generace)

Architektura Nehalem vznikla přepracováním původní architektury Intel Core. Tato nová architektura přináší na jednom čipu až 4 jádra a obsahuje řadu důležitých vylepšení.

Jedním z těchto vylepšení je nová cache třetí úrovně (L3). Rozdíl mezi L2 a L3 je podobný jako mezi L1 a L2, ale L3 je kromě vyšší kapacity a pomalejší rychlosti specifická ještě tím, že je sdílená mezi všemi jádry. (8) (22)

Dalším důležitým vylepšením je nová funkce Turbo Boost, která reaguje na slabší výkon vícejádrových procesorů ve starších nebo špatně paralelizovatelných programech. Při vykonávání jednovláknového programu, který je tedy specifický tím, že zatěžuje pouze jedno jádro, může mikroprocesor druhé jádro vypnout a vytvořit si tak prostor pro zvýšení frekvence zatíženého jádra. V praxi, ale není běžně možné takto zvýšit frekvenci libovolně, ale maximálně o pár desítek procent. Zatížené jádro totiž generuje velké množství tepla na velmi malé ploše (oproti ploše celého čipu) a při zvyšování frekvence dochází k daleko strmějšímu nárůstu příkonu než 1:1. (23)



**Obr. 15 Snímek mikroprocesoru Nehalem**

Zdroj: <https://pcper.com/wp-content/uploads/2008/08/7dd0-02.jpg>

#### 4.19.2 Westmere (1.generace)

Generace Westmere je tick fází k Nehalemu. Rozměry tranzistorů byly sníženy ze 45nm na 32nm. Tato generace je význačná zejména tím, že poprvé obsahuje grafický čip. (8)



**Obr. 16 Mikroprocesor Westmere obsahující grafický čip**

Zdroj: <https://www.cnews.cz/westmere-h57-clarkdale-ii-architektura-a-novinky/>

#### 4.19.3 Sandy Bridge (2.generace)

Sandy Bridge představuje pro Intel zásadní skok kupředu. Stejně jako předchozí generace Westmere je Sandy Bridge vyráběn 32nm technologií. Tato generace však přináší mnoho architektonických vylepšení.

Grafický čip je nově integrován do procesoru (namísto toho, aby byl pouze ve stejné schránce), což zásadně snížilo latenci při komunikaci s ním.

Byla přidána sada instrukcí AVX (Advanced Vector Extensions), která umožňovala provádět 256bitové SIMD výpočty v plovoucí desetinné čárce.

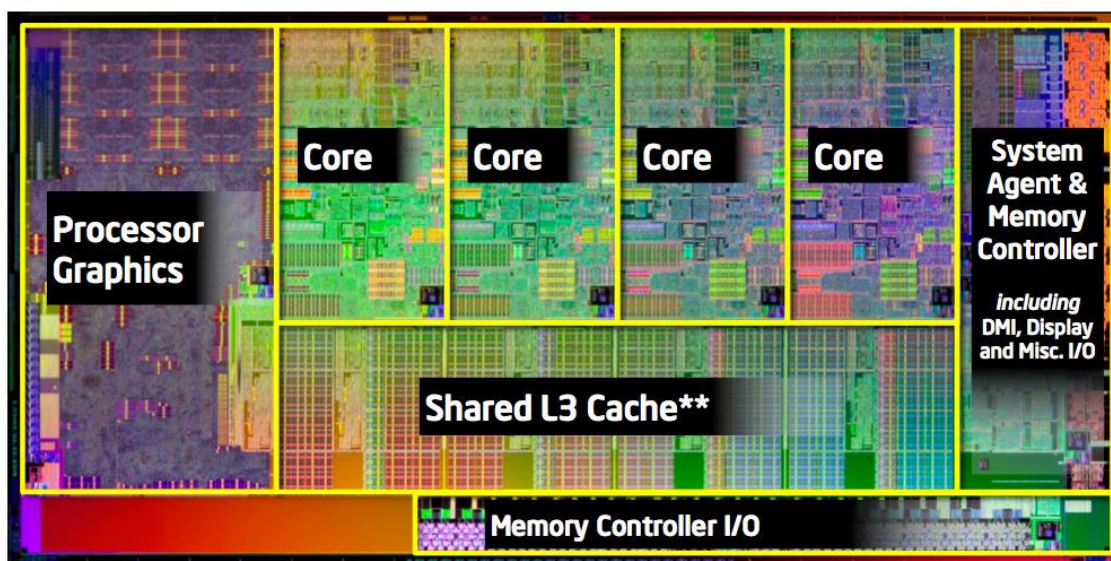
Severní můstek je nově integrován do samotného procesoru a nese název „System Agent“. Jeho napájení i napájení grafického čipu je od procesoru odděleno. Grafický

čip, System Agent i zbytek procesoru mohou tedy každý fungovat na jiném napájecím napětí.

Funkce Turbo Boost byla vylepšena na verzi 2.0, která umožňuje jednomu jádru zvýšit svůj výkon na omezený čas i nad úroveň navrženého tepelného výkonu procesoru. Toto vylepšení se hodí zejména pro takový typ práce, která obsahuje rychlé výkyvy ve využívání procesoru.

Sandy Bridge, také obsahuje obvody pro hardwarové kódování a dekódování videa nazvané jako „Media Engine“. Tyto činnosti dříve představovaly pro procesor značné zatížení, ale použitím specializovaných obvodů je dosaženo zefektivnění práce.

Důvodem je skutečnost, že architektura mikroprocesorů je obecná. Mikroprocesor je navrhnout tak aby dokázal spustit libovolný program. Media Engine byl postaven pouze pro jeden typ práce. (24)



**Obr. 17 Snímek mikroprocesoru Sandy Bridge**

Zdroj:

<https://images.anandtech.com/reviews/cpu/intel/sandybridge/review/die.jpg>

#### **4.19.4 Ivy Bridge (3. Generace)**

Ivy Bridge představuje další fázi tick a vyrábí se na novém 22nm výrobním procesu. Díky tomu přináší očekávané snížení spotřeby a drobné zvýšení rychlosti.

Zajímavou změnou je i nová a vylepšená grafická jednotka (GPU), která oproti předchůdci dosahovala dvojnásobné rychlosti. (8)

#### 4.19.5 Haswell (4. Generace)

Další generace mikroprocesorů Intel Core nese název Haswell. Důraz byl kladen hlavně na zvýšení grafického výkonu a na snížení spotřeby. Tato generace proto přináší jen několik málo vylepšení. (4)

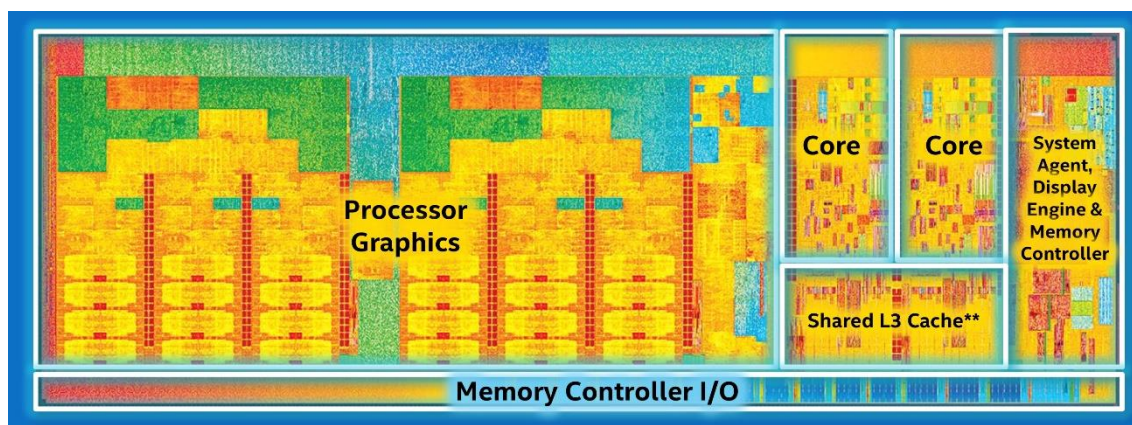
Sada instrukcí AVX byla vylepšena na verzi AVX 2.0 a na vybraných modelech bylo zabudováno 128MB paměti eDRAM. Jednalo se o standardní dynamickou RAM, která byla, ale vestavěna přímo do procesoru a tvořila tak pomyslnou cache čtvrté úrovně.

#### 4.19.6 Broadwell (5. Generace)

Broadwell představuje první z velmi dlouhé série 14nm mikroprocesorů Intel. Tato generace byla zaměřena hlavně na mobilní zařízení. Zásadní pro Intel opět bylo zlepšit grafický výkon a snížit spotřebu.

Jednalo se o architekturu, která nebyla orientovaná na výkon, takže se objevovala hlavně v mobilních zařízeních a pouze malé množství procesorů této generace bylo dostupných pro stolní počítače. (8)

Za pozornost stojí i to, že snaha Intelu zlepšovat grafický výkon postupně vedla k tomu, že od generace Sandy Bridge, která jako první integrovala GPU do mikroprocesoru tato výpočetní jednotka výrazně narostla a nyní zabírá polovinu až dvě třetiny celého čipu.



**Obr. 14 Snímek notebookového mikroprocesoru Broadwell**

Zdroj:

[https://cdn1.expertreviews.co.uk/sites/expertreviews/files/5/83//intel\\_broadwell\\_die\\_layout.png?itok=cAX5tPqV](https://cdn1.expertreviews.co.uk/sites/expertreviews/files/5/83//intel_broadwell_die_layout.png?itok=cAX5tPqV)

#### 4.19.7 Skylake (6. Generace)

Skylake je šestou generací architektury Intel Core a je opět vyráběn 14nm výrobním procesem. Na rozdíl od mobilně orientovaného Broadwellu se zaměřuje i na desktop.

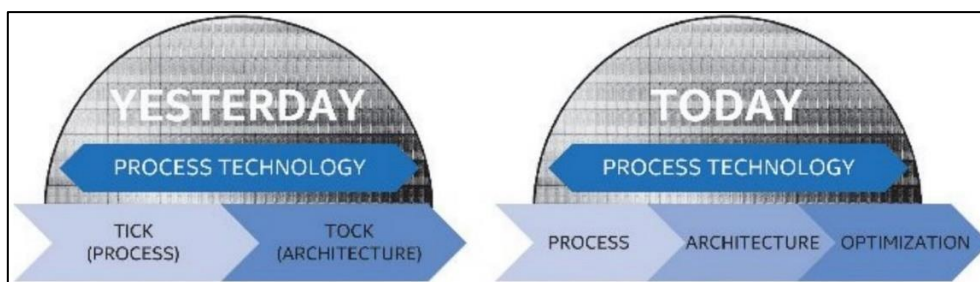
Objevuje se zde nově podpora pro paměti DDR4 (starší DDR3 je ale také možné použít). Dalším vylepšením je technologie Intel Speed Shift, která slibuje, že dokáže mezi výkonnostními režimy přepínat daleko rychleji než starší Enhanced SpeedStep. Jedinou nevýhodou architektury Skylake je, že oproti svému mobilně orientovanému předchůdci již neobsahuje paměť eDRAM. (25)

#### 4.19.8 Kaby Lake (7. Generace)

Kaby Lake je první generace, která se odklání od Tick-Tock modelu. Intel svým způsobem oficiálně přiznává problémy při přechodu na 10nm a zavádí nový model nazvaný „Process-Architecture-Optimization“. Tento nový model funguje následovně. (26)

1. Process: Přechod na nový, vylepšený výrobní proces a s tím spojené benefity
2. Architecture: Nová architektura, která plně využívá výhod výrobního procesu, který byl zaveden minulé generaci.
3. Optimization: Třetí krok, který má překlenout čas, při kterém se finalizuje nový výrobní proces pro příští generace. V tomto kroku dochází k optimalizaci stávajícího výrobního procesu i stávající architektury.

Generace Kaby Lake tedy představuje plnohodnotnou fázi optimalizace. Přináší vylepšení výrobního procesu i architektury. Došlo k přechodu na vylepšený 14nm proces nazvaný „14nm+“ a architektura byla také optimalizována. (8)



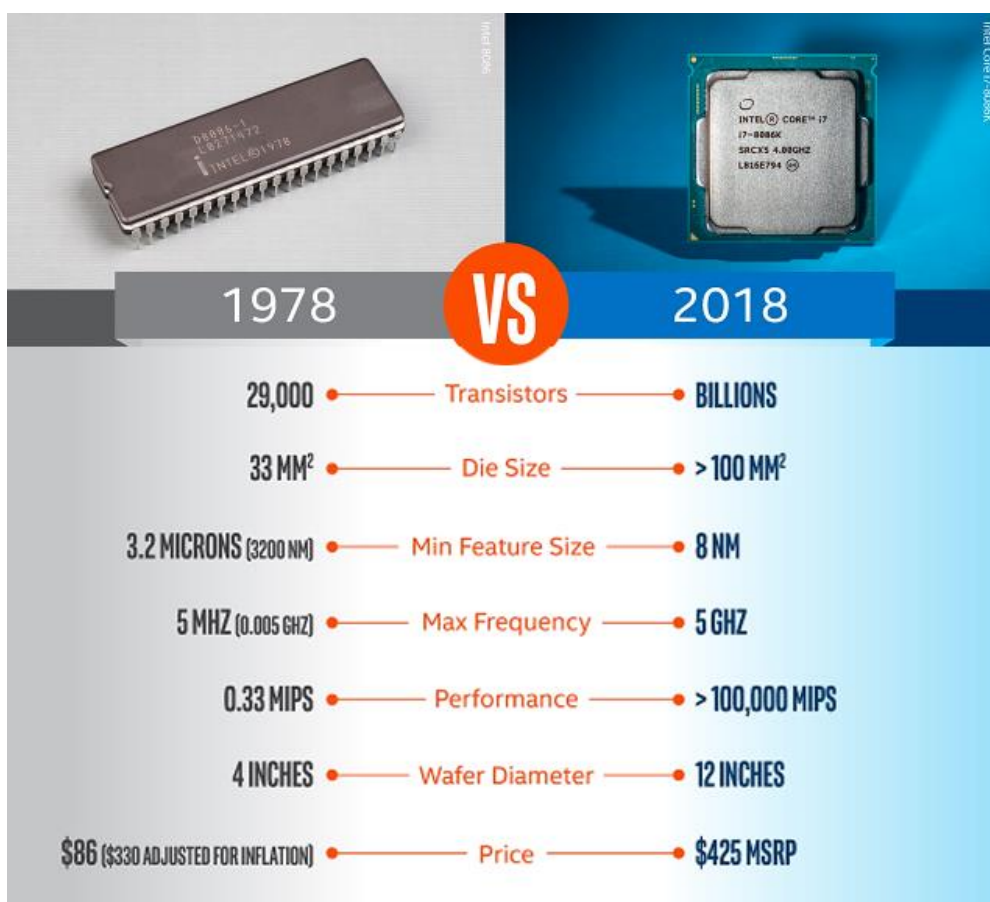
**Obr. 18 Process-Architecture-Optimization model**

Zdroj: (26)

#### 4.19.9 Coffee Lake (8. Generace)

Coffee Lake představuje čtvrtou generaci 14nm procesorů Intel. Firma tedy nedokázala udržet krok ani se svým rozvolněným vývojovým modelem Process-Architecture-Optimization, který byl představen před vydáním generace Kaby Lake. Tyto nové procesory reagují na konkurenci v podobě AMD Ryzen, který se stal velmi populární hlavně kvůli své nízké ceně a vysokému počtu jader. Největší změna, kterou Coffee Lake přináší, je výrazné zvýšení počtu jader. Nejlepší mainstreamové procesory Coffee Lake obsahují 6 jader a v kombinaci s technologií HyperThreading dokážou zpracovávat až 12 vláken současně. (8)

Zajímavým procesorem, který patří do této generace je i Intel 8086K. Jedná se o limitovanou edici určenou k oslavě čtyřiceti roků od prvního x86 mikroprocesoru. Intel 8086K vznikl výběrem nejvýkonnějších procesorů 8700K. Tyto vybrané procesory měly od Intelu zaručeno to, že jsou schopny v turbo režimu dosáhnout 5 Ghz (Maximální turbo u standardní 8700K je 4.7Ghz). (27)



Obr. 19 8086 vs i7 8086K

Zdroj: (27), upraveno

#### **4.19.10 Coffee Lake-refresh (9.Generace)**

V roce 2019 přináší Intel na trh pátou generaci procesorů vyrobených 14nm výrobní technologií. Hlavním cílem této generace je opět vzdorovat konkurenci ze strany firmy AMD. Počet jader nejlepších mainstream procesorů této generace opět vzrostl a dostal se už na 8.

#### **4.19.11 Comet Lake (10.Generace)**

Architektura Comet Lake oficiálně vydaná v roce 2020 představuje další inkrementální vylepšení na cestě k 10nm. Cílem Intelu v této generaci bylo nadále vzdorovat konkurenci v podobě AMD a díky tomu dochází společně s mírným mezigeneračním zvýšením výkonu i ke zmírnění agresivní politiky umělého oslabování výkonu. Většina procesorů Intel nyní disponuje funkcí HyperThreading, což dříve nebylo pravidlem. (28)

#### **4.19.12 Rocket Lake (11.Generace)**

Ani v další generaci se Intelu nedaří plně vyladit 10nm výrobní proces. Tato nová generace vyšla na konci března roku 2021 a představuje již těžko uvěřitelnou sedmou generaci založenou na 14nm výrobním procesu. Tato generace opět přinesla pouze inkrementální vylepšení.



## 5 Historický přehled vývoje mikroprocesorů firmy AMD

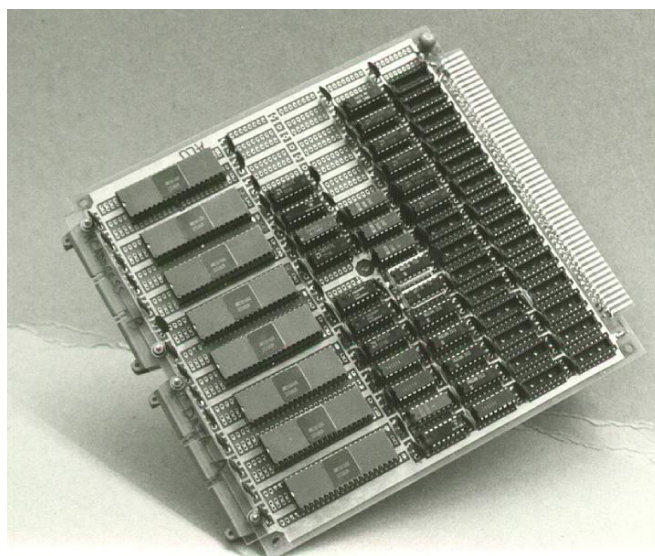
AMD představuje v současnosti druhou největší firmu na poli vývoje mikroprocesorů řady x86. Firma vznikla v roce 1969 a nyní se kromě vývoje mikroprocesorů a čipsetů věnuje i vývoji grafických čipů.

Od Intelu se AMD odlišuje zejména absencí výrobních kapacit, kterých se firma musela kvůli nepříznivé finanční situaci vzdát. Prodej výrobní divize se však ukázal být jako velmi dobrý krok, protože společnost získala prostředky pro překlenutí těžkých časů a během následné výroby nové generace mikroprocesorů měla firma daleko flexibilnější možnosti než konkurent Intel, pro kterého problémy ve vlastní výrobě představují v současnosti značný limitující faktor.

### 5.1 Am2900

V roce 1975 představila firma AMD technologii zvanou „bit-slicing“. Procesory využívající této technologie se skládaly podobně jako stavebnice z modulů obsahující ALU s relativně malou bitovou šířkou. Využitím více takových modulů mohlo být, ale teoreticky dosaženo složení procesoru používajícího šířku slova, která je libovolným násobkem té základní.

Díky flexibilitě a volnosti, kterou tato technologie přinesla se stala rodina čipů Am2900 relativně populární, a i o mnoho let později se využívala při výuce na univerzitách. (29)



**Obr. 20 Grafický akcelerátor používající čipy z rodiny Am2900**

Zdroj: <https://i.iinfo.cz/images/465/pc141-9.jpg>

## **5.2 AMD 8086, Am286, Am386, Am486, Am5x86 a další**

Dalších několik generací mikroprocesorů AMD se skládalo zejména z licenčních i nelicenčních kopií produktů konkurenčního Intelu.

Tlak na výrobu mikroprocesorů Intel u jiných firem byl vyvíjen zejména firmou IBM, která se oprávněně domnívala, že Intel nebude schopen dodávat dostatečné množství hardwaru pro IBM PC.

Licenční výrobu se Intel později pokusil ukončit s příchodem mikroprocesoru 80386. Toto rozhodnutí však firma AMD nepovažovala za právoplatné, a proto ho napadla u soudu. Soud dal firmě za pravdu a rozhodl, že AMD má právo vyrábět a navrhovat mikroprocesory architektury x86. Intel však není povinen s AMD sdílet všechny jeho nové výrobky.

Bez detailních plánů nových procesorů firmě AMD nezbylo nic jiného, než se uchýlit k reverznímu inženýrství a mikroprocesory Am386 a jeho blízcí nástupci pak vznikali pouze jako nelicenční klony produktů značky Intel. Tyto klony, ale často dosahovaly vyššího výkonu než originální produkty, a proto se mikroprocesory firmy AMD staly značně populární. (30) (31)

## **5.3 AMD K5**

V roce 1996 představila firma AMD svůj prvním produkt řady x86, který byl kompletně navrhnut inženýry AMD. Jednalo se o na tu dobu moderní mikroprocesor, který využíval spekulativní spouštění instrukcí mimo pořadí společně s překladem instrukcí na RISCové za pomoci mikrokódu. (31)

Procesor i jeho výroba se však potýkala se značnými problémy, což způsobilo, že se mikroprocesor dostal na trh pozdě a nebyl schopen dosahovat výkonnostních cílů, které od něj AMD očekávala. (30)

## **5.4 AMD K6**

Mikroprocesory rodiny K6 byly uvedeny v roce 1997 a představují pro AMD další zásadní krok kupředu. Založeny jsou na technologii firmy NexGen, kterou AMD zakoupilo.

AMD K6 opět využívají interní překlad instrukcí x86 a v pozdějších verzích zavádí i jiné důležité inovace jako například instrukce MMX a 3DNow! umožňující SIMD

operace s celými čísly i s čísly v plovoucí desetinné čárce. V této době ještě neexistovala sada instrukcí SSE Intelu, která je svou funkcí velmi podobná 3DNow!. Pozdější mikroprocesory dále integrovaly L2 cache a disponovaly technologií PowerNow!, která dynamicky měnila napětí a taktovací frekvenci v závislosti na požadovaném výkonu, čímž bylo dosaženo větší energetické účinnosti a menšího množství průměrně vydávaného tepla. (31)

### **5.5 Athlon (K7)**

Další generace mikroprocesorů AMD přichází v roce 1999 a přináší s sebou zlatou éru firmy. Na rozdíl od Intelu se AMD zoufale nežene za navyšování taktovací frekvence za každou cenu a pozdější procesory architektury AMD K7 se často dokážou vyrovnat Pentiu IV i za použití nižších taktovacích frekvencí. (30)

Aby firma AMD dostatečně zdůraznila svou architektonickou převahu začala své procesory znovu označovat zkratkou PR (=Performance Rating), které namísto skutečné frekvence procesoru udávalo, jakou frekvenci by musel mít straší mikroprocesor této generace, aby se danému novějšímu vyrovnal. Mezi novináři se ale často spekulovalo o tom, že toto označení ve skutečnosti míří spíše na mikroprocesory firmy Intel a podle toho byl PR rating i často používán. (32)

Během této doby začíná AMD rovněž své produkty označovat novými názvy, z nichž zejména Athlon se používá dodnes. Mezi další označení mikroprocesorů AMD se řadí například: Duron, Sempron a Thunderbird.

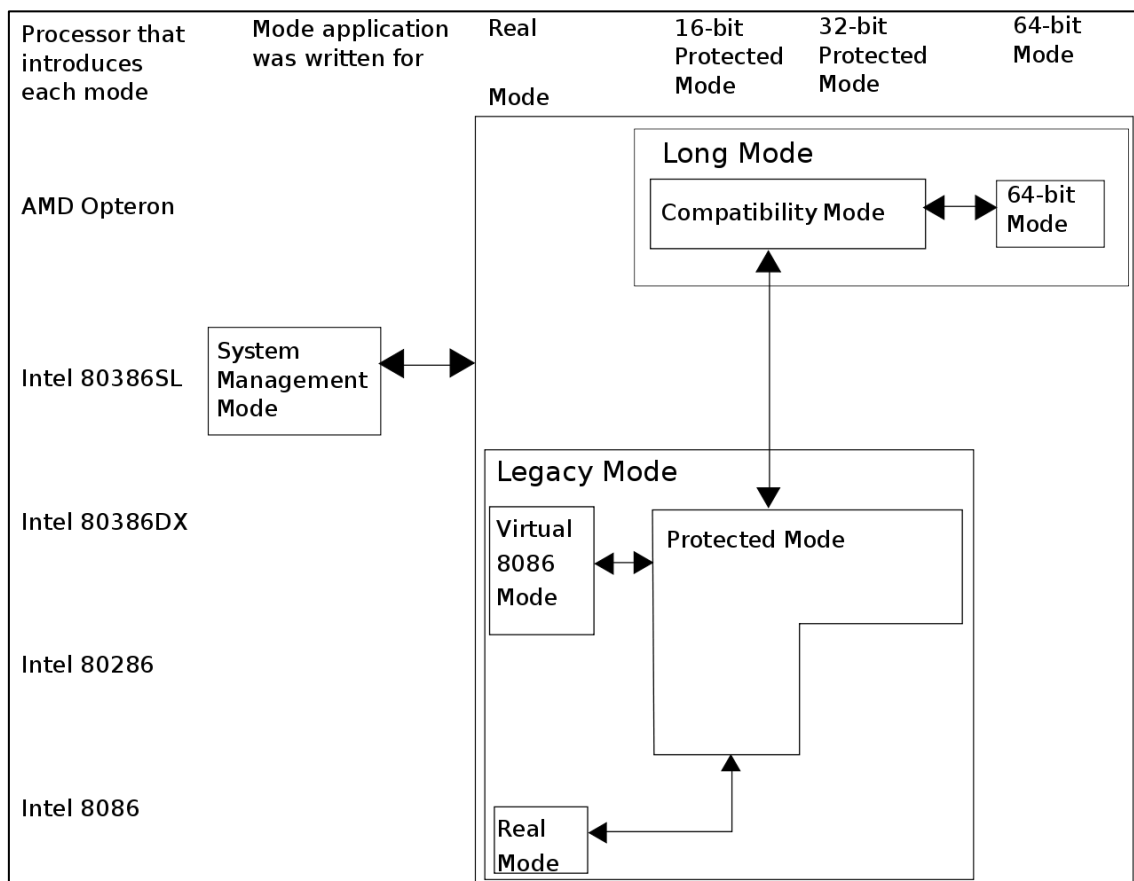
### **5.6 Athlon64 (K8)**

V roce 2003 došlo k představení mikroprocesoru Athlon64 a jeho serverové varianty nazvané Opteron. Architektura K8, na které byly tyto nové procesory postaveny byla skutečně revoluční. Jednalo se totiž o první 64bitové mikroprocesory řady x86.

Tyto mikroprocesory s sebou přinesly nový režim zvaný „Long mode“, ve kterém lze spouštět 64bitové aplikace, ale i aplikace psané pro starší 32bitový mód. Výchozí mód, ve kterém se mikroprocesor nachází je reálný. Z toho režimu je možné se za pomoci 64bitového operačního systému přepnout do Long módu. Mikroprocesor

dále podporuje tzv. „Legacy“ mód, ve kterém může být spuštěn standartní 32bitový chráněný režim a zároveň i režim emulace 8086. (33)

Skutečnost, že nové procesory AMD umožňovaly spouštět 64bitové i starší aplikace zároveň, byla natolik zásadní, že Athlon64 začal nabývat na značné popularitě a Intelu nezbylo nic jiného než si technologii x86-64 od AMD licencovat.



**Obr. 21 Diagram režimů mikroprocesorů s rozšířením X86-64**

Zdroj: <https://en.wikipedia.org/wiki/X86-64#/media/File:AMD64StateDiagram.svg>

## 5.7 Athlon64 X2 (K8)

O dva roky později v roce 2005 byla architektura K8 dále obohacena o druhé jádro a AMD se tak stalo druhou společností, které se povedlo dovést vícejádrový mikroprocesor řady x86 na trh. Triumf AMD byl o to větší, protože Pentia D, která se na trh dostala jen o něco málo dříve, se ukázala být naprostým propadákem.

Jednalo se o další nezvratný úspěch firmy AMD, která v minulosti spíše nová inovativní řešení přejímala od Intelu namísto toho, aby je sama navrhovala.

## **5.8 AMD K10 (Phenom, Phenom II a Athlon II)**

Nástupcem populárních mikroprocesorů minulé architektury se stala architektura K10. Tato nová architektura přinesla řadu inkrementálních vylepšení, integraci L3 cache a čtyři až šest jader (později). Tyto procesory měly však oproti konkurenci v podobě architektury Intel Core 2 značnou výhodu. Jádra čtyřjádrových variant se totiž nacházela na stejném čipu, a tudíž nedocházelo ke zpomalení způsobenému při komunikaci mezi jednotlivými moduly. Přesto všechno se však úspěch architektury K10 nedostavil. V architektuře byla totiž nalezena chyba, a díky ní musela být výroba pozastavena. Mikroprocesory této generace nebyly rovněž schopny dosáhnout frekvence jakou AMD očekávalo a jejich cena byla i mírně vyšší u konkurence, což zčásti negovalo architektonické výhody AMD.

Firma AMD se dále v této době začínala dostávat do stísněné finanční situace díky předraženému nákupu grafické společnosti ATI, a i díky nastupující finanční krizi. (31)

## **5.9 Llano a Bobcat**

V roce 2011 představila firma AMD nový koncept, který nazvala Fusion. Jednalo se o zástavbu grafického čipu, který vycházel z technologií firmy ATI přímo do procesoru. AMD toto spojení CPU s GPU později nazvala jako APU (Accelerated Processing Unit) a slibovala si od něj masivní nárůst podílu v noteboocích. Přímo konkurenci APU AMD představovaly mikroprocesory Intel Core druhé generace, které rovněž obsahovaly grafický čip. Firma Intel se však stále drží označení CPU. (34) (35)

Přestože se úspěch APU v žádaném rozsahu nedostavil, tak tento nový produkt pro AMD později znamenal vytvoření segmentu „Semi-Custom Solutions“, ve kterém firma AMD navrhuje SoC<sup>6</sup> specificky na přání zákazníka, který se zaváže odebrat hardware v desetitisících kusů. Tohoto využívají zejména firmy Microsoft a Sony, které SoC od firmy AMD dlouhodobě využívají pro své herní konzole.

---

<sup>6</sup> System On Chip – integrovaný obvod, který kromě CPU(APU) obsahuje i jiné části počítače (paměť, rozhraní I/O zařízení, GPS modul, Wifi modul či jiné)

## **5.10 Bulldozer (AMD FX)**

Namísto pokračování v architektuře K10 se firma AMD rozhodla vyvinout úplně novou architekturu zvanou „Bulldozer“, která byla slavnostně představena ke konci roku 2011.

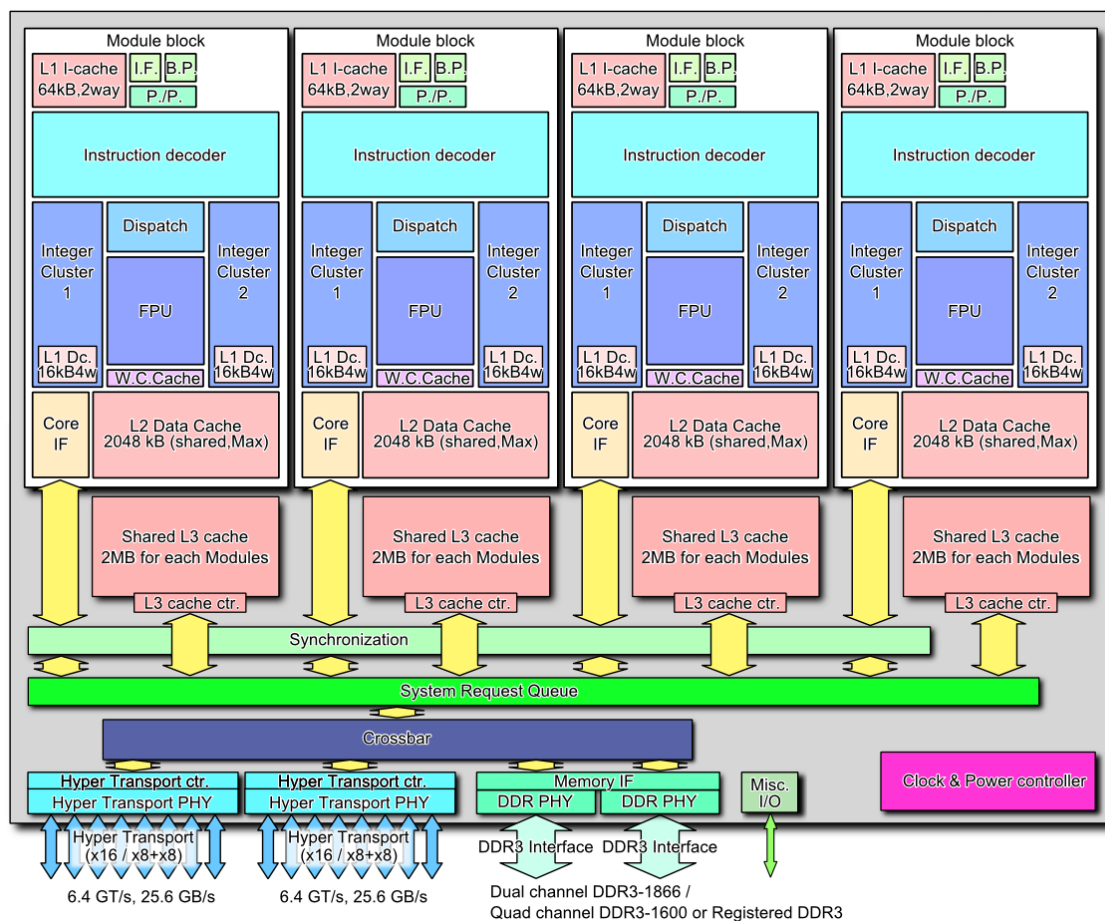
Firma se domnívala, že do budoucna bude počet jader mikroprocesorů růst, a že množství jader je důležitější než jednojádrový výkon. Tomuto odpovídal i marketing těchto produktů, který produkty často označoval jako „Future-Proof“, čímž se firma snažila vyjádřit jejich připravenost na budoucí software, který bude z velkého množství jader těžit. (36)

Výsledkem toho byla nová strategie nazvaná „clustered multithreading“, která sice nabízela na tu dobu velmi velký počet jader, ale tato jádra nebyla plnohodnotná. Každá dvě jádra byla totiž sdružena do jednoho bloku (cluster/module), který spolu mnoho částí sdílel.

Zejména omezující bylo sdílení jednotky FPU, díky čemuž procesory této architektury zpravidla dosahovaly silného celočíselného výkonu, ale relativně slabého výkonu v plovoucí desetinné čárce. (37)

Sázka na CMT se firmě AMD nakonec nevyplatila, protože software nadále vyžadoval jen několik málo vláken a slabý výkon této architektury v takových aplikacích byl v silném kontrastu s konkurencí v podobě Intel Core, která byla s ohledem na silný jednojádrový výkon navržena.

Architektura Bulldozer je významná i tím, že představuje pomyslný vrchol úpadku firmy AMD. Už v předešlé generaci docházelo k postupnému snižování podílu na trhu a tato nová architektura tento trend pouze urychlila. Firma AMD se tak dostala téměř na hranici bankrotu a byla nucena přistoupit k velké restrukturalizaci, při které někteří důležití lidé AMD dobrovolně opustili, velké množství lidí bylo propuštěno, a aby firma měla dostatek finančních prostředků pro další pokračování, tak se musela uchýlit i k tak zoufalým krokům jako je prodeji budov, které si následně firma zpětně pronajímala. (38)



**Obr. 22 Blokový diagram architektury Bulldozer s 8 jádry**

Zdroj:

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ec/AMD\\_Bulldozer\\_block\\_diagram\\_%288\\_core\\_CPU%29.PNG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ec/AMD_Bulldozer_block_diagram_%288_core_CPU%29.PNG)

## 5.11 Současné procesory firmy AMD

### 5.11.1 Zen/Zen+

Po problémech, do kterých se firma AMD dostala, vznikla nutnost přijít s nějakou skutečně geniální inovací, která by jí umožnila čelit tvrdé konkurenci ze strany procesorů Intel a zároveň si udržet dostatečně velké ziskové marže, aby mohl vývoj mikroprocesorů nadále pokračovat. A přesně tímto skoro až zázračným produktem byla architektura Zen oficiálně vydaná v roce 2017.

Architektura Zen opouští strategii CMT a důraz je namísto toho kladen na vysoký výkon na jádro a nízkou spotřebu energie. Největší stavební jednotka této architektury je modul „Zeppelin“, který se v běžných spotřebitelských procesorech

nachází pouze jeden, ale serverové procesory obsahují čtyři spojené moduly novou sběrnici nazvanou „Infinity Fabric“ (v obrázku znázorněno znakem nekonečna). Z této serverové varianty vznikla i varianta pro HEDT nazvaná „Threadripper“, kterou připravili inženýři AMD ve volném čase, a která obsahuje pouze 2 aktivní moduly. (39)

Každý z modulů Zeppelin se dále dělí na dvě části CCX (CoreComplex), kde každý CCX obsahuje až 4 aktivní jádra, která spolu na rozdíl od strategie CMT nesdílejí nic jiného než cache třetí úrovně. Ta u této architektury dosahuje úctyhodných 8 MB na CCX. (40)

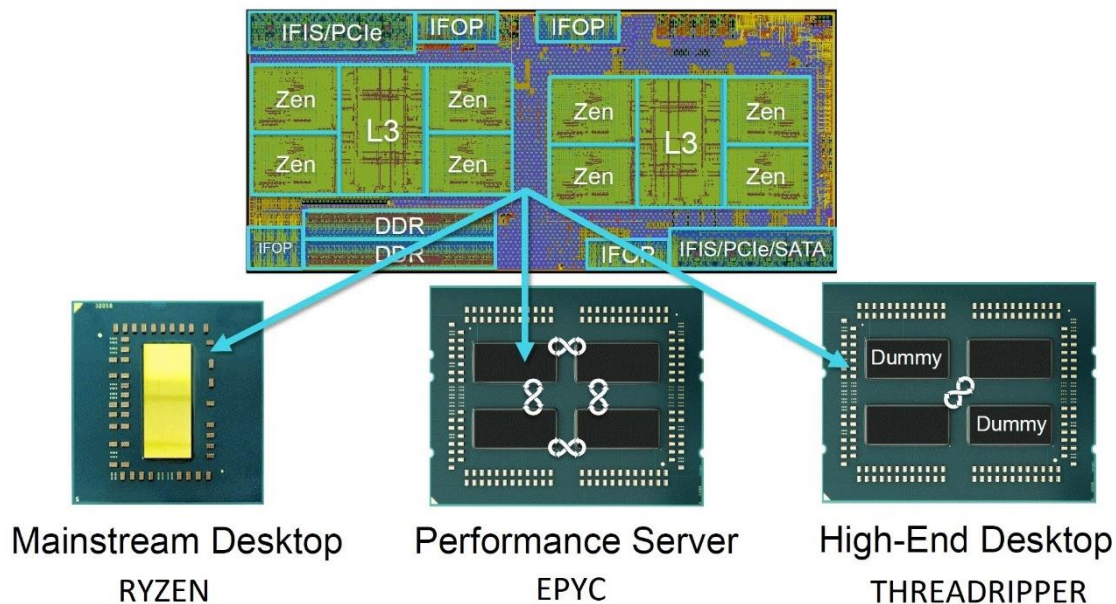
I přesto, že se návrh AMD na první pohled nezdá až tak přelomový, tak je to právě modulárnost, která ho revolučním dělá. Architektura Zen umožňuje obrovskou škálovatelnost, kde například APU „Raven Ridge“ založené na Zen obsahuje pouze jedno CCX vedle grafického čipu, zatímco serverové procesory obsahují 4 moduly Zeppelin. Celkem tedy až 8 aktivních CCX. Tato CCX použitá v APU i serveru se od sebe přitom téměř neliší, což dramaticky snižuje cenu.

Dalším faktorem snižujícím cenu je skutečnost, že architektura Zen je navržena pro usnadnění binningu. Jednotlivá CCX jsou na sobě z velké části nezávislá, a tak existuje menší šance, že dojde k nevratnému poškození celého čipu při výrobě. Pokud, ale k takovému poškození přeci jen dojde, tak se nejedná o zásadní problém. Poškozený čip Zeppelin se jednoduše nahradí novým. Zbytek procesoru, který se v případě modelů EPYC a Threadripper skládá z jiných modulů zůstává nepoškozený. Tento přístup se nazývá MCM (Multi Chip Module) a je protikladem tradičního monolitického přístupu, u kterého výtěžnost (poměr úspěšně vyrobených procesorů) klesá s druhou mocninou plochy čipu. Výroba mikroprocesorů s velkou plochou je tedy velmi drahá. MCM přístup ale přináší i nevýhody a tou nejzásadnější je zpomalení z důvodu latence při komunikaci mezi moduly. Tato nevýhoda je ale snadno překonána cenou, která je podle výpočtů AMD o ~40% nižší než u monolitického řešení. (41)

Dalším rozdílem oproti architekturám firmy Intel je nepoužití integrovaného grafického čipu mimo procesory specificky označené jako APU. Díky tomu je AMD schopno využít plochu procesoru pro více jader, což začalo být v roce 2017 opět relevantní. Velká chyba minulé generace procesorů AMD se ale neopakuje.



Mikroprocesory založené na architektuře Zen totiž na rozdíl od předchozí architektury Bulldozer disponují silným jednojádrovým výkonem, kterému je před velkým počtem jader dáována přednost.



**Obr. 23 Modulární architektura AMD Zen**

Zdroj: [https://diit.cz/sites/default/files/amd\\_zepelin\\_zen\\_epyc\\_threadripper.png](https://diit.cz/sites/default/files/amd_zepelin_zen_epyc_threadripper.png)  
(upraveno)

### 5.11.2 Zen2

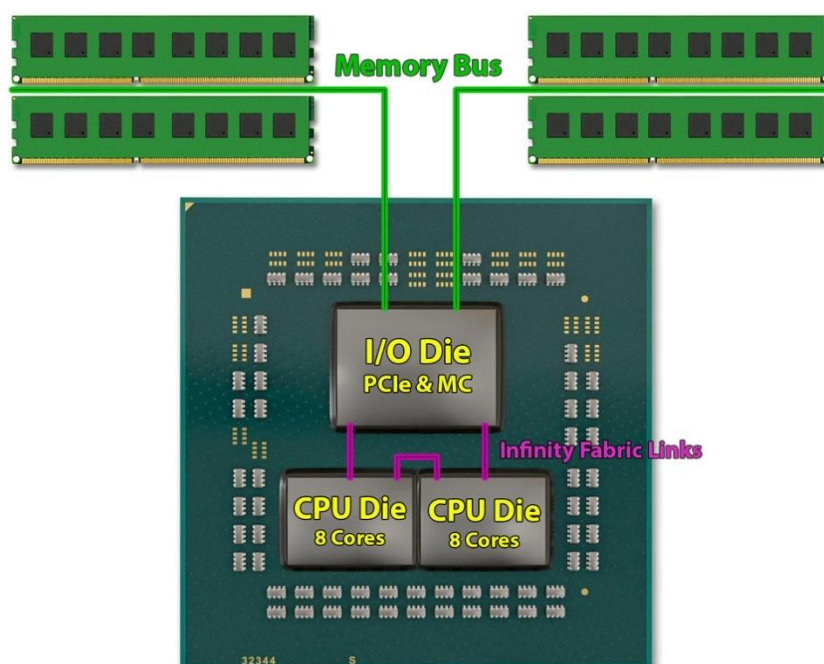
Procesory architektury Zen dokázaly plně konkurovat Intelu. Za nižší cenu než konkurenční procesory, nabízely velký počet jader a zároveň výkon na jedno jádro, který byl jen o málo menší než u Intelu.

Architektura Zen2 měla na tento úspěch navázat. Využit k tomu byl nový a efektivní 7nm výrobní proces firmy TSMC. Nejzásadnějším vylepšením bylo vyčlenění I/O funkcí na samostatný čiplet, který byl vyráběn 14nm (nebo i 12nm) výrobním procesem firmy GlobalFoundries. Výhodou vyčlenění těchto funkcí byl snazší binning, ale i levnější výroba procesorů. I/O funkce totiž netěží ze zmenšení tranzistorů tolik jako výkonné funkce jader, a proto mohou být vyráběny na starším a levnějším výrobním procesu jiné firmy. (42) (43)

Spotřebitelské procesory AMD se dále skládaly až ze dvou modulů nově nazvaných jako „CCD“, které opět každé obsahovalo dvě čtyřjádrové CCX. Celkem tedy tato architektura obsahovala až 16 jader v běžných spotřebitelských procesorech a až 64

jader v serverových procesorech. Každé toto jádro navíc podporovalo SMT a počet maximálně zároveň zpracovávaných vláken jedním procesorem se tedy dostal až na neuvěřitelných 128. Tomuto strmému nárůstu nebyla firma Intel schopna čelit a jejich maximální počet jader tvořil pouze 10 jader se SMT ve spotřebitelských a 28 jader se SMT v serverových procesorech. (44)

Nová jádra architektury Zen2 byla rovněž velmi rychlá a dosahovala stejné úrovně výkonu na jádro jako mikroprocesory firmy Intel. (45)



**Obr. 24 Diagram MCM architektury Zen2**

Zdroj: <https://www.svethardware.cz/nove-verze-biosu-odhalily-dalsi-moznosti-taktovani-a-nastaveni-procesoru-ryzen-3000/48970/img/O8bTJO1bP4b3wUZc.jpg>

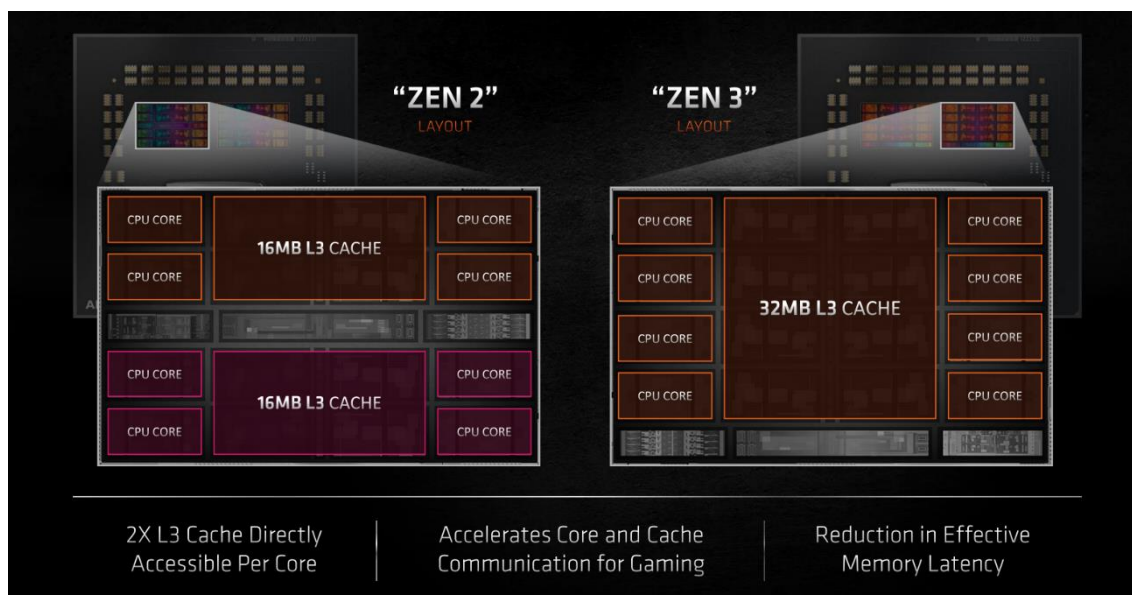
### 5.11.3 Zen3

Zen 3 představuje k dnešku nejnovější architekturu firmy AMD, a zatímco generace Zen2 dorovnala Intel v jednojádrovém výkonu, tak Zen3 už procesory Intel rovnou překonává.

Architektura Zen3 je vyráběna na vylepšeném výrobním procesu firmy TSMC nazvaném 7nm+ s využitím firmy Global Foundries pro výrobu I/O čipletů.

Zen3 představuje podle AMD kompletní redesign architektury Zen/Zen2. Pozornost je zaměřena na optimalizaci fungování každé jednotlivé části procesoru. Nejvíce

viditelnou změnou je struktura CCD, které se už nově neskládá ze dvou modulů CCX, ale pouze z jednoho osmijádrového, kde mají všechna jádra přístup k plným 32 MB cache L3. (46)



**Obr. 25 Struktura CCD v Zen2 a Zen3**

Zdroj: <https://hexus.net/media/uploaded/2020/10/6a6c0bc3-37d6-49ef-822c-cb82cdc125c1.PNG>

## 6 Možný budoucí vývoj

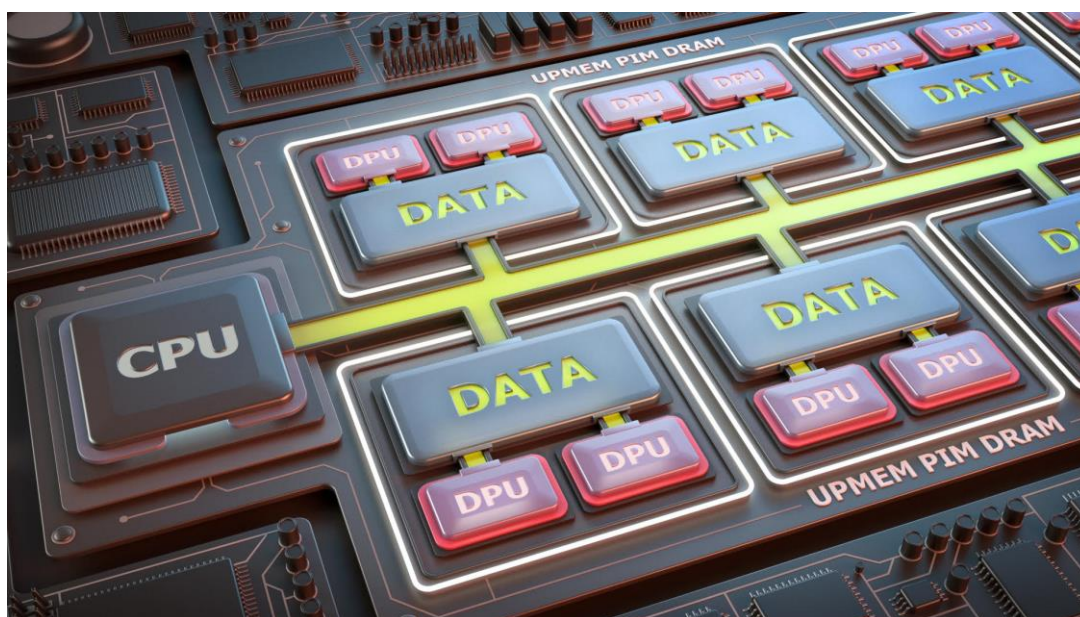
### 6.1 Processing In Memory (PIM)

Von Neumannovo schéma, ze kterého dnešní počítače vychází je charakteristické tím, že výpočetní jednotka je oddělena od dat, se kterými pracuje. Díky tomu je nutné, aby data určená k výpočtu byla nejprve přenesena z paměti do procesoru a po samotném provedení operace je nutné výsledek přenést zpět do paměti.

K eliminaci tohoto úzká hrdla počítače postupně začaly využívat paměť cache. Ta má ale vždy pouze omezenou kapacitu a vyžaduje poměrně složitý management od procesoru.

Myšlenka PIM (Processing In Memory) má v plánu vylepšit tradiční způsob provádění výpočtů pomocí jednotek DPU (Data Processing Unit), které mají být umístěny přímo v samotné paměti. Úkolem těchto jednotek je provádět jednodušší výpočty bez nutnosti přesunu dat, čímž dojde ke zvýšení výkonu a ke snížení energie, která by byla jinak vyplývána na „zbytečný“ přesun dat tam a zpět.

Paměti s technologií PIM jsou prozatím určeny k experimentálnímu použití v serverech pro výpočty v umělé inteligenci a BIG DATA. Pokud se ale tento koncept osvědčí, pak je možné, že by se v budoucnosti mohl objevit i v běžných spotřebitelských počítačích. (47)



**Obr. 26 UPMEM PIM DRAM**

Zdroj: <https://supernovainvest.com/wp-content/uploads/2018/02/upmem.jpg>

## **6.2 ARM: Nástupce x86?**

Zkratka ARM představuje rodinu procesorů založených na filozofii RISC, která je vyvíjena stejnojmennou firmou sídlící ve Velké Británii. Zásadním rozdílem mezi Intellem/AMD a firmou ARM je kromě základní filozofie návrhu procesoru i to, že firma ARM své procesory neprodává ani nevyrábí. Cílem firmy ARM je navrhnout architekturu a na ní pak prodávat licence jiným firmám, které si výsledný produkt plně přizpůsobí pro své vlastní použití.

Právě kvůli těmto svým nejzákladnějším rysům je mikroprocesorová architektura ARM velmi oblíbenou a nyní začíná pronikat i do sektoru tradičně ovládaného architekturou x86. Skutečnost, že se jedná o čistě RISCovou architekturu, dělá tyto procesory velmi energeticky efektivními. Licenční business model dává firmám velkou flexibilitu, co se týče použití procesorů. Koncová firma si může procesor nakonfigurovat, tak aby byl přesně vhodný pro zařízení, které firma chce prodávat. U tradičních výrobců byl namísto toho nejdříve vyvinut procesor s ohledem na potenciální zařízení, ve kterém by mohl být, a až potom je okolo toho procesoru ono zařízení vyrobeno. Největší nevýhodou architektury ARM je prozatím její nekompatibilita s programy psanými pro x86. (48)

Zatím zdaleka největší ranou pro tradiční architektury v souboji s ARMem bylo ohlášení firmy Apple ohledně přechodu svých produktů od platformy Intel k platformě ARM. Architektury ARM ale pronikají do světa x86 i jinak. V roce 2018 zprovoznila firma Amazon své první servery na bázi ARM a plány na vytvoření vlastního procesoru této architektury ohlásila i firma Microsoft, která už několik let pracuje na verzi operačního systému Windows pro ARM. (49)

První výsledky výrobků s procesory Apple Silicon, které jsou na architekturu ARM postaveny, přitom vypadají velmi dobře, a to včetně emulace x86 přes emulátor, který firma Apple nazvala „Rosetta2“. Nejlepších výsledků ale architektura ARM dosahuje bez emulace, a proto se jedná pouze o přechodné řešení, než bude k dispozici dostatek aplikací, které byly nativně vyvinuty pro ARM. (50)

Byla by ale chyba nad procesory ARM přemýšlet pouze v kontextu architektur desktopových počítačů, laptopů a serverů. Mikroprocesory založené na architektuře

ARM už dnes naprosto dominují v běžné spotřební elektronice (pevné disky, mobilní telefony, bezdrátové routery, ledničky atd.)

### **6.3 RISC-V**

RISC-V představuje novou architekturu založenou na filozofii RISC a realizovanou jako open source projekt. Tím tato architektura přináší teoreticky ještě větší flexibilitu než ARM. V nedávných testech navíc RISC-V údajně dosáhl efektivity, která daleko převyšuje i architekturu ARM. (51)

V blízké době je tedy možné, že procesory založené na architektuře RISC-V začnou pronikat do segmentů, kde je dlouhodobě lídrem ARM. Takovýto průnik do segmentů nejdrobnější elektroniky a kontrolérů by ale mohl znamenat, že postupně bude tato architektura vstupovat i do jiných segmentů a podobně jako ARM může v daleké budoucnosti teoreticky vstoupit i do běžných počítačů.

### **6.4 Miničiplety**

Firma AMD dokázala, že za pomoci strategie MCM, lze vytvářet velmi výkonné procesory za velmi přijatelné ceny. Zdá se tedy, že aby Intel mohl být opět konkurenceschopný, tak se bude muset vydat podobnou cestou a strategii MCM také adoptovat.

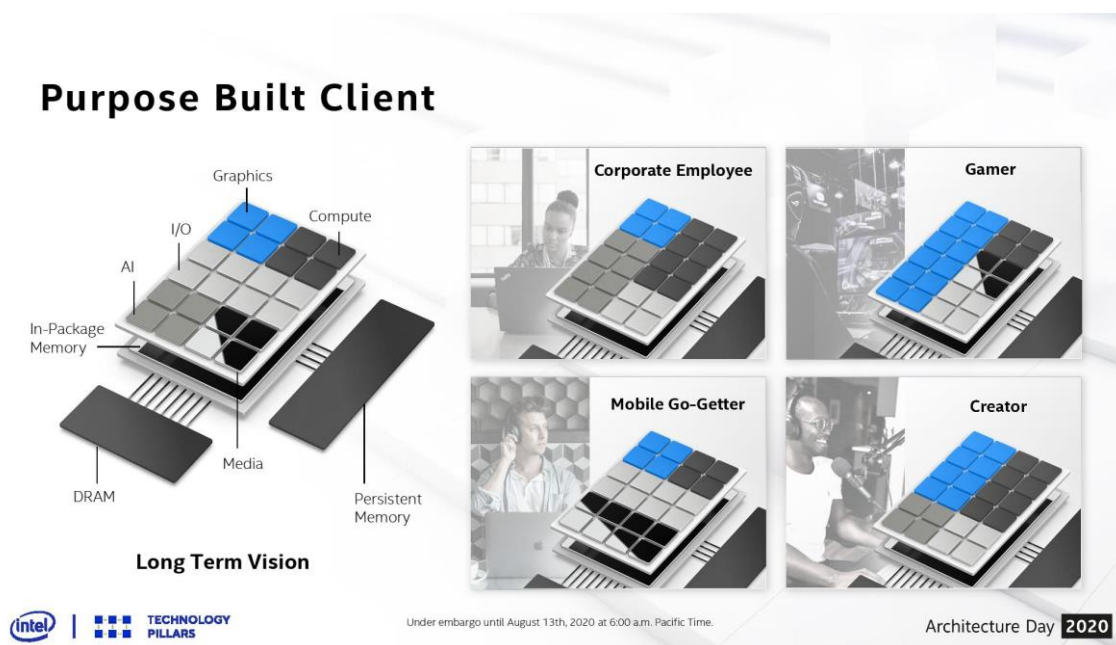
První oznámení, které něco podobného naznačuje učinil Intel v roce 2020 během svého každoročního představení zvaném Intel architecture days. Během této události firma porovnal tři možné cesty dalšího vývoje mikroprocesorů a monolitické řešení z něj vyšlo z daleka nejhůře. Takové řešení je totiž nejdražší, protože spotřebovává nejvíce času na vývoj a verifikaci. Při výrobě se také v celém čipu nachází nejvíce chyb a opakované použití celého čipu není možné.

Jako nejlepší označila firma Intel naopak nové řešení spočívající ve velkém množství malých čipletů, ze kterých bude poté možné „složit“ celý procesor přesně na míru plánovanému použití.

Firma ale už nezodpověděla, jak plánuje vyřešit problémy, které by takové řešení bez pochyby muselo adresovat. Každý čiplet například musí mít rozhraní pro komunikaci s ostatními. U větších čipletů se nejedná o problém a toto rozhraní

zabírá jednotky procent plochy, ale u miničipletů by toto rozhraní v poměru k celku mohlo zabírat i desítky procent.

Dalším z problémů je, že v představách Intelu je na miničiplety rozdělena i grafická jednotka. Datové toky v GPU jsou ale podstatně větší, než v CPU. Třetím problémem je pak latence z důvodu komunikace velkého množství čipletů a energetická efektivita takového řešení. Na Komunikaci mezi čiplety může být zkonsumováno velké množství energie a tím méně energie zbude na samotná jádra. (52)

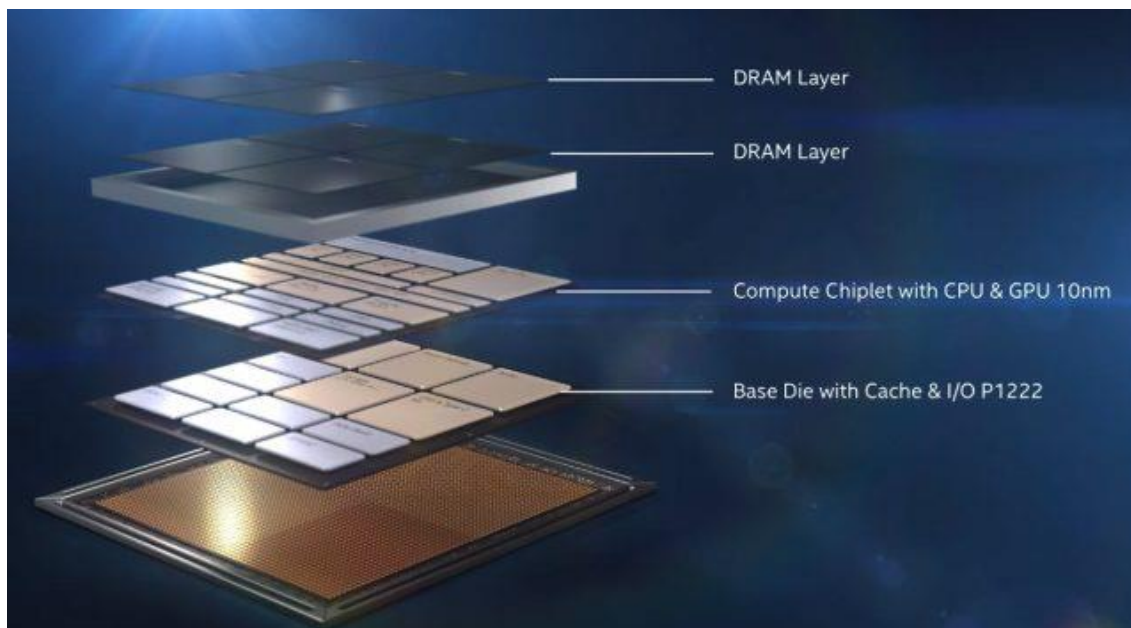


**Obr. 27 Potenciální budoucí architektura Intelu využívající miničiplety**  
Zdroj: (52)

## **6.5 3D Vrstvení čipů a hybridní procesory**

Během Intel architecture days 2018 byla představena technologie vrstvení procesorů x86 nazvaná jako Foveros. Tento koncept má Intelu pomoci vytvořit malé SoC, které by bylo velmi energeticky efektivní a dokázalo by tak konkurovat SoC na architektuře ARM. K dosažení velké energetické efektivity firma Intel využívá kombinace úsporných a výkonných jader v jednom pouzdře. Tomuto konceptu Intel říká „Hybridní procesor“ a jedná se v podstatě o adaptaci technologie big.LITTLE, kterou mikroprocesory ARM používají už dlouho.

První generace vzniklá na tomto konceptu byla již vydána a nese jméno LakeField. (53)



**Obr. 28 Intel LakeField**

Zdroj: <https://www.extremetech.com/wp-content/uploads/2020/06/Foveros-Lakefield-Feature-2-640x353.jpg>

## **6.6 Další zmenšování tranzistorů a potenciální náhrada křemíku**

Nárůst výkonů byl v minulosti z velké části způsoben průběžným zmenšováním tranzistorů a zdokonalováním výrobních procesů.

Dostáváme se ale už do bodu, kde vzdálenost mezi source a drain u nejmodernějších výrobních procesů jsou pouhých několik desítek křemíkových atomů. A při těchto vzdálenostech začíná být značný problém s jevem zvaným kvantové tunelování, kdy už řídicí elektroda gate není nadále schopna spolehlivě bránit přechodu elektronů ze source do drain. Nabízí se tedy otázka, zda nebude křemík v blízké budoucnosti nahrazen jiným materiálem. Favoritem je zejména grafen a specifitěji uhlíkové nanotrubičky. (54)

Podle Forrest Norroda z AMD, ale během této dekády nelze nástupce křemíku očekávat a delší budoucnost je „značně mlhavá“. (55)



## 7 Porovnávání dnešních procesorových řad

Přehled současně prodávaných procesorů lze snadno získat v libovolném internetovém obchodě nebo i na stránkách výrobců procesorů.

Z přehledů by se dalo například vyvodit, že současně prodávané procesory firmy AMD nabízí větší počet jader, větší množství cache paměti, a to většinou za menší cenu. Jejich nevýhodou je však relativně menší frekvence, na které operují.

Přehled jako takový bohužel nabízí pouze omezenou užitečnost. Není z něj například vůbec zřejmé, jaký je výkon daných procesorů v různých aplikacích. Snadno lze například určit to, že hodnota L3 cache u Intelu a AMD neznamenaá to samé, protože procesory AMD jsou rozděleny do více spolupracujících modulů, které spolu často nesdílejí celou paměť L3, a to se určitě negativně projeví na výkonu.

Tabulky rovněž ukazují frekvence procesorů. Vůbec ale není vidět, jak se tato frekvence mění v čase ani to, jak se na frekvenci projeví okolní teplota, použitá základní deska či počet jader, která jsou najednou zatěžována. Víme pouze frekvenci při zatížení jedním vláknem a frekvenci při plném zatížení procesoru. Frekvence ale není přímo porovnatelná, protože procesory různé architektury typicky dokážou zpracovat při stejné práci rozdílný průměrný počet instrukcí na jeden výpočetní cyklus.

Dalším problémem je, že není vůbec jasné, jakým způsobem byla výrobcem vypočítána hodnota navrženého tepelného výkonu a jak se to promítne do příkonu, který bude daný procesor vyžadovat.

Toto je pouze výběr z problémů, které nastávají při přímém porovnávání procesorů dle jejich specifikací. Některé z těchto problémů jsou adresovatelné rozšířením tabulek o další parametry. Tabulky poté ale zásadně ztrácí na přehlednosti a stále z nich není možné určit řadu charakteristik, a to zejména výkon procesorů v různých aplikacích.

Z těchto důvodů je pro porovnání jednotlivých procesorů důležité jejich podrobení různým výkonnostním testům, které jsou specificky navrženy tak, aby otestovaly jejich výkon při široké škále různých použití.

Tento proces testování výkonu procesorů přitom může být velmi složitý z důvodu velké komplexnosti chování moderních procesorů a nutnosti kontroly velkého

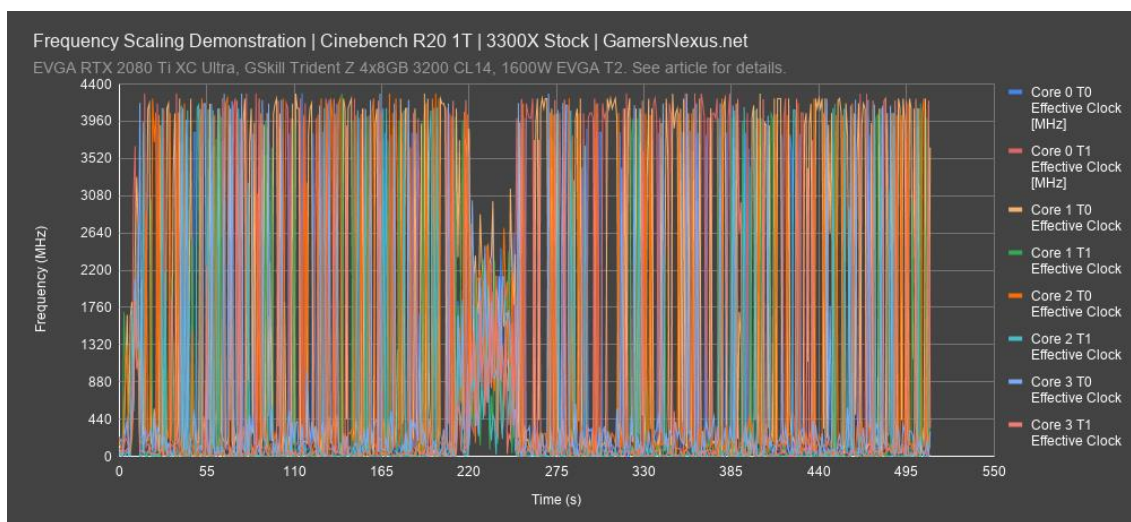
množství proměnných (okolní teplota, správný tlak chladiče, minimalizace rozdílu mezi tepelnou vodivostí jednotlivých tub teplovodivých past a následné správné nanesení dané pasty, minimalizace vlivu procesů operačního systému na pozadí, atd). Redakce Gamers Nexus například pro své recenze testuje procesory přísnou metodikou, při které je vygenerováno až 30 obrázků grafů, které musí být dále správně interpretovány.

## 7.1 Přehled vybraných dílčích testů redakce Gamers Nexus

### 7.1.1 Škálování frekvence v aplikaci Cinebench

Úkolem tohoto testu je ověřit, jak se daný procesor chová při zpracovávání jednovláknové úlohy a zjistit, zda daný procesor dosahuje frekvence, kterou výrobce propagoval.

Testovaný mikroprocesor R3 3300X se na obrázku chová přesně dle předpokladů. Jádra procesoru se při vykonávání úlohy střídají a dochází k postupnému využití plného boostu 4,3 Ghz na každém jádře. Pokles frekvence uprostřed grafu je v pořádku, protože je zapříčiněn ukončením prvního průchodu a následným začátkem následujícího průchodu samotným testem.



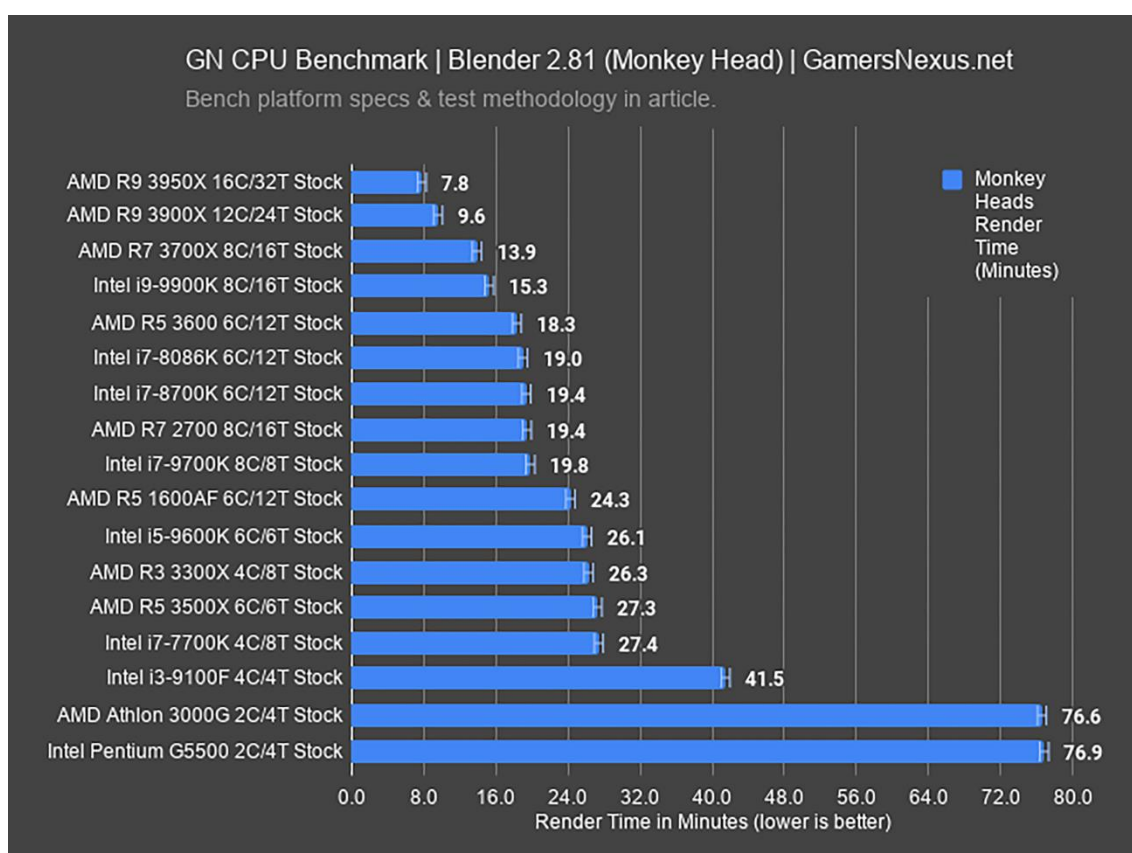
**Obr. 29 Graf škálování frekvence v aplikaci Cinebench**

Zdroj: (56)

## 7.1.2 Blender benchmark

Další skupina testů se zaměřuje na simulaci reálného použití procesoru při práci v programech využívajících velké množství vláken zároveň. Typicky se jedná o kompresi, renderování nebo podobnou dobře paralelizovatelnou úlohu.

Z testu na obrázku je patrné, že v těchto úlohách vedou procesory s větším počtem jader a je zde i vidět vliv mezigeneračních změn procesorů. Například procesor Ryzen 7 2700 disponuje osmi jádry se SMT. I přes to je však poražen mladším Ryzenem 5 3600, který má jader pouze šest. Tato jádra jsou však kvůli mezigeneračním vylepšením výkonnější.



Obr. 30 Graf výsledků v Blender benchmark

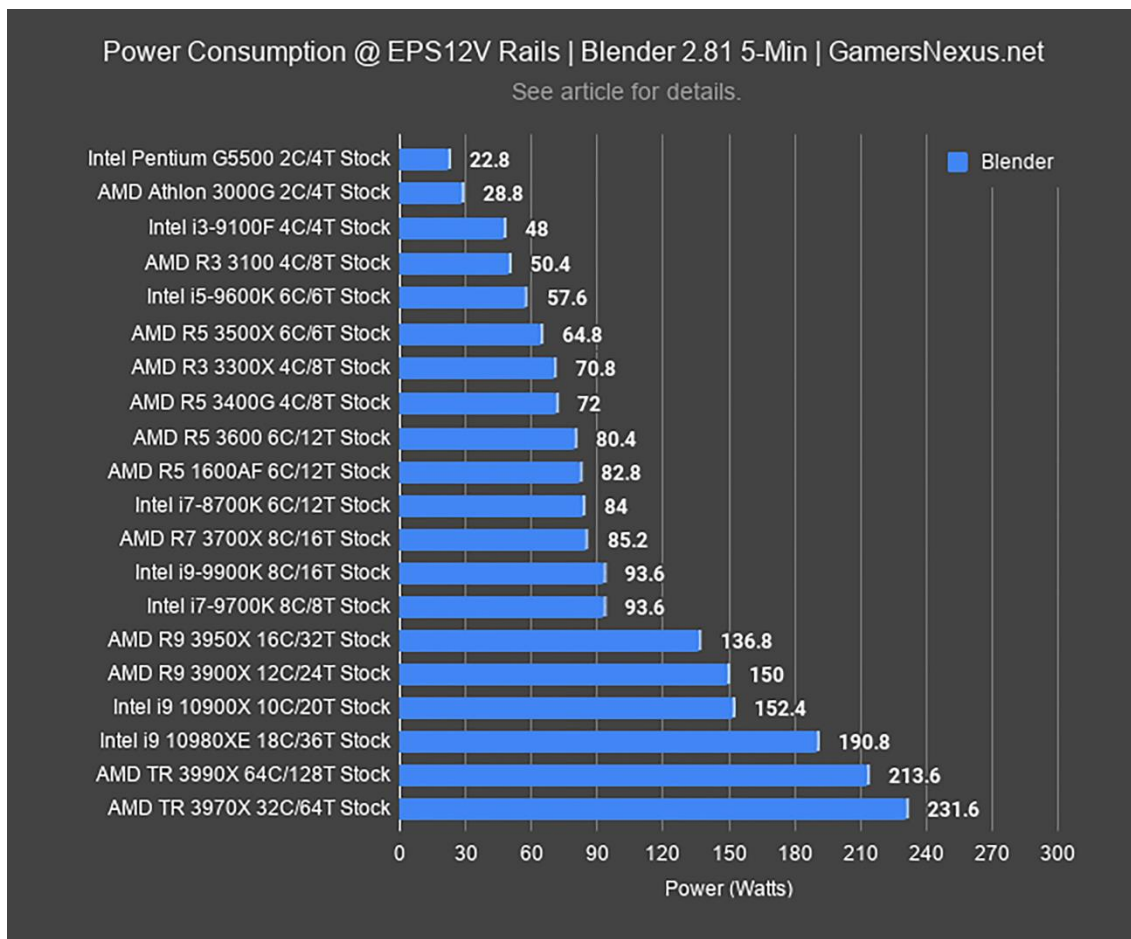
Zdroj: (56), upraveno

## 7.1.3 Testování spotřeby energie

Při měření výkonu v aplikacích je dále důležité zohlednit spotřebu energie daných procesorů.

Redakce Gamers Nexus k tomu využívá speciálně navržený benchmark v Blenderu, při kterém jsou zatížena všechna jádra a po 5 minutách jsou výsledky zalogovány.

Na tomto testu je vidět, že i když vícejádrové procesory často zvládají testy v aplikacích typu Blender lépe než ostatní, tak nevýhodu je většinou vyšší spotřeba energie během těchto testů.



**Obr. 31 Graf testování spotřeby energie**  
Zdroj: (56), upraveno

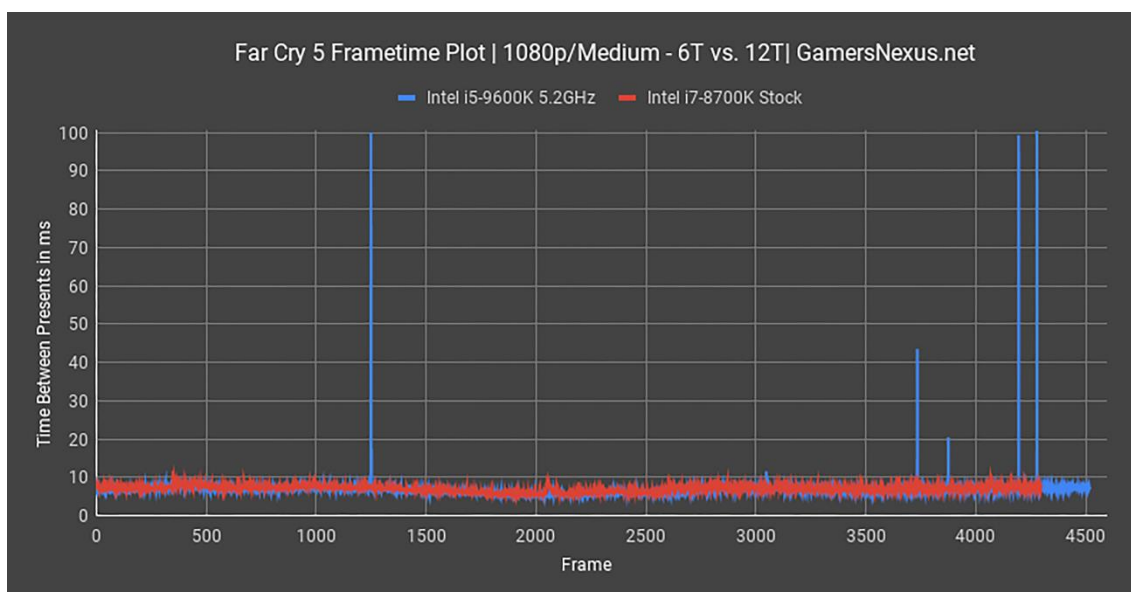
#### 7.1.4 Testy výkonu v počítačových hrách

Další rozsáhlou částí testů je využití daných procesorů v různých počítačových hrách. Tyto testy jsou obzvláště obtížné, protože každá hra je unikátní a procesor, který se může v jednom testu ukázat jako nejlepší, může v jiné hře být i podprůměrný. Jediným způsobem, jak tuto variaci eliminovat je testování procesorů ve velkém množství rozdílných pečlivě vybraných her, tak aby každá z nich reprezentovala určitou skupinu her, které využívají procesor podobným způsobem.

Na obrázku je graf, který zobrazuje, jak dlouho trvá testovaným procesorům vykreslit snímky dané hry. Pokud by například byla hra vykreslována přesně šedesáti snímky za sekundu, pak by graf vypadal jako rovná čára v 16,6ms. Počítače ale bohužel nejsou bez použití speciálních technik většinou schopné vykreslovat snímky s přesně stejně velkými časy mezi nimi, a proto grafy na obrázku jsou rozkmitané.

Pro co největší plynulost hry je důležité, aby graf dosahoval co nejmenších časů vykreslování snímků (co nejvíce snímků za sekundu), ale zároveň i aby během vykreslování nedocházelo k velkým rozdílům mezi časy nutnými k vykreslení snímků. Takováto situace by se během hry jevila jako záseky.

Z obrázku je patrné, že mikroprocesor i7 8700K ve hře Far Cry 5 dosahuje lepšího výkonu než novější i5 9600K, protože u něj nedochází k zásekům, které se v grafu projevují špičkami. Pokud by byl využit jednoduchý sloupcový graf, tak by tyto extrémy byly zprůměrovány a procesory by se jevily jako identické výkonem.



**Obr. 32 Graf konzistence vykreslování snímků hry**

Zdroj: <https://www.gamersnexus.net/hwreviews/3407-intel-i5-9600k-cpu-review-vs-2700-2600-8700k> (upraveno)

### 7.1.5 Sloupcový graf snímků za sekundu

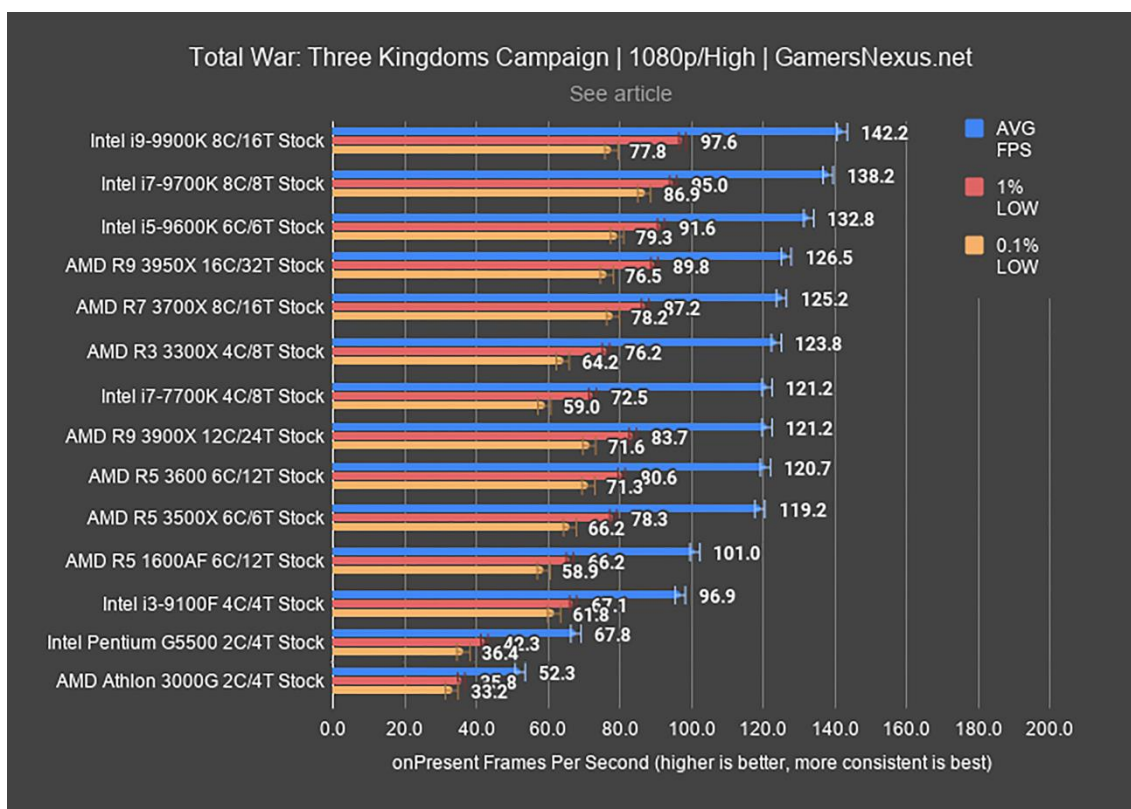
Alternativním zobrazením plynulosti hry je běžný sloupcový graf snímků za sekundu. U tohoto grafu ale existuje riziko, že velké výkyvy ve vykreslování snímků

nebudou zřetelné. Z toho důvodu přiřazuje redakce ke každému procesoru přesně 3 sloupce, kde první zobrazuje hodnotu FPS a další ukazují přepočítané hodnoty 1% a 0,1% nejpomalejších snímků.

Příkladem mohou být procesory R9 3900X a i7 7700K, které na obrázku dosahují totožného výkonu ve snímcích za sekundu. Pokud se však zaměříme na porovnání horizontálních sloupců 1% LOW a 0,1% LOW, tak můžeme vidět, že procesor R9 3900X ve hře Total War: Three Kingdoms dosahuje větší konzistence vykreslování snímků a může tedy být považován za lepší.

Důležité je ale pochopit, že i když se tento vylepšený sloupcový graf snaží znázornit konzistenci časů vykreslovaných snímků, tak je graf stále zatížen průměrováním a málo časté výkyvy v něm mohou být hůře viditelné.

Nejlepším znázorněním plynulosti her je tedy graf konzistence vykreslování snímků. Sloupcový graf je však vhodné použít kvůli jeho jednoduchosti a intuitivní pochopitelnosti.



**Obr. 33 Sloupcový graf snímků za sekundu**

Zdroj: (56), upraveno

### **7.1.6 Ostatní testy**

Ostatní testy zahrnují graf frekvence procesoru při plném zatížení všech jader. Účelem je zjistit, jak se vyvíjí frekvence procesoru v čase a zmapovat využití boostu procesoru a čas, po který je schopen procesor boost udržet. Poslední důležitou částí testů je graf teploty procesoru, který je vykreslený v čase.

Z těchto testů je poté nutné vytvořit závěr a všechna data dát do souvislosti. Zejména důležité je brát ohled na pravděpodobné využití daného procesoru a jeho cenu. Dle toho pak redakce vydává svá doporučení.

## 8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo především přiblížit čtenáři interní fungování moderních mikroprocesorů. K naplnění tohoto cíle byla využita kapitola základní pojmy a na tuto kapitolu bylo poté navázáno v historickém přehledu vývoje procesorů obou hlavních firem, které se návrhem a výrobou mikroprocesorů pro PC zabývají. Z přehledu byly záměrně vynechány málo významné procesory a příliš podrobné specifikace.

Důvodem zahrnutí historického přehledu byla hlavně možnost jeho čtivého zpracování, při kterém jsou postupně představovány problémy a následná řešení mnoha problémů, kterým museli vědci a hardwaroví inženýři v minulosti čelit. I přes to, že mnoho procesorů představených v této práci lze považovat za zastaralé, tak jejich začlenění do práce není zbytečné. Dnešní nejmodernější procesory obsahují stejné části a využívají stejné koncepty jako procesory starší (i když jsou tyto koncepty možná zdokonaleny). Díky vzájemné zpětné kompatibilitě procesorů rodiny x86 je dokonce nutné, aby nové procesory byly podobné těm starším, protože jinak by na nejmodernějších procesorech nebylo možné spustit programy psané pro procesory starší.

Znalosti, které čtenář získá z této práce mohou být dále využity i mimo procesory této konkrétní rodiny. V práci je například představena i rodina mikroprocesorů ARM, která je v současnosti velmi rozšířená a mimo některé zásadní rozdíly je její interní fungování velmi podobné a je využito stejných konceptů.

V další části práce je poté představeno několik možností budoucího vývoje mikroprocesorů a na tuto část je navázáno kapitolou, která se zaměřuje problematikou srovnávání procesorů mezi sebou. V této kapitole je popsáno několik důvodů proč pouhé specifikace k samotnému porovnání nestačí a v následující podkapitole je uveden přehled toho, jak lze interpretovat výsledky některých často využívaných testů výkonu procesorů. Pro toto vysvětlení je využito představení vybraných konkrétních postupů redakce Gamers Nexus. Podobné testy však využívají i jiné redakce zabývající se stejnou problematikou, a proto je důležité vědět, jak tyto testy interpretovat.



## 9 Seznam použité literatury

1. **Pelikán, Jaroslav.** Von Neumannovo schéma. *Fakulta Informatiky*. [Online] Masarykova Univerzita, Prosinec. 3 1999. [Citace: 23. Únor 2021.] <https://www.fi.muni.cz/usr/pelikan/ARCHIT/TEXTY/VNEUM.HTML>.
2. **Tišnovský, Pavel.** Jak pracuje počítač? . *Root.cz*. [Online] Internet Info, s.r.o., 27. Únor 2008. [Citace: 23. Únor 2021.] <https://www.root.cz/clanky/jak-pracuje-pocitac/#k03>.
3. **Pelikán, Jaroslav.** Procesor (mikroprocesor). *Fakulta Informatiky*. [Online] Masarykova Univerzita, 3. Prosinec 1999. [Citace: 19. Únor 2021.] <https://www.fi.muni.cz/usr/pelikan/ARCHIT/TEXTY/PARPROC.HTML#PRENOS>.
4. **Wallossek, Igor.** Run a current Ryzen without an AMD chipset? That would work too! What's behind the Knoll Activator. *igorsLAB*. [Online] 13. Červen 2020. [Citace: 20. Únor 2021.] <https://www.igorslab.de/en/a-ryzen-without-one-chip-set-operates-without-whats-behind-the-knoll-activator/>.
5. **YADIN, Aharon.** *Computer systems architecture*. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 978-1-4822-3105-2.
6. **Wagner , Jayce.** Intel Confirms It's Releasing its Own Gaming GPU in 2020. *Digital Trends*. [Online] Designtechnica Corporation, 12. Červen 2018. [Citace: 13. Červen 2020.] <https://www.digitaltrends.com/computing/intel-gaming-gpu/>.
7. **Noska, Martin.** Intel 4004 – jak vypadal první mikroprocesor? | Computerworld.cz. *Computerworld.cz*. [Online] Internet Info DG, a.s., 17. Listopad 2011. [Citace: 13. Červen 2020.] <https://computerworld.cz/hardware/intel-4004-jak-vypadal-prvni-mikroprocesor-44139>.
8. **Sexton , Michael Justin Allen.** The History Of Intel CPUs: Updated! *Tom's Hardware*. [Online] Future US, Inc., 08. Září 2018. [Citace: 13. Červen 2020.] <https://www.tomshardware.com/picturestory/710-history-of-intel-cpus.html>.
9. **Edwards, Benj.** Birth of a standard: The Intel 8086 microprocessor. *PCWorld*. [Online] IDG Communications, Inc., 8. Červen 2018. [Citace: 13. Červen 2020.] <https://www.pcworld.com/article/146957/article.html>.

10. **Pelikán, Jaroslav.** Procesory INTEL 80x86. *Fakulta Informatiky*. [Online] Masarykova Univerzita, Prosinec. 3 1999. [Citace: 13. Červen 2020.] <https://www.fi.muni.cz/usr/pelikan/ARCHIT/TEXTY/I80X86.HTML>.
11. **Shvets, Gennadiy.** Intel 80386 processor family. *CPU-World*. [Online] 1. Duben 2020. [Citace: 17. Červen 2020.] <http://www.cpu-world.com/CPUs/80386/index.html>.
12. **Tanenbaum, Andrew S. a Austin, Todd.** *Structured computer organization. 6th ed.* Boston : Pearson, 2013. ISBN 0132916525.
13. **Tišnovský, Pavel.** Vektorové procesory aneb další pokus o zvýšení výpočetního výkonu počítačů. *ROOT.CZ*. [Online] Internet Info, s.r.o., 25. Srpen 2011. [Citace: 16. Červen 2020.] <https://www.root.cz/clanky/vektorove-procesory-aneb-dalsi-pokus-o-zvyseni-vypocetniho-vykonu-pocitacu/>. ISSN 1212-8309.
14. **Pavelka, Emil.** Pentium 4 - co dodat ? *Svět Hardware*. [Online] oXy Online s.r.o, 24. Srpen 2000. [Citace: 18. Červen 2020.] <https://www.svethardware.cz/pentium-4-co-dodat/2841>. ISSN 1213-0818.
15. **Vítek, Jan.** Série 9700 je labutí píseň procesorů Intel Itanium. *Svět Hardware*. [Online] oXy Online s.r.o., 12. Květen 2017. [Citace: 12. Listopad 2020.] <https://www.svethardware.cz/serie-9700-je-labuti-pisen-procesoru-intel-itanium/44416>. ISSN 1213-0818.
16. **Hartung, Roman.** HW-Legends #10: The biggest FAIL in Intel Company History? But one of the MOST BEAUTIFUL CPUs ever. *Youtube video*. [Online] 31. Květen 2020. [Citace: 12. Listopad 2020.] <https://www.youtube.com/watch?v=NTxXTbOHG7Q>.
17. **Intel Corporation.** Intel. *Intel Unveils World's Best Processor*. [Online] Intel Corporation, 27. Červenec 2006. [Citace: 15. Červen 2020.] <https://web.archive.org/web/20070403081121/http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/20060727comp.htm?cid=rss-83642-c1-135841>.
18. **Šurkala, Milan .** Intel Core 2 Duo slaví 10. narozeniny. *Svět hardware*. [Online] oXy Online s.r.o., 28. Červenec 2016. [Citace: 18. Červen 2020.] <https://www.svethardware.cz/intel-core-2-duo-slavi-10-narozeniny/42795>. ISSN 1213-0818.

19. **Matuška , Petr.** Cool Quiet vs. SpeedStep. Přehled konkurenčních technologií šetřící energii u stolních procesorů AMD a Intel(CD) . *PCWorld*. [Online] 2005. Květen 1. [Citace: 15. Červen 2020.] <https://pcworld.cz/hardware/cool-quiet-vs-speedstep-prehled-konkurencnich-technologii-setrici-energii-u-stolnich-procesoru-amd-a-intel-cd-12525>.
20. **Techquickle.** Binning As Fast As Possible. *Youtube video*. [Online] Linus Media Group, 5. Březen 2016. [Citace: 13. Listopad 2020.] <https://www.youtube.com/watch?v=8AQPIBfIqMk>.
21. **Kowaliski, Cyril.** Intel 'upgrade card' unlocks disabled CPU features. *Tech Report*. [Online] Tech Report, 20. Zář 2010. [Citace: 21. Únor 2021.] <https://techreport.com/news/19664/intel-upgrade-card-unlocks-disabled-cpu-features/>.
22. **Shimpi, Anand Lal a Gary Key.** The Dark Knight: Intel's Core i7. *AnandTech*. [Online] 3. Listopad 2008. [Citace: 16. Ř 2020.] <https://www.anandtech.com/show/2658>.
23. **WIFT, "WIFT"**. Turbo Boost podrobněji. *DIIT.CZ*. [Online] CDR server s.r.o., 13. Listopad 2008. [Citace: 16. Ř 2020.] <https://diit.cz/clanek/turbo-boost-podrobneji>. ISSN 1804-5405.
24. **Štefek, Petr.** Intel Sandy Bridge: sametová evoluce. *Svět Hardware*. [Online] oXy Online s.r.o, 29. Zář 2010. [Citace: 17. Ř 2020.] <https://www.svethardware.cz/recenze-intel-sandy-bridge-sametova-evoluce/30767>. ISSN 1213-0818.
25. **Vítek, Jan.** Intel Skylake: test nových Core i7 a Core i5. *Svět Hardware*. [Online] oXy Online s.r.o, 26. Srpen 2015. [Citace: 17. Ř 2020.] <https://www.svethardware.cz/recenze-intel-skylake-test-novych-core-i7-a-core-i5/40964>. ISSN 1213-0818.
26. **Wan, Samuel** . Intel Ditches 'Tick-Tock' for 'Process-Architecture-Optimization'. *eTeknix*. [Online] eTeknix® Limited, 23. Březen 2016. [Citace: 19. Ř 2020.] <https://www.eteknix.com/intel-ditches-tick-tock-for-process-architecture-optimization/>.
27. **Obermaier, Z.** Limitovaná edice Core i7-8086K s taktem až 5,0 GHz v testu. *pctuning*. [Online] EMPRESA MEDIA, a.s, 25. Červen 2018. [Citace: 20. Ř 2020.]

<https://pctuning.tyden.cz/hardware/procesory-pameti/52245-limitovana-edice-core-i7-8086k-s-taktem-az-5-0-ghz-v-testu?start=1>. ISSN 1214-0201.

28. **Alcorn, Paul** . Hyper-Threading Coming to Intel's Comet Lake Core i5 and i3 Lineup: Benchmark Submission (Updated). *Tom's Hardware*. [Online] Future US, Inc, 22. Říjen 2019. [Citace: 21. Únor 2021.] <https://www.tomshardware.com/news/hyper-threading-coming-to-intels-comet-lake-core-i3-lineup-benchmark-submission>.

29. **Tišňovský, Pavel**. Procesor sestavený z čipů AMD Am2900 - předchůdce skutečných DSP. *Root.cz*. [Online] Internet Info, 12. Duben 2011. [Citace: 16. Listopad 2020.] <https://www.root.cz/clanky/procesor-sestaveny-z-cipu-amd-am2900-predchudce-skutecnych-dsp/#k03>. ISSN 1212-8309.

30. **Evanson , Nick a Singer, Graham**. The Rise, Fall and Revival of AMD. *techspot.com*. [Online] TechSpot, Inc, 2020. Červen 29. [Citace: 16. Listopad 2020.] <https://www.techspot.com/article/2043-amd-rise-fall-revival-history/>.

31. **Sexton, Michael Justin Allen** . The History Of AMD CPUs. *tomshardware.com*. [Online] Future US, Inc., 21. Duben 2017. [Citace: 16. Listopad 2020.] <https://www.tomshardware.com/picturestory/713-amd-cpu-history.html>.

32. **Klabazňa, Petr**. Athlon XP Rating, co si jej vypočítat? *Svět Hardware*. [Online] oXy Online s.r.o., 12. Listopad 2001. [Citace: 18. Listopad 2020.] <https://www.svethardware.cz/athlon-xp-rating-co-si-jej-vypocitat/4949>. ISSN 1213-0818.

33. **Advanced Micro Devices, Inc.** x86-64™ Technology White Paper. *Datasheet Catalog*. [Online] [Citace: 16. Leden 2021.] [pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/AdvancedMicroDevices/mXyyzxsy.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/AdvancedMicroDevices/mXyyzxsy.pdf).

34. —. APU 101:All about AMD FusionAccelerated Processing Units. *amd.com*. [Online] 2001. [Citace: 16. Leden 2021.] <http://developer.amd.com/wordpress/media/2012/10/apu101.pdf>.

35. **WIFT "WIFT"**. AMD prý díky Fusion APU zvýší svůj podíl na trhu, říkají taiwanští výrobci. *DIIT.CZ*. [Online] 23. Prosinec 2010. [Citace: 17. Leden 2021.] <https://diit.cz/clanek/amd-pry-diky-fusion-apu-zvysi-svuj-podil-na-trhu-rikaji-taiwansti-vyrobci>. ISSN 1804-5405.

36. **Burke, Steve.** AMD's "Future-Proof" FX-8370 in 2020 (CPU Benchmarks, Overclocking, & Revisit). *Youtube video*. [Online] Gamers Nexus, 3. Srpen 2020. [Citace: 17. Leden 2021.] [https://www.youtube.com/watch?v=c\\_Gcg-tFfu0](https://www.youtube.com/watch?v=c_Gcg-tFfu0).
37. **Mandau, Markus.** BULLDOZER - Nové CPU od AMD. *CHIP*. [Online] Burda International CZ s.r.o. [Citace: 18. Leden 2021.] <https://www.chip.cz/casopis-chip/earchiv/rubriky/technika/buldozer/>. ISSN 1210-0684.
38. **Pimentel, Benjamin.** AMD sells Austin campus. *MarketWatch*. [Online] MarketWatch, Inc., 12. Březen 2013. [Citace: 18. Leden 2021.] <https://www.marketwatch.com/story/amd-sells-austin-campus-2013-03-12>.
39. **Souček, Jiří "no-X"**. Threadripper AMD neplánovala, inženýři ho připravili ve volném čase. *DIIT*. [Online] CDR server s.r.o., 11. Zářij 2017. [Citace: 19. Leden 2021.] <https://diit.cz/clanek/threadripper-amd-neplanovala>. ISSN 1804-5405.
40. **Vítek, Jan.** AMD Ryzen jsou tu, co všechno nám nabídnou? *Svět Hardware*. [Online] oXy Online s.r.o., 2. Březen 2017. [Citace: 19. Leden 2021.] <https://www.svethardware.cz/recenze-amd-ryzen-jsou-tu-co-vsechno-nam-nabidnou/44008>. ISSN 1213-0818.
41. **Souček, Jiří "no-X"**. Skládání procesorů z křemíkových modulů snižuje AMD náklady o ~40 %. *DIIT*. [Online] CDR server s.r.o., 28. Srpen 2017. [Citace: 19. Leden 2021.] <https://diit.cz/clanek/skladani-procesoru-z-modulu-snizuje-naklady>. ISSN 1804-5405.
42. **Cutress, Ian.** AMD Zen 2 Microarchitecture Analysis: Ryzen 3000 and EPYC Rome. *AnandTech*. [Online] Future Plc, 10. Červen 2019. [Citace: 20. Leden 2021.] <https://www.anandtech.com/show/14525/amd-zen-2-microarchitecture-analysis-ryzen-3000-and-epyc-rome>.
43. **Souček, Jiří "no-X"**. Zen 2 / 7nm EPYC tvoří kombinace 7nm a 14nm čipletů! *DIIT.CZ*. [Online] CDR server s.r.o., 7. Listopad 2018. [Citace: 20. Leden 2021.] <https://diit.cz/clanek/zen-2-tvori-kombinace-7nm-14nm-cipletu>. ISSN 1804-5405.
44. **Olšan, Jan.** AMD odhalilo Epyc 7002: 7nm proces, 64 jader, nová architektura. Knockout Xeonů? *cnews.cz*. [Online] internet info, 8. Srpen 2019. [Citace: 20. Leden 2021.] <https://www.cnews.cz/amd-epyc-7002-druhe-generace-rome-7nm-zen-2-uvvedeni-porazka-intelu>.

45. **Souček, Jiří "no-X"** . Zen 2 posouvá AMD v žebříčku Single-Thread testu Passmark ze 140. místa na 1. *DIIT.CZ*. [Online] CDR server s.r.o., 1. Červenec 2019. [Citace: 20. Leden 2021.] <https://diit.cz/clanek/zen-2-posouva-amd-v-zebricku-single-thread-testu-passmark-na-1-misto>. ISSN 1804-5405.
46. **Burke, Steve**. AMD Ryzen 5950X, 5900X, 5800X, & 5600X Specs, Price, Release Date, & Zen 3 Changes. *Youtube video*. [Online] Gamers Nexus, 8. Říjen 2020. [Citace: 21. Leden 2021.] <https://www.youtube.com/watch?v=n-AanO3Axzk>.
47. **Cutress, Ian**. Hot Chips 31 Analysis: In-Memory Processing by UPMEM. *AnandTech*. [Online] Future Plc, 19. Srpen 2019. [Citace: 8. Březen 2021.] <https://www.anandtech.com/show/14750/hot-chips-31-analysis-inmemory-processing-by-upmem>.
48. **TechQuickie**. ARM CPUs as Fast As Possible. *Youtube video*. [Online] Linus Media Group, 10. Srpen 2015. [Citace: 9. Únor 2021.] <https://www.youtube.com/watch?v=X4BxUiqWq8E>.
49. **Frumusanu, Andrei**. Amazon's Arm-based Graviton2 Against AMD and Intel: Comparing Cloud Compute. *AnandTech*. [Online] Future plc, 10. Březen 2020. [Citace: 9. Únor 2021.] <https://www.anandtech.com/show/15578/cloud-clash-amazon-graviton2-arm-against-intel-and-amd>.
50. —. The 2020 Mac Mini Unleashed: Putting Apple Silicon M1 To The Test. *AnandTech*. [Online] Future plc, 17. Listopad 2020. [Citace: 9. Únor 2021.] <https://www.anandtech.com/show/16252/mac-mini-apple-m1-tested>.
51. **Salter, Jim**. New RISC-V CPU claims recordbreaking performance per watt. *artTECHNICA*. [Online] WIRED Media Group, 12. Prosinec 2020. [Citace: 10. Únor 2021.] <https://arstechnica.com/gadgets/2020/12/new-risc-v-cpu-claims-recordbreaking-performance-per-watt/>.
52. **Souček , Jiří "no-X"**. Intel ohlásil strategii miničipletů. Nevysvětlil, jak vyřeší spojení a spotřebu. *DIIT.CZ*. [Online] CDR server s.r.o., 25. Srpen 2020. [Citace: 11. Únor 2021.] <https://diit.cz/clanek/intel-ohlasil-strategii-minicipletu-nevysvetlil-jak-vyresi-spojeni-spotrebu>. ISSN 1804-5405..
53. **Vítek, Jan**. Intel Lakefield: x86 SoC ze čtyř vrstev čipů už pro letošní rok. *Svět Hardware*. [Online] oXy Online s.r.o, 27. Březen 2019. [Citace: 10. Únor 2021.]

<https://www.svethardware.cz/intel-lakefield-x86-soc-ze-ctyr-vrstev-cipu-uz-pro-letosni-rok/48807>. ISSN 1213-0818.

54. **Ježek , David .** V Berkeley vyrobili první 1nm tranzistor. *DIIT.CZ*. [Online] CDR server s.r.o., 12. Říjen 2016. [Citace: 11. Únor 2021.] <https://diit.cz/clanek/v-berkeley-vyrobili-prvni-1nm-tranzistor>. ISSN 1804-5405..

55. **Souček, Jiří "no-X"**. AMD: Křemík, křemík a zase jen křemík. Nic jiného až dekádu nečekejte. *DIIT.CZ*. [Online] CDR server s.r.o., 2019. Březen 21. [Citace: 12. Únor 2021.] <https://diit.cz/clanek/budoucnost-podle-amd-patri-kremiku>. ISSN 1804-5405..

56. **Gamers Nexus.** AMD Ryzen 3 3300X CPU Review vs. 3100 Benchmarks: An R3 is Enough for Gaming & Clock-for-Clock. *GamersNexus*. [Online] GamersNexus, LLC., 7. Červenec 2020. [Citace: 6. Březen 2021.] <https://www.gamersnexus.net/hwreviews/3581-amd-ryzen-3-3300x-cpu-review-vs-3100-clock-for-clock>.

## 10 Přílohy

Čip	Datum	Max Mhz	Tranist.	Paměť	Poznámka
4004	1971	0.74	2300	640	První mikroprocesor na čipu
8008	1972	0.8	3500	16 KB	První 8bitový mikroprocesor
8080	1974	2	6000	64 KB	
8086	1978	10	29000	1 MB	První 16bitový mikroprocesor
80286	1981	12	134000	16 MB	Obsahuje ochranu paměti
80386	1986	33	275000	4 GB	První 32bitový mikroprocesor
80486	1989	100	1.2M	4 GB	integrace FPU, integrace cache
Pentium	1993	233	3.1M	4 GB	Superskalární, MMX instrukce
Pentium Pro	1995	200	5.5M	4 GB	Obsahuje L2 cache
Pentium III	1999	1400	9.5M	4 GB	SSE instrukce
Pentium 4	2000	3800	42M	4 GB	Hyperthreading
Core Duo	2006	3200	152M	2 GB	Dvě jádra na jednom čipu
Core	2006	3200	410M	64 GB	L3 cache
Core	2011	3300	1160M	24 GB	integrované GPU

**Tabulka 1 Přehled vývoje mikroprocesorů Intel**

Zdroj: (12 str. 40), upraven



## Podklad pro zadání BAKALÁŘSKÉ práce studenta

Jméno a příjmení: **Jan Gregovský**  
Osobní číslo: **I1800167**  
Adresa: **Stará Ves 14, Zámrsk, 56543 Zámrsk, Česká republika**  
Téma práce: **Architektury mikroprocesorů**  
Téma práce anglicky: **Microprocessor Architectures**  
Vedoucí práce: **prof. RNDr. Peter Mikulecký, Ph.D.**  
**Katedra informačních technologií**

### Zásady pro vypracování:

#### Cíle závěrečné práce:

Popsat nejdůležitější rysy vývoje procesorových řad obou hlavních producentů mikroprocesorů Intel a AMD. Porovnat dnešní procesorové řady pro osobní počítače obou producentů. Poskytnout čtenáři přehled toho nejdůležitějšího, co se ve vývoji architektur mikroprocesorů obou hlavních výrobců stalo, a pokusit se charakterizovat i možné trendy vývoje.

#### Osnova:

Úvod  
Historie  
Porovnání dnešních procesorových řad  
Možný budoucí vývoj  
Závěr  
Zdroje  
Přílohy

### Seznam doporučené literatury:

TANENBAUM, Andrew S. a Todd AUSTIN. Structured computer organization. 6th ed. Boston: Pearson, 2013. ISBN 0132916525.  
YADIN, Aharon. Computer systems architecture. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 978-1-4822-3105-2.  
Znalost angličtiny je potřebná. Další literaturu poskytnete zadavatel.

Podpis studenta:

Datum:

Podpis vedoucího práce:

Datum: