

**Technická univerzita v Košiciach**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

## **Kryptografia v Pythone**

**Bakalárska práca**

**2022**

**Patrik Zeleňák**

**Technická univerzita v Košiciach**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Kryptografia v Pythone**

**Bakalárska práca**

Študijný program:	Počítačové siete
Študijný odbor:	Informatika
Školiace pracovisko:	Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií (KEMT)
Školiteľ:	prof. Ing. Miloš Drutarovský, CSc.

**Košice 2022**

**Patrik Zeleňák**

## **Abstrakt v SJ**

Bakalárska práca sa zaoberá analýzou, testovaním a porovnaním vybraných existujúcich kryptografických knižníc pre programovací jazyk Python. Porovnanie knižníc je zamerané najmä z pohľadu rýchlosťi a rozsahu podpory kryptografických algoritmov a protokolov. Teoretická časť je venovaná detailnému opisu novej vysoko-paralizovateľnej hašovacej funkcie Blake3. Pozornosť je venovaná aj opisu Merklovej hašovacej stromovej konštrukcie, jej výhodám a využitiu. Praktická časť bakalárskej práce je rozdelená do dvoch častí. Prvá praktická časť je zameraná na analýzu dostupných kryptografických knižníc pre jazyk Python a prípravy demonštračných aplikácií pre porovnanie a analýzu daných knižníc. Druhá praktická časť je venovaná prepojeniu externej optimalizovanej hašovacej funkcie Blake3 napísanej v jazyku Rust s jazykom Python. Záver práce obsahuje výkonnostné porovanie prepojenej Python implementácie hašovacej funkcie Blake3 s jej inými implementáciami.

## **Klúčové slová v SJ**

Kryptografia, Python, Blake3, PyO3, Rust, Dynamická knižnica

## **Abstrakt v AJ**

This Bachelor thesis focuses on analysis, testing and comparison between existing cryptographic libraries for programming language Python. The comparison of cryptographic libraries is mainly focused on performance and range of supported cryptographic algorithms and protocols. Theoretical part of the paper is dedicated to new highly parallelizable hash function Blake3. An attention is paid to description of Merkle hash tree structure, it's advantages and it's use in practice. The practical part of the thesis is divided into two sections. The first section is focused on analysis of available cryptographic Python libraries and creation of demo applications, needed for comparison of libraries. The second section focuses on binding of external Rust hash function Blake3 to Python. The conclusion of the thesis includes performance comparison of binded Blake3 implementation and some other implementations of hash function Blake3.

## **Klúčové slová v AJ**

Cryptography, Python, Blake3, PyO3, Rust, Dynamic Library

## **Bibliografická citácia**

ZELENÁK, Patrik. *Kryptografia v Pythone*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2022. 90s. Vedúci práce: prof. Ing. Miloš Drutarovský, CSc.

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**  
**Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií**

**ZADANIE  
BAKALÁRSKEJ PRÁCE**

Študijný odbor: **Informatika**  
Študijný program: **Počítačové siete**

Názov práce:

**Kryptografia v Pythonе**  
Cryptography in Python

Študent: **Patrik Zeleňák**  
Školiteľ: **prof. Ing. Miloš Drutarovský, CSc.**  
Školiace pracovisko: **Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií**  
Konzultant práce:  
Pracovisko konzultanta:

Pokyny na vypracovanie bakalárskej práce:

Analyzujte, otestujte a porovnajte vybrané existujúce kryptografické knižnice pre programovací jazyk Python. Porovnanie realizujte najmä z pohľadu rýchlosťi vykonávania kryptografických algoritmov a rozsahu podporovaných kryptografických algoritmov a protokolov. Zamerajte sa predovšetkým na moderné a perspektívne algoritmy, pre ktoré pripravte sady jednoduchých demonštračných aplikácií, ktoré budú demonštrovať ich využitie v Pythone. Na príklade hašovacej funkcie Blake 3 overte a demonštrujte možnosť využitia externých optimalizovaných modulov, vytvorených v inom programovacom jazyku, na zrýchlenie finálnej aplikácie vytvorenej v programovacom jazyku Python.

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský  
Termín pre odovzdanie práce: 27.05.2022  
Dátum zadania bakalárskej práce: 29.10.2021



10.   
.....  
prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.  
dekan fakulty

## **Čestné vyhlásenie**

Čestne vyhlasujem, že som bakalársku prácu na tému: Kryptografia v Pythone vypracoval samostatne, pomocou uvedenej literatúry pod odborným vedením prof. Ing. Miloša Drutarovského, CSc.

Košice, 13.5.2022

.....

*Vlastnoručný podpis*

## **Podčakovanie**

Rád by som sa podčakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce, prof. Ing. Milošovi Drutarovskému, CSc. za metodické usmernenie, ochotu a odborné rady, ktoré mi poskytol pri vypracovaní bakalárskej práce.

# Obsah

---

<b>Zoznam skratiek</b>	<b>xvi</b>
<b>Zoznam Symbolov</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Úvod do Pythonu</b>	<b>3</b>
1.1 Python . . . . .	3
1.1.1 Inštalácia Pythonu . . . . .	4
1.1.2 Inštalácia Python modulov pomocou PIP inštalátora . . . . .	4
1.1.3 Import Python modulov . . . . .	5
1.2 Binárna reprezentácia dát v jazyku Python . . . . .	5
1.3 Správne spracovavanie suborov pre kryptografiu . . . . .	7
<b>2 Kryptografické knižnice pre jazyk Python</b>	<b>11</b>
2.1 Knižnica PyCryptodome . . . . .	11
2.2 Knižnica Cryptography . . . . .	12
2.3 Ďalšie kryptografické knižnice . . . . .	14
<b>3 Paralizovateľná hašovacia funkcia</b>	

---

<b>Blake3</b>	<b>17</b>
3.1 Merklova hašovacia stromová štruktúra . . . . .	18
3.1.1 Rozdelenie vstupných dát na segmenty $C_i$ . . . . .	19
3.1.2 Nezávislé hašovanie segmentov $C_i$ . . . . .	20
3.1.3 Tvorba a hašovanie rodičovských uzlov $P$ . . . . .	21
3.1.4 Hašovanie koreňa stromu . . . . .	21
3.2 Paralizovateľná hašovacia funkcia Blake3 . . . . .	22
3.2.1 Kompresná funkcia $Kf()$ . . . . .	23
3.2.2 G funkcia . . . . .	25
3.2.3 Paralelizmus s využitím SIMD inštrukcií . . . . .	30
3.2.4 Permutácia $P()$ . . . . .	33
3.2.5 Finálna transformácia stavovej matice $Fu()$ . . . . .	33
3.2.6 Spracovanie uzlov a listov . . . . .	33
3.2.7 Blake3 strom . . . . .	38
<b>4 Využitie Rust implementácie funkcie Blake3 v jazyku Python</b>	<b>40</b>
4.1 Nástroje na vytvorenie dynamickej Python knižnice . . . . .	41
4.2 Inštalácia programovacieho jazyka Rust . . . . .	43
4.3 Inicializácia vývojového prostredia a spustenie kódu . . . . .	44
4.4 Inštalácia Rust modulov (crates) . . . . .	45
4.5 Tvorba dynamickej Python knižnice z externého Rust modulu . . . . .	45

4.6 Prepojenie Rust implementácie hašovacej funkcie Blake3 s jazykom Python . . . . .	47
4.6.1 Inicializácia vývojového prostredia jazyka Rust . . . . .	47
4.6.2 Import Rust modulov . . . . .	47
4.6.3 Mapovenie Rust modulu s jazykom Python . . . . .	49
4.6.4 Vytvorenie Python dynamického modulu . . . . .	51
<b>5 Experimentálne výsledky</b>	<b>55</b>
5.1 Vyhodnotenie experimentálneho porovnania kryptografických knižnic jazyka Python . . . . .	56
5.2 Porovnanie rôzných implemetácií hašovacej funkcie Blake3 . . . . .	60
<b>6 Záver</b>	<b>64</b>
<b>Zoznam príloh</b>	<b>67</b>
<b>A Práca s binárnymi dátami</b>	<b>68</b>
A.1 Základné operácie s bajtmi . . . . .	68
A.2 Konverzia dátovych typov Bytes-Bytarray-List . . . . .	70
<b>B Opis inštalácie jazyka Python pre OS Windows</b>	<b>72</b>
B.1 Inštalácia jazyka Python pre OS Windows . . . . .	72
B.2 Inštalácia a práca s viacerými verziami jazyka Python . . . . .	74
B.2.1 Manuálna inštalácia . . . . .	74

B.2.2 Inštalácia viacerých verzií jazyka Python pomocou nástroja pyenv . . . . .	77
<b>C Opis inštalácie jazyka Rust pre OS Windows</b>	<b>78</b>
<b>Literatúra</b>	<b>81</b>

# Zoznam obrázkov

---

3.1	Štruktúra konvenčných hašovacích funkcií . . . . .	18
3.2	Marklov hašovací strom . . . . .	19
3.3	Hašovací strom Blake3 . . . . .	23
3.4	Bloková schéma kompresnej funkcie . . . . .	25
3.5	Stavová matica $4 \times 4$ , obsahujúca šestnásťich 32-bitových slov, ktoré možno jednotne vyjadriť aliasmi $v_{0-15}$ . . . . .	26
3.6	G operácie . . . . .	28
3.7	Princíp spracovania bloku dát $M$ kompresiou funkciou . . . . .	30
3.8	Paralelné spracovanie stĺpcov operáciami $G_{0-3}$ . . . . .	31
3.9	Rotácia vektorov a následné paralelné spracovanie stĺpcov operáciami $G_{4-7}$ . . . . .	31
3.10	Inverzná rotácia vektorov . . . . .	31
3.11	Sekvenčné spracovanie listu binárneho stromu v hašovacej funkcií Blake3 . . . . .	37
3.12	Budovanie hašovacieho stromu . . . . .	38

4.1	Prepojenie externého Rust modulu s jazykom Python s využitím DLL knižnice	42
4.2	Výpis z terminálu 1.	43
4.3	Výpis z terminálu 2.	44
4.4	Bloková schéma mapovania	46
B.1	Oficiálna webová stránka jazyka Python	72
B.2	Výber požadovanej verzie jazyka Python	73
B.3	Proces inštalácie jazyka Python	73
B.4	Výpis nainštalovanej verzie Pythonu v príkazovom riadku	74
B.5	Inštalácia jazyka Python 2.7.18	75
C.1	Inštalačný balíček jazyka Rust dostupný	78
C.2	Terminálový výpis pri inštalácii jazyka Rust	79
C.3	Terminálový výpis chyby pri inštalácii jazyka Rust	79
C.4	Priebeh inštalácie softvéru Microsoft C++ build tool	80

# Zoznam tabuliek

---

1.1	Módy pre prácu so súbormi v Pythone . . . . .	8
2.1	Stručný zoznam základných kryptografických primitív a algoritmov . . . . .	13
2.2	Porovnanie vybraných kryptografických modulov jazyka Python z hľadiska ich veľkosti pre Python 3.8 . . . . .	15
3.1	Premenné stavovej matice $SM$ . . . . .	27
3.2	Inicializačné vektory pre Blake3 . . . . .	28
3.3	Permutácia bloku dát $P(M)$ , pričom $M = m_0, \dots, m_{15}$ . . . . .	33
3.4	Finálna transformácia $Fu()$ . . . . .	34
3.5	Tabuľka hodnôt premennej d . . . . .	36
4.1	Verzie použitých programovacích jazykov a modulov . . . . .	41
4.2	Premenovanie dynamického modulu v závislosti od operačného systému	54
5.1	Výsledky merania rychlosťných testov, vykonaných na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre symetrické prúdové šifry. Testovanie algoritmov bolo realizované na súbore o veľkosti 100 MB. . . . .	57

5.2	Výsledky merania rychlostných testov, vykonalých na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre symetrické blokové, realizované na súbore o veľkosti 100 MB šifry . . . . .	57
5.3	Výsledky merania rychlostných testov, vykonalých na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre digitálny podpis DSA a ECDSA . . .	58
5.4	Výsledky merania rychlostných testov, vykonalých na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre RSA-OAEP s rôznou veľkosťou modula	58
5.5	Výsledky merania rychlostných testov hašovacích funkcií, vykonalých na procesore I5-8250U a OS Windows 10. Rýchlosné testy boli realizované na súbore o veľkosti 100 MB. . . . .	59
5.6	Výsledky merania rychlostných testov hašovacích funkcií, vykonalých na procesore I5-8250U a OS Windows 10. Rýchlosné testy boli realizované na súbore o veľkosti 100 MB. . . . .	59
5.7	Rýchlosný test hašovacej funkcie Blake3, vykonalých na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre rôzne implementácie funkcie Blake3	61
5.8	Porovnanie referenčných implementácií hašovacej funkcie Blake3 na testovacích súboroch o veľkosti 10 MB, 20 MB a 50 MB. Samotné referenčné implementácie sú napísane v jazyku C, Rust a v jazyku Python. Testy boli vykonalé na procesore Intel I5-8250U. . . . .	62
5.9	Porovnanie vybraných konvenčných hašovacich funkcií, podporovaných kryptografickým modulom Cryptography s prepojenou hašovaou funkciou Blake3, ktorá využíva všetkých 8 dostupných vlákien procesora I5-8250U . . . . .	62

# Zoznam skratiek

---

<b>3DES</b>	Triple Data Encryption Algorithm.
<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard.
<b>API</b>	Application programming interface.
<b>ARC4</b>	Alleged Rivest Cipher 4.
<b>ARM</b>	Advanced RISC Machine.
<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange.
<b>AVX-512</b>	Advanced Vector Extensions 512.
<b>AVX2</b>	Advanced Vector Extensions 2.
<b>CBC</b>	Cipher Block Chaining.
<b>CPU</b>	Central Processor Unit.
<b>CTR</b>	Counter Mode.
<b>DDR4</b>	Double Data Rate 4.
<b>DH</b>	Diffie Hellman Algorithm.
<b>DLL</b>	Dynamic-link library.
<b>DSA</b>	Digital Signature Algorithm.
<b>ECB</b>	Electronic CodeBook.
<b>ECC</b>	Elliptic Curve Cryptography.
<b>ECDH</b>	Elliptic-curve Diffie–Hellman.
<b>ECDSA</b>	Elliptic Curve Digital Signature Algorithm.
<b>ECIES</b>	Elliptic Curve Integrated Encryption Scheme.
<b>GOST</b>	Government Standard.
<b>HMAC</b>	Hash-based message authentication codes.
<b>MD4</b>	Message-digest algorithm 4.

<b>MD5</b>	Message-digest algorithm 5.
<b>NIST</b>	National Institute of Standards and Technology.
<b>OS</b>	Operačný systém.
<b>P-192</b>	192-bit prime field Weierstrass curve.
<b>P-224</b>	224-bit prime field Weierstrass curve.
<b>P-256</b>	256-bit prime field Weierstrass curve.
<b>P-384</b>	384-bit prime field Weierstrass curve.
<b>P-521</b>	521-bit prime field Weierstrass curve.
<b>PIP</b>	Package Installer for Python.
<b>PYD</b>	Python dynamic library (Windows).
<b>RAM</b>	Random Access Memory.
<b>RSA</b>	Rivest–Shamir–Adleman šifra.
<b>SHA</b>	Secure Hash Algorithm.
<b>SHA2</b>	Secure Hash Algorithm 2.
<b>SHA3</b>	Secure Hash Algorithm 3.
<b>SHAKE</b>	Secure Hash Algorithm and KECCAK.
<b>SIMD</b>	Single instruction, multiple data.
<b>SSD</b>	Solid State Drive.
<b>UTF-8</b>	Unicode Transformation Format 8.
<b>XOR</b>	Exclusive OR.

# Zoznam Symbolov

---

$v_{0-15}$	Aliases stavovej matice
$\oplus$	Binárna operácia XOR
$d$	Bity slúžiace na bitovu separáciu domén
$M$	Blok vstupných dát
$Gk$	$G$ operácia, sfunkcie $G()$
$IV$	Inicializačný vektor
$R$	Koreň binárneho stromu
$b$	Počítadlo bajtov v bloku
$T = t_0, t_1$	Počítadlo segmentov
$P$	Rodičovský uzol
$\ggg$	Rotácia bitov vpravo
$+$	Sčítanie modulo $2^{32}$ v $G()$
$C_i$	Segment vstupných dát
$SM$	Stavová matica
$h_{0-7}$	Vstupné zreťaovacie hodnoty stavovej matice
$\parallel$	Zreťazenie objektov (concatenation)
$CV_i$	Zreťazovacia hodnota v binárnom strome

# Úvod

---

Digitalizácia a dopad internetovej éry drasticky zmenil všetko vrátane bankovníctva, internetovej a sietovej bezpečnosti, elektronickej pošty, zábavy a dokonca aj vzdelávania. Kryptografia sa stala jedným z najdôležitejších nástrojov moderného sveta. Masívnym vývojom informačno-komunikačných technológií a elektronických systémov, spolu s dopytom po bezpečnom spracovaní a ukladaní dát, sa nároky na kryptografickú bezpečnosť zvýšili. Vzniklo veľké množstvo metód, kryptografických algoritmov a protokolov, ktorými dokážeme naše dáta chrániť a uchovávať v bezpečí pred nepovolanými osobami. Jednou z týchto metód je šifrovanie. Táto práca bližšie opisuje základne konverzné techniky a režimy práce so súbormi, ktoré sú potrebné pre prácu s kryptografickými modulmi jazyka Python. Podrobne sa zameriame na analýzu kryptografických modulov pre jazyk Python z hľadiska rýchlosťi vykonávania kryptografických funkcií ale aj z hľadiska rozsahu podporovaných kryptografických algoritmov a protokolov.

Využitie jazyka Python je pre kryptografické účely omnoho jednoduchšie ako napríklad C/C++. Hoci existujú populárne, voľne dostupné knižnice ako OpenSSL, ich používanie môže byť komplexné a náročné. Python eliminuje tieto problémy a disponuje mnohými knižnicami (modulmi) ako napríklad Cryptography, PyCryptography, Hashlib a mnoho ďalších. Jednou z vlastností jazyka Python je aj jeho jednoduchá integrácia a prepojenie s jazykmi ako C/C++, Rust, Java, Fortran alebo .NET.

Nosnou časťou bakalárskej práce je detailný opis a analýza nového, rýchleho a vysoko paralizovateľného kryptografického stavebného bloku, ktorým je hašovacia funkcia Blake3. Funkcia Blake3 je zaujímavá najmä svojou štruktúrou, ktorá je založená na princípe Merklového stromu. Vďaka Merklovej stromovej hašovacej

konštrukcii ale aj využitiu SIMD inštrukcií je funkcia Blake3 vhodná pre rýchle hašovanie veľkých súborov s teoreticky nekonečnou možnosťou paralelizmu, či verifikáciu streamovaných dát. Optimalizovaná a plne paralizovateľná implementácia hašovacej funkcie Blake3, napísaná jej autormi, je napísaná v programovacom jazyku Rust. Využitie jednej z vlastnosti jazyka Python, možnosť prepojenia externého modulu napísaného v inom programovacom jazyku, demonštrujeme na príklade prepojenia externého Rust modulu Blake3 s jazykom Python.

Prvá kapitola obsahuje stručný úvod do programovacieho jazyka Python, čo zahŕňa stručný opis jazyka Python, jeho inštaláciu a základnú prácu s bitovými dátovými typmi, či prácu so súbormi. Opísaný je princíp inštalácie a používania Python modulov pomocou Python inštalátora balíčkov (PIP).

Druhá kapitola je zameraná na opis vybraných kryptografických knižníc z hľadiska rozsahu podporovaných kryptografických algoritmov a protokolov. Opis zahŕňa výhody a nevýhody jednotlivých kryptografických knižníc ale aj princípy implementácie a štruktúru daných knižníc.

Detailným opisom hašovacej funkcie Blake3 ale aj opisom Merklovej stromovej štruktúry sa zaoberá tretia kapitola tejto bakalárskej práce. Táto kapitola opisuje výhody Merklovej hašovacej štruktúry, jej využitie a princíp budovania binárneho Merklového stromu. Súčasťou tejto kapitoly je detailný opis nosnej časti tejto práce, ktorou je hašovacia funkcia Blake3. Opísaný je vnútorný stav funkcie Blake3, princíp paralelizmu a využitia SIMD inštrukcií, či budovanie binárneho hašovacieho stromu funkcie Blake3.

Štvrtá kapitola zahŕňa princíp vytvorenia a prepojenia externej dynamickej knižnice napísanej v programovacom jazyku Rust s jazykom Python. Samotné prepojenie je realizované na hašovacej funkcií Blake3, ktorej optimalizovaná a plne paralizovateľná implementácia je napísaná v jazyku Rust.

Posledná kapitola je venovaná experimentálnemu overeniu a porovnaniu kryptografických modulov jazyka Python. Porovnanie vybraných kryptografických modulov je realizované na základe rýchlosťi kryptografických algoritmov. Súčasťou tejto kapitoly je aj porovnanie rôznych implementácií hašovacej funkcie Blake3 spolu s prepojenou implementáciou funkcie Blake3 v jazyku Python.

# 1 Úvod do Pythonu

---

## 1.1 Python

Python[1] je vysoko úrovňový, open-source programovcí jazyk, podporovaný viacerými operačnými systémami. Python sa pokladá za procedurálny, funkcionálny ale aj objektovo orientovaný programovací jazyk, no môže byť použitý aj na rôzne skriptovacie účely. Prvé implementácie programovacieho jazyka Python boli realizované v roku 1989 vývojárom Guidom van Rossumom<sup>1</sup> a prvá stabilná verzia jazyka Python (Python 1.0) bola predstavená v roku 1991. V roku 2000 bola predstavená verzia Python 2.0, ktorá obsahovala niekoľko vylepšení ako napríklad garbage collector s funkcionalitou zachytávania slučiek a podporu kódovacej sady Unicode. Verzia Python 3.0, ktorá bola predstavená v roku 2008 obsahovala veľké množstvo vstavaných knižníc a nových funkcionalít, ktoré verzia Python 2.0 neponúkala. Najväčšie rozdiely medzi verzou Python 2.0 a 3.0 predstavuje zmena výpisu na štandardný výstup, kde bol príkaz `print` nahradený funkciou `print()`, úprava vstavaných knižníc alebo zmena syntaxe. Aktuálna verzia jazyka Python je verzia Python 3.10.4. Garbage collector, ktorý je súčasťou Pythonu, zabezpečuje automatickú správu pamäte, čo sa môže javiť ako výhoda oproti preferovanému jazyku pre kryptografiu, ktorým je jazyk C. Syntax jazyka Python je pomerne jednoduchá, čo nám umožňuje písat kód rýchlo a prehľadne. Filozofia dizajnu jazyka Python kladie dôraz na čitateľnosť kódu s využitím odsadenia blokov kódu. Spúštanie programu napísaného v Pythonu si nevyžaduje špeciálny preklad a prítomnosť komplátora. Program sa spracováva pomocou interpreta podobne ako v jazyku PERL alebo

---

<sup>1</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Guido\\_van\\_Rossum](https://en.wikipedia.org/wiki/Guido_van_Rossum)

PHP. Na druhej strane má Python značné nedostatky z hľadiska spotreby pamäte [2][3]. Štandardne je vykonávanie programu v jazyku Python pomalšie ako v jazyku C, čo predstavuje jednu z jeho nevýhod [4]. Využívanie viacerých jadier CPU môže byť obtiažné a problematické [5]. Tieto nevýhody je možné redukovať prepojením externých modulov napísaných v inom programovacom jazyku [6].

### **1.1.1 Inštalácia Pythonu**

Pre väčšinu Linuxových distribúcií alebo macOS je Python vopred predinstalovaný. Rôzne verzie Python interpretera je možné stiahnuť (<https://www.python.org/>) a nainštalovať z oficiálneho zdroja. Inštalácia Python interpretera pre operačný systém Windows vyžaduje inštalačný balíček s príponou .msi. Výberom správnej verzie predídeme rôznym problémom s kompatibilitou modulov. V tejto práci budeme využívať Python verziu 3.8.10. Detailný opis inštalácie Python interpretera na iných platformách môžeme nájsť v dokumentácii<sup>2</sup> alebo v knihe Shannona W. Braya [7] resp. v prílohe **B**. Overiť správnosť inštalácie je možné príkazom `Python --version` v príkazovom riadku alebo termináli, ktorý vypíše aktuálne nainštalovanú verziu Pythonu.

### **1.1.2 Inštalácia Python modulov pomocou PIP inštalátora**

PIP<sup>3</sup> (package installer for Python) je inštalátor Python balíčkov, ktorý budeme využívať na inštaláciu rôznych kryptografických modulov. PIP je súčasťou inštalačného balíčka Python interpretera. V prípade, že PIP nie je súčasťou inštaláčného balíčka, je možné ho explicitne stiahnuť (<https://bootstrap.pypa.io/get-pip.py>) a doinštalovať príkazom `py get-pip.py`. Inštalácia balíčkov prebieha v príkazovom riadku príkazom `pip install nazov-balíčka`.

---

<sup>2</sup><https://wiki.Python.org/moin/BeginnersGuide/Download>

<sup>3</sup><https://pip.pypa.io/en/stable/>

### 1.1.3 Import Python modulov

Jedným z cieľov tejto práce je analýzovať a otestovať kryptografické moduly jazyka Python a porovnať jednotlivé moduly na základe rýchlosťi a rozsahu podporovaných kryptografických algoritmov a protokolov. Je preto potrebné uviesť niekoľko spôsobov (Zdrojové kódy 1.1–1.3), ktorými dokážeme tieto moduly importovať do Python kódu.

Zdrojový kód 1.1: Štandardný import modulu random v jazyku Python

```
import random
#Volanie funkcie
random.urandom(16)
```

Zdrojový kód 1.2: Import modulu s využitím aliasu v jazyku Python

```
import random as r
#Volanie funkcie
r.randint(1,10)
```

Zdrojový kód 1.3: Import konkrétnej triedy funkcie v jazyku Python

```
from random import randint
#Volanie funkcie
randint(1,10)
```

Výhodou jazyka Python je možnosť interakcie s externými modulmi napísanými v inom programovacom jazyku [6]. Zaujímavostou je, že niektoré vstavené funkcie jazyka Python sú napísané v programovacom jazyku C [8]. Extérne moduly sú využívané najmä z dôvodu eliminácie slabých stránok jazyka Python. Súčasťou tejto práce je vytvorenie externého modulu, napísaného v programovacom jazyku Rust [9] a jeho prepojenie s Pythonom. Viac o integrácií externých modulov nájdeme v kap. 4.

## 1.2 Binárna reprezentácia dát v jazyku Python

V kryptografii sú dátá typicky spracovávané vo forme bajtov, čomu sú prispôsobené aj rôzne kryptografické nástroje. Je preto dôležité dbať na správnu re-

prezentáciu dát a prácu s nimi. Python poskytuje niekoľko spôsobov, ktorými je možné vyjadriť dátu v binárnom tvare. Prvým spôsobom je tzv. bytes-literals. Ide o binárnu reprezentáciu dát, ktorej syntax je podobná reťazcu (string), avšak od bežného reťazca sa líši prefixom `b`. Bytes-literals povoľuje iba základných 127 ASCII znakov. Všetky ostatné znaky je nutné spracovať iným spôsobom.

```
Bytes_literals = b"Reprezentacia bajtov vo forme bytes-literals."
```

Pri pokuse o konverziu reťazca na bytes-literals napr. `b"Toto je skúška!"` nám Python interpreter vypíše chybové hlásenie, pretože tento výraz obsahuje znaky, ktoré nie sú z podporovaného rozsahu ASCII znakov. Ide o znaky "ú" alebo "š". V takomto prípade je nutné použiť metódu `encode()`, ktorú nám ponuka jazyk Python. Metóda `encode()` podporuje rôzne kódovacie sady. Predvolenou kódovacou sadou je UTF-8. Analogicky je možné využívať metódu `decode()` na dekódovanie bajtov.

```
Bytes_encoded = "Reprezentacia bajtov s využitím funkcie encode!".encode()
```

V praxi sa môžeme stretnúť s formátom bytes-arrays, ktorý reprezentuje zoznam (list) bajtov. Tento formát môže byť v niektorých kryptografických API preferovaný, pretože poskytuje väčšiu flexibilitu práce s bajtmi [10]. Bytes-arrays je základným binárnym typom v jazyku Python. V tomto bloku opíšeme základne techniky konverzie bajtov, zoznamov a bytes-arrays. Viac informácií o dátových typoch a vstavaných funkciách je možné nájsť v dokumentácii jazyka Python[8].

Pre generovanie a kopírovanie bajtov je vhodná vstavaná funkcia `bytes()`, ktorej vstupným parametrom môže byť celé číslo, binárny objekt alebo aj funkcia `range()`.

#### Zdrojový kód 1.4: Práca s bajtmi

```
Bytes_zero = bytes(10)
Duplicated_bytes = bytes(Bytes_zero)
```

V Zdrojovom kóde 1.4 môžeme vidieť demonštráciu funkcie `bytes()`, kde sme

najprv vygenerovali 10 nulových bajtov a neskôr sme tieto bajty skopírovali a priradili premennej s názvom `Duplicated_bytes`.

Veľmi často sa môžeme stretnúť s hexadecimálnou reprezentáciou retazca. Ide o retazec, ktorý obsahuje hexadecimálne vyjadrenie dát, vždy po dvojiciach znakov pričom každý znak môže nadobúdať hodnoty od 0 po f napr. retazec "2ef0 f1f2". Takýto hexa-string je možné previesť do bajtov a naopak.

```
Hex_to_bytes = bytes.fromhex("2ef0 f1f2")
Bytes_to_hex = b"\x2e\xf0\xf1\xf2".hex()
```

Jedným z možných formátov pre uchovávanie bajtov je uloženie bajtov do zoznamu, kde je každý bajt vyjadrený ako celé číslo. Zoznam v takomto tvare je možné previesť do tvaru bytes-literal pomocou funkcie `bytes()` alebo do bytes-arrays pomocou `bytearray()`. Spätná konverzia bajtov na list je možná prostredníctvom funkcie `list()`.

```
Test_list = [116, 101, 115, 116]
Bytes_from_list = bytes(Test_list)
Test_bytes = b"test"
List_from_bytes = list(Test_bytes)
```

Práca s dátovým typom bytes-array je podobná ako s dátovým typom bytes. Využíva rovnaké funkcie na konverziu medzi inými dátovými typmi. Dátový typ bytes-array je tzv. `mutable`, čo znamená, že je možné meniť hodnotu jeho obsahu. Na druhej strane dátový typ bytes je `immutable`, to znamená, že hodnotu premennej nie je možné v programe meniť. Viac demonštračných príkladov a detailnejšie opísanie jednotlivých konverzných metód môžeme nájsť v prílohe A alebo v Python dokumentácii[8].

### 1.3 Správne spracovavanie suborov pre kryptografiu

Ako sme už naznačili, spracovávanie dát v binárnom tvare je pre kryptografické systémy kľúčové, preto v tomto bloku opíšeme niekoľko spôsobov spracovania súborov. Otvoriť a čítať súbory je v Pythone možné viacerými spôsobmi, no najčastejšie

sa využíva vstavaná funkcia `open()`. Táto funkcia obsahuje niekoľko vstupných parametrov ako `file`, `mode`, `encoding` a podobne [8]. `file` určuje názov, cestu alebo celočíselnú hodnotu deskriptora daného súboru. `Mode` predstavuje mód, v ktorom daný súbor otvárame. V prípade, že potrebujeme pracovať so súborom v binárnom tvaru, nastavíme túto hodnotu na "`b`". Predvolená hodnota argumentu `mode` "`r`" je nastavená na čítanie súboru v textovom režime. V Tabuľka 1.1 môžeme vidieť ďalšie podporované režimy. Jednotlivé režimy je možné kombinovať napr. "`rb`", "`wr`", "`w+`" a pod. [11].

Tabuľka 1.1: Módy pre prácu so súbormi v Pythone

Režimy otvárania súborov	
Režim	Význam
<code>r</code>	režim pre čítanie, textový súbor
<code>w</code>	režim pre zápis, textový súbor; v prípade, že existuje rovnomený súbor, tak bude prepísaný
<code>a</code>	režim pre zápis na koniec súboru, textový súbor
<code>r+</code>	režim pre zápis na koniec súboru, textový súbor
<code>w+</code>	režim pre čítanie, zápis a prípadne prepisovanie v prípade rovnomeného súboru, textový súbor
<code>rb</code>	režim pre čítanie a zápis na konci súboru, binárny súbor
<code>wb</code>	režim pre zápis, v prípade rovnomeného súboru aj prepisovanie, binárny súbor
<code>ab</code>	režim pre zápis na koniec súboru, binárny súbor
<code>rb+</code>	režim pre čítanie a zápis, binárny súbor
<code>wb+</code>	režim pre zápis, čítanie a prípadne prepisovanie pri existencii rovnomeného súboru, binárny súbor
<code>ab+</code>	režim na zápis a čítanie na konci súboru, binárny súbor

Zdrojový kód 1.5 demonštruje otvorenie súboru "`filename.txt`" v móde "`rb`", teda čítanie súboru v binárnom móde. V takomto prípade je nutné operáciu ukončiť metódou `close()`, ktorá uvoľní dátu z RAM pamäte a správne zatvorí súbor.

Metódou `read()` je možné získať obsah daného súboru. Po uzavorení súboru už nie je možné sa na súbor späť odkazovať.

Zdrojový kód 1.5: Štandardná práca so súborom v jazyku Python

```
my_file = open("filename.txt", "rb")
data_from_file = my_file.read()
my_file.close()
```

Ďalším spôsobom je čítanie súboru pomocou kľúčového slovíčka `with`, kde nie je potrebné súbor uzavárať. Príkaz `with` sa postará o správne zatvorenie súboru a jeho uvoľnenie z pamäte. Odkazovanie sa na súbor je možné iba v bloku `with`.

Zdrojový kód 1.6: Práca so súborom s využitím príkazu `with` v jazyku Python

```
with open("filename.txt", "rb") as my_file:
    data_from_file = my_file.read()
```

Metóda `read()` obsahuje argument `size`, ktorý vyjadruje koľko bajtov súboru chceme prečítať. Hodnota argumentu `size` je predvolene nastavená na hodnotu `-1`, čo znamená prečítanie celého súboru. Je nutné podotknúť, že metóda `read()` vrácia dátu, či už v textovej forme alebo vo forme bajtov. Tieto dátu štandardne priradzujeme premennej, čo znamená, že dátu zapisujeme do operačnej pamäte. V prípade, že pracujeme s veľkým súborom (väčšími ako je dostupná operačná pamäť), program nám môže „spadnúť“ a Python interpreter vypíše chybové hlásenie. Jedným z možných riešení je nastaviť hodnotu argumentu `size` na fixnú hodnotu a následne dátu spracovať po blokoch s danou veľkosťou. Pri viacnásobnom volaní funkcie `read()` tak postupne prečítame celý obsah súboru. Zdrojový kód 1.7 demonštruje jednu z metód spracovania a hašovania veľkého súboru s využitím hašovacej funkcie MD5 [12].

Zdrojový kód 1.7: Čítanie veľkého súboru v Pythone

```
import hashlib
md5_object = hashlib.md5()
block_size = 128*md5_object.block_size
a_file = open("large_file", 'rb')

chunk = a_file.read(block_size)
while chunk:
    md5_object.update(chunk)
    chunk = a_file.read(block_size)

md5_hash = md5_object.hexdigest()
```

## 2 Kryptografické knižnice pre jazyk Python

---

Kryptografia je veda, ktorá využíva matematické metódy utajovania obsahu a preukázaťnosťi pôvodu prenášaných správ [13]. Jej cieľom je utajíť obsah prenášaných správ, čo zahrňa riešenie základných bezpečnostných otázok ako je dôvernosť a integrita dát, autentizácia a autorizácia užívateľov a podobne. Bezpečný prenos a utajenie prenášaného obsahu je možné dosiahnuť s využitím kryptografických algoritmov a protokolov (digitálne podpisy, výmena klúčov, autentizácia správ, a pod.), ktorých základ tvoria kryptografické primitíva. Cieľom tejto kapitoly je analyzovať, otestovať a porovnať vybrané existujúce kryptografické knižnice (moduly) pre programovací jazyk Python, pričom porovnanie jednotlivých kryptografických modulov bude zamerané na spôsob implementácie, veľkosť modulov a rozsah podporovaných kryptografických algoritmov a protokolov.

### 2.1 Knižnica PyCryptodome

PyCryptodome [14] (pôvodne známy ako PyCrypto) je kryptografický modul jazyka Python, obsahujúci nízko úrovňové kryptografické primitíva ako napríklad AES [15], Salsa20 [16], RSA [17], DSA [18], SHA3 [19], Blake2s [20], Blake2b [20], ElGamal [21], HMAC [22] a mnoho ďalších. Súčasťou modulu PyCryptodome je aj algoritmus pre generovanie klúčov na báze eliptických krviek (NIST krvky P-192, P-224, P-256, P-384 a P-521). Hoci modul ponúka generovanie klúčov na báze ECC, samotný algoritmus pre šifrovanie na báze ECC v module chýba. Úplný

zoznam podporovaných kryptografických primitív a protokolov je dostupný v dokumentácii<sup>1</sup>. Základom modulu PyCryptodome nie je žiadným priamim prepojením kryptografickej knižnice jazyka C, ako je OpenSSL [23]. Algoritmy sú v maximálnej možnej miere implementované v čistom Pythone. Iba časti, ktoré sú mimoriadne dôležité pre výkon (napr. blokové šifry), sú implementované v jazyku C, teda ich implementácia je založená na možnosti externého prepojenia jazyka C s jazykom Python. V tejto práci budeme využívať aktuálne najnovšiu verziu modulu PyCryptodome, teda verziu 3.14.1. V budúcich verziach modulu PyCryptodome môžeme očakávať pridanie kryptografických algoritmov ako ECIES [24], ECDH [25], Camellia [26], GOST [27], Diffie-Hellman [28], bcrypt [29], argon2 [30]. Viac informácií ohľadom modulu PyCryptodome je možné nájsť v dokumentácii<sup>2</sup>.

## 2.2 Knižnica Cryptography

Cryptography [31] je komplexný kryptografický modul jazyka Python, ktorý ponúka veľké množstvo kryptografických primitív a protokolov. Oproti modulu PyCryptodome je modul Cryptography masívnejší, komplexnejší a jeho implementácia závisí od knižnice OpenSSL (napísanej v jazyku C) pre všetky kryptografické operácie. OpenSSL je de facto štandard pre kryptografické knižnice a poskytuje veryký výkon spolu s rôznymi certifikátmi, ktoré môžu byť relevantné pre vývojárov. Podrobny opis všetkých podporovaných kryptografických algoritmov a protokolov je možné nájsť v online dokumentácii<sup>3</sup>. Tento modul obsahuje základné algoritmy pre ECC ako napríklad ECDSA či ECDH. Oproti modulu PyCryptodome ponúka modul Cryptography väčšiu podporu eliptických kriviek<sup>4</sup>. Tvorcovia tohto modulu kladú pri vývoji veľký dôraz na bezpečnú implementáciu (kladie dôraz na odolnosť voči postranným útokom) všetkých kryptografických algoritmov a protokolov. V tejto práci budeme využívať aktuálne najnovšiu verziu modulu Cryptography, teda verziu 37.0.1.

---

<sup>1</sup><https://www.pycryptodome.org/en/latest/src/features.html>

<sup>2</sup><https://www.pycryptodome.org/en/latest/src/installation.html>

<sup>3</sup><https://cryptography.io/en/latest/hazmat/primitives/>

<sup>4</sup><https://cryptography.io/en/latest/hazmat/primitives/asymmetric/ec/>

Tabuľka 2.1 poskytuje stručný prehľad základných kryptografických primitív a algoritmov, ktoré sú podporované kvalitnými kryptografickými Python modulmi PyCryptodome a Cryptography. Okrem týchto algoritmov, môžeme v oboch kryptografických moduloch nájsť protokoly ako Secret sharing scheme [32], alebo funkcie pre odvodzovanie kľúčov (key derivation functions) [33]. Z Tabuľky 2.1 alebo aj z dokumentácií daných kryptografických modulov je vidieť, že modul Cryptography je z hľadiska rozsahu podporovaných kryptografických primitív a algoritmov rozsiahlejší. Z pohľadu bezpečnej implementácie algoritmov je modul Cryptography aj odolnejší voči postranným útokom (side-channel attacks)[34].

Tabuľka 2.1: Stručný zoznam základných kryptografických primitív a algoritmov, podporovaných Python modulmi PyCryptodome a Cryptography

Podporované kryptografické algoritmy pre vybrané Python moduly			
Kategória	Kryptografické primitívum	PyCryptodome	Cryptography
Symetrické šifry	AES [15]	✓	✓
	DES/3DES [35]	✓	✓
	CAST-128 [36]	✓	✓
	RC2 [37]	✓	✗
	Camellia [26]	✗	✓
	ChaCha20 [38]	✓	✓
	Salsa20 [16]	✓	✗
	RC4 [39]	✓	✓
	SEED [40]	✗	✓
	SM4 [41]	✗	✓
Tradičné módy symetrických šifier	Blowfish [42]	✗	✓
	IDEA [43]	✗	✓
	ECB [44]	✓	✓
	CBC [44]	✓	✓
	CFB [44]	✓	✓
Špeciálne módy symetrických šifier a autentizačné šifrovanie	OFB [44]	✓	✓
	CTR [44]	✓	✓ - iba pre AES
	OpenPGP [45]	✓	✗
	CCM [46]	✓	✓
	EAX [47]	✓	✗
Kryptografia s verejným kľúčom	SIV [48]	✓	✓
	OCB [49]	✓	✓
	GCM [50]	✓	✓
	ChaCha20-Poly1305 [38]	✓	✓
	XTS [51]	✗	✓
	RSA(OAEP,PSS,PKCS1v15) [17]	✓	✓
	DSA [18]	✓	✓
Kryptografia s verejným kľúčom	ECDSA [52]	✓	✓
	ECDH [25]	✗	✓

Tabuľka 2.1 – pokračovanie

	ElGamal [21]	✓	✗
	Diffie-Helman [28]	✗	✓
Hašovacie funkcie	SHA1 [53]	✓	✓
	SHA2 [53]	✓	✓
	SHA3 [19]	✓	✓
	Blake2 [20]	✓	✓
	MD5 [54]	✓	✓
	SM3 [55]	✗	✓
	KangarooTwelve [56]	✓	✗
	RIPEMD-160 [57]	✓	✗
MAC	HMAC [22]	✓	✓
	CMAC [58]	✓	✓
	KMAC [59]	✓	✗
	Poly1305 [60]	✓	✓

## 2.3 Ďalšie kryptografické knižnice

Hashlib [61] je modul jazyka Python, ktorý obsahuje súbor kryptografických hašovacích funkcií. Modul Hashlib je súčasťou inštalácie jazyka Python. Teda modul Hashlib je aktualizovaný a udržiavaný samotnými vývojármi jazyka Python. Tento modul ponúka základné hašovacie funkcie ako napríklad MD4, MD5, funkcie z rodiny SHA, funkciu Blake2s, Blake2b a pod. Implementácia niektorých hašovacích funkcií ako napríklad funkcie z rodiny SHA3 alebo SHAKE sú založené na kryptografickej knižnici OpenSSL. Výhodou tejto knižnice je jednoduchá manipulácia a stručná dokumentácia.

Za zmienku stoja aj špecializované moduly PyNaCl [62] a tinyec [63]. Modul PyNaCl je kryptografický modul zameraný predovšetkým na oblasť sietových protokolov a algoritmov (<https://pypi.org/project/PyNaCl/>). Ide o prepojenie kryptografickej knižnice libsodium vytvorennej Danielom J. Bernsteinom<sup>5</sup>. Modul tinyec je relatívne malý kryptografický modul vytvorený na vykonávanie aritmetických operácií na eliptických krivkách. Hoci modul tinyec nie je vhodný

<sup>5</sup><https://cr.yp.to/djb.html>

pre produkčnú výrobu, slúži ako výborný edukačný nástroj pre hlbšie pochopenie vnútorného fungovania eliptických kriviek (<https://github.com/alexmgr/tinyec>). Aktuálne verzie týchto kryptografických modulov je možné nájsť v Tabuľke 2.2.

Porovnanie vybraných kryptografických modulov možno vykonať z hľadiska veľkosti daných modulov. Tabuľka 2.2 demonštruje porovnanie veľkosti kryptografických modulov jazyka Python. Veľkosti vybraných kryptografických modulov z Tabuľky 2.2 zodpovedajú ich aktuálne najnovším verziám. Kryptografický modul Hashlib sa v Tabuľke 2.2 nenachádza, pretože tento modul je súčasťou jazyka Python už od verzie 2.7.18 a jeho veľkosť závisí nie len od implementácie kryptografických primitív, ale aj od samotnej štruktúry jazyka Python. Približná veľkosť implementácie kryptografických primitív modulu Hashlib pre Python 3.8 je 1,2 MB, čo zahŕňa aj kryptografické primitíva, ktorých implementácia je založená na prepojení kryptografických primitív z kryptografickej knižnice jazyka C, OpenSSL 1.1.0. Najnovšiu verziu modulu Hashlib ponúka Python 3.10.4. Táto verzia využíva knižnicu OpenSSL a podporované verzie sú OpenSSL 1.1+ ale aj verzia 3.0.0. Kryptografické moduly PyCryptodome, Cryptography a Hashlib boli experimentálne otestované z hľadiska rýchlosťi vykonávania kryptografických algoritmov. Výsledky rýchlostných meraní sú vyjadrené v kapitole 5.1.

Tabuľka 2.2: Porovnanie vybraných kryptografických modulov jazyka Python z hľadiska ich veľkosti pre Python 3.8

Porovnanie veľkosti vybraných kryptografických modulov		
Python Modul	Verzia modulu	Veľkosť
Cryptography [31]	37.0.1	74,1 MB
PyCryptodome [14]	3.14.1	39,5 MB
PyNaCl [62]	1.5.0	28,6 MB
tinyec [63]	0.4.0	64,4 kB

Zvyšná časť tejto bakalárskej práce je venovaná novému kryptografickému stavebnému bloku, ktorým je hašovacia funkcia Blake3 [64]. Blake3 je perspektívna vysoko paralizovateľná hašovacia funkcia, postavená na základoch hašovacej funkcie Bao [65] a Blake2 [20], ktorá je zaujímačná z hľadiska velmi rýchleho spracovania veľkého množstva dát. Blake3 sa čoraz častejšie využíva napríklad v block-chainových

technológiach, peer-to-peer protokoloch a kryptomenách ako napríklad Solana a Su-  
acoin [66][67]. V závere tejto práce demonštrujeme akým spôsobom možno využiť  
hašovaciu funkciu Blake3, ktorej optimalizovaná a paralizovateľná implementácia je  
napísana v programovacom jazyku Rust, pre efektívne odhašovanie veľkého množ-  
stva dát v jazyku Python.

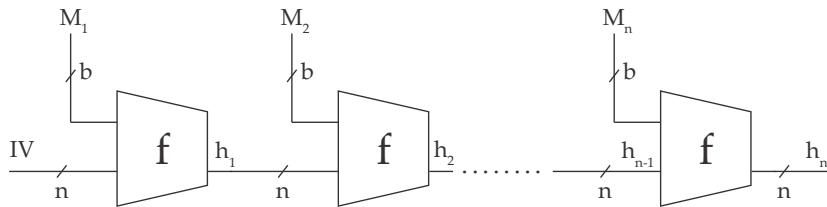
## 3 Paralizovateľná hašovacia funkcia Blake3

---

Hašovacie funkcie majú obrovský význam v oblasti autentizácie a autorizácie dát. Jedným z možných využití hašovacích funkcií je overenie integrity dát t.j. garancia, že dátá neboli zmenené napríklad počas prenosu cez prenosový kanál. Predstavme si, že odosielateľ  $A$  a adresát  $B$  spolu nadviazali komunikáciu a chcú si medzi sebou vymeniť dátá. Odosielateľ  $A$  dátá zahašuje pomocou jednej z dostupných hašovacích funkcií. Výsledkom hašovania dát je hašovací kód s fixnou dĺžkou napr. 256 bitov. Takýto hašovací kód budeme nazývať referenčný hašovací kód. Referenčný kód je známy pre adresáta  $B$ . Odosielateľ  $A$  odošle dátá cez prenosový kanál adresátovi  $B$ . Overenie integrity dát sa vykoná na strane adresáta  $B$  a to tak, že adresát  $B$  zahašuje prijate dátá a porovná svoj hašovací kód s referenčným hašovacím kódom. Ak sa tieto kódy zhodujú, prenos dát prebehol úspešne a bez akejkoľvek zmeny dát počas ich prenosu. Takéto overenie integrity sa zväčša realizuje sekvenčným spôsobom, čo môže predstavovať isté nevýhody.

Konvenčné hašovacie funkcie spracúvajú dátá sekvenčným spôsobom, to znamená, že sa vstupné dátá typicky rozdelenia na bloky dát o určitej veľkosti a tie sa spracúvajú s istou vzájomnou závislosťou (vid. Obr. 3.1). Každý z blokov je spracovaný kompresnou funkciou. Výstup kompresnej funkcie sa stáva vstupom pre následujúcu kompresnú funkciu. To znamená, že pre spracovanie i-teho bloku, musíme zahašovať všetky predchadzajúce bloky dát. Hašovací kód, teda výstup z hašovacej funkcie, dostávame po aplikácii kompresnej funkcie na posledný blok dát [68].

Hašovacia funkcia Blake3, ktorej je venovaná táto kapitola, však pracuje úplne



Obr. 3.1: Štruktúra konvenčných hašovacích funkcií

inak. Blake3 je moderná hašovacia funkcia vyvinutá v roku 2020 skupinou vývojárov<sup>1</sup> za účelom čo najefektívnejšie a najrýchlejšie zahašovať dát a overiť ich integritu. Blake3 nevyužíva sekvenčné spracovanie dát ako to je u konvenčných hašovacích funkcií ale svoju štruktúru buduje na základoch Merklového stromu [69]. Merklova stromová konštrukcia prináša niekoľko výhod ako napríklad neobmedzenú možnosť paraleлизmu pri spracovaní veľkých dát [70], overovanie integrity streamovanych dát, či overenie integrity dát pri ich stahovaní z viacerých zdrojov simultánne [71]. Rýchlosť hašovacej funkcie Blake3 značne ovplyvňuje jej štruktúru. Vďaka Merklovému stromu je funkcia Blake3 vysoko paraleлизovateľná a každé vlákno CPU jednotky môže spracovať svoj blok dát nezávisle. Jadro hašovacej funkcie Blake3 je špeciálne navrhnuté pre podporu vektorizovaných SIMD inštrukcií, čo má za následok zvýšenie rýchlosťi. Autori Blaku3 dbali aj na podporu efektívnych výpočtov realizovaných na rôznych menších 32-bitových platformách ale aj bežných 64-bitových platformách. Teda efektívnosť spracovania dát je zachovaná bez ohľadu na typ architektúry. Funkcia Blake3, kvôli jej schopnosti rýchleho hašovania dát, nie je vhodná pre uchovávanie hesiel v databázových systémoch práve.

### 3.1 Merklova hašovacia stromová štruktúra

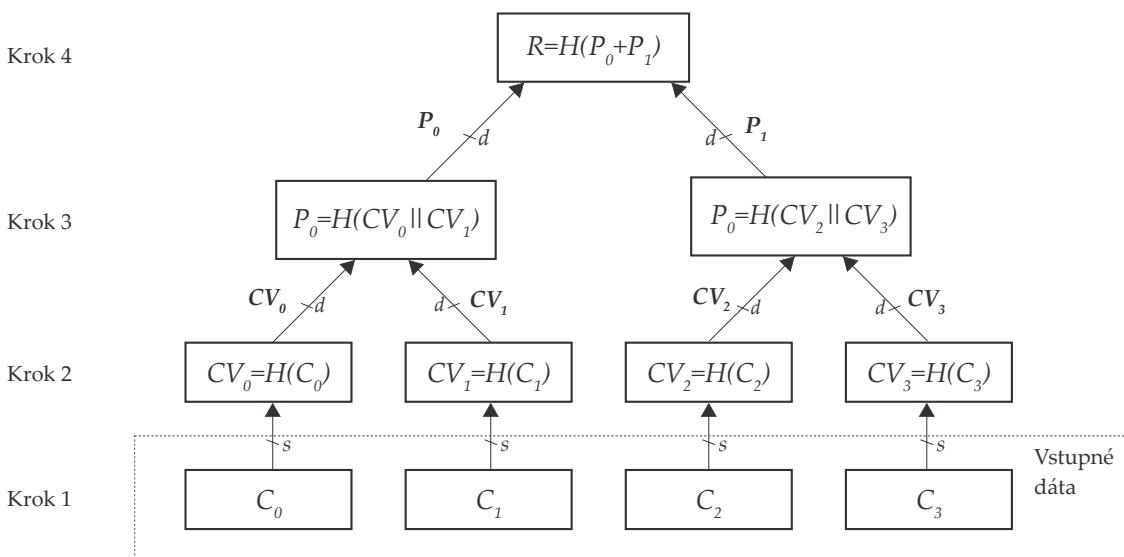
Merklov hašovaci strom je hašovacia konštrukcia vynájdená Ralphom Merklokom[72], ktorá vykazuje výhodne vlastnosti pre efektívny paraleлизovateľný výpočet integrity dát [73]. Ide o binárnu stromovú štruktúru, ktorej listy reprezentujú bloky vstupných dát  $C_i$  s veľkosťou  $s$  a každý rodičovský vrchol je odvodený od jeho dvoch potomkov. Na Obr. 3.2 môžeme vidieť príklad realizácie Merklového hašova-

<sup>1</sup>Tvorcovia Blake3: Jack O'Connor, Jean-Philippe Aumasson, Samuel Neves a Zooko Wilcox-O'Hearn

cieho stromu.

Vo všeobecnosti môžeme realizáciu Merklového stromu opísať v niekoľkých krokoch:

1. Rozdelenie vstupných dát do blokov  $C_i$ .
2. Nezávislé hašovanie blokov dát  $C_i$ .
3. Tvorba a hašovanie rodičovských uzlov  $P$ .
4. Hašovanie koreňa stromu  $R$ .



Obr. 3.2: Merklova stromova hašovacia konštrukcia

### 3.1.1 Rozdelenie vstupných dát na segmenty $C_i$

Vstupné dátá rozdelíme do blokov dát  $C_i$  o veľkosti  $s$ . Tieto bloky dát budeme označovať ako segmenty. V niektorých iných literatúrach môžu byť segmenty označované aj ako chunky (kúsky). Z Obr. 3.2 je vidno, že vstupné dátá sú rozdelné do štyroch rovnako veľkých blokov  $C_0, C_1, C_2, C_3$ . Veľkosť týchto blokov resp. segmentov sa môže v každej implementácii Merklovej hašovacej konštrukcie lísiť. Existujú určité hraničné prípady, kedy môže mať zlý výber veľkosti segmentu negatívne dôsledky pre efektivitu Merklovej štruktúry. J.Chapweske vo svojej práci [74]

uvádza, že z hľadiska efektívneho spracovania dát je veľmi dôležité voliť vhodnú velkosť segmentu  $C_i$ .

Ak je velkosť segmentu väčšia alebo rovná veľkosti vstupných dát, hašovacia štruktúra stráca svoje výhody stromovej štruktúry a proces hašovania je rovnaký ako pri konvenčnom hašovaní celého súboru. Teda ak veľkosť vstupných dát  $n$  je menšia alebo rovná veľkosti segmentu  $s$ , spracovávali by sme iba jeden blok dát a to konvenčným spôsobom, ktorý je naznačený v úvode tejto kapitoly.

Ak je velkosť segmentu rovnaká ako veľkosť výstupu z hašovacej funkcie  $H()$ , teda kód hašovacej funkcie, ktorá spracováva dané segmenty viď. kap. 3.1.2, celková veľkosť hašovaných dát by mohla byť rovná až dvojnásobku veľkosti vstupu, pretože je potrebné hašovať nie len listy, ale aj príslušné rodičovské vrcholy.

Pre optimalizáciu Merklovej hašovacej stromovej štruktúry možno odvodíť záver, že veľkosť segmentu  $s$  by mala splňať základne požiadavky vyjadrené vzťahom 3.1

$$n > s > d. \quad (3.1)$$

Pričom  $n$  je veľkosť bloku vstupných dát,  $d$  predstavuje veľkosť hašovacieho kódu použitej hašovacej funkcie a  $s$  je veľkosť segmentu. Odporúčaná veľkosť segmentu pre viaceré aplikačné použitia, vrátane hašovacej funkcie Blake3, je 1024 bajtov [74].

### 3.1.2 Nezávislé hašovanie segmentov $C_i$

V podkapitole 3.1.1 sme si opísali požiadavky potrebné pre optimálne rozdelenie vstupných dát do segmentov. Druhým krokom je spracovanie týchto segmentov  $C_i$ . Na každý segment sa aplikuje hašovacia funkcia  $H()$ . V praxi sa volí kvalitná a bezpečná hašovacia funkcia napr. niektorá z rodiny SHA-2. Hašovanie bloku prebehne klasickým spôsobom a výstupom z hašovacej funkcie  $H()$  je zretezovacia hodnota (chaining value) v binárnom strome  $CV_i$  (ďalej len zretezovacia hodnota).

Z Obr. 3.2 je zrejmé, že segment tvorí vstup pre hašovaciu funkciu  $H()$ . Teda segment  $C_0$  je vstupom pre funkciu  $H()$  a výstupom tejto funkcie je zreťazovacia hodnota  $CV_0$ .

### 3.1.3 Tvorba a hašovanie rodičovských uzlov $P$

V druhom kroku sme opísali princíp hašovania segmentov pomocou hašovacej funkcie  $H()$ , čo viedlo k získaniu zreťazovacích hodnôt. V tejto podkapitole opíšeme akým spôsobom vznikajú rodičovské uzly a ako ich spracúvame. Každý rodičovský uzol má práve dvoch potomkov a to ľavého potomka a pravého potomka. Teda každý rodičovský uzol pozostáva práve z dvoch hodnôt a to zo zratazovacej hodnoty ľavého potomka a zratazovacej hodnoty pravého potomka. Na Obr. 3.2 je vidieť, že rodičovský uzol  $P_0$  pozostáva z jeho ľavého potomka  $C_0$  a pravého potomka  $C_1$ , konkrétnie z ich zreťazovacích hodnôt  $CV_0$  a  $CV_1$ . Hašovaním rodičovského uzla získavame opäť zreťazovaciu hodnotu, ktorá sa stáva jedným zo vstupov svojho nadriadeného rodičovského uzla. Takéto hierarchické spracovávanie uzlov, smerom od listov ku koreňu, vykonávame až kým sa nedostaneme ku koreňu binárneho stromu.

### 3.1.4 Hašovanie koreňa stromu

Vo všeobecnosti sa hašovanie koreňa stromu realizuje rovnakým spôsobom ako hašovanie rodičovských uzlov. Na Obr. 3.2 môžeme vidieť, že koreň stromu  $R$  má dvoch potomkov  $P_0$  a  $P_1$ . Zreťazovacie hodnoty potomkov koreňa tvoria vstup pre hašovaciu funkciu  $H()$  a výstupom funkcie  $H()$  získavame hašovací kód Merklovej hašovacej štruktúry. Teda po aplikácii  $H(P_0 \parallel P_1)$  získavame hašovací kód stromovej štruktúry.

Stromová hašovacia štruktúra poskytuje možnosť paralelného spracovania dát ale aj rôzne iné výhody ako napríklad overenie integrity konkrétneho bloku dát, čo nie je možné pri konvenčnej metóde hašovania, práve z dôvodu sekvenčného spracovávania blokov. Pri stromovej hašovacej konštrukcii, je možné overiť integritu

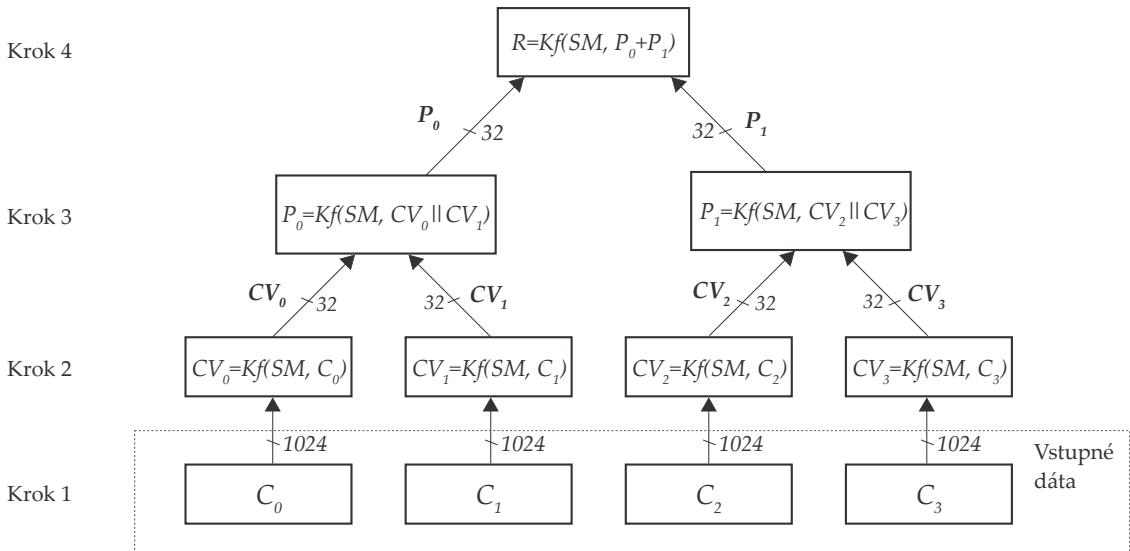
každej vetvy stromu, za predpokladu, že sú splnené určité požiadavky [74]. Teda je možné overiť integritu aktuálne získaných parciálnych dát, hoci strom ešte nie je plne dostupný. Táto vlastnosť poskytuje možnosti overovania integrity streamovaných súborov, či overovania integrity súborov pri ich stahovaní z viacerých zdrojov simultánne [71][75].

Merklové stromy tvoria jednu zo základných časti block-chainových technológií [76][77] a ich využitie možno nájsť u najväčších zastupiteľov kryptomien ako Bitcoin [78] alebo Ethereum [79][80].

## 3.2 Paralizovateľná hašovacia funkcia Blake3

Blake3 využíva Merklovú hašovaciu konštrukciu, čo je jedným z hlavných dôvodov rýchlosťi a efektívnosti tejto hašovacej funkcie. Zvyšok tejto kapitoly bude venovaný podrobnejšemu opisu funkcie Blake3 spolu s jej hašovacou stromovou štruktúrou.

Algoritmus hašovacej funkcie Blake3 spracúva údaje po blokoch s dĺžkou 1024 bajtov a produkuje hašovací kód s dĺžkou 64 bajtov, pričom je možné tento hašovací kód rozšíriť na ľubovoľnú veľkosť z rozsahu  $0 \leq l < 2^{64}$ . Maximálna veľkosť vstupných údajov je  $2^{64}$ . Podobne ako bolo opísané v podkapitole 3.1, aj pre hašovaciu funkciu Blake3 platí, že sa vstupné dáta rozdelia na segmenty  $C_i$  o veľkosti 1024 bajtov. Posledný segment môže byť aj menší no nikdy nie prázdný. V prípade, že je posledný segment menší bude mu pridaná vhodná výplňová schéma (padding). Tieto segmenty  $C_i$  tvoria listy binárneho hašovacieho stromu. Každý segment dát sa hašuje kompresnou funkciou  $Kf()$ , ktorej výsledkom je zretezovacia hodnota  $CV_i$  o veľkosti 32 bajtov. Princíp tvorby rodičovských uzlov je rovnaký ako v Merklovej stromovej štruktúre (kap. 3.1), teda každý rodičovský uzol je odvodený od jeho dvoch potomkov (pravý a ľavý potomok). Na ilustračnom Obr. 3.3 môžeme vidieť hierarchické spracovanie dát, kde rodičovský uzol  $P_0$  je tvorený zretezovacou hodnotou ľavého potomka  $CV_0$  a zretezovacou hodnotou pravého potomka  $CV_1$ . Takýmto hierarchickým spôsobom pokračujeme v spracovaní dát smerom od listov ku koreňu



Obr. 3.3: Stromová konštrukcia hašovacej funkcie Blake3

stromu. Na Obr. 3.3 je taktiež vidieť, že kompresná funkcia požaduje dva vstupné parametre. V prípade, že hašujeme list stromu, vystupné parametre kompresnej funkcie tvorí stavová matica  $SM$  s veľkosťou 64 bajtov a segment  $C_i$  o veľkosti 1024 bajtov. Ak hašujeme rodičovský uzol, vstupné parametre tvorí opäť stavová matica  $SM(64\text{ B})$  a vstupné dáta tvorené zreťazovacími hodnotami potomkov daného rodičovského uzla, teda hodnoty  $CV_l \parallel CV_p$ . Viac o kompresnej funkcií a stavovej matici nájdeme v podkapitole 3.2.1 a 3.2.2.

Aplikáciou kompresnej funkcie na koreň stromu, získame hašovací kód funkcie Blake3, ktorý je prednastavený na dĺžku 64 bajtov. Dĺžku hašovacieho kódu možno rozšíriť na ľubovoľný počet bajtov z rozsahu  $0 \leq l < 2^{64}$  a prispôsobiť naším požiadavkám.

### 3.2.1 Kompresná funkcia $Kf()$

Kompresná funkcia je funkcia, ktorá slúži na výpočet zreťazovacích hodnôt. Každá zreťazovacia hodnota slúži ako časť vstupných dát pre výpočet nadradeného rodičovského uzla. Príkladom môže byť zreťazovacia hodnota  $CV_0$ , ktorá reprezentuje prvú polovicu vstupných dát rodičovského uzla  $P_0$  (Obr. 3.3).

Kompresná funkcia  $Kf()$  požaduje dva vstupné parametre, a to stavovú maticu  $SM$  s veľkosťou 64 bajtov a blok vstupných dát  $M$  taktiež o veľkosti 64 bajtov.

Je nutné podotknúť, že listy a rodičovské uzly sa spracúvajú odlišným spôsobom. V prípade rodičovských uzlov je hodnota  $M$  rovná  $CV_l \parallel CV_p$ . Pre listy binárneho stromu platí, že sa list (1024 B) rozdelí na 64-bajtové subbloky  $M_0, \dots, M_{15}$ , ktoré sa následne spracúvajú sekvenčne. Viac o spracúvaní listov a rodičovských uzlov nájdeme v podkapitole 3.2.6.

Spracovanie rodičovského uzla možno vyjadriť rovnicou 3.2

$$CV_i = Kf(SM, M). \quad (3.2)$$

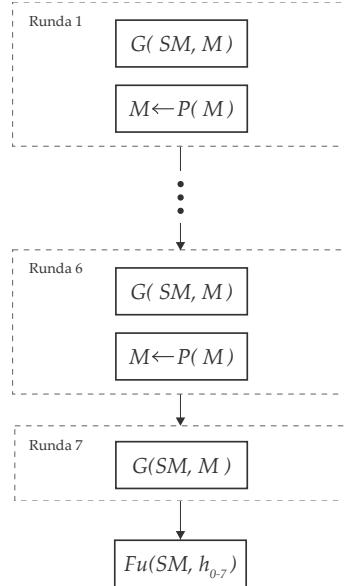
Pričom  $CV_i$  je zreteľazovacia hodnota daného rodičovského uzla a vstupné dátá  $M = CV_l \parallel CV_p$ . Spracovanie listu možno opísť vzťahom 3.3

$$CV_i = Kf(SM, M_n). \quad (3.3)$$

Pričom  $CV_i$  je zreteľazovacia hodnota daného listu a  $M_n$  je subblok listu, pričom  $n \in \{0, \dots, 15\}$ . Vo všeobecnosti budeme tieto vstupné dátá označovať ako  $M$ .

Výstup kompresnej funkcie tvorí reťazec o dĺžke 64 bajtov, ktorý je skrátený na požadovanú veľkosť 32 bajtov. Dĺžka reťazca sa neskrakuje iba v prípade, ak aplikujeme  $Kf()$  na koreň stromu.

Kompresná funkcia  $Kf()$  spracúva dátá v 7 rundách. Každá runda, okrem poslednej, je tvorená tzv.  $G$  funkciou a následnou permutáciou vstupných dát. V poslednej runde sa taktiež aplikuje  $G$  funkcia, no permutácia vstupných dát sa už nevykonáva. Konečným krokom kompresnej funkcie  $Kf()$  je transformácia stavovej matice označená ako  $Fu()$ . Transformácia stavovej matice je realizovaná podľa Tabuľky 3.4. Aplikáciou  $Fu()$  získame 64-bajtový výstup kompresnej funkcie. V prípade potreby úpravy výstupu  $Kf()$  pre požadovanú veľkosť zreteľazovacej hodnoty  $CV_i$  (32 B), sa realizuje skrátenie tohto výstupu. Skrátenie možno chápať ako zahodenie druhej polovice výstupu z  $Kf()$ . Teda skrátený výstup predstavuje iba prvých 32 bajtov z pôvodného 64-bajtového výstupu. Obr. 3.4 poskytuje grafické znázornenie realizácie siedmich rund kompresnej funkcie  $Kf()$ , kde  $SM$  je stavová matica (64 B),  $M$  je blok vstupných dát (64 B), ktorý v prípade rodičovského uzla pred-



Obr. 3.4: Bloková schéma kompresnej funkcie  $Kf()$

stavuje hodnotu  $CV_l \parallel CV_p$  a v prípade listu sú to bloky  $M_{0-15}$ .  $G()$  predstavuje  $G$  funkciu a  $P()$  reprezentuje permutáciu vstupných dát podľa Tabuľky 3.3. Posledným krokom kompresnej funkcie je transformácia stavovej matice, označená ako  $Fu()$ , podľa Tabuľky 3.4.

### 3.2.2 G funkcia

V každej runde sa vykoná  $G$  funkcia, ktorej vstupný parameter  $SM$  reprezentuje stavovú maticu a  $M$  predstavuje blok vstupných dát.  $G$  funkcia má za úlohu zmeniť stav matice v závislosti od jej aktuálneho stavu a bloku vstupných dát. Stavovú maticu  $SM$  (64 B) možno zapísat v podobe šestnástich 32-bitových slov. Tieto slová možno vyjadriť v matici  $4 \times 4$  následovne:

Matica vľavo symbolizuje inicializáciu stavovej matice  $SM$  a matica vpravo predstavuje aliasy ( $v_{0-15}$ ) parametrov stavovej matice. Inicializácia  $SM$  prebieha na začiatku spracovávania každého bloku dát  $M$  (pre rodičovské uzly je blok dát  $M = CV_l \parallel CV_p$ , v prípade listov vstupné dát M predstavujú bloky  $M_0, \dots, M_{15}$ ), teda pri každom volaní kompresnej funkcie  $Kf()$ . Hodnoty  $h_{0-7}$  predstavujú vstupné zretezovacie hodnoty, ktoré sa v prípade spracovania prvého bloku listu (blok  $M_0$ ) nastavia na korešpondujúce inicializačné vektory  $IV_{0-7}$ , ktoré sú zobrazené v Ta-

$$\begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 & h_7 \\ IV_0 & IV_1 & IV_2 & IV_3 \\ t_0 & t_1 & b & d \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} v_0 & v_1 & v_2 & v_3 \\ v_4 & v_5 & v_6 & v_7 \\ v_8 & v_9 & v_{10} & v_{11} \\ v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{15} \end{pmatrix}$$

Obr. 3.5: Stavová matica  $4 \times 4$ , obsahujúca šestnásťich 32-bitových slov, ktoré možno jednotne vyjadriť aliasmi  $v_{0-15}$

bulke 3.2. Pri spracúvaní nasledujúcich blokov listu (bloky  $M_1, \dots, M_{15}$ ), sú parametre  $h_{0-7}$  nastavené na hodnoty zreťazovacích hodnôt predchádzajúcich blokov vid. podkapitola 3.2.6. Napríklad pri spracúvaní druhého bloku listu (blok  $M_1$ ), teda  $Kf(SM, M_1)$ , sú parametre  $h_{0-7}$  tvorené skráteným výstupom (prvých 32 bajtov zo 64-bajtového výstupu) z kompresnej funkcie predchádzajúceho bloku  $Kf(SM, M_0)$ . V prípade rodičovských uzlov sú parametre  $h_{0-7}$  nastavené v závislosti od zvoleného módu funkcie Blake3 vid. podkapitola 3.2.6.

Parameter  $t_0$  (32 bitov) a  $t_1$  (32 bitov) tvorí 64-bitový parameter  $T = (t_0, t_1)$ , ktorý slúži na dva účely, a to na indexáciu listov a ako premenlivý prvok pri rozšírení hašovacieho kódu funkcie Blake3. Indexácia listov spočíva v jednoduchej inkrementácii parametra  $T$ , teda pri spracúvaní všetkých 64-bajtových blokov prvého listu je tento parameter nastavený na hodnotu  $T=0$ , pri spracovaní všetkých blokov druhého listu je  $T=1$  a pod. V prípade rozšírenia hašovacieho kódu funkcie Blake3, ktorého veľkosť môže byť ľubovoľná z rozsahu  $0 \leq l < 2^{64}$ , slúži parameter  $T$  ako jediná premenlivá hodnota. Rozšírenie sa vykonáva opakovanej aplikáciou kompresnej funkcie  $Kf()$  na koreň stromu, pričom každá takáto aplikácia  $Kf()$ , sa lísi iba parametrom  $T$ . Inkrementácia parametra  $T$  zabezpečí, že výsledkom každej aplikácie  $Kf()$  na koreň stromu získame inú hodnotu reťazca. Spojením (concatenation) všetkých výstupných reťazcov získame výsledný rozšírený hašovací kód funkcie Blake3. Viac o rozšírenom výstupe je možné nájsť v dokumentácii [64]. V prípade rodičovských uzlov je parameter  $T$  vždy nastavený na hodnotu 0.

Parameter  $b$  označuje veľkosť spracovaného bloku dát  $M$ . Hodnota  $b$  je nastavená vždy na hodnotu 64. Jedinú výnimku predstavuje posledný blok v poslednom liste binárneho stromu, keďže jeho veľkosť môže byť aj menšia. Parameter  $d$  slúži

na bitovú separáciu domén, čo možno chápať ako nastavenie špeciálnych vlastností daného bloku  $M$ . Modifikácia parametra  $d$  sa realizuje nastavením spodných 7 bitov podľa Tabuľky 3.5. Napríklad prvý blok v liste by mal obsahovať informáciu o tom, že je zároveň začiatkom listu. Podľa Tabuľky 3.5 možno túto informáciu informáciu vyjadriť ako  $CHUNK\_START$ . V takomto prípade je hodnota  $d$  nastavená na  $d=1$ . Je zrejmé, že blok dát  $M$  môže obsahovať viacero vlastností, napr. koreň stromu môže byť zároveň aj posledný rodičovským uzlom, teda je potrebné nastaviť informáciu  $PARENT$  a  $ROOT$ . Teda  $d = 2^2 + 2^3$ , čo je 12 resp.  $\dots 000\ 1100$  binárne, zapísané na spodných 7 bitoch.

Matica vpravo (vid. Obr. 3.5) predstavuje aliasy hodnôt stavovej matice (matice vľavo), ktoré slúžia na jednotný opis parametrov stavovej matice. Tieto aliasy budeme využívať v opise  $G$  funkcie.

Opis jednotlivých hodnôt spolu s ich veľkosťou v bitoch nájdeme v Tabuľke 3.1. Blok vstupných dát  $M$  možno taktiež zapísať v tvare šestnásťich 32-bitových slov  $m_0, \dots, m_{15}$ .

Tabuľka 3.1: Premenné stavovej matice  $SM$

Prehľad premenných v matici 4x4.		
Premenná	Veľkosť v bitoch	Popis
$h_{0-7}$	256 ( $8 \times 32$ )	Vstupné zretezovacie hodnoty
$m_{0-15}$	512 ( $16 \times 32$ )	Vstupné dátá
$T = t_0, t_1$	64 ( $32 + 32$ )	Počítadlo segmentov (chunks)
b	32	Počet bajtov v bloku
d	32	Bity slúžiace na bitovu separáciu domén
$IV_i$	32	Inicializačný vektor

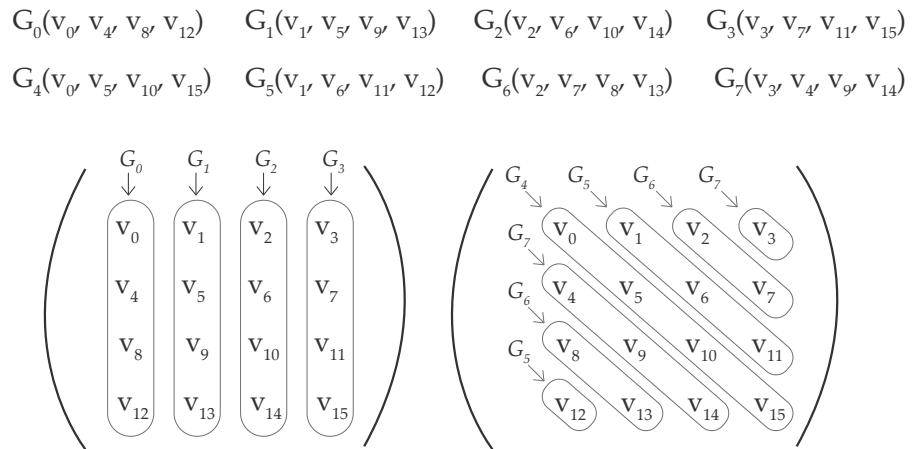
Blake3 využíva rovnakú sadu inicializačných vektorov ako jeden z jeho predchodcov Blake2s, hodnoty  $IV$  je možné nájsť v Tabuľke 3.2.

Po inicializácii stavovej matice  $SM$  nasleduje jej spracovanie spolu s blokom dát  $M$ , v siedmich rundách kompresnej funkcie a finálnej transformácii  $Fu()$ . Pri spracovaní dát v jednotlivých rundách budeme týchto šestnásť 32-bitových slov stavovej matice označovať aliasmi, teda parametrami  $v_0, \dots, v_{15}$ . Blok dát  $M$  môžeme taktiež zapísať v podobe šestnásť 32-bitových slov  $m_0, \dots, m_{15}$ .

Tabuľka 3.2: Inicializačné vektory pre Blake3

$IV_0$	0x6A09E667
$IV_1$	0xBB67AE85
$IV_2$	0x3C6EF372
$IV_3$	0xA54FF53A
$IV_4$	0x510E527F
$IV_5$	0x9B05688C
$IV_6$	0x1F83D9AB
$IV_7$	0x5BE0CD19

$G$  funkcia pozostáva z 8 operácií  $G_{0-7}$  a je aplikovaná na každý stĺpec matice  $4 \times 4$  a potom aj na každú diagonálu. Spracovacie stĺpcov a diagonál prebieha v 8 operáciách  $G_{0-7}$  paralelne. Na Obr. 3.6 môžeme vidieť grafické znázornenie ale aj matematické vyjadrenie týchto  $G$  operácií.



Obr. 3.6: Grafické znázornenie a matematické vyjadrenie realizácie  $G$  operácií

Každá operácia označovaná ako  $G_k(a, b, c, d, M)$ , kde  $k \in \{0, \dots, 7\}$  a parametre  $a, b, c, d$  predstavujú slová matice vyjadrené aliasmi  $(v_0, \dots, v_{15})$ , je definovaná Algoritmom 1. Napríklad operácia  $G_0$  berie na vstup parametre  $v_0, v_4, v_8, v_{12}$ , teda  $G_0(v_0, v_4, v_8, v_{12}, M)$ . Parameter  $M$  predstavuje blok vstupných dát, ktorý je možno zapísat ako šestnásť 32-bitových slov  $m_0, \dots, m_{15}$ . Symbol  $\oplus$  predstavuje operáciu XOR,  $+$  je znakom sčítania modulo  $2^{32}$  a  $w \ggg l$  predstavuje rotáciu slova  $w$  vpravo o  $l$  bitov.

Algoritmus 1 znázornuje sekvenčné vykonávanie operácie  $G_k(a, b, c, d, M)$ , kde

**Algoritmus 1** Implementácia jednotlivých operácií  $G_k(a, b, c, d, M)$

---

**Vstup:** Slová stavovej matice  $(a, b, c, d)$ , blok vstupných dát  $M = \{m_0, \dots, m_{15}\}$

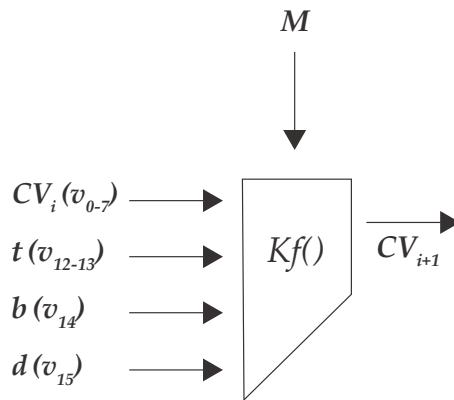
a index  $k \in \langle 0; 7 \rangle$ , pričom index  $k$  je zviazaný s indexom G operácie

**Výstup:** Modifikované slová stavovej matice  $(a, b, c, d)$

- 1:  $a \leftarrow a + b + m_{2k+0}$
  - 2:  $d \leftarrow (d \oplus a) \ggg 16$
  - 3:  $c \leftarrow c + d$
  - 4:  $b \leftarrow (b \oplus c) \ggg 12$
  - 5:  $a \leftarrow a + b + m_{2k+1}$
  - 6:  $d \leftarrow (d \oplus a) \ggg 8$
  - 7:  $c \leftarrow c + d$
  - 8:  $b \leftarrow (b \oplus c) \ggg 7$
- 

$k$  nadobúda hodnoty 0–7 a slová  $a, b, c, d$  predstavujú slová stavovej matice vyjadrené aliasmi  $v_0, \dots, v_{15}$ .  $M$  je blok vstupných dát o veľkosti 64 B, ktorý možno napísat ako  $m_0, \dots, m_{15}$ , čo predstavuje slová  $m_{2k+0}$  a  $m_{2k+1}$  v Algoritme 1, kde index  $k$  je zviazaný s indexom operácie  $G_k$  a može nadobúdať hodnoty  $k \in \{0, \dots, 7\}$ . Teda operácia  $G_0(a, b, c, d, M)$  pracuje so slovami  $m_{2.0+0}$  a  $m_{2.0+1}$  a pod. Každá operácia  $G_k()$  realizuje transformáciu štyroch vstupných slov  $a, b, c, d$  matice  $SM$ , na štyri výstupné slova  $a, b, c, d$ .

Obr. 3.7 ilustruje základný princíp spracovania bloku dát kompresnou funkciou, kde môžeme vidieť reprezentáciu vstupných parametrov kompresnej funkcie. Parameter  $M$  predstavuje blok vstupných dát a hodnoty  $CV_i, t, b, d$  predstavujú hodnoty stavovej matice. V zátvorkach pri jednotlivých hodnotách stavovej matice môžeme vidieť aj ich aliasy  $v_{0-15}$ . Všimnime si, že inicializačné vektory  $IV_{0-3}$ , teda slova  $v_{8-11}$  nie sú v Obr. 3.7 naznačené. Je to preto, že tieto hodnoty sú fixné a sú prítomne v každej aplikácii  $Kf()$ .



Obr. 3.7: Princíp spracovania bloku dát  $M$  kompresiou funkciou  $Kf()$

### 3.2.3 Paralelizmus s využitím SIMD inštrukcií

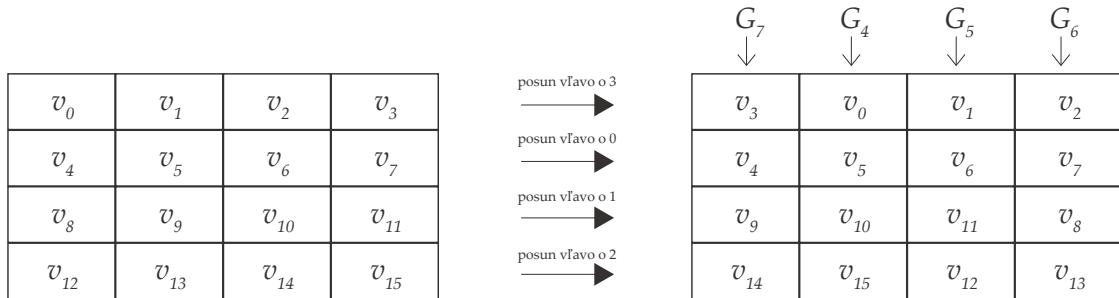
Funkcia Blake3 využíva niekoľko metód, ktorými je schopná zrýchliť proces hašovania. Jednou z týchto metód je využitie SIMD inštrukcií. Existujú 3 rôzne spôsoby využitia SIMD inštrukcii v hašovacej funkcií Blake3. Prvý spôsob je podobný ako u jeho predchodcu Blake2b, resp. Blake2s. Slová matice sa rozdelia po riadkoch do štyroch 128-bitových vektorov  $r_{0-3}$  následovne. Prvý vektor obsahuje slová  $v_{0-3}$ , druhý vektor obsahuje slová  $v_{4-7}$  a pod. Slová  $v_{0-15}$  predstavujú aliasy parametrov stavovej matice  $SM$ . Následne sa vykoná vektorizovaná  $G$  funkcia (ktorá pracuje s vektorovými inštrukciami) na všetkých 4 stĺpoch paralelne. To znamená, že operácie  $G_{0-3}$  (spracovanie stĺpcov) sa vykonajú naraz. Obr. 3.8 demonštruje spracovanie dát s využitím SIMD inštrukcií a to tak, že operácie  $G_{0-3}$  sa vykonávajú naraz, teda po riadkoch  $r_{0-3}$ . Napríklad riadok  $r_0$ , obsahuje aliasy  $v_{0-3}$ , ktoré predstavujú hodnoty  $a$  pre každú  $G_{0-3}(a, b, c, d)$  operáciu. S využitím SIMD inštrukcií dokážeme realizovať výpočet hodnôt  $a$  pre všetky operácie  $G_{0-3}$  naraz. V prvom riadku Algoritmu 1 môžeme vidieť výpočet hodnoty  $a$ , ktorý je možné aplikovať na celý riadok  $r_0$  (teda na hodnoty  $v_{0-3}$ , ktoré predstavujú hodnoty  $a$  v jednotlivých  $G_{0-3}$  operáciách) naraz. Podobne možno postupovať pri spracovaní riadku  $r_1$ , ktorého spracovanie sa realizuje v druhom riadku Algoritmu 1 (výpočet hodnoty  $d$ ) pre každú operáciu  $G_{0-3}$ . Takýmto spôsobom realizujeme výpočet všetkých operácií  $G_{0-3}$  s využitím SIMD inštrukcií. Po spracovaní stĺpcov následuje diagonalizácia vektorov, čo znamená, že sa vykoná vhodná rotácia vektorov tak, aby všetky slová z pôvodných diagonál ležali vhodne pod sebou. Diagonalizáciou dosiahneme stav,

kedy môžeme opäť použiť vektorizovanú  $G$  funkciu na jednotlivé stĺpce. Posledným krokom je inverzná rotácia vektorov do pôvodného stavu [81].

	$G_0$	$G_1$	$G_2$	$G_3$
$r_0 \rightarrow$	$v_0$	$v_1$	$v_2$	$v_3$
$r_3 \rightarrow$	$v_4$	$v_5$	$v_6$	$v_7$
$r_2 \rightarrow$	$v_8$	$v_9$	$v_{10}$	$v_{11}$
$r_1 \rightarrow$	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{14}$	$v_{15}$

Obr. 3.8: Paralelné spracovanie stĺpcov operáciami  $G_{0-3}$

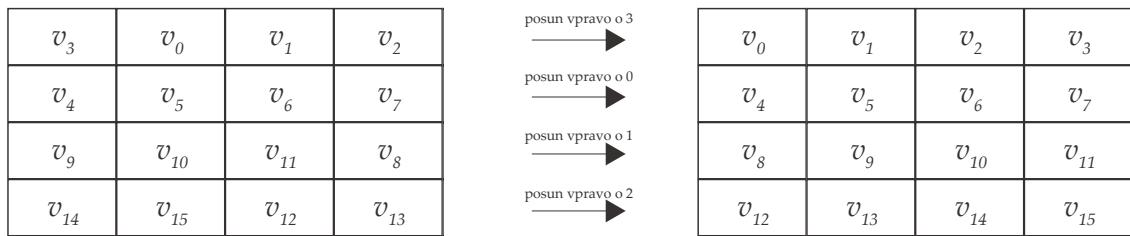
Obr. 3.8 naznačuje vektorizované spracovanie stĺpcov operáciami  $G_{0-3}$  paralelne.



	$G_7$	$G_4$	$G_5$	$G_6$
	$v_3$	$v_0$	$v_1$	$v_2$
	$v_4$	$v_5$	$v_6$	$v_7$
	$v_9$	$v_{10}$	$v_{11}$	$v_8$
	$v_{14}$	$v_{15}$	$v_{12}$	$v_{13}$

Obr. 3.9: Rotácia vektorov a následné paralelné spracovanie stĺpcov operáciami  $G_{4-7}$  operácií

Z Obr. 3.9 je vidno, že vhodnou rotáciou vektorov je možné opäť vykonať spracovanie stĺpcov, tentokrát pre diagonálnej stavovej matice  $SM$ . Teda je možné vykonať operácie  $G_{4-7}$  paralelne po stĺpcoch. Rotácia vľavo je aplikovaná na každý vektor následovne. Nultý vektor rotujeme o 3 miesta vľavo. Prvý vektor rotujeme o 0 miest vľavo resp. nerotujeme vôbec, druhý o 1 miesto vľavo a tretí o 2 miesta vľavo. Po diagonalizácii prebehne spracovanie stĺpcov paralelne.



	$v_3$	$v_0$	$v_1$	$v_2$
	$v_4$	$v_5$	$v_6$	$v_7$
	$v_9$	$v_{10}$	$v_{11}$	$v_8$
	$v_{14}$	$v_{15}$	$v_{12}$	$v_{13}$

	$v_0$	$v_1$	$v_2$	$v_3$
	$v_4$	$v_5$	$v_6$	$v_7$
	$v_8$	$v_9$	$v_{10}$	$v_{11}$
	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{14}$	$v_{15}$

Obr. 3.10: Inverzná rotácia vektorov

Posledným krokom je úprava vektorov do pôvodného stavu s využitím inverznej rotácie. Z Obr. 3.10. je vidno, že inverzná rotácia (vpravo) sa aplikuje na každý vektor následovne. Nultý vektor rotujeme o 3 miesta vpravo. Prvý vektor rotujeme o 0 miest vpravo resp. nerotujeme vôbec, druhý o 1 miesto vpravo a tretí o 2 miesta vpravo.

Takéto využitie SIMD inštrukcií je vhodné aplikovať na malé vstupy. V prípade veľkého množstva vstupných dát je vhodné využiť niektorý z ďalších dvoch spôsobov využitia SIMD inštrukcií.

Prvým spôsobom využitia SIMD inštrukcií pre veľé množstvo vstupných dát je metóda, ktorá je veľmi podobná spôsobu využitia SIMD inštrukcií v hašovacej funkcií Blake2bp resp. Blake2sp. V tejto metóde sa viacero listov spracúva paralelne s využitím vektorov a to tak, že každý vektor obsahuje jedno 32-bitové slovo stavovej matice každého listu. Teda prvý vektor bude obsahovať slová stavovej matice  $v_0$  (čo je alias prvého slova stavovej matice) z každého stavu aktuálne spracúvaných listov. Druhý vektor bude obsahovať slova  $v_1$ , tretí  $v_2$  a pod. Šírku takto vytvorených, celkovo 16 vektorov, určuje počet aktuálne spracúvaných listov. Teda ak paralelne spracúvame 4 listy, šírka vektorov bude rovná 128 bitom ( $4 \times 32$  bitov). Následne sa vykoná  $G$  funkcia, ktorá spracúva dáta po jednom stĺpci resp. diagonále naraz, pre všetky stavy  $SM$  v každom liste, bez potreby diagonalizácie vektorov. Výhodou tohto spôsobu využitia SIMD inštrukcií je aj možnosť využitia inštrukčných sad ako AVX2 a AVX-512 [82][83][84].

Druhý spôsob spracovania dát pomocou SIMD inštrukcií pre väčšie množstvo vstupných dát je veľmi podobný prvému spôsobu (pre spracovanie malých vstupov), kde štvor-slovné (napr.  $v_0, v_1, v_2, v_3$ ) riadky matice  $SM$  tvoria jeden zo 4 vektorov. V tomto prípade je možné využiť väčšie vektory, ktoré budú obsahovať viacero takýchto štvor-slovných riadkov, pričom každy z riadkov patrí inej stavovej matici  $SM$ . Ďalej je princíp rovnaký ako v prvej metóde, t.j. paralelne spracovanie stlpov a následne vykonaná diagonalizácia vektorov. Po diagonalizácii vektorov sa opäť vykoná paralelne spracovanie stlpov a úprava vektorov do pôvodného stavu s využitím inverznej rotácie. Hoci je tento spôsob spracúvania dát v hašovacej funkcií Blake3 zriedkavý, jeho využitie môže byť vhodné pre rôzne mikroarchitektúry [64].

Viac informácií o paralelizme a využití SIMD inštrukcií je možné nájsť v dokumentácii hašovacej funkcie Blake3 [64].

### 3.2.4 Permutácia $P()$

Permutácia bloku vstupných dát  $M$  (64 B), zapísaných ako šestnásť 32 bitových slov  $m_0, \dots, m_{15}$ , prebieha v každej runde (okrem poslednej) a je realizovaná podľa Tabuľky 3.3. Permutácia sa vykonáva na slovách  $m_0, \dots, m_{15}$ , kde indexy slov  $m_0, \dots, m_{15}$  reprezentujú hodnoty 0–15 z Tabuľky 3.3.

Tabuľka 3.3: Permutácia bloku dát  $P(M)$ , pričom  $M = m_0, \dots, m_{15}$

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	6	3	10	7	0	4	13	1	11	12	5	9	14	15	8

### 3.2.5 Finálna transformácia stavovej matice $Fu()$

Posledným krokom kompresnej funkcie  $Kf()$  je transformácia stavovej matice  $SM$  podľa Tabuľky 3.4, kde parametre  $v'_{0-15}$  predstavuju aliasy stavovej matice po poslednej aplikácii  $G$  funkcie (po 7 runde) a  $h_{0-7}$  predstavuje zretežovacie hodnoty. Teda  $h_{0-7}$  predstavuje prvých 8 slov z pôvodne inicializovanej  $SM$  pre daný blok (prvých 8 slov matice, ktorých hodnoty zodpovedajú hodnotám matice v prvej runde).

Hodnoty  $h'_{0-15}$ , ktoré získame finálnou transformáciou stavovej matice  $SM$ , predstavujú 64-bajtový výstup kompresnej funkcie  $Kf()$ .

### 3.2.6 Spracovanie uzlov a listov

Merklov hašovací strom funkcie Blake3 pozostáva z dvoch hlavných prvkov, a to listov s veľkosťou 1024 bajtov a rodičovských uzlov s veľkosťou 64 bajtov.

Tabuľka 3.4: Finálna transformácia  $Fu()$

$h'_0 \leftarrow v'_0 \oplus v'_8$	$h'_8 \leftarrow v'_8 \oplus h_0$
$h'_1 \leftarrow v'_1 \oplus v'_9$	$h'_9 \leftarrow v'_9 \oplus h_1$
$h'_2 \leftarrow v'_2 \oplus v'_{10}$	$h'_{10} \leftarrow v'_{10} \oplus h_2$
$h'_3 \leftarrow v'_3 \oplus v'_{11}$	$h'_{11} \leftarrow v'_{11} \oplus h_3$
$h'_4 \leftarrow v'_4 \oplus v'_{12}$	$h'_{12} \leftarrow v'_{12} \oplus h_4$
$h'_5 \leftarrow v'_5 \oplus v'_{13}$	$h'_{13} \leftarrow v'_{13} \oplus h_5$
$h'_6 \leftarrow v'_6 \oplus v'_{14}$	$h'_{14} \leftarrow v'_{14} \oplus h_6$
$h'_7 \leftarrow v'_7 \oplus v'_{15}$	$h'_{15} \leftarrow v'_{15} \oplus h_7$

Spracovanie týchto stavebných prvkov hašovacieho stromu Blake3 viedie k získaniu zretazovacej hodnoty, potrebnej pre budovanie nadradených rodičovských uzlov. Hoci zámer spracovania oboch prvkov je rovnaký, realizacia je odlišná.

### Spracovanie uzlov

Spracovanie rodičovského uzla prebieha jednoduchou aplikáciou kompresnej funkcie. Vstupnými parametrami  $Kf()$  sú stavova matica  $SM$  a blok dát  $M$  pričom  $M = CV_l \parallel CV_p$ , kde  $CV_l$  je zretazovacia hodnota ľavého potomka a  $CV_p$  je zretazovacia hodnota pravého potomka. Výsledkom spracovania rodičovského uzla je 32-bajtová zretazovacia hodnota.

Stavova matica rodičovského uzla môže vyzerať takto:

$$\begin{pmatrix} k_0 & k_1 & k_2 & k_3 \\ k_4 & k_5 & k_6 & k_7 \\ IV_0 & IV_1 & IV_2 & IV_3 \\ t_0 & t_1 & b & d \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} v_0 & v_1 & v_2 & v_3 \\ v_4 & v_5 & v_6 & v_7 \\ v_8 & v_9 & v_{10} & v_{11} \\ v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{15} \end{pmatrix}$$

Blake3 disponuje 3 hašovacími modmi  $hash(input)$ ,  $keyed\_hash(key, input)$  a  $derive\_key(context, key\_material)$ . Základný mód  $hash(input)$  berie na vstup dátu

o ľubovoľnej veľkosti z rozsahu  $0 \leq l < 2^{64}$  bajtov. Mód *keyed\_hash(key, input)* berie na vstup okrem vstupných dát aj 256-bitový kľúč  $k_{0-7}$ , ktorého prítomnosť ovplyvní inicializáciu stavovej matice  $SM$  a teda hašovací kód je závislý od daného kľúča. Hašovací mód *derive\_key(context, key\_material)* berie na vstup reťazec (*context*) a klúčový materiál, oba vstupy môžu byť ľubovoľnej veľkosti z rozsahu rozsahu  $0 \leq l < 2^{64}$  bajtov. Hašovací mód *derive\_key* pracuje v 2 fázach. V prvej fáze sa hašuje reťazec (*context*) a v druhej fáze sa hašuje klúčový materiál v závislosti od výstupu hašovacieho kódu z prvej fázy. Každý z týchto módov (okrem základného *hash(input)*) pridá parametru  $d$  (v stavovej matici) svoju špecifickú informáciu (flag), ktorá bude nastavená pri každom spracovaní bloku  $M$  podľa Tabuľky 3.5. Veľkosť hašovacieho kódu funkcie Blake3 môže byť ľubovoľná z rozsahu  $0 \leq l < 2^{64}$  bajtov, čo platí pre všetky módy, avšak pri výstupe menšom ako je 256 bitov je nutné zvažovať isté bezpečnostné riziká [85][86].

V prípade výberu módu, ktorý na vstup berie kľúč (*keyed\_hash*) sú hodnoty  $k_{0-7}$  rovné danému kľúču. Ak sme zvolili základný hašovací mód *hash(input)*, hodnoty  $k_{0-7}$  pozostávajú z korešpondujúcich inicializačných vektorov  $IV_{0-7}$ . V prípade módu *derive\_key* sa hašovanie realizuje dvakrát (v dvoch fázach). V prvej fáze hodnoty stavovej matice  $k_{0-7}$  pozostávajú z korešpondujúcich inicializačných vektorov  $IV_{0-7}$ , no v druhej fáze (pri spracovaní klúčového materiálu) tvoria hodnoty  $k_{0-7}$  prvých 256 bitov z výstupu prvej fázy. Hodnoty  $k_{0-7}$  sa nastavujú vždy pri inicializácii stavovej matice  $SM$ , teda v každom rodičovskom prvku ale aj pri spracovaní prvého bloku listu  $M_0$ .

Parametre  $t0, t1$  a  $b$  sú pre rodičovský uzol fixne dané  $t_0 = t_1 = 0$ . Hodnota veľkosti vstupného bloku  $b$  je u rodičovského uzla vždy nastavená na 64. Hodnota  $d$  (32 bitov), slúžiaca na bitovú separáciu domén je vhodne nastavená podľa Tabuľky 3.5, pričom separačné bity sa nastavujú len na spodných 7 bitoch.

Je zrejmé, že hodnota  $d$  može nadobúdať rôzne hodnoty v závislosti od významu spracúvaných údajov. Na príklade 3.4 možno vidieť nastavenie hodnoty  $d$  pre koreň hašovacieho stromu podľa Tabuľky 3.5, ktorý je zároveň aj rodičovským uzlom,

Tabuľka 3.5: Tabuľka hodnôt premennej d

Flag name	hodnota
<i>CHUNK_START</i>	$2^0$
<i>CHUNK_END</i>	$2^1$
<i>PARENT</i>	$2^2$
<i>ROOT</i>	$2^3$
<i>KEYED_HASH</i>	$2^4$
<i>DERIVE_KEY_CONTEXT</i>	$2^5$
<i>DERIVE_KEY_MATERIAL</i>	$2^6$

$$d = 2^2 + 2^3. \quad (3.4)$$

Pri spracúvaní koreňového uzla je hodnota  $d$  obohatená o hodnotu  $ROOT$  teda  $2^3$  čo symbolizuje, že výstupom kompresnej funkcie nie je 32-bajtový refazec ale 64. Výstupný refazec kompresnej funkcie, aplikovanej na koreň stromu, je hašovacím kódom funkcie Blake3 a jeho veľkosť možno rozšíriť na ľubovoľnú dĺžku z rozsahu  $0 \leq l < 2^{64}$  [64].

### Spracovanie listov

Listy hašovacieho stromu Blake3 sa kvôli svojej veľkosti musia spracovávať inak ako rodičovské uzly. Spracovanie listu prebieha následovne:

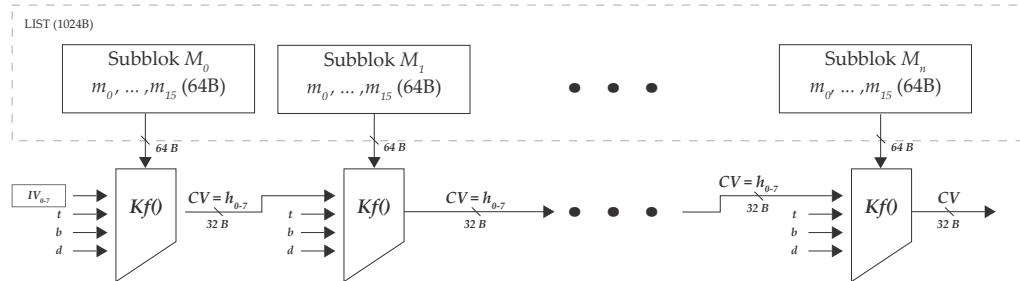
1. Blok dát o veľkosti  $1024 B$  sa rozdelí na 64-bajtové subbloky  $M_n$ . Posledný list stromu môže byť aj menší ako  $1024 B$  no nikdy nie prázdný. Napríklad ak má posledný list stromu  $667 B$ , bude rozdelený na 10 subblokov ( $10 \times 64 B = 640 B$ ) a k zvyšným  $27 B$  sa pridá výplňová schéma (padding) v podobe nulových bajtov, čím vznikne celkovo jedenásť 64-bajtových subblokov.
2. Každý z týchto subblokov  $M_n$ , kde  $n \in < 0; 15 >$  možno zapísat ako šestnásť 32-bitových slov  $m_{0-15}$ . Subblok  $M_n$  predstavuje vstupné dátá kompresnej funkcie  $Kf()$ . Ďalším parametrom  $Kf()$  je stavová matica  $SM$ , ktorá je vhodne upravená pre spracovanie daného bloku dát vid. Tabuľka 3.1 a Tabuľka 3.5.

Matica  $SM$  sa inicializuje na začiatku spracovania každého bloku  $M_n$ . Pri spracovaní prvého bloku listu  $M_0$  sa hodnoty  $h_{0-7}$  nastavia na korešpondujúce inicializačné vektory  $IV_{0-7}$ .

$$\begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 & h_7 \\ IV_0 & IV_1 & IV_2 & IV_3 \\ t_0 & t_1 & b & d \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} v_0 & v_1 & v_2 & v_3 \\ v_4 & v_5 & v_6 & v_7 \\ v_8 & v_9 & v_{10} & v_{11} \\ v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{15} \end{pmatrix}$$

Počítadlo  $T = (t_0, t_1)$  slúži ako index listu, teda všetky subbloky v prvom liste budú spracované indexom  $T=0$ , v druhom liste  $T=1$  a pod.

3. Pre každý prvý subblock listu platí, že hodnota prvku  $d$  stavovej matice bude obsahovať informáciu  $CHUNK\_START$  ( $2^0$ ) a každý posledný subblock listu  $CHUNK\_END$  ( $2^1$ ).
4. Subbloky sa spracúvajú sekvenčným spôsobom, t.j. s určitou vzájomnou závislosťou. Výstup kompresnej funkcie pri spracovaní  $n$ -teho subblocku (subblock  $M_n$ ) sa stáva vstupom pre spracovanie nasledujúceho subblocku  $M_{n+1}$ . Inak povedané, výstup z  $Kf(SM, M_n)$  tvorí zreťazovaciu hodnotu  $h_{0-7}$  stavovej matice nasledujúceho subblocku viď. obr.3.11.



Obr. 3.11: Sekvenčné spracovanie listu binárneho stromu v hašovacej funkcií Blake3

Bloková schéma na Obr. 3.11 naznačuje sekvenčný proces spracovania subblockov v liste. Všimnime si, že výstup z kompresnej funkcie  $Kf()$ , teda zreťazovacia hodnota subblocku, tvorí jeden zo vstupov  $Kf()$  následujúceho subblocku. Z tejto blokovej schémy je zrejmé, že zreťazovaciu hodnotu (slova stavovej matice  $h_{0-7}$ ) prvého subblocku v liste ( $M_0$ ) tvoria inicializačné vektory  $IV_{0-7}$ .

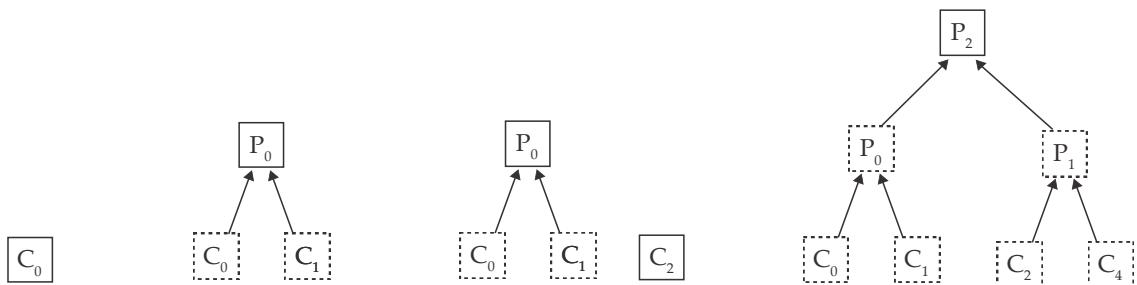
### 3.2.7 Blake3 strom

Princípom stromovej hašovacej konštrukcie je hierarchické získavanie zretezovacích hodnôt prvkov daného stromu. Zretezovacie hodnoty daných prvkov tvoria základ pre výpočet zretezovacích hodnôt ich nadriadeného rodičovského uzla. Výsledkom aplikácie kompresnej funkcie  $Kf()$  na koreň stromu je hašovací kód funkcie Blake3.

Štruktúru binárneho stromu v hašovacej funkcií Blake3 určujú tieto pravidlá:

1. Každý ľavý podstrom je úplný binárny strom. Všetký listy ľavého podstromu sú v rovnakej hĺbke a počet týchto listov je mocninou čísla 2.
2. Každý ľavý podstrom obsahuje rovnaký alebo väčší počet listov ako zodpovedajúci pravý podstrom.

Obr. 3.12 demonštruje proces formovania hašovacieho stromu postupným spracúvaním listov na základe pravidiel uvedených vyššie. Každý z týchto listov  $C_i$  je spacúvaný kompresnou hašovacou funkciou, ktorej výstupom je zretezovacia hodnota. Zretezovacie hodnoty dvoch susedných potomkov tvoria vstupy pre výpočet zretezovacej hodnoty ich rodičovského uzla vid. podkapitola 3.2.6. Aplikáciou kompresnej funkcie na koreň stromu, získame hašovací kód funkcie Blake3 zakódovaný vo formáte little-endian [87].



Obr. 3.12: Budovanie hašovacieho stromu Blake3

Kedže na budovanie hašovacieho stromu sú potrebné iba zretezovacie hodnoty daných prvkov, je potrebné tieto hodnoty uchovať v pamäti. Autori funkcie Blake3 poukazujú na fakt, že nie je potrebné uchovať v pamäti všetky zretezovacie hodnoty

ale iba tie, ktoré sú potenciálnymi kandidátmi pre výpočet zretezovacej hodnoty ďalšieho uzla. Túto skutočnosť demonštruje Obr. 3.12, kde pevné boxy predstavujú zretezovacie hodnoty, ktoré je potrebné uchovať a prerušované boxy predstavujú hodnoty, ktoré je možné uvoľniť z pamäte. Tvorcovia funkcie Blake3 prišli s efektívnym riešením, uchovávať tieto hodnoty v dátovej štruktúre zásobník (stack). Zásobník zretezovacích hodnôt teda uchováva všetky potrebné zretezovacie hodnoty. O pridávanie a úpravu zásobníka sa stará funkcia *add\_chunk\_chaining\_value()*, ktorú možno nájsť v referenčnom kóde<sup>2</sup>. Referenčný kód, napísaný až v 3 programovacích jazykoch (Python, Rust, C), však nie je optimalizovaný, slúži iba na edukačné účely. Podrobnejší opis hašovacej funkcie Blake3 je možné nájsť v jej dokumentácii [64].

---

<sup>2</sup>[https://github.com/BLAKE3-team/BLAKE3/tree/master/reference\\_impl](https://github.com/BLAKE3-team/BLAKE3/tree/master/reference_impl)

## 4 Využitie Rust implementácie funkcie Blake3 v jazyku Python

---

Python je v súčasnosti jedným z najpopulárnejších programovacích jazykov, ktorého dopyt stúpol za posledných 5 rokov až o 12,1% v porovnaní s inými programovacími jazykmi<sup>1</sup>. Vdaka svojím výhodám, ako napríklad intuitívna syntax, jednoduchá interakcia s inými programovacími jazykmi, či široká developerská komunita, získal svoje postavenie v oblastiach dátovej vedy (data science), strojového učenia, vývoja webových aplikácií a v mnohých ďalších odvetviach<sup>2</sup>. Je nutné podotknúť, že hoci Python poskytuje veľké množstvo výhod, obsahuje aj niekoľko zásadných nevýhod ako napríklad vysoká spotreba operačnej pamäte alebo jeho nízka rýchlosť [3][2]. Python je pomerne pomalý programovací jazyk v porovnaní s nízkoúrovňovými programovacími jazykmi ako napríklad C, C++. Tieto nevýhody však vieme čiastočne eliminovať prepojením externých modulov, napísaných v inom rýchlejšom programovacom jazyku [6]. V tejto kapitole demonštrujeme akým spôsobom je možné prepojiť časť kódu paralizovateľnej hašovacej funkcie Blake3, ktorá je napísaná v programovacom jazyku Rust s jazykom Python. Rust je vysoko-úrovňový programovací jazyk špeciálne navrhnutý pre bezpečnú správu pamäte a vývoj súbežných (concurrency) a paralizovateľných aplikácií [88]. Rust patrí k jedným z najrýchlejších programovacích jazykov a jeho rýchlosť je porovnateľná s jazykom C/C++. Vhodným prepojením externých modulov napísaných v jazyku Rust s Pythonom dosiahneme niekoľko násobne zrýchlenie a zefektívnenie nášho kódu, pričom si zachováme komfort jazyka Python.

---

<sup>1</sup><https://pypl.github.io/PYPL.html>

<sup>2</sup><https://www.crowdbotics.com/blog/python-vs-rust-which-is-better>

## 4.1 Nástroje na vytvorenie dynamickej Python knižnice

V prípade prepojenia programovacích jazykov je nutné dbať na kompatibilitu všetkých modulov, programovacích jazykov a podobne. Verzie jednotlivých programovacích jazykov a prídavných modulov využitých v tejto práci sú zobrazené v Tabuľke 4.1. Základom prepojenia externého modulu s jazykom Python je vytvorenie dynamickej knižnice pre jazyk Python. Táto kapitola opisuje proces tvorby dynamickej knižnice pre jazyk Python a následne aj jej použitie. Z užívateľského hľadiska je používanie dynamických knižníc výhodnou, pretože užívateľ nemusí danú knižnicu vytvárať ale stačí, že použije už vytvorenú dynamickú knižnicu.

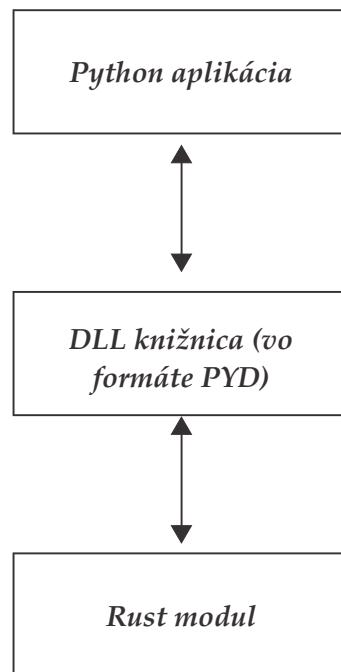
Tabuľka 4.1: Verzie použitých programovacích jazykov a modulov

Programovací jazyk/modul	Verzia
Rust (programovací jazyk)	rustc 1.56.1
Cargo (balíčkový manažér pre Rust)	cargo 1.56.0
Python (programovací jazyk)	Python 3.8.10
pip (balíčkový manažér pre Python)	pip 22.0.3
PyO3 (prepájačí modul)	0.15.1
Blake3 (hašovacia funkcia)	1.3.1
maturin (nástroj pre vytváranie Python modulov)	0.11.5

V prípade programovacích jazykov Python a Rust je možné zvoliť aj iné verzie ako tie z Tabuľky 4.1, no aj tu existujú minimálne požiadavky a odporúčania v rámci verzií, ktoré sa vzťahujú na modul PyO3. Rust modul PyO3 [89], zodpovedný za mapovanie kódu napísaného v jazyku Rust do jazyka Python má isté minimálne požiadavky na verzie týchto programovacích jazykov. V prípade samotného programovacieho jazyka Rust je to verzia 1.48 alebo vyššia a v prípade Pythonu je to verzia 3.7 a vyššia. Existujú aj špeciálne verzie tzv. nighly versions modulu PyO3, ktoré sú kompatibilné so staršími verziami jazyka Python (2.7 alebo 3.5). V prípade, že pracujeme s inou verzou Rust modulu PyO3 ako je uvedené v Tabuľke 4.1, je vhodné skontrolovať tieto minimálne požiadavky na verzie programovacích jazykov v dokumentácii modulu (<https://pyo3.rs/>). Cargo je balíčkový manažér jazyka Rust, ktorý je zvyčajne súčasťou inštalácie programovacieho jazyka Rust,

podobne ako PIP (package installer for Python), ktorý je typicky súčasťou inštalácie jazyka Python. Pomocou Rust modulu PyO3 je teda možné nampovať zdrojový kód napísaný v Ruste s jazykom Python, čo nám následne umožní vytvoriť Python modul. Zhotovenie Python modulu má na starosti terminalový Python nástroj maturin [90]. Maturin je nástroj, ktorý slúži na rýchle a komfortné zostavenie Python modulov, bez zložitej konfigurácie. Modul maturin nie je striktne obmedzený jeho verziou, no odporúčaná verzia modulu maturin pre zachovanie kompatibility je 0.9.0 alebo akákoľvek jeho novšia verzia. Aktuálna verzia modulu maturin je 0.12.15. Rust modul Blake3 obsahuje celkovo 11 verzií, pričom prvá predstavená verzia Blake3 0.3.3 bola predstavená 28. apríla 2020. Modul Blake3 je pravidelne udržiavaný a optimalizovaný z hľadiska výkonu a bezpečnosti. Súčasná verzia modulu Blake3 je verzia 1.3.1, ktorá bola predstavená 14. februára 2022. V tejto práci budeme pracovať s aktuálne najnovšou verziou Blake3 1.3.1, jednotlivé verzie sú dostupné v github repozitári [67].

Princíp prepojenia externého Rust modulu s jazykom Python je robrazený na Obr. 4.1. Prepojenie využíva DLL knižnicu (Dynamic-link library) vo formáte dynamickej Python knižnice (PYD).



Obr. 4.1: Prepojenie externého Rust modulu s jazykom Python s využitím DLL knižnice

## 4.2 Inštalácia programovacieho jazyka Rust

Programovací jazyk Rust je voľne dostupný a jeho stiahnutie a priebeh inštalácie je možné nájsť v online dokumentácii (<https://doc.rust-lang.org/book/ch01-01-installation.html>) resp. v prílohe C. V prípade operačného systému Linux alebo macOS sa inštalácia realizuje prostredníctvom terminálu. Pre operačný systém Windows je potrebné stiahnuť inštalačný balíček (<https://www.rust-lang.org/tools/install>). V prípade inštalácie programovacieho jazyka Rust na OS Windows, je nutné doinštalovať softvér *C++ build tools for Visual Studio 2013* alebo jeho akúkoľvek novšiu verziu (<https://visualstudio.microsoft.com/visual-cpp-build-tools/>).

Počas inštalácie Rustu môžeme naraziť na niekoľko terminálových výpisov, ktoré vyžadujú nášu pozornosť.

```
If you will be targeting the GNU ABI or otherwise know what you are  
doing then it is fine to continue installation without the build  
tools, but otherwise, install the C++ build tools before proceeding.
```

```
Continue? (Y/n)
```

```
>
```

Obr. 4.2: Výpis z terminálu 1.

Prvý takýto vstup, ktorý znázornuje Obr. 4.2 informuje o potrebe inštalácie softvéru *Microsoft C++ build tools*. V tomto prípade je nutné softvér doinštalovať a inštaláciu Rustu spustiť opäťovne.

Ďalší takýto vstup, ktorý znázornuje Obr. 4.3 vyžaduje výber z 3 možností. V tomto prípade zvolíme možnosť číslo „1“, teda predvolenú inštaláciu, v ktorej sa vykoná inštalácia programovacieho jazyka Rust, compilera pre jazyk Rust, baličkového manažera Cargo a ďalších potrebných závislostí.

Správne nainštalovanie programovacieho jazyka Rust môžeme overiť zistením verzie Rustu a baličkového manažera Cargo pomocou príkazov `rustc --version` (pre

```
Current installation options:

    default host triple: x86_64-pc-windows-msvc
    default toolchain: stable (default)
        profile: default
    modify PATH variable: yes

1) Proceed with installation (default)
2) Customize installation
3) Cancel installation
>
```

Obr. 4.3: Výpis z terminálu 2.

verziu Rustu) a cargo --version (pre verziu Carga).

### 4.3 Inicializácia vývojového prostredia a spustenie kódu

Prvým krokom vývoja našej aplikácie je inicializácia vývojového prostredia pomocou terminálového príkazu:

```
Cargo init
```

Počas inicializácie sa nám v adresári vytvorí niekoľko súborov. Súbor *Cargo.toml* uchováva všetky potrebné informácie o našom projekte, jeho modifikáciou je možné importovať všetky potrebné Rust moduly. Zložka *src* obsahuje súbor *main.rs*, ktorý po komplilácii a spustení na obrazovku vypíše „Hello world“. V zložke *src* by sa mali nachádzať všetky Rust súbory obahujúce zdrojový kód („prípona .rs“).

Preklad kódu (compile) je možné vykonať príkazom *cargo build*. Týmto príkazom spustíme preklad kódu v neoptimalizovanom (developerskom móde). Preklad kódu v optimalizovanom móde je možné vykonať príkazom *cargo build --release*. Spustenie kódu je možné vykonať príkazom *cargo run*, ktorý spustí nás kód tiež v neoptimalizovanom móde. Pre spustenie kódu v optimalizovanom móde je

potrebné vykonať príkaz cargo run --release.

## 4.4 Inštalácia Rust modulov (crates)

Balíčkový manažer Cargo je zodpovedný za inštaláciu, aktualizáciu a vymazanie modulov jazyka Rust. V iných literatúrach sa môžeme stretnúť s pojmom crates, čo je typické označenie Rust modulov. Inštaláciu modulov možno realizovať príkazom:

```
cargo install [nazov_modulu]  
napr. cargo install b3sum
```

Importovanie modulov do kódu realizujeme pridaním modulu do súboru *Cargo.toml* v nainicializovanom prostredí.

Zdrojový kód 4.1: *Cargo.toml*

```
[dependencies]  
time = "*"  
chrono = "0.4"
```

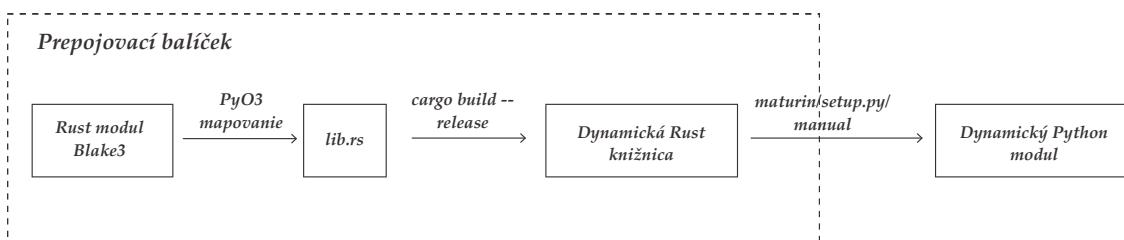
V prípade, že moduly iba importujeme do súboru *Cargo.toml* (bez inštalácie), balíčkový manažér Cargo sa postará o ich inštaláciu pri preklade kódu.

## 4.5 Tvorba dynamickej Python knižnice z externého Rust modulu

Na prepojenie externého modulu vytvoreného v programovacom jazyku Rust s jazykom Python je potrebné namapovať tento externý modul do jazyka Python, čo vyžaduje konverziu objektov medzi jazykom Rust a Python. Mapovanie si môžeme predstaviť ako vytváranie funkcií, resp. tried a metód, ktoré na vstup budú brať premenné jazyka Python. Tieto premenné sa pomocou mapovacieho modulu zviažu s typmi premenných programovacieho jazyka Rust a v tele funkcie prebehne nosná časť výpočtov (v našom prípade hašovanie). Cieľom mapovania je

získat hodnotu, ktorú je Python schopný spracovať. Medzi najznámejšie mapovacie moduly pre mapovanie jazyka Rust a jazyka Python patrí modul PyO3 a modul cpython. V tejto práci budeme na mapovanie jazykov využívať mapovací modul PyO3, ktorého výhodou je jednoduchá integrácia a zrozumiteľná dokumentácia (<https://pyo3.rs/>). Prepojenie externého modulu možno rozdeliť do niekoľkých krokov:

1. Vytvorenie vývojového prostredia v jazyku Rust.
2. Importovanie potrebných Rust modulov (modifikácia súboru Cargo.toml).
3. Mapovanie Rust modulu a jazyka Python s využitím modulu PyO3.
4. Samotné prepojenie nášho modulu a jeho import do jazyka Python.



Obr. 4.4: Bloková schéma mapovania externého Rust modulu do dynamického Python modulu

Obr. 4.4 poskytuje grafické znázornenie celého procesu prepojenia externého modulu (Blake3) napísaného v jazyku Rust s jazykom Python a následne vytvorenie dynamického Python modulu, ktorý využijeme v demonštračnej aplikácii.

Prepojenie externého Rust modulu demonštrujeme na príklade hašovacej funkcie Blake3, ktorej plne optimalizovaná a paralizovateľná verzia je napísaná práve v jazyku Rust. Prepojením hašovacej funkcie Blake3, napísanej v jazyku Rust, zabezpečíme to, že nosná časť výpočtov bude spracovaná jazykom Rust, čo má za následok niekoľko násobne zrýchlenie procesu hašovania. V závere tejto kapitoly zhodnotíme a porovnáme výsledky získané hašovaním súboru s využitím funkcie Blake3 pre jej rôzne implementácie. Porovnanie zahrňa aj našu prepojenú implementáciu hašovacej funkcie Blake3.

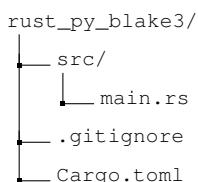
## 4.6 Prepojenie Rust implementácie hašovacej funkcie Blake3 s jazykom Python

Táto podkapitola slúži ako návod pre vytvorenie dynamického Python modulu prepojením už existujúceho Rust modulu. V tomto prípade budeme prepájať hašovaciu funkciu Blake3 napísanu v programovacom jazyku Rust, ktorú v závere tejto kapitoly importujeme do našej demonštračnej Python aplikácie, následne modul otestujeme a porovnáme aj s inými implementáciami hašovacej funkcie Blake3.

### 4.6.1 Inicializácia vývojového prostredia jazyka Rust

Prvým krokom prepojenia externého Rust modulu je vytvorenie vývojového prostredia. Vývojové prostredie je možné nainicializovať príkazom *cargo new [názov\_balička]*. Vykonaním tohto príkazu sa nám vytvorí zložka s názvom nášho prepájacieho balíčka, ktorá bude obsahovať niekoľko potrebných súborov s ktorými budeme pracovať.

Vykonaním príkazu *cargo new rust\_py\_blake3* vytvoríme nový adresár s názvom *rust\_py\_blake3*, ktorý bude obsahovať nasledujúce súbory:



### 4.6.2 Import Rust modulov

Pridanie Rust modulov do nášho novo-vytvoreného prepájacieho balíčka *rust\_py\_blake3* realizujeme jednoduchou modifikáciou súboru *Cargo.toml*. Manuálna inštalácia prídavných modulov nie je potrebná, pretože o ich inštaláciu sa postará balíčkový manažér Cargo pri preklade. Súbor *Cargo.toml* pre mapovanie

hašovacej funkcie Blake3 môže vyzerat takto:

Zdrojový kód 4.2: Cargo.toml

```
[package]
name = "rust\py\blake3"
version = "0.1.0"
edition = "2021"

[lib]
name = "rust\py\blake3"
crate-type = ["cdylib"]

[dependencies.pyo3]
version = "0.15.1"
features = ["extension-module"]

[features]
neon = ["blake3/neon"]

[dependencies]
blake3 = { version = "1.3.1", features = ["rayon"] }
time = "*"
chrono = "0.4"
```

Sekcia *package* obsahuje základné informácie o našom prepájacom balíčku ako názov balíčka, verzia a edícia. Meno balíčka môže byť ľubovoľné, no malo by sa zhodovať s menom adresára v ktorom sa nachádza (teda rust\_py\_blake3). Toto meno sa zhoduje s názvom balíčka, ktorý sme zadávali v príkaze *cargo new rust\_py\_blake3*.

Sekcia *lib* obsahuje informácie o dynamickej knižnici, ktorá je výsledkom celého mapovania a následného prekladu. Túto mapovaciu dynamickú knižnicu importujeme do nášho python kódu a pomocou nej budeme hašovať súbor s využitím hašovacej funkcie Blake3 napísanej v jazyku Rust. Názov tejto dynamicej knižnice nemusí byť totožný s menom nášho balíčka, no pre využitie sa akýmkoľvek komplikáciám ponecháme názov dynamickej knižnice zhodný s názvom prepájacieho balíčka.

V sekcií *dependencies.pyo3* definujeme verziu rozširovacieho mapovacieho modulu PyO3. Verziu modulu PyO3 nastavíme na 0.15.1.

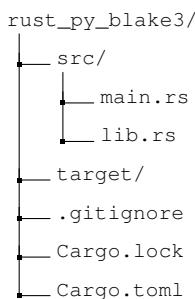
V prípade, že chceme hašovanie uskutočniť na ARM procesoroch pridáme do sekcie *features* funkcionalitu neon, čo predstavuje akési rozšírenie pre spracovanie SIMD in-

štrukcií na ARM procesoroch (<https://www.arm.com/technologies/neon>). V tejto práci budeme na hašovanie dát využívať procesor od spoločnosti Intel, teda sekciu *features* necháme prázdnú resp. vynecháme úplne. Poslednou časťou súboru *Cargo.toml* je sekcia *dependencies*, ktorá obsahuje všetky prídavné moduly ako napr. modul Blake3 s využitím funkcie `rayon`, zodpovednej za paralizovateľnosť, či moduly `time` a `chrono`, ktorými môžeme otestovať rýchlosť a efektívnosť hašovania funkcie Blake3 v jazyku Rust.

#### 4.6.3 Mapovanie Rust modulu s jazykom Python

Na mapovanie modulu Blake3, ktorý je napísaný v jazyku Rust budeme využívať rozširovací modul PyO3. Podrobnejší opis tohto modulu ako aj návod na jeho používanie nájdeme v dokumentácii (<https://pyo3.rs/v0.15.1/>). Je potrebné dodať, že na mapovanie kódu resp. modulu musíme ovládať základne princípy programovacieho jazyka Rust. Odporúčaná literatúra pre efektívne štúdium jazyka Rust je jeho dokumentácia postavená na základe rôznych praktických príkladov (<https://doc.rust-lang.org/stable/rust-by-example/>).

Pre mapovanie externého Rust modulu Blake3 je nutné vytvoriť v adresári *rust\_py\_blaKE3/src* súbor *lib.rs*, ktorý bude obsahovať samotné mapovanie. Teda štruktúra nášho adresára by mohla vyzerať takto:



Pridaním súboru *lib.rs* sa nám automaticky vytvorí zložka *target* spolu so súborom *Cargo.lock*. Mapovanie funkcie Blake3, napísanej v súbore *lib.rs*, môže vyzerať nasledovne:

Zdrojový kód 4.3: Mapovanie Python a Rust objektov v súbore lib.rs

```
use pyo3::prelude::*;
use pyo3::types::{PyAny, PyBytes};

#[pyfunction]
fn rustypy_blake(_py: Python, data:&[u8]) -> PyResult<[u8;32]>{
    let mut _hasher = blake3::Hasher::new();
    _hasher.update_rayon(data);
    let result_from_update = *_hasher.finalize().as_bytes();
    return Ok(result_from_update);
}

#[pymodule]
fn rustypy(_py: Python, m: &PyModule) -> PyResult<()> {
    m.add_function(wrap_pyfunction!(rustypy_blake, m)?);
    Ok(())
}
```

Prvý riadok kódu naznačuje využívanie rozšírovacieho modulu PyO3, ktorý používa špecialne makrá ako napríklad `#[pyfunction]` alebo `#[pymodule]`. `#[pyfunction]` má za úlohu definovať našu python funkciu, ktorú budeme neskôr volať v našom python kóde. Funkcia `rustypy_blake()` realizuje hašovanie dát pomocou funkcie Blake3. Návratová hodnota funkcie `rustypy_blake()` je objekt `PyBytes`, ktorý je rozpoznateľný jazykom Python. Konverziu dátových typov potrebnú pre prepojenie rust objektov s jazykom python môžeme nájsť v dokumentácii rozšírovacieho modulu PyO3 (<https://pyo3.rs/v0.15.1/conversions/tables.html>). Dôležitou funkciou pre správne importovanie našej knižnice do python kódu je funkcia `rust_py_blake3()`. Táto funkcia musí byť definovaná Macrom `#[pymodule]` a jej názov musí byť zhodný s názvom knižnice, ktorý sme zadávali v súbore `Cargo.toml` (v našom prípade musí byť názov tejto funkcie „`rust_py_blake3`“). Ak by názov funkcie nebol totožný s názvom našej dynamickej knižnice, import nášho modulu do python aplikácie by nebol možný.

V prípade, že sme mapovanie dokončili môžeme pokračovať s prekladom nášho prepojovacieho balíčka `rust_py_blake3`. Preklad modulu vykonáme príkazom `cargo build --release` (preklad je nutné vykonať z adresára „`./rust_py_blake3`“). Prepínačom `--release` sme povedali, že preklad sa ma vykonať v optimalizovanom móde.

#### 4.6.4 Vytvorenie Python dynamického modulu

Finálnym krokom, ktorý je potrebný vykonať pre správne využitie a otestovanie nášho prepájacieho balíčka „rust\_py\_blaKE3“, je vytvorenie dynamického Python modulu a následne importovanie tohto modulu do testovacej aplikácie napísanej v jazyku Python. Vytvoriť a následne použiť dynamický Python modul vytvorený z nášho prepojovacieho Rust balíčka je možné realizovať 3 spôsobmi:

1. Python modul maturin.
2. Python modul Setup-tools.
3. Manuálne vytvorenie dynamického modulu.

##### **maturin**

Najjednoduchší spôsob, ako prvýkrát vyskúšať náš prepajací modul generovaný rozširovacím modulom PyO3, je použiť maturin. Maturin je nástroj na vytváranie a publikovanie Python modulov založených na programovacom jazyku Rust. Maturin je známy tým, že poskytuje menšiu flexibilitu ako modul setup-tools alebo manuálne vytvorenie dynamického modulu, no jeho používanie je nenáročné. Nasledujúce kroky nastavia virtuálne prostredie, do ktorého si nainštalujeme python modul maturin.

V adresári *rust\_py\_blaKE3* vytvoríme Python virtuálne prostredie (virtual environment) do ktorého si nainštalujeme modul maturin.

```
py -m venv .env  
.\.env\Scripts\activate
```

Týmto príkazmi platné pre OS Windows vytvoríme a spustíme virtuálne prostredie jazyka python. Pre vytvorenie a spustenie virtualného prostredia pre OS Linux alebo macOS možno postupovať podľa návodu (<https://docs.rs/pyo3/latest/pyo3/>). Následne nainštalujeme modul maturin pomocou príkazu:

```
pip install maturin
```

Samotné vytvorenie dynamickej knižnice vykonáme príkazom:

```
maturin develop --release
```

kde opäť použijeme prepínač `--release` pre vytvorenie modulu v optimalizovanom móde. Posledným krokom je import a testovanie novo vytvoreného dynamického Python modulu. Demonštračná aplikácia `test.py` (ktorá sa môže nachádzať v ľubovoľnom adresári) môže vyzerať takto:

Zdrojový kód 4.4: Import a otestovanie dynamickej Python knižnice v súbore `test.py`

```
import rust_py_blaKE3 as r
print(r.rustypy_blaKE(b"Testuje funkciu BlaKE3"))
```

kde prvý riadok má za úlohu importovať naš novo vytvorený dynamický Python modul (vytvorený pomocou modulu `maturin`) a druhý riadok demonštruje využitie konkrétnej funkcie `rustypy_blaKE()` ktorú sme definovali v súbore `lib.rs`. Spustenie súboru `test.py` je nutné vykonať z virtuálneho prostredia.

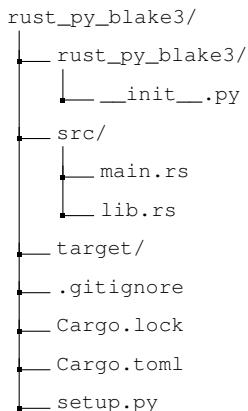
```
.\env\Scripts\activate
py [cesta_k_app\test.py]
```

## Setup-tools

Druhou metódou pre vygenerovanie dynamického Python modulu z nášho prepájacieho Rust modulu „`rust_py_blaKE3`“ je možné realizovať pomocou modulu *setup-tools*, ktorý je vo všeobecnosti flexibilnejší a ako *maturin*, no práca s ním je náročnejšia. Pre prácu s Python modulom *setup-tools* je potrebné nainštalovať niekoľko python balíčkov.

```
pip install setuptools-rust
pip install setuptools
pip install wheel
```

V adresári „`rust_py_blaKE3`“ vytvoríme nový python súbor `setup.py` a adresár s názvom nášho prepájacieho balíčka teda „`rust_py_blaKE3`“, ktorý bude obsahovať súbor `__init__.py`. Vytvorením týchto súborov by náš adresár mohol vyzerať takto:



Použité súbory *setup.py* a *\_\_init\_\_.py* vytvorené pre túto prácu je možné nájsť v github repozitári [91]. Princípy tvorby súboru *setup.py* je môžé si naštudovať v dokumentácii (<https://setuptools-rust.readthedocs.io/en/latest/>). Spustenie modulu *setup-tools* pre vytvorenie požadovaného Python modulu možeme vykonať následovným príkazom

```
py setup.py install
```

Po vykonaní príkazu *py setup.py install* sa nám v adresári „rust\_py\_blake3“ vytvorí adresár „rust\_py\_blake3.egg-info“, ktorý obsahuje prídavne informácie o našom novo vytvorenom Python module. Po úspešnom vytvorení Python modulu „rust\_py\_blake3“, môžeme tento modul využívať bez akéhokoľvek virtualného vývojového prostredia. Teda testovaciu aplikáciu *test.py*, ktorá obsahuje kód na overenie funkčnosti nášho modulu, možeme spustiť následovne:

```
py cesta_k_suboru\test.py
```

## Manuálne vytvorenie dynamického Python modulu

Metóda manuálneho vytvorenia dynamického Python modulu sa môže javiť ako relatívne rýchle riešenie, bez potreby inštalácie doplnkových modulov. Po preklade nášho mapovacieho Rust modulu, ktorý bol preložený príkazom *cargo build --release*, sa nám v adresári "rust\_py\_blake3/target/release" vytvoril súbor (dynamická knižnica) s názvom *rust\_py\_blake3.dll* resp. *librust\_py\_blake3.dll*. Tento súbor môže nadobúdať aj iné názvy (Tabuľka 4.2) v závislosti od nášho OS. Túto dynamickú knižnicu je potrebné nakopírovať do zložky s našou testovacou aplikáciou *test.py* a následne ju premenovať podľa Tabuľky 4.2, čím získame dynamický

Python modul.

Tabuľka 4.2: Premenovanie dynamického modulu v závislosti od operačného systému

Premenovanie dynamického modulu		
Operačný systém	Názov dynamického modulu	Po premenovaní
macOS	rust_py_blaKE.dylib	
	alebo librust_py_blaKE3.dylib	rust_py_blaKE3.so
Windows	rust_py_blaKE.dll	
	alebo librust_py_blaKE3.dll	rust_py_blaKE3.pyd
Linux	rust_py_blaKE.so	
	alebo librust_py_blaKE3.so	rust_py_blaKE3.so

Import dynamického Python modulu do testovacej aplikácie je vykonaný v prvom riadku súboru *test.py*. Spustenie testovacieho súboru vykonáme príkazom:

```
py cesta_k_suboru\test.py
```

Príklad prepojenia externého Rust modulu hašovacej funkcie Blake3, pre všetky vyššie uvedené metódy je možné nájsť v github repozitári [91]. Github repozitár taktiež obsahuje Python dynamickú knižnicu *rust\_py\_blaKE3.pyd*, ktorú môže čitateľ využiť a otestovať hned bez akejkoľvek ďalšej konfigurácie. Táto Python dynamická knižnica je vhodná pre operačný systém Windows. Jediná podmienka, ktorú je nutné splniť pre otestovanie modulu je vložiť súbor *rust\_py\_blaKE3.pyd* do adresára, v ktorom sa nachádza testovací kód. Všetky zdrojové kódy sú dostupné v prílohe **D** resp. v github repozitári [91]. Experimentálne testovanie rýchlosťi rôznych implementácií hašovacej funkcie Blake3, vrátane našej prepojenej implementácie, je možné nájsť v kapitole 5.2.

## 5 Experimentálne výsledky

---

Táto kapitola obsahuje výsledky meraní, ktoré boli realizované v experimentálnej časti tejto bakalárskej práce. Kapitola obsahuje výsledky rýchlosťných testov, vykonaných na demonštračných aplikáciách, ktoré majú za úlohu porovnať kryptografické moduly jazyka Python. Kapitola taktiež zahŕňa výsledky meraní rýchlosťných testov, vykonaných na rôznych implementáciách hašovacej funkcie Blake3, čo zahrňa aj porovnanie jednotlivých implementácií. Demonštračné aplikácie vytvorené v rámci experimentálnej časti tejto bakalárskej práce sú dostupné v prílohe **D** alebo v github repozitári [91]. Hardvérové vybavenie, na ktorom boli vykonané všetky merania je nasledovné. Centrálna procesorová jednotka (CPU) I5-8250U od spoločnosti Intel s celkovým počtom 4 jadier, resp. 8 logických vlákien so základnou frekvenciou 1,60 GHz (<https://rb.gy/nnyb8e>). Typ operačná pamäť (RAM) je DDR4 s frekvenciou 2400 MHz a veľkosťou 8 GB a pamäť SSD Micron 1100 256 GB s maximálnou rýchlosťou čítania 530 MB/s. Realizácia meraní bola vykonaná na 64-bitovom operačnom systéme Windows 10 od firmy Microsoft. V práci boli použité programovacie jazyky Python 3.8.10, Rust 1.56.1 a jazyk C s prekladačom gcc 11.2.0 (MinGW-W64). Pri realizácii výkonnostných porovnávacích testov je vhodné postupovať spôsobom, ktorým získame konzistentné hodnoty merania a minimalizujeme odchýlky v meraniach. Jednou z najefektívnejších techník na dosiahnutie konzistentných výsledkov je vypnutie funkcionality turboboost a hyper-threading na centrálnej procesorovej jednotke [92].

Súčasťou experimentálnej časti tejto bakalárskej práce je aj otestovanie kryptografických modulov z hľadiska správneho vykonávania kryptografických algoritmov. Kryptografické moduly PyCryptodome a Cryptography podporujú možnosť vykonania automatických jednotkových testov, ktoré otestujú jednotlivé moduly.

Kryptografický modul Hashlib nepodporuje možnosť automatického vykonania jednotkových testov, preto sme pre tento modul vytvorili testy, ktoré preveria správnosť vykonávania algoritmov. Testovanie jednotných algoritmov bolo realizované s využitím testovacích vektorov. Zdrojové kódy jednotlivých testov ako aj návod na realizovanie automatických jednotkových testov je možné nájsť v prílohe **D**, resp. v github repozitári [91].

## **5.1 Vyhodnotenie experimentálneho porovnania kryptografických knižníc jazyka Python**

Pre vybrane kryptografické moduly jazyka Python sme vykonali rýchlosné testy, v ktorých sme testovali symetrické blokové šifry ako AES, 3DES, CAST5, Blowfish, symetrické prúdové šifry ChaCha20, ARC4, Salsa20 a hašovacie funkcie rodiny SHA2, SHA3 a funkcie Blake2s, Blake2b. Výsledky rýchlosných testov pre symetrické prúdové šifry sú zobrazené v Tabuľke 5.1, pre symetrické blokové testy v Tabuľke 5.2, pre digitálne podpisy v Tabuľke 5.3. Samotné testovanie prebehlo aj na algoritme RSA, čo vyjadrené v Tabuľke 5.4. Výsledky rýchlosných testov pre hašovacie funkcie možno vidieť v Tabuľke 5.5 a v Tabuľke 5.6. Výsledné hodnoty meraní znázornené v tabuľkách 5.1, 5.2, 5.5, 5.6 predstavuje priemernú hodnotu merania rýchlosi daného algoritmu pri celkovo 20 vykonaných meraniach. Testovací súbor, ktorý bol spracovávaný danými kryptografickými primitívami má veľkosť cca 100 MB. Zdrojové kódy demonštračných aplikácií, vytvorené pre testovanie týchto kryptografických modulov, možno nájsť v Github repozitári [91] alebo v prílohe **D**. V repozitári sa nachádzajú demonštračné aplikácie, ktoré využívajú niektoré ďalšie algoritmy ako DH, RSA, či ECDSA, ktoré boli testované z hľadiska správnosti vykonávania kryptografických úkonov.

Tabuľka 5.1 znázorňuje rýchlosne porovnanie vybraných symetrických prúdových šifier, ktoré sú implementované v kryptografickom module Cryptography a PyCryptodome. Z Tabuľky 5.1 je vidieť, že modul Cryptography je niekoľko násobne rýchlejší ako PyCryptodome, avšak neobsahuje prúdovú šifru Salsa20. Šifrovanie symetrickými prúdovými šiframi bolo realizované na súbore s veľkosťou 100 MB

Tabuľka 5.1: Výsledky merania rýchlosných testov, vykonaných na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre symetrické prúdové šifry. Testovanie algoritmov bolo realizované na súbore o veľkosti 100 MB.

Rýchlosný test – Symetrické prúdové šifry		
Algoritmus	Modul Cryptography [31]	Modul PyCryptodome [14]
ChaCha20 [38]	0,2418 s	0,6713 s
ChaCha20Poly1305 [38]	0,2401 s	0,9264 s
Salsa20 [16]	—	0,9926 s
ARC4 [93]	0,5525 s	0,4509 s

a výsledne hodnoty predstavujú priemernú rýchlosť šifrovania pri celkovo 20 vykonaných meraniach.

Tabuľka 5.2: Výsledky merania rýchlosných testov, vykonaných na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre symetrické blokové, realizované na súbore o veľkosti 100 MB šifry

Rýchlosný test – Symetrické blokové šifry				
Algoritmus	Mód - ECB	Mód - CBC	Mód - CTR	Modul
AES(128) [15]	0,2257 s	0,3961 s	0,1798 s	Cryptography
	0,1758 s	0,5962 s	0,1678 s	PyCryptodome
3DES [35]	7,4142 s	7,3613 s	—	Cryptography
	7,4813 s	7,9763 s	7,5829 s	PyCryptodome
CAST5 [36]	1,9021 s	1,8051 s	—	Cryptography
	2,1216 s	2,5302 s	2,1562 s	PyCryptodome
Blowfish [42]	1,8336 s	1,9066 s	—	Cryptography
	1,6371 s	2,0676 s	1,6463 s	PyCryptodome

Z Tabuľky 5.2 je vidno, že modul Cryptography je opäť rýchlejší ako modul PyCryptodome, no jeho nevýhodou môže byt pravé limitácia CTR módu, ktorá je podporovaná iba pre šifru AES. Šifrovanie symetrickými blokovými šiframi bolo realizované na súbore s veľkosťou 100 MB a výsledne hodnoty predstavujú priemernú rýchlosť šifrovania pri celkovo 20 vykonaných meraniach. Z vykonaných meraní vyplýva, že bloková šifra AES je v porovnaní s inými šiframi najrýchlejšia. Rýchlosť šifry AES možno odôvodniť hypotézou, že implementácia šifry AES je prispôsobená čipovým sadám, ktoré sa nachádzajú v mnohých procesoroch. Vďaka inštrukčným sadám pre algoritmus AES možno urýchliť výpočty realizované pri šifrovani dát šifrovacím algoritmom AES.

Tabuľka 5.3 demonštruje rýchlosť generovania kľúčov a následne podpísanie súboru

Tabuľka 5.3: Výsledky merania rýchlosných testov, vykonaných na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre digitálny podpis DSA a ECDSA

Rýchlosný test – Digitálne podpisy			
Algoritmus	Generovanie kľúčov	Digitálny Podpis / Súbor	Modul
DSA [18]	min: 0,271 s	0,493 s / 100 MB	Cryptography
	max: 5,2748 s	1,022 s / 200 MB	Cryptography
	avg: 0,998 s	5,421 s / 1 GB	Cryptography
DSA [18]	min: 5,0326 s	1,061 s / 100 MB	PyCryptodome
	max: 41,476 s	2,139 s / 200 MB	PyCryptodome
	avg: 14,527 s	10,562 s / 1 GB	PyCryptodome
ECDSA [52]	min: 0,002 s	0,479 s / 100 MB	Cryptography
	max: 0,146 s	1,024 s / 200 MB	Cryptography
	avg: 0,004 s	4,741 s / 1 GB	Cryptography
ECDSA [52]	min: 0,005 s	1,067 s / 100 MB	PyCryptodome
	max: 0,011 s	2,143 s / 200 MB	PyCryptodome
	avg: 0,006 s	10,378 s / 1 GB	PyCryptodome

algoritmami DSA a ECDSA. Tabuľka 5.3 poskytuje minimálnu, maximálnu a priemernú dobu trvania generovania kľúčov (pri 100 vykonaných meraniach) a zároveň aj dobu podpisu súborov o veľkosti 100 MB, 200 MB a 1 GB. Modulus v algoritme DSA je 3072, čo odpovedá ekvivalentnej kryptografickej bezpečnosti pre použitú hašovaciu funkciu SHA256. V prípade ECDSA je použitá taktiež hašovacia funkcia SHA256 a eliptická krivka P-256 [94].

Tabuľka 5.4: Výsledky merania rýchlosných testov, vykonaných na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre RSA-OAEP s rôznou veľkosťou modula

Rýchlosný test – RSA-OAEP					
Veľkosť vstupu	Modulus	Cryptography		PyCryptodome	
		Generovanie kľúčov	Šifrovanie	Generovanie kľúčov	Šifrovanie
190 B	2048	0,348 s	0,00041 s	0,791 s	0,0042 s
250 B	4096	2,749 s	0,00047 s	21,919 s	0,0094 s
500 B	8192	5,058 s	0,00089 s	293,41 s	0,0276 s

Tabuľka 5.4 demonštruje RSA-OAEP šifrovanie pre dĺžky vstupov 190 B, 250 B a 500 B a generovanie kľúčov pre modulus o veľkosti 2048, 4096, 8192. Výsledne hodnoty meraní tvoria aritmetický priemer po celkovo 20 vykonaných meraniach.

Tabuľky 5.5 a 5.6 znázorňujú hašovanie súboru o veľkosti 100 MB s využitím rôznych hašovacích funkcií podporovaných Python kryptografickými modulmi Cryptography, PyCryptodome a Hashlib. Výsledné hodnoty meraní predstavujú priemernú rýchlosť hašovania pri celkovo 20 vykonaných meraniach.

Na základe výsledkov vykonaných meraní možno odvodiť záver, že kryptografický

Tabuľka 5.5: Výsledky merania rýchlosných testov hašovacích funkcií, vykonaných na procesore I5-8250U a OS Windows 10. Rýchlosné testy boli realizované na súbore o veľkosti 100 MB.

Rýchlosný test – Hašovacie funkcie		
Algoritmus	Čas	Modul
SHA2-224	0,4735 s	Cryptography
	1,0186 s	PyCryptodome
	0,4781 s	Hashlib
SHA2-256	0,4807 s	Cryptography
	1,0107 s	PyCryptodome
	0,4803 s	Hashlib
SHA2-384	0,3274 s	Cryptography
	0,6428 s	PyCryptodome
	0,3162 s	Hashlib
SHA2-512	0,3211 s	Cryptography
	0,6449 s	PyCryptodome
	0,3166 s	Hashlib

Tabuľka 5.6: Výsledky merania rýchlosných testov hašovacích funkcií, vykonaných na procesore I5-8250U a OS Windows 10. Rýchlosné testy boli realizované na súbore o veľkosti 100 MB.

Rýchlosný test – Hašovacie funkcie		
Algoritmus	Čas	Modul
SHA3-224	0,5608 s	Cryptography
	0,7921 s	PyCryptodome
	0,6278 s	Hashlib
SHA3-256	0,5901 s	Cryptography
	0,817 s	PyCryptodome
	0,6534 s	Hashlib
SHA3-384	0,761 s	Cryptography
	1,0595 s	PyCryptodome
	0,8518 s	Hashlib
SHA3-512	1,1051 s	Cryptography
	1,5101 s	PyCryptodome
	1,2274 s	Hashlib
Blake2b	0,3057 s	Cryptography
	0,5395 s	PyCryptodome
	0,3875 s	Hashlib
Blake2s	0,4865 s	Cryptography
	0,9105 s	PyCryptodome
	0,6105 s	Hashlib

modul Cryptography sa javí v priemere ako najrýchlejší a zároveň podporuje najviac kryptografických algoritmov a protokolov. Jeho limitáciu v môžeme nájsť napríklad v čítačovom móde (CTR) pre blokové symetrické šifry, pretože tento mód je podpo-

rovany iba pre šifru AES. Na druhej strane modul PyCryptodome je v tomto smere flexibilnejší, no výkonnostne sa javí ako najslabší. Zaujímavou voľbou pre hašovanie dát je kompaktný modul Hashlib, ktorý vdaka svojej jasnej a stručnej dokumentácii je najjednoduchší na používanie.

## 5.2 Porovnanie rôznych implemenetácií hašovacej funkcie Blake3

Táto kapitola je stručným zhodnotením testovania hašovacej funkcie Blake3 a porovnanie dosiahnutých meraní pre rôzne implementácie. Vykonanie rýchlosťných testov hašovacej funkcie Blake3 prebehlo na optimalizovanej Rust verzii funkcie Blake3<sup>1</sup>, referenčnom Python kóde<sup>2</sup> a na nami vytvorennej implementácii, založenej na dynamickej Python knižnici vytvorennej v jazyku Rust [91]. Rýchlosťne porovnanie zahŕňa merania rýchlosťi pomocou hašovacieho a overovacieho softvéru TurboSFV (<https://www.turbosfv.com/>). TurboSFV je komerčný nástroj na výpočet a validáciu kontrolných súčtov pre súbory, či hašovanie daných súborov. Nástroj TurboSFV ako jeden z mála podporuje hašovaciu funkciu Blake3 ale aj viacero iných hašovacích algoritmov ako napríklad MD5, hašovacie funkcie rodiny Blake2, SHA2, SHA3. Táto práca využíva demo verziu nástroja TurboSFV 9.30. Nástroj TurboSFV podporuje paralelné spracovanie dát hašovacou funkciou Blake3 od verzie 9.20. Testovanie rýchlosťi týchto implementácií bolo vykonané na centrálnej procesorovej jednotke (CPU) I5-8250U od spoločnosti Intel (<https://rb.gy/nnyb8e>). Hašovanie prebehlo na testovacích súboroch o veľkostiach 100 MB, 200 MB a 1 GB. Výsledky testovania reprezentuje Tabuľka 5.7.

Tabuľka 5.7 predstavuje výsledky rýchlostného testu hašovacej funkcie Blake3 pre rôzne implementácie. V prípade oficiálnej optimalizovanej paralizovateľnej implementácie napisanej v programovacou jazyku Rust a nami vytvorennej demonštračnej implementácii rust\_py\_blake3 bolo možné hašovanie otestovať z hladiska rýchlosťi na rôznom počte aktívnych vlakien procesora I5-8250U od spoločnosti Intel. Z me-

---

<sup>1</sup><https://docs.rs/blake3/latest/blake3/>

<sup>2</sup>[https://github.com/oconnor663/pure\\_python\\_blake3](https://github.com/oconnor663/pure_python_blake3)

Tabuľka 5.7: Rýchlosný test hašovacej funkcie Blake3, vykonaných na procesore I5-8250U a OS Windows 10, pre rôzne implementácie funkcie Blake3

Rýchlosný test – Hašovacia funkcia Blake3 otestovaná na rôznych implementáciách					
Implementácia	Vlákna (Threads)/ Jadrá	100 MB	200 MB	1 GB	
Optimalizovaná Rust impl.	1 vlákno	0,064 s	0,128 s	0,655 s	
	2 vlákna	0,033 s	0,069 s	0,341 s	
	3 vlákna	0,023 s	0,043 s	0,242 s	
	4 vlákna	0,021 s	0,036 s	0,201 s	
	5 vlákin	0,019 s	0,031 s	0,165 s	
	6 vlákin	0,015 s	0,029 s	0,153 s	
	7 vlákin	0,014 s	0,028 s	0,142 s	
	8 vlákin	0,013 s	0,027 s	0,138 s	
rust_py_blaKE3	1 vlákno	0,065 s	0,129 s	0,665 s	
	2 vlákna	0,035 s	0,089 s	0,346 s	
	3 vlákna	0,024 s	0,046 s	0,301 s	
	4 vlákna	0,022 s	0,043 s	0,203 s	
	5 vlákin	0,021 s	0,034 s	0,171 s	
	6 vlákin	0,018 s	0,032 s	0,167 s	
	7 vlákin	0,017 s	0,031 s	0,156 s	
	8 vlákin	0,016 s	0,029 s	0,146 s	
TruboSFV	1 jadro	0,388 s	0,768 s	3,874 s	
	2 jadrá	0,215 s	0,422 s	2,093 s	
	4 jadrá	0,127 s	0,236 s	1,105 s	
Python ref. impl.	1 vlákno	4424,26 s	14181,6 s	235169 s	

raní vyplýva, že výpočtovo najrýchlejsia implementácia je implementácia napísaná v jazyku Rust, ktorá je rýchlejsia ako naša demonštračná prepojená implementácia rust\_py\_blaKE3 v priemere o približne 6.7 %. Je nutné podotknúť, že naša demonštračná implementácia nie je optimalizovaná z hľadiska spotreby operačnej pamäte a zároveň poskytuje iba základný hašovací mód funkcie Blake3, teda mód  $hash(input)$ . Rozšírenie nami vytvorennej demonštračnej implementácie o všetky hašovacie módy funkcie Blake3, spolu s verifikáciou streamovaných dát považujem za vhodné v ďalších prácach. Nástroj TurboSFV podporuje hašovanie dát hašovacou funkciou Blake3 s využitím paraleлизmu a to od verzie 9.20. Toto hašovanie sa však vzťahuje na počet dostupných jadier CPU, nie na počet vlákin ako to bolo u Rust a rust\_py\_blaKE3 implementácií [95]. Výsledky meraní paralelného hašovania dát s využitím hašovacej funkcie Blake3 nástrojom TurboSFV sú zobrazené v Tabuľke 5.7. Referenčná implementácia hašovacej funkcie Blake3, napísaná v programovačom jazyku Python, sa javí ako najpomalšia. Táto neoptimalizovaná implementácia slúži iba na edukačné účely a nepodporuje žiadnu formu paraleлизmu.

Tabuľka 5.8 zobrazuje výsledky rýchlosných testov, ktoré boli vykonané na testovacích súboroch (10 MB, 20 MB a 50 MB) jednotlivými neoptimalizovanými

Tabuľka 5.8: Porovnanie referenčných implementácií hašovacej funkcie Blake3 na testovacích súboroch o veľkosti 10 MB, 20 MB a 50 MB. Samotné referenčné implementácie sú napísane v jazyku C, Rust a v jazyku Python. Testy boli vykonané na procesore Intel I5-8250U.

Porovnanie referenčných implementácií funkcie Blake3			
Programovací jazyk	10 MB	20 MB	50 MB
C	0,604 s	1,365 s	2,835 s
Rust	0,064 s	0,107 s	0,248 s
Python	108,7 s	207,7 s	1114,7 s

referenčnými implementáciami hašovacej funkcie Blake3. Referenčné implementácie sú dostupné pre programovací jazyk C, jazyk Rust a programovací jazyk Python. Z Tabuľky 5.8 je vidieť, že referenčná implementácia funkcie Blake3, napísaná v jazyku Python, sa javí ako najpomalšia. Implementácia napísaná v jazyku Rust sa javí ako najrýchlejšia a v porovnaní s implementáciou napísanou v jazyku C je v približne desaťkrát rýchlejsia. Zdrojové kódy rýchlostných testov pre referenčné implementácie funkcie Blake3 je možné nájsť v Prílohe **D**, resp. v github repozitári [91].

Tabuľka 5.9: Porovnanie vybraných konvenčných hašovacích funkcií, podporovaných kryptografickým modulom Cryptography s prepojenou hašovacou funkciou Blake3, ktorá využíva všetkých 8 dostupných vlákien procesora I5-8250U

Porovnanie vybraných hašovacích funkcií			
Súbor	SHA-256	SHA3-256	rust_py Blake3
20 MB	0,0958 s	0,1177 s	0,0051 s
50 MB	0,2327 s	0,2902 s	0,0094 s
100 MB	0,4807 s	0,5901 s	0,016 s
500 MB	2,3168 s	2,8908 s	0,0696 s
1,5 GB	7,0825 s	8,9933 s	0,2061 s
2 GB	10,0687 s	12,0961 s	0,2934 s

Tabuľka 5.9 zobrazuje porovnanie konvenčných hašovacích funkcií SHA-256 a SHA3-256 s prepojenou implementáciou hašovacej funkcie Blake3. Z Tabuľky 5.5 a 5.6 je vidieť, že kryptografický modul Cryptography dosahuje najlepšie výsledky z hľadiska rýchlosťi vykonávania algoritmov pre jazyk Python, a preto je vhodné vykonať porovnanie konvenčných hašovacích funkcií s využitím práve tohto modulu. Z Tabuľky 5.9 je vidieť, že prepojená implementácia hašovacej funkcie Blake3, vy-

užívajúca všetkých 8 dostupných vlákien, je výrazne rýchlejšia ako konvenčné hašovacie funkcie a to niekoľko násobne. Na príklade hašovania súboru o veľkosti 20 MB je prepojená implementácia funkcie Blake3 v priemere 21-krát rýchlejšia ako konvenčné hašovacie funkcie. V prípade hašovania väčších súborov tento rozdiel narastá a na príklade hašovania súboru o veľkosti 2 GB je tento rozdiel v priemere až 38 násobný.

## 6 Záver

---

Prudkým rozvojom informačno-komunikačných technológií začalo vznikať čoraz viac aplikácií, ktoré spracúvajú, uchovávajú alebo prenášajú často citlivé, osobné alebo tajné údaje. Bezpečné zaobchádzanie s údajmi rieši kryptografia. Vzhľadom na fakt, že programovací jazyk Python je jedným z najpopulárnejších programovacích jazykov a jeho popularita stále narastá, je voľba tohto programovacieho jazyka zaujímavou v oblasti vývoja takýchto aplikácií. Teda má zmysel, uvažovať o kryptografii v programovacom jazyku Python, čo je téma, ktorej sa venuje táto bakalárka práca.

Teoretická časť tejto bakalárskej práce má za úlohu detailne opísat nový kryptografiký stavebný blok, ktorým je hašovacia funkcia Blake3. Hašovacia funkcia Blake3 ma obrovský potenciál vo svete kryptografie, pretože vďaka Merklovej stromovej hašovacej štruktúre a efektívnej implementácii je funkcia Blake3 niekolko násobne rýchlejšia ako súčasné hašovacie funkcie. V tejto práci sme sa venovali problematike Merklových stromov, kde sme opísali ich štruktúru, využitie a výhody, ktoré nám táto konštrukcia ponúka. Následne sme podrobne opísali princípy hašovacej funkcie Blake3 ako aj jej využitie a výhody v porovnaní s konvenčnými hašovacími funkciami. Stručne sme naznačili využitie SIMD inštrukcií a paraleлизmus vo funkcií Blake3.

Úlohou prvej praktickej časti bakalárskej práce je oboznámiť sa s programovacím jazykom Python a základnými operáciami, ktoré je potrebné ovládať v oblasti kryptografie. Predstavili sme si najpopulárnejšie a najrobustnejšie kryptografické Python moduly, pre ktoré sme pripravili sadu demončtračných aplikácií. Cieľom demonštračných aplikácií bolo otestovať dané kryptografické moduly z hľadiska rýchlosťi vykonávania kryptografických úkonov ale aj z hľadiska rozsahu podpo-

rovaných kryptografických algoritmov a protokolov.

V druhej praktickej časti tejto práce sme sa venovali premosteniu hašovacej funkcie Blake3 do jazyka Python, pretože optimalizovaná a paralizovateľná implementácia funkcie Blake3 je napísaná v jazyku Rust. Programovací jazyk Rust je relatívne nový programovací jazyk, ktorý bol prvýkrát predstavený v roku 2014 spoločnosťou Microsoft. Ide o programovací jazyk, ktorý by vďaka svojej rýchlosťi a bezpečnosti mohol predstavovať alternatívnu programovacieho jazyka C resp. C++. Vývojári jazyka Rust propagujú jeho schopnosť pomáhať vývojárom vytvárať rýchle, bezpečné aplikácie a tvrdia, že Rust zabraňuje chybám segmentácie a zaručuje bezpečnosť vlastien pri vývoji aplikácií. Programovací jazyk Rust neobsahuje garbage collector, runtime alebo manuálnu správu pamäte, čo súvisí s jeho rýchlosťou a bezpečnosťou. Bezpečnosť Rustu je založená na troch striktných „ownership-based“ pravidlách, na ktoré dohliada prekladač. Prvé pravidlo hovorí o tom, že každá hodnota v Ruste má svoju premennú, ktorá je jej vlastníkom. Druhé pravidlo hovorí o tom, že každá hodnota môže mať práve jedného vlastníka a tretie pravidlo hovorí, že hodnota bude zahodená, keď sa jej vlastník dostane mimo rozsah (mimo blok) kódu [96][97]. Práve rýchlosť, bezpečnosť a podpora mnohých knižníc jazyka Rust viedla tvorcov hašovacej funkcie Blake3 k využitiu tohto jazyka pre vývoj Blaku3. Tieto výhody sme využili v bakalárskej práce pri prepojení hašovacej funkcie Blake3 s jazykom Python. V práci sme si vysvetlili princíp mapovania objektov jazyka Rust s jazykom Python. Vytvorili sme dynamický Python modul, ktorý sme neskôr otestovali v našej demonštračnej aplikácii a vykonali merania so zameraním na rýchlosť tejto implementácie. Rýchlosné meracie testy boli vykonané na rôznych implementáciach funkcie Blake3. Výsledký meraní boli zaslané na publikáciu do zborníka prác<sup>1</sup> fakulty elekrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. článok sa nachádza aj v prílohe **D**. Hoci naša implementácia je o čosi pomalšia ako optimalizovaná Rust implementácia, jej výhodou je zachovanie komfortu jazyka Python pri hašovaní dát.

Naša demonštračná implementácia hašovacej funkcie Blake3 má niekoľko nevýhod, t.j. väčšia spotreba pamäti, či neúplná podpora všetkých funkcionalít, ktoré ponúka funkcia Blake3 ako napríklad verifikácia streamovaných dát. Optimalizáciu

---

<sup>1</sup><http://eei.fei.tuke.sk/>

a úpravu zdrojového kódu je možné dosiahnúť s využitím vhodných programátor-ských techník a takéto vylepšenie považujem za vhodné pre ďalšie práce.

# Zoznam príloh

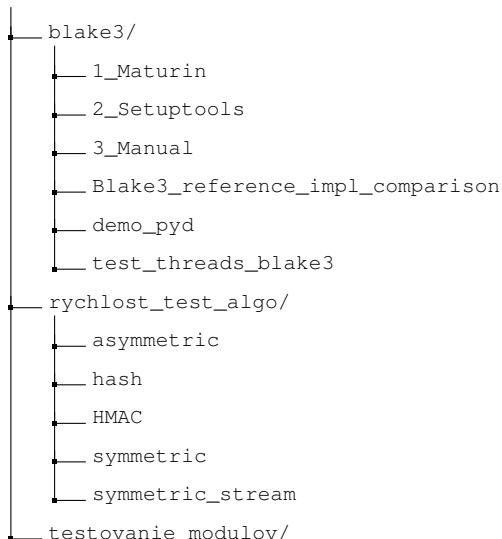
---

**Príloha A** Práca s binárnymi dátami.

**Príloha B** Inštalácia jazyka Python.

**Príloha C** Inštalácia jazyka Rust.

**Príloha D** CD médium - bakalárska práca v elektronickej podobe, článok zaslaný na publikáciu do EEI zborníka, zdrojové kódy demonštračných aplikácií, rýchlostné testy algoritmov, testovanie kryptografických knižník jazyka Python, prepojenie externého Rust modulu Blake3 s jazykom Python.



# A Práca s binárnymi dátami

---

Táto príloha má za úlohu opísť základné operácie s binárnymi dátami, ktoré sú potrebné pre kryptografiu v jazyku Python. Súčasťou prílohy bude aj stručný opis základných konverzných metód medzi binárnymi dátovými typmi.

## A.1 Základné operácie s bajtmi

Manipulácia s binárnymi dátami je v kryptografii klúčová najmä pri písaní aplikácií, ktoré vyžadujú prácu s kryptografickými algoritmami. Práve preto táto sekcia opisuje základné operácie s binárnymi dátami v jazyku Python.

Bytes-literal je jedným z možných vyjadrení binárnych dát. Ide o formát, ktorý je štruktúrovo podobný reťazcu (string), avšak obsahuje prefix `b`. Formát bytes-literal podporuje iba základných 127 ASCII znakov.

```
bytes_literal = b"ABCD"  
print("bytes_literal: ", bytes_literal)
```

V prípade, ak naše dáta obsahujú znaky, ktoré nie sú z podporovaného rozsahu 127 ASCII znakov, je vhodné použiť vstavanú metódu Python reťazca `encode()`. Táto metóda podporuje rôzne kódovacie sady ako napríklad predvolenú sadu utf-8, či utf-16. Analogicky je možné použiť metódu `dencode()` pre dekódovanie znakov.

```
string="ABCĐ"  
print("string.encode(): ", string.encode())
```

Bajt je v Python tzv. immutable dátovy typ. To znamená, že jeho hodnotu nie je možné meniť počas písania kódu. Zdrojový kód nižšie je domonštráciou snahy o zmenu premennej `change_bytes`, ktorá pôvodne obsahuje 4 nulové bajty. Pri

spustení kódu, nám Python interpreter vypíše chybové hlásenie.

```
change_byte = b'0000'
change_byte = bytes_zero[0:1]=b'2'
print("bytes_zero: ",change_byte)
```

V jazyku python vieme bajty generovať a kopírovať, s využitím vstavanej funkcie `bytes()`. Táto funkcia podporuje generovanie nulových bajtov, inkrementujúcich bajtov (vstupný parameter je funkcia `range()`) alebo kopírovanie bajtov.

```
# generovanie nulovych bajtov
bytes_zero = bytes(10)
print("bytes_zero: ",bytes_zero)

# generovanie inkrementujucich bajtov
bytes_inc = bytes(range(20))
print("bytes_inc: ",bytes_inc)

# kopirovanie bajtov
bytes_copied = bytes(bytes_inc)
print("bytes_copied: ",bytes_copied)
```

V kryptografii sa môžeme stretnúť s potrebou konverzie refazca hexadecimálnych znakov na bajty a naopak. Takúto konverziu je v Pythone možné vykonať využitím metódy `fromhex()` a `hex()`. Podmienkou je, že hexadecimálne znaky musia byť vyjadrené vždy po dvojiciach. To znamená, že ak by sme chli zapísat znak vyjadrujúci číslo 4, správny formát zápisu do dvojice znakov by bol `0x04` nie `0x4`. Takúto konverziu je možné vykonať následovne.

```
#hex_string po dvojiciach (hex znaky, max. ff)
hex_to_bytes_literal=bytes.fromhex('feac')
print("bytes_to_hex: ",hex_to_bytes_literal)
# feac -> b'\xfe\xac'

bytes_literal_to_hex = b'\xfe\xac'.hex()
print("bytes_literal_to_hex: ",bytes_literal_to_hex)
# b'\xfe\xac' -> feac
```

Python podporuje dátový typ byte-array, ktorý veľmi podobný typu `bytes` a je s ním možné vykonávať rovnaké operácie ako s typom `bytes`. Výhodou dátového typu `byte-array` oproti typu `bytes` je to, že je tzv. `mutable`, teda je možné meniť jeho obsah v kóde.

```
bytearray_zero = bytearray(10)
# bytearray je mutable a je možné meniť jeho obsah
bytearray_zero[1:2]=b'\x01'
print(bytearray_zero)
```

S typom byte-array je možné pracovať rovnako ako s typom bytes, teda možeme generovať, kopírovať a formovať bajty z hexa-reťazca.

```
# generovanie nulovych byte-arrays
bytearray_zero = bytearray(10)
print(bytearray_zero)

# generovanie inkrement. byte-arrays
bytearray_inc = bytearray(range(10))
print(bytearray_inc)

#create bytearray from hex-string
hex_string = '2Ef0 f1f0'
print(bytearray.fromhex(hex_string))
# 2ef0f1f0 -> b'.\xf0\xf1\xf0'

# get hex from bytearray
temp_bytearray = bytearray(b'.\xf0\xf1\xf0')
print(temp_bytearray.hex())
# b'.\xf0\xf1\xf0' -> 2ef0f1f0
```

## A.2 Konverzia dátovych typov Bytes-Bytearray-List

V tejto sekcií sa zameriame na základne konverzné techniky medzi dátovými typmi jazyka Python ako sú Bytes, Byte-array a List. Tieto konverzné techniky možno nájsť aj v našich demonštračných aplikáciach vytvorených pre testovanie kryptografických Python modulov.

### Konverzia List ↔ Byte-array:

```
# list na byte-array
test_list = [116, 101, 115, 116]
test_byte_array = bytearray(test_list)
print("test_byte_array: ", test_byte_array)

# bytearray na list
test_byte_array = list(bytearray(test_list))
print(test_byte_array)
```

### Konverzia List ↔ Bytes:

```
# list na bytes
bytes_from_list = bytes(list(range(20)))
print(bytes_from_list)

# bytes na list
list_form_bytes = list(bytes_from_list)
print(list_form_bytes)
```

**Konverzia Bytesarray ↔ Bytes:**

```
get_bytearray_from_bytes = bytearray(b'abcs')
print(get_bytearray_from_bytes)

get_bytes_from_bytearray = bytes(bytearray(b'abcs'))
print(get_bytes_from_bytearray)
```

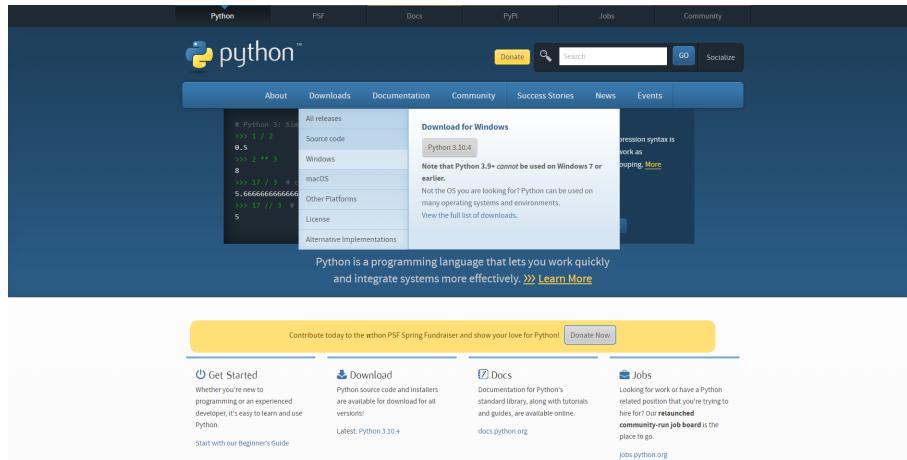
# B Opis inštalácie jazyka Python pre OS Windows

---

Táto príloha obsahuje detailný návod na inštaláciu programovacieho jazyka Python pre operačný systém Windows. Súčasťou prílohy je aj stručný návod inštalácie a využitia viacerých verzií programovacieho jazyka Python.

## B.1 Inštalácia jazyka Python pre OS Windows

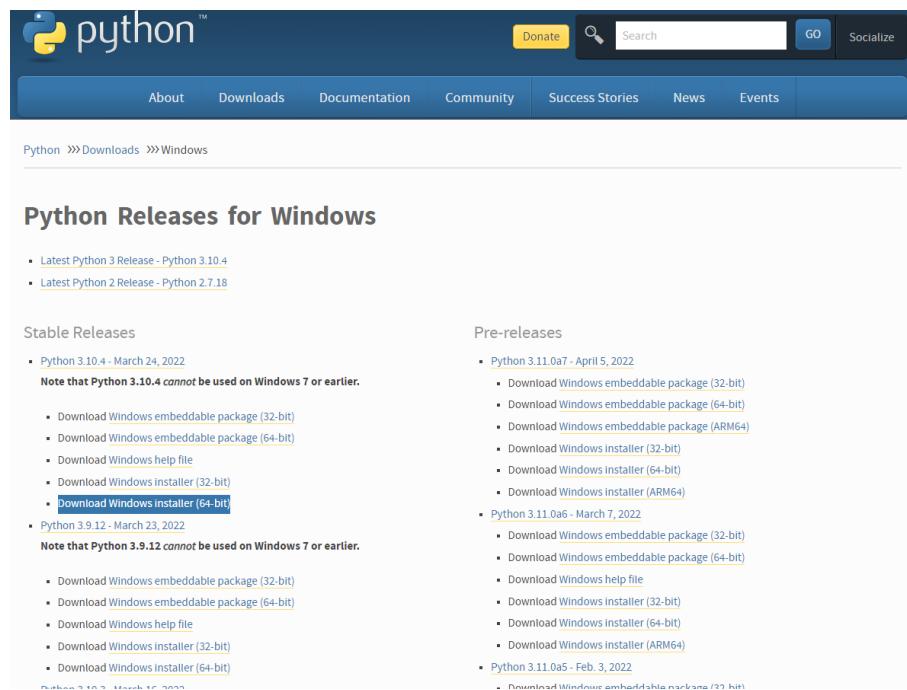
Inštalácia programovacieho jazyka Python pre OS Windows je realizovaná prostredníctvom inštalačného balíčka, ktorý je možný stiahnuť z oficiálnej stránky jazyka Python (<https://www.python.org/>) v sekcii **Downloads** (vid. Obr. B.1).



Obr. B.1: Oficiálna webová stránka jazyka Python

Následne vyberieme vhodnú verziu Pythonu a stiahneme inštalačný balíček (Obr. B.2). V tomto prípade si nainštalujeme aktuálne najnovšiu dostupnú verziu, teda verziu 3.10.4.

Po stiahnutí inštalačného balíčka spustíme inštaláciu Pythonu dvojklikom na inšta-



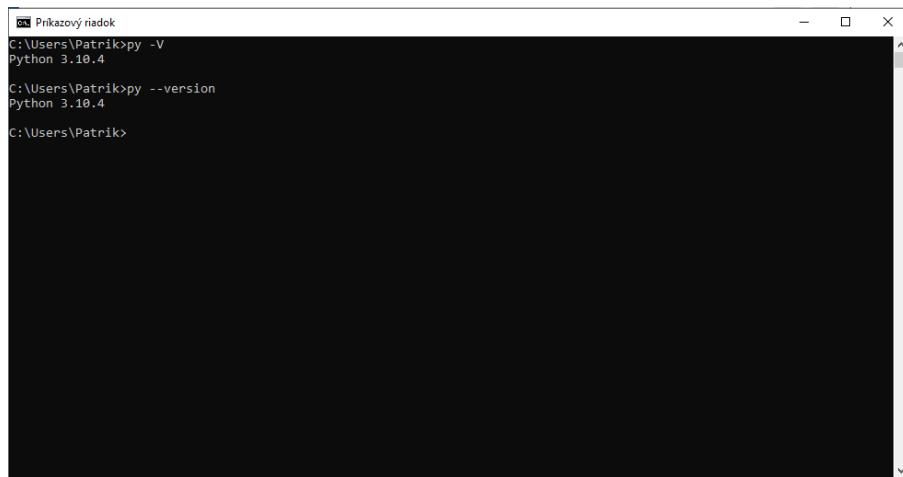
Obr. B.2: Výber požadovanej verzie jazyka Python

lačný balíček. Inštaláciu môžeme ponechať v preferovanom predvolenom nastavení



Obr. B.3: Proces inštalácie jazyka Python s využitím inštalačného balíčka

a pokračujeme s výberom možnosti **Install Now**, čo možno pozorovať na Obr. B.3. Touto voľbou sa nám nainštaluje verzia Pythonu 3.10.4 do predvoleného adresára, v tomto prípade C:\Users\Patrik\AppData\Local\Programs\Python\Python310. Správnosť inštalácie môžeme otestovať terminálovým príkazom `py -version` resp.



```
Prikazový riadok
C:\Users\Patrik>py -V
Python 3.10.4
C:\Users\Patrik>py --version
Python 3.10.4
C:\Users\Patrik>
```

Obr. B.4: Výpis nainštalovanej verzie Pythonu v príkazovom riadku

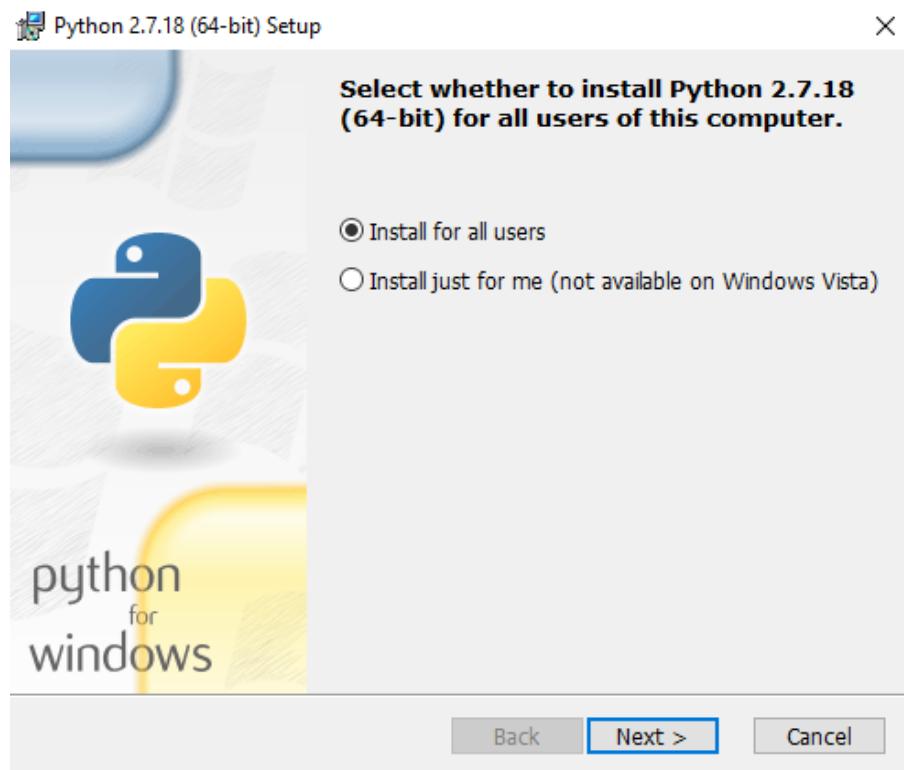
`py -V` (viď. Obr. B.4).

## B.2 Inštalácia a práca s viacerými verziami jazyka Python

Inštalácia viacerých verzií jazyka Python na jednom zariadení môže byť problematická. V tejto časti prílohy si uvedieme niekoľko metód inštalácie a použitia viacerých verzií jazyka Python pre OS Windows.

### B.2.1 Manuálna inštalácia

Prvým, najrýchlejším a zároveň najjednoduchším spôsobom je manuálna inštalácia viacerých verzií jazyka Python. V predošej časti tejto prílohy sme si nainštalovali Python 3.10.4. V tejto časti demonštrujeme inštaláciu Pythonu 2.7.18. Inštalácia prebehne podobný spôsobom ako pri inštalácii Python 3.10.4. V prvej fáze (Obr. B.5) inštalácie ponecháme predvolené nastavenia a zvolíme možnosť **Next>**. Následne vyberieme a zvolíme cestu pre inštaláciu Python 2.7.18. Cestu zvolíme rovankú akú sme volili pri inštalácii Python 3.10.4, pričom koncový adresár premenujeme na Python27, teda výsledná cesta by mohla vyzerať takto, C:\Users\Patrik\AppData\Local\Pro-grams\Python\Python27. Inštaláciu dokon-

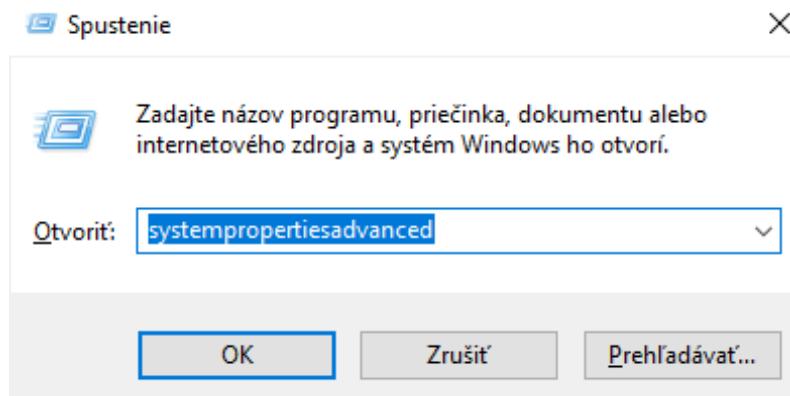


Obr. B.5: Inštalácia jazyka Python 2.7.18 k existujúcej verzii 3.10.4

číme výberom možnosti **Next>**.

Následne je nutné zvoliť (prepnúť) používanú verziu Pythonu. Prvým krokom, ktorý je potrebný vykonať je pridanie cesty C:\Users\Patrik\AppData\Local\Programs\Python\Python27 do systémových premenných prostredia. Pridať cestu do systémových premenných prostredia môžno realizovať následovne:

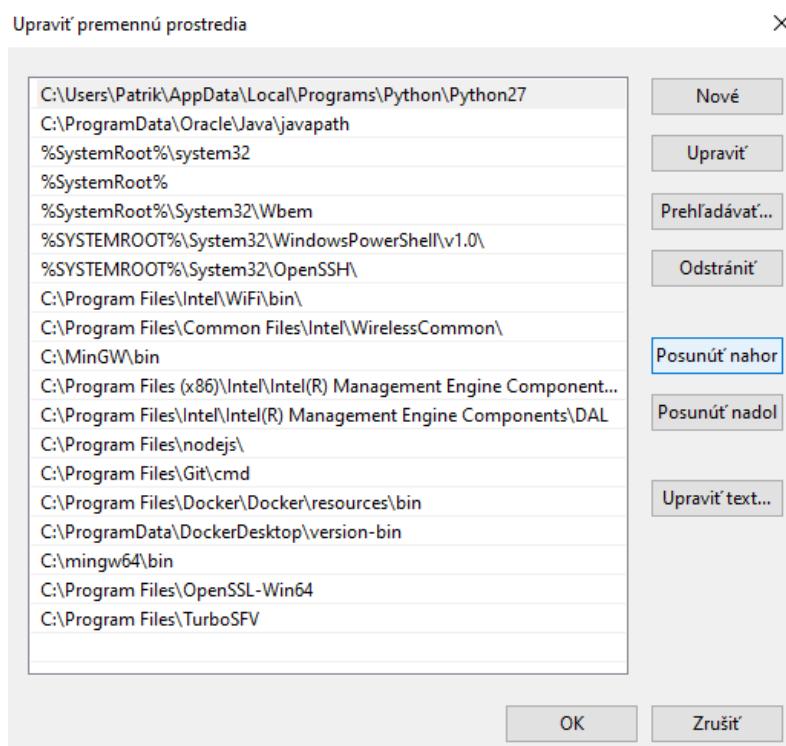
1. Pomocou klávesovej skratky **Win+R** vyhľadáme názov **systempropertiesadvanced**.



2. Zvolíme možnosť **Premenné prostredia**. V časti **Systémové premenné** zvolíme

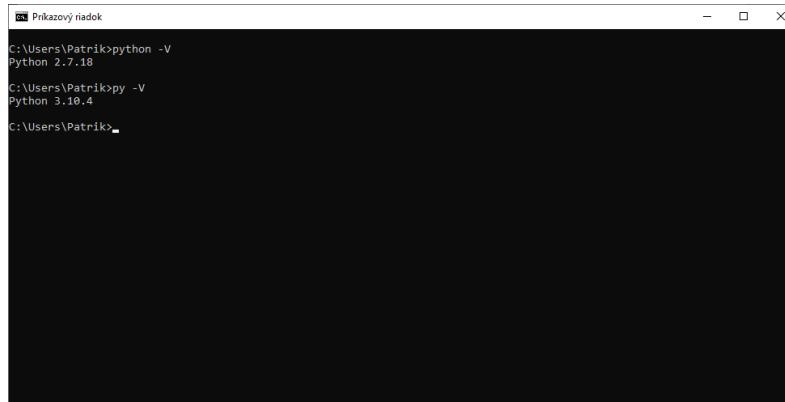
premennú **Path** a následne vyberieme možnosť **upraviť**.

3. Pridáme cestu do systémových premenných pomocou tlačidla **Nové**, kde vložíme cestu C:\Users\Patrik\AppData\Local\Programs\Python\Python27.
4. Je dôležité, aby naša novo-pridaná cesta k Pythonu 2.7.18 bola ako prvá v poradí, tým zabezpečíme „prepnutie“ verzie. Následne uložíme vykonané zmeny a spustíme príkazový riadok.



5. V príkazovom riadku spustíme príkaz `python -V`. Je veľmi dôležité použiť príkaz **python** a nie **py**, pretože príkaz **py** pracuje na globálne predvolenej verzii Python 3.10.4. Súbory, ktoré chceme spúštať z verzie, ktorú sme si zvolili ako prvú v poradí (v systémových premenných prostredia) budeme tak tiež spúštať príkazom (`python`).

Takúto manuálnu inštaláciu viacerých verzií jazyka Python je možné vykonať aj pomocou video návodu (<https://www.youtube.com/watch?v=ggRsauJcEyE>).



```
C:\Users\Patrik>python -V
Python 2.7.18
C:\Users\Patrik>py -V
Python 3.10.4
C:\Users\Patrik>
```

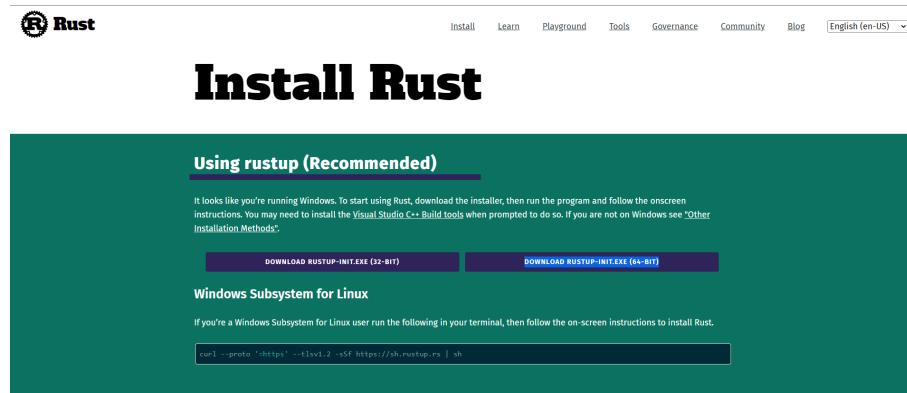
## **B.2.2 Inštalácia viacerých verzií jazyka Python pomocou nástroja pyenv**

Inštaláciu viacerých verzií jazyka Python je možné vykonať oveľa komfortnejším a flexibilnejším spôsobom, pomocou nástrojov pyenv alebo pyenv-virtualenv. V prípade ak by sme chceli nainštalovať viacero verzií jazyka Python 3.x.x je vhodné zvoľiť nástroj pyenv, ktorý je pre OS Windows dostupný v github repozitári (<https://github.com/pyenv-win/pyenv-win>). Nainštalovanie a práca s nástrojom pyenv je detailne opísaná v návode (<https://k0nze.dev/posts/install-pyenv-venv-vscode/>), resp. v dostupnom online video návode (<https://youtu.be/HTx18uyyHw8>). V prípade, ak chceme pracovať aj s verziou Python 2.x.x je lepšie zvážiť nástroj pyenv-virtualenv (<https://rb.gy/kxap6c>).

# C Opis inštalácie jazyka Rust pre OS Windows

---

Inštalácia programovacieho jazyka Rust pre operačný systém Windows pozostáva z niekoľkých krokov. Prvým krokom je stiahnutie inštalačného balíčka pre jazyk Rust (<https://www.rust-lang.org/tools/install>). Inštalácia vyžaduje prítomnosť softvéru **C++ build tools for Visual Studio 2013** alebo akúkoľvek novšiu verziu, ktorý je dostupný na linke: <https://visualstudio.microsoft.com/visual-cpp-build-tools/>. Po stiahnutí a nainštalovaní **C++ build tools for Visual Studio 2013**, mô-



Obr. C.1: Inštalačný balíček jazyka Rust dostupný na oficiálnej webovej stránke Rustu

žeme pokračovať v inštalácií samotného Rustu. Dvojklikom na inštalačný balíček Rustu spustíme terminálový inštalačný proces. Obr. C.2 obsahuje výpis z terminálu, v ktorom si môžeme zvoliť jednu z 3 možnosti. Pokračujeme prednastaveným (defaultným) spôsobom a vyberieme možnosť 1. Zvolením tejto možnosti súhlasíme s predvolenými nastaveniami a začneme proces inštalácie jazyka Rust a jeho závislosti ako napríklad balíčkový manažér Cargo.

```
The Cargo home directory located at:  
C:\Users\Patrik\.cargo  
This can be modified with the CARGO_HOME environment variable.  
The cargo, rustc, rustup and other commands will be added to  
Cargo's bin directory, located at:  
C:\Users\Patrik\.cargo\bin  
This path will then be added to your PATH environment variable by  
modifying the HKEY_CURRENT_USER\Environment\PATH registry key.  
You can uninstall at any time with rustup self uninstall and  
these changes will be reverted.  
Current installation options:  
  
    default host triple: x86_64-pc-windows-msvc  
        default toolchain: stable (default)  
            profile: default  
            modify PATH variable: yes  
1) Proceed with installation (default)  
2) Customize installation  
3) Cancel installation  
>
```

Obr. C.2: Terminálový výpis pri inštalácii jazyka Rust

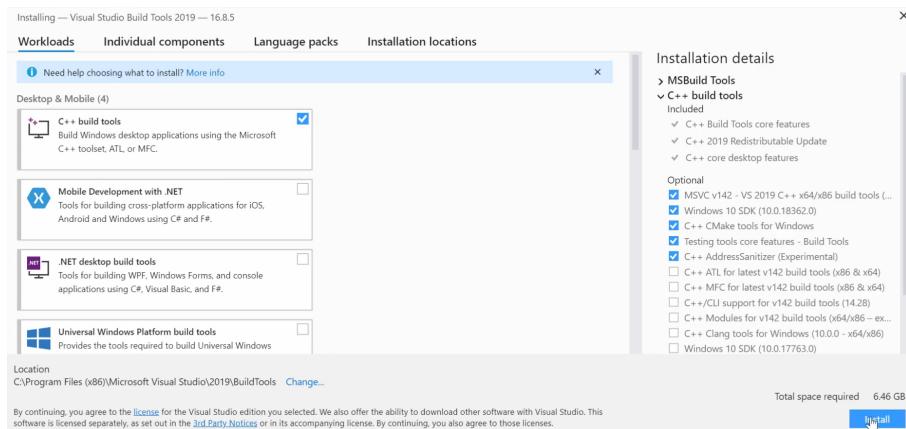
V prípade, že po spustení inštalačného balíčka Rust dostaneme terminálový výpis, ktorý je naznačený na Obr. C.3, je nutné stiahnuť a nainštalovať softvér **C++ build tools for Visual Studio 2013** (<https://visualstudio.microsoft.com/visual-cpp-build-tools/>). Obr. C.3 informuje o potrebe softvéru **Microsoft C++ build tools**

```
Rust Visual C++ prerequisites  
Rust requires the Microsoft C++ build tools for Visual Studio 2013 or  
later, but they don't seem to be installed.  
The easiest way to acquire the build tools is by installing Microsoft  
Visual C++ Build Tools 2019 which provides just the Visual C++ build  
tools:  
https://visualstudio.microsoft.com/visual-cpp-build-tools/  
Please ensure the Windows 10 SDK and the English language pack components  
are included when installing the Visual C++ Build Tools.  
Alternately, you can install Visual Studio 2019, Visual Studio 2017,  
Visual Studio 2015, or Visual Studio 2013 and during install select  
the "C++ tools":  
https://visualstudio.microsoft.com/downloads/  
Install the C++ build tools before proceeding.  
If you will be targeting the GNU ABI or otherwise know what you are  
doing then it is fine to continue installation without the build  
tools, but otherwise, install the C++ build tools before proceeding.  
Continue? (Y/n) -
```

Obr. C.3: Terminálový výpis, ktorý informuje o tom, že sovtvér Microsoft C++ build tool, nie je dostupný

pre inštaláciu jazyka Rust. V tomto prípade je možné inštaláciu zrušiť a pokračovať s nainštalovaním **Microsoft C++ build tools**. Pri inštalácii **C++ build tools for Visual Studio 2013** je nutné zvoliť inštaláciu **C++ build tools**.

Po úspešnom nainštalovaní **C++ build tools** je možné opäť spustiť inštalačný balíček programovacieho jazyka Rust. Po spravnom nainštalovaní **C++ build tools** a opäťovnom spustení inštalácie jazyka Rust, dostaneme terminalový výpis zhodný



Obr. C.4: Priebeh inštalácie softvéru Microsoft C++ build tools

s Obr. C.2, pri ktorom násedne zvolíme predvolenú možnosť inštalácie, teda zvolíme možnosť 1.

# Literatúra

---

1. KUHLMAN, Dave. *A Python Book: Beginning Python, Advanced Python, and Python Exercises*. [online] [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: [https://web.archive.org/web/20120623165941/http://cutter.rexx.com/~dkuhlman/python\\_book\\_01.html](https://web.archive.org/web/20120623165941/http://cutter.rexx.com/~dkuhlman/python_book_01.html).
2. BARANY, Gergö. *Python Interpreter Performance Deconstructed*. [online] [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: [https://www.cristal.univ-lille.fr/dyla14/papers/dyla14-8-Python\\_Interpreter\\_Performance\\_Deconstructed.pdf](https://www.cristal.univ-lille.fr/dyla14/papers/dyla14-8-Python_Interpreter_Performance_Deconstructed.pdf).
3. CHUN, Wesley J. *Core Python Programming*. USA: Prentice Hall PTR, 2006. ISBN 978-01-3226-993-3.
4. FOURMENT, Mathieu; GILLINGS, Michael R. *A comparison of common programming languages used in bioinformatics*. [online] [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/1471-2105-9-82.pdf>.
5. TABBA, Fuad. *Adding Concurrency in Python Using a Commercial Processor's Hardware Transactional Memory Support*. [online] [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: [https://web.archive.org/web/20130115061039id\\_/http://www.cs.auckland.ac.nz/~fuad/parpycan.pdf](https://web.archive.org/web/20130115061039id_/http://www.cs.auckland.ac.nz/~fuad/parpycan.pdf).
6. JARAKACA. *Integrating Python With Other Languages*. [online] [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://wiki.python.org/moin/IntegratingPythonWithOtherLanguages>.
7. BRAY, Shannon W. *Practical Cryptography in Python: Learning Correct Cryptography by Example*. New York, 2019. 1. ISBN 9781484248997.
8. GUIDO VAN ROSSUM, and the Python development team. *The Python Library Reference*. [online] [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/download.html>.

9. RUST. *Programovací jazyk Rust*. [online] [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <http://www.rust-lang.org/>.
10. MICROSOFT. *System Security Cryptography Namespace*. [online] [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/api/system.security.cryptography?view=net-6.0>.
11. SITIARIK, Patrik. *Elektronická Príručka Práce So Súbormi, Poliami A Zoznamami V Jazyku Python*. [online] [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=FB09C562C25683D6609B6652F34B>.
12. PANKAJ. *Reading Large Text Files in Python*. [online] [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: <https://www.journaldev.com/32059/read-large-text-files-in-python>.
13. BURDA, Karel. *Kryptografia okolo nás*. Praha, 2019. 1. ISBN 9788088168492. Tiež dostupné na: [https://web2.mlp.cz/koweb/00/04/52/75/91/kryptografie\\_okolo\\_nas.pdf](https://web2.mlp.cz/koweb/00/04/52/75/91/kryptografie_okolo_nas.pdf).
14. PYCRYPTODOME, Modul. *PyCryptodome*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.pycryptodome.org/en/latest/index.html>.
15. 197, FIPS. *Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/fips/nist.fips.197.pdf>.
16. BERNSTEIN, Daniel J. *Salsa20 specification*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://cr.yp.to/snuffle/spec.pdf>.
17. JONSSON, J.; KALISKI, B. *Public-Key Cryptography Standards (PKCS) 1: RSA Cryptography Specifications Version 2.1*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://cr.yp.to/snuffle/spec.pdf>.
18. 186-4, FIPS PUB. *Digital Signature Standard (DSS)*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/fips/nist.fips.186-4.pdf>.
19. 202, FIPS PUB. *SHA-3 Standard: Permutation-Based Hash and Extendable-Output Functions*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/fips/nist.fips.202.pdf>.
20. AUMASSON, Jean-Philippe; NEVES, Samuel; WILCOX-O'HEARN, Zooko; WINNERLEIN, Christian. *BLAKE2: simpler, smaller, fast as MD5*. [online] [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.blake2.net/blake2.pdf>.

21. RAJITHA RANASINGHE, and PABASARA ATHUKORALA. *GENERALIZATION OF THE ELGAMAL PUBLIC-KEY CRYPTOSYSTEM*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2020/354.pdf>.
22. 198-1, FIPS PUB. *The Keyed-Hash Message Authentication Code (HMAC)*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.198-1.pdf>.
23. OPENSSL. *OpenSSL Cryptography and SSL/TLS Toolkit*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.openssl.org/>.
24. MARTINEZ, V. Gayoso; ALVAREZ, F. Hernandez; ENCINAS, L. Hernandez; AVILA, C. Sanchez. *A Comparison of the Standardized Versions of ECIES*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: [https://digital.csic.es/bitstream/10261/32674/1/Gayoso\\_A%20Comparison%20of%20the%20Standardized%20Versions%20of%20ECIES.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/32674/1/Gayoso_A%20Comparison%20of%20the%20Standardized%20Versions%20of%20ECIES.pdf).
25. HOUSLEY, R. *Use of the Elliptic Curve Diffie-Hellman Key Agreement Algorithm with X25519 and X448 in the Cryptographic Message Syntax (CMS)*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8418>.
26. MATSUI, M.; NAKAJIMA, J. *A Description of the Camellia Encryption Algorithm*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3713>.
27. IQBAL, Muhammad; SAHPUTRA, Yudi; SIAHAAN, Andysah Putera Utama. *The Understanding of GOST Cryptography Technique*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/308661220\\_The\\_Understanding\\_of\\_GOST\\_Cryptography\\_Technique](https://www.researchgate.net/publication/308661220_The_Understanding_of_GOST_Cryptography_Technique).
28. RESCORLA, E. *A Description of the Camellia Encryption Algorithm*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3713>.
29. PROVOS, Niels; MAZIERES, David. *Bcrypt Algorithm*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: [https://www.usenix.org/legacy/events/usenix99/provos/provos\\_html/node5.html](https://www.usenix.org/legacy/events/usenix99/provos/provos_html/node5.html).

30. BIRYUKOV, Alex; DINU, Daniel; KHOVRATOVICH, Dmitry. *Argon2: the memory-hard function for password hashing and other applications.* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.password-hashing.net/argon2-specs.pdf>.
31. CRYPTOGRAPHY, Modul. *pyca/cryptography.* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://cryptography.io/en/latest/>.
32. BEIMEL, Amos. *Secret-Sharing Schemes: A Survey.* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.turbosfv.com/Blog?q=2&p0=68>.
33. CHEN, Lily et al. Recommendation for key derivation using pseudorandom functions. *NIST special publication.* 2008, roč. 800, s. 108. Tiež dostupné na: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-108.pdf>.
34. PYCA/CRYPTOGRAPHY. *Frequently asked questions.* [online] [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://cryptography.io/en/latest/faq/?highlight=side-channel#why-use-cryptography>.
35. 46-3, FIPS PUB. *DATA ENCRYPTION STANDARD (DES).* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/46/3/archive/1999-10-25/documents/fips46-3.pdf>.
36. ADAMS, C. *The CAST-128 Encryption Algorithm.* [online] [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.ipa.go.jp/security/rfc/RFC2144EN.html>.
37. RC2. *Analysis of RC2.* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.cryptrec.go.jp/exreport/cryptrec-ex-1042-2001.pdf>.
38. NIR, Y. *ChaCha20 and Poly1305 for IETF Protocols.* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7539>.
39. MIRONOV, Ilya. *(Not So) Random Shuffles of RC4.* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2002/067.pdf>.
40. LEE, H.J.; LEE, S.J.; YOON, J.H.; CHEON, D.H.; LEE, J.I. *The SEED Encryption Algorithm.* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4269.html>.
41. TSE, R.; WONG, W.; SAARINEN, M-J. *The SM4 Blockcipher Algorithm And Its Modes Of Operations draft-ribose-cfrg-sm4-10.* [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ribose-cfrg-sm4-10>.

42. CHINTA, Sankeeth Kumar. *Blowfish*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <http://cs.indstate.edu/~schinta/blowfish.pdf>.
43. ARTHEESWARI, S.; CHANDRASEKARAN, RM. *INTERNATIONAL DATA ENCRYPTION ALGORITHM (IDEA) FOR DATA SECURITY IN CLOUD*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.ijcns.com/pdf/ijtesvol8no1-2.pdf>.
44. DWORKIN, Morris. *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation Methods and Techniques*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA400014.pdf>.
45. CALLAS, J.; DONNERHACKE, L.; FINNEY, H.; SHAW, D.; THAYER, R. *OpenPGP Message Format*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4880>.
46. WHITING, D.; HOUSLEY, R.; FERGUSON, N. *Counter with CBC-MAC (CCM)*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3610.html>.
47. BELLARE, M.; ROGAWAY, P.; WAGNER, D. *The EAX Mode of Operation*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.cs.ucdavis.edu/~rogaway/papers/eax.pdf>.
48. HARKINS, D. *Synthetic Initialization Vector (SIV) Authenticated Encryption Using the Advanced Encryption Standard (AES)*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5297.html>.
49. KROVETZ, T.; ROGAWAY, P. *The OCB Authenticated-Encryption Algorithm*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7253.html>.
50. HOUSLEY, R. *Using AES-CCM and AES-GCM Authenticated Encryption in the Cryptographic Message Syntax (CMS)*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5084.html>.
51. DWORKIN, Morris. *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The XTS-AES Mode for Confidentiality on Storage Devices*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-38e.pdf>.
52. 186-3, FIPS PUB. *Digital Signature Standard (DSS)*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: [https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/186/3/archive/2009-06-25/documents/fips\\_186-3.pdf](https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/186/3/archive/2009-06-25/documents/fips_186-3.pdf).

53. 180-2, FIPS PUB. *SECURE HASH STANDARD*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/180/2/archive/2002-08-01/documents/fips180-2.pdf>.
54. SAGAR, Farhad Ahmed. *Cryptographic Hashing Functions - MD5*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://cs.indstate.edu/~fsagar/doc/paper.pdf>.
55. ZHENG, Xin; HU, Xianghong; ZHANG, Jinglong; YANG, Jian. *An Efficient and Low-Power Design of the SM3 Hash Algorithm for IoT*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/335848054\\_An\\_Efficient\\_and\\_Low-Power\\_Design\\_of\\_the\\_SM3\\_Hash\\_Algorithm\\_for\\_IoT](https://www.researchgate.net/publication/335848054_An_Efficient_and_Low-Power_Design_of_the_SM3_Hash_Algorithm_for_IoT).
56. BERTONI, Guido; DAEMEN, Joan; PEETERS, Michal; ASSCHE, Gilles Van; KEER, Ronny Van; VIGUIER, Benoit. *KangarooTwelve: fast hashing based on Keccak-p*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2016/770.pdf>.
57. DOBBERTIN, Hans; BOSSELAERS, Antoon; PRENEEL, Bart. *RIPEMD-160: A Strengthened Version of RIPEMD*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://homes.esat.kuleuven.be/~bosselaer/ripemd160/pdf/AB-9601/AB-9601.pdf>.
58. 800-38B, NIST Special Publication. *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The CMAC Mode for Authentication*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/specialpublications/nist.sp.800-38b.pdf>.
59. 800-185, NIST Special Publication. *SHA-3 Derived Functions: cSHAKE, KMAC, TupleHash and ParallelHash*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/specialpublications/nist.sp.800-185.pdf>.
60. WANG, Dayin; LIN, Dongdai; WU, Wenling. *An Improved Poly1305 MAC*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/221651941\\_An\\_Improved\\_Poly1305\\_MAC](https://www.researchgate.net/publication/221651941_An_Improved_Poly1305_MAC).
61. HASHLIB, Modul. *Hashlib*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://docs.python.org/3.8/library/hashlib.html>.
62. PYNACL, Modul. *PyNaCl*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/PyNaCl/>.

63. TINYEC, Modul. *tinyec*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/tinyec/>.
64. O'CONNOR, Jack; AUMASSON, Jean-Philippe; NEVES, Samuel; WILCOX-O'HEARN, Zooko. *BLAKE3 one function, fast everywhere*. 2020.
65. O'CONNOR, Jack. *The Bao Spec*. [online] [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: [https://github.com/oconnor663/bao/blob/master/docs/spec\\_0.9.1.md](https://github.com/oconnor663/bao/blob/master/docs/spec_0.9.1.md).
66. MACHADO, Armando; DOMINGUES, J. Augusto. *Suacoin: Ecological friendly proof-of-work cryptocurrency*. [online] [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.suacoin.com/Suacoin.pdf>.
67. O'CONNOR, Jack; AUMASSON, Jean-Philippe; NEVES, Samuel; WILCOX-O'HEARN, Zooko. *Blake3*. [online] [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://github.com/BLAKE3-team/BLAKE3#adoption--deployment>.
68. PENARD, Wouter; WERKHOVEN, Tim van. *On the Secure Hash Algorithm family*. [online] [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: [https://blog.infocruncher.com/resources/ethereum-whitepaper-annotated/On%20the%20Secure%20Hash%20Algorithm%20family%20\(2008\).pdf](https://blog.infocruncher.com/resources/ethereum-whitepaper-annotated/On%20the%20Secure%20Hash%20Algorithm%20family%20(2008).pdf).
69. SZYDŁO, Michael. *Merkle Tree Traversal in Log Space and Time*. [online] [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-540-24676-3\\_32.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-540-24676-3_32.pdf).
70. ATIGHEHCHI, Kevin; ROLLAND, Robert. *Optimization of Tree Modes for Parallel Hash Functions: A Case Study*. [online] [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1512.05864.pdf>.
71. CHAMPINE, Luke. *Streaming Merkle Proofs within Binary Numeral Trees*. [online] [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2021/038.pdf>.
72. MERKLE, Ralph C. *METHOD OF PROVIDING DIGITAL SIGNATURES*. U.S. Patent 4 309 569, jan. 1982.
73. DAHLBERG, Rasmus; PULLS, Tobias; PEETERS, Roel. *Efficient Sparse Merkle Trees Caching Strategies and Secure (Non-)Membership Proofs*. [online] [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2016/683.pdf>.
74. CHAPWESKE, J. *Tree Hash EXchange format (THEX)*. 2003. Dostupné z: <https://adc.sourceforge.io/draft-jchapweske-thex-02.html>.

75. SCHRODER, Dominique; SCHRODER, Dominique. *Verifiable Data Streaming*. [online] [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2013/038.pdf>.
76. CASTELLON, Cesar; ROY, Swapnoneel; KREIDL, Patrick; DUTTA, Ayan; BÖLÖNI, Ladislau. Energy Efficient Merkle Trees for Blockchains. In: *2021 IEEE 20th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*. 2021, s. 1093–1099. Dostupné z DOI: [10.1109/TrustCom53373.2021.00149](https://doi.org/10.1109/TrustCom53373.2021.00149).
77. MOHAN, Arun Prasad; MOHAMEDASFAK, R.; GLADSTON, Angelin. Merkle Tree and Blockchain-Based Cloud Data Auditing. *Int. J. Cloud Appl. Comput.* 2020, roč. 10, s. 54–66.
78. BAILEY, Bolton; SANKAGIRI, Suryanarayana. *Merkle Trees Optimized for Stateless Clients in Bitcoin*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2021/340.pdf>.
79. GALAL, Hisham S.; ELSHEIKH, Muhammad; YOUSSEF, Amr M. *An Efficient Micropayment Channel on Ethereum*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2019/1322.pdf>.
80. CRYPTOPEDIA. *Merkle Trees and Merkle Roots Help Make Blockchains Possible*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.gemini.com/cryptopedia/merkle-tree-blockchain-merkle-root#section-merkle-trees-in-bitcoin-and-beyond>.
81. O'CONNOR, Jack. *Blake3/asm*. [online] [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: [http://github.com/BLAKE3-team/BLAKE3/blob/e17743e8fdf2845be6dc85ad339bf45feeefc564/asm/asm.py#L331-L370](https://github.com/BLAKE3-team/BLAKE3/blob/e17743e8fdf2845be6dc85ad339bf45feeefc564/asm/asm.py#L331-L370).
82. GEPNER, Paweł. *Using Avx2 Instruction Set To Increase Performance Of High Performance Computing Code*. [online] [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: [tp://147.213.75.178/ojs/index.php/cai/article/viewFile/%202017\\_5\\_1001/851](https://147.213.75.178/ojs/index.php/cai/article/viewFile/%202017_5_1001/851).
83. INTEL. *Intel AVX-512 Instructions*. [online] [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/technical/intel-avx-512-instructions.html?wapkw=avx>.

84. WATANABE, Hiroshi; NAKAGAWA, Koh M. SIMD vectorization for the Lennard-Jones potential with AVX2 and AVX-512 instructions. *Computer Physics Communications*. 2019, roč. 237, s. 1–7. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.10.028>.
85. GUNSING, Aldo. *Block-Cipher-Based Tree Hashing*. [online] [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://eprint.iacr.org/2022/283.pdf>.
86. O'CONNOR, Jack. *Blake3/c/Security Notes*. [online] [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://github.com/BLAKE3-team/BLAKE3/tree/master/c#security-notes>.
87. TECHNOLOGIES, RITAMBHARA. *Big and Little Endian*. [online] [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.ritambhara.in/big-and-little-endian/>.
88. BLANDY, J.; ORENDORFF, J. *Programming Rust: Fast, Safe Systems Development*. O'Reilly Media, 2017. ISBN 9781491927281.
89. PyO3. [online] [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://docs.rs/pyo3/latest/pyo3/>.
90. MATURIN, Modul. *maturin*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/maturin/>.
91. ZELEŇÁK, Patrik. *CryptographyInPython\_Thesis*. [online] [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: [https://github.com/Alg0ritmus/CryptographyInPython\\_Thesis](https://github.com/Alg0ritmus/CryptographyInPython_Thesis).
92. BAKHVALOV, DENIS. *How to get consistent results when benchmarking on Linux?* [online] [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://easyperf.net/blog/2019/08/02/Perf-measurement-environment-on-Linux>.
93. KNUDSEN, Lars R.; MEIER, Willi; PRENEEL, Bart; RIJMEN, Vincent; VERDOOLAEGE3, Sven. *Analysis Methods for (Alleged) RC4*. [online] [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-49649-1\\_26.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-49649-1_26.pdf).
94. ADALIER, Mehmet. *Efficient and Secure Elliptic Curve Cryptography Implementation of Curve P-256*. [online] [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/events/workshop-on-elliptic-curve-cryptography-standards/documents/papers/session6-adalier-mehmet.pdf>.
95. TURBOSFV. *TurboSFV v9.20*. [online] [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.turbosfv.com/Blog?q=2&p0=68>.

96. FULTON, Kelsey R.; CHAN, Anna; VOTIPKA, Daniel; HICKS, Michael; MAZUREK, Michelle L. *Benefits and Drawbacks of Adopting a Secure Programming Language: Rust as a Case Study*. [online] [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: [https://obj.umiacs.umd.edu/securitypapers/Rust\\_as\\_a\\_Case\\_Study.pdf](https://obj.umiacs.umd.edu/securitypapers/Rust_as_a_Case_Study.pdf).
97. APODACA, Richard L. *Rust Ownership by Example*. [online] [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://depth-first.com/articles/2020/01/27/rust-ownership-by-example/#:~:text=For%20as%20long%20as%20a%20variable%20remains%20in,owner%20is%20no%20longer%20used%20within%20the%20scope..>