Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ľahká kryptografia vo VPN sieťach

Diplomová práca

2023 **Bc. Marek Rohač**

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ľahká kryptografia vo VPN sieťach

Diplomová práca

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

Košice 2023 **Bc. Marek Rohač**

Abstrakt v SJ

Cieľom práce je oboznámiť čitateľa s problematikou VPN sieti. V práci sme opísali základné princípy fungovania VPN, klasifikáciu na základe viacerých aspektov a charakteristiku viacerých známych VPN protokolov. Následne sme sa zamerali na charakteristiku pojmu ľahká kryptografia. Opísali sme kryptografickú permutáciu XOODOO a možnosti jej použitia. V praktickej časti sme analyzovali, demonštrovali a experimentálne odmerali implementáciu XOODOO permutáciu v jednoduchej VPN sieti. VPN sieť vytvára voľne dostupný program DSVPN. Je napísaný v jazyku C a obsahuje otvorený zdrojový kód. V rámci praktickej časti sme sa zamerali aj na rozšírenie kompatibility v programe DSVPN pre OS Windows. V závere práce sme zhrnuli dosiahnuté výsledky a ponúkame čitateľovi možnosti ďalšieho rozšírenia práce.

Kľúčové slová v SJ

DSVPN, Ľahká kryptografia, Linux, VPN, Windows, XOODOO

Abstrakt v AJ

The aim of the work is to familiarize the reader with the issue of VPN networks. In the work, we described the basic principles of VPN operation, classification based on several aspects and characteristics of several known VPN protocols. Subsequently, we focused on the characteristics of the concept of lightweight cryptography. We have described the XOODOO cryptographic permutation and the possibilities of its use. In the practical part, we analyzed, demonstrated and experimentally measured the implementation of XOODOO permutation in a simple VPN network. The VPN network is created by the freely available program DSVPN. It is written in C and contains open source code. As part of the practical part, we also focused on expanding compatibility in the DSVPN program for Windows OS. At the end of the work, we summarized the achieved results and offer the reader possibilities for further expansion of the work.

Kľúčové slová v AJ

DSVPN, Lightweight Cryptography, Linux, VPN, Windows, XOODOO

Bibliografická citácia

ROHAČ, Bc. Marek. *Ľahká kryptografia vo VPN sieťach*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2023. 104s. Vedúci práce: prof. Ing. Miloš Drutarovský, CSc.

67865

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií

ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študijný odbor: **Informatika**

Študijný program: **Počítačové siete**

Názov práce:

Ľahká kryptografia vo VPN sieťach

Lightweight Cryptography in VPN Networks

Študent: **Bc. Marek Rohač**

Školiteľ: **prof. Ing. Miloš Drutarovský, CSc.**

Školiace pracovisko: **Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií**

Konzultant práce:

Pracovisko konzultanta:

Pokyny na vypracovanie diplomovej práce:

Na základe dostupných informácií naštudujte a opíšte kryptografickú permutáciu XOODOO využívanú v ľahkej kryptografii. Analyzujte a opíšte dostupné implementácie, ktoré využívajú XOODOO permutáciu v zabezpečení VPN siete. V jazyku C vytvorte demonštračné aplikácie jednoduchej VPN siete využívajúce XOODOO permutáciu na platformách Linux alebo Windows a experimentálne overte ich funkčnosť. Analyzujte aké výpočtové nároky má vytvorená implementácia. Dokumentáciu k diplomovej práci vytvorte tak, aby ju bolo možné využiť aj v špecializovaných predmetoch zameraných na bezpečnosť informačných a komunikačných systémov.

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský

Termín pre odovzdanie práce: 21.04.2023

Dátum zadania diplomovej práce: 31.10.2022

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY -12-

.....

prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

dekan fakulty

Čestné vyhlásenie

Vyhlasujem, že som záverečnú prácu vypracoval samostatne s použitím uvedenej odbornej literatúry.

Košice, 21. 4. 2023 .....

Vlastnoručný podpis

Poďakovanie

Na tomto mieste by som rád poďakoval svojmu vedúcemu práce *prof. Ing. Milošovi Drutarovskému, CSc.* za jeho čas a odborné vedenie počas celého riešenia záverečnej práce.

Obsah

Zoznam obrázkov

Zoznam tabuliek

Zoznam zdrojových kódov

Zoznam skratiek

AES Advanced Encryption Standard.

AH Authentication Header.

CHAP Challenge Handshake Authentication Protocol.

ECC Eliptic Curve Cryptography.

ECDH Elliptic-Curve Diffie–Hellman.

ECDSA Elliptic Curve Digital Signature Algorithm.

ESP Encapsulating Security Payloads.

FSKD Full-State Keyed Duplex.

FTP File Transfer Protocol.

FW FireWall.

GRE Generic Routing Encapsulation.

GW GateWay.

HTTP HyperText Transfer Protocol.

HTTPS HyperText Transfer Protocol Secure.

IOT Internet Of Things.

IP Internet Protocol.

IPSec Internet Protocol Security.

ISAKMP Internet Security Association and Key Management Protocol.

KP Cryptographical Primitive.

L Layer.

L2F Layer 2 Forwarding protocol.

L2TP Layer 2 Tunneling Protocol.

LAC L2TP Access Concentrator.

LNS L2TP Network Server.

LTS Long Term Support.

LWC LightWeight Cryptography.

LWCA LightWeight Cryptography Algorithm.

MAC Message Authentication Code.

MS-CHAP MicroSoft Challenge Handshake Authentication Protocol.

MTU Maximum Transmission Unit.

NAS Network Access Server.

NAT Network Address Translation.

NIST National Institute of Standards and Technology.

OS Operating System.

OSI Open Systems Interconnection reference model.

PAP Password Authentication Protocol.

PDV Packet Delay Variation.

PPP Point-to-Point Protocol.

PPPoE PPP over Ethernet.

PPTP Point-to-Point Tunneling Protocol.

RFC Request For Comments.

RSA Rivest–Shamir–Adleman.

SA Security Associations.

SMTP Simple Mail Transfer Protocol.

SSL Secure Socket Layers.

SSTP Secure Socket Tunneling Protocol.

TAP virtual software TAP interface on L2 layer.

TCP Transmission Control Protocol.

TCP/IP Transmission Control Protocol/Internet Protocol reference model.

TLS Transport Layer Security.

TUN virtual software TUNnel interface on L3 layer.

UDP User Datagram Protocol.

VB Virtual Box.

VM Virtual Machine.

VPN Virtual Private Network.

XOF eXtendable-Output Function.

Úvod

Virtuálna privátna sieť, z ang. *Virtual Private Network* (ďalej VPN), sa stala bežnou a veľmi využívanou technológiou na zabezpečenie sieťovej komunikácie. S VPN sa stretávame takmer v každej sfére. Domácnosti ju zvyknú používať na získanie prístupu k im nedostupným zdrojom. Vo sfére biznisu zasa s cieľom najlepšieho zabezpečenia dát v pomere s rýchlosťou, ktorú VPN implementácia poskytuje.

Cieľom práce je priblížiť čitateľovi základné informácie o VPN sieti pomocou postupnej charakteristiky, klasifikácie na základe viacerých aspektov a opisu už existujúcich VPN protokolov. Následne špecifikujeme dôležitý prvok kvalitnej VPN siete, zabezpečenie pomocou kryptografie. Konkrétne sa zameriame na pomerne novú podkategóriu, tzv. ľahkú kryptografiu, z ang. *Lightweight Cryptography*. Tento pojem v práci charakterizuje. Z ľahkej kryptografie sme si za účelom opisu vybrali kryptografickú perrmutáciu XOODOO [1]. XOODOO tvorí základ kryptografického balíka Xoodyak [2], jedného z finalistov štandardizačného procesu Národného inštitútu pre štandardy a technológie (NIST) v kategórií ľahkej kryptografie. V práci ju opíšeme a vysvetlíme možnosti jej použitia. Následne použijeme permutáciu za účelom zabezpečenia jednoduchej siete. VPN sieť vytvoríme pomocou voľne dostupného programu DSVPN napísaného v jazyku C. Program realizuje autentizované šifrovanie s využitím XOODOO permutácie. Experimentálne overíme funkčnosť a implementáciu VPN v DSVPN zanalyzujeme. Následne doplníme zdrojový kód o kompatibilitu s operačným systémom Windows. Vykonané zmeny opíšeme. Súčasťou práce je aj experimentálne meranie počtu potrebných cyklov a rýchlosti šifrovacieho algoritmu počas bežnej prevádzky.

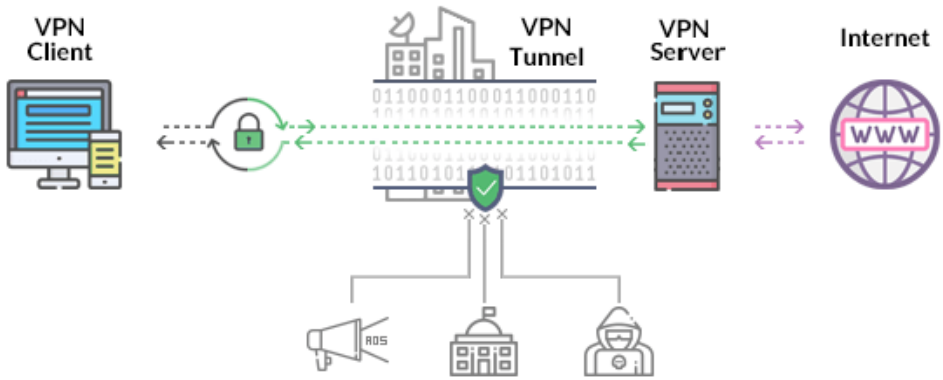
Prvá kapitola sa venuje charakteristike VPN sietí. Druhá kapitola obsahuje informácie o ľahkej kryptografií so zameraním sa na kryptografickú permutáciu XOODOO. Tretia kapitola informuje čitateľa o použitých nástrojoch, prostredí a konfigurácií virtuálnych strojov (z ang. *Virtual Machines*, ďalej VM). Štvrtá kapitola obsahuje analýzu DSVPN a informácie o rozšírení jej kompatibility do ope-

račného systému (z ang. *Operating System*, ďalej OS) Microsoft Windows. V piatej kapitole zhrnieme dosiahnuté výsledky z meraní a experimentov. Spomenuté činnosti budú vykonané v prostredí virtuálnych strojov na dvojici obrazov operačných systémov Microsoft Windows a Linux s distribúciou Ubuntu. Pri tvorbe, úprave a preklade zdrojového kódu použijeme jazyk C s GCC prekladačom.

1 Virtual Private Network – VPN

Virtuálna privátna sieť (ďalej **VPN**) je jeden zo spôsobov prepojenia zariadení, tak že internetová komunikácia medzi nimi je privátna, resp. zabezpečená aj v prípade používania nezabezpečenej, verejnej siete. Bezpečnosť spojenia je docielená pomocou kryptografických protokolov v tuneli, ktorý VPN vytvára. Pod pojmom tunel sa v skutočnosti myslí virtuálna zašifrovaná linka, ktorou je dátový paket prenášaný po sieti medzi koncovými zariadeniami. V skutočnosti tunel vzniká pomocou procesu zapuzdrenia dát, v závislosti od toho na akej úrovni OSI referenčného modelu sa pohybujeme.

VPN technológia patrí aktuálne k najpoužívanejším spôsobom pripojenia sa medzi 2 rôznymi internetovými doménami. Najčastejší výskyt je možné sledovať v korporátnom prostredí, pričom cieľom je rozšírenie možností bezpečného pripojenia sa k firemnej sieti. Vzhľadom na firemné tajomstvá je nutné aby bolo takéto spojenie bezpečné a zamestnanci sa mohli pripojiť z rôznych miest. Vďaka uvedeným vlastnostiam je následne možná aj práca z domu (z ang. *Home office*), ktorá môže byť benefitom pre obe strany. Ukážka použitia VPN je znázornená na obrázku 1.1. Naprieč VPN tunelom sa prenášajú zašifrované dáta.



Obr. 1.1: Ukážka typického VPN spojenia

1.1 Výhody a nevýhody VPN sietí

Medzi výhody VPN sietí patrí najmä zvýšenie bezpečnosti pripojenia. Všetka sieťová komunikácia je zašifrovaná pomocou kryptografického algoritmu. V závislosti od kvality implementácie sú informácie prenášané po takejto sieti nečitatelné. Ďalším typickým znakom je poskytnutie anonymity. VPN dokáže zamaskovať našu IP adresu a zároveň aj geografickú lokáciu. Tým, že sa pripojíme na zariadenie v inej sieti, tak získavame prístup k všetkým povoleným zdrojom tohto vzdialeného zariadenia. Týmto spôsobom dokážeme napríklad pristupovať k interným dátam. VPN je šikovný nastroj na ochranu vo verejnej nezabezpečenej sieti, ktorá bez VPN zabezpečenia poskytuje útočníkom rôzne možnosti útoku alebo zneužitia pripojeného zariadenia.

Medzi hlavné nevýhody patrí spomalenie internetového spojenia. Tým že, sa dodatočne spracúvavajú sieťové dáta, tak nastáva nechcené spomalenie. Táto dlhšia odozva siete sa predlžuje priamo úmerne od vzdialenosti servera, na ktorý sa pripájame. Ďalšou nepísanou nevýhodou je cena. Väčšina VPN poskytovateľov poskytuje služby za pomerne dráhe poplatky. Pri voľbe poskytovateľa je taktiež nutné prečítať si podmienky pripojenia. Niektorý poskytovatelia uchovávajú dáta, ktoré naprieč spojením prechádzajú. Poslednou nevýhodou je pomerne zložitá konfigurácia pri niektorých VPN protokoloch. Samozrejme, uvedený problém nastáva len pri prvotnej konfigurácií VPN siete.

1.2 Charakteristika a definovanie pojmov

Obsahom tejto podkapitoly je zavedenie a následne stručná charakteristika pojmov, potrebných na pochopenie problematiky VPN sietí.

1.2.1 Tunel a tunelovacie rozhrania

Tunel v počítačových sieťach predstavuje virtuálne spojenie medzi jedným alebo viacerými zariadeniami. Jeho obsahom sa prenášajú zapuzdrené dáta (z ang. *encapsulated data*). Proces pridávania dát k pôvodným sa v tejto súvislosti zvykne taktiež označovať ako **tunelovanie**. V počítačových sieťach je týmto spôsobom možné zmeniť, resp. zameniť použitý protokol za iný. Príkladom by mohlo byť tunelovanie z IPv4 do IPv6. V uvedenom prípade sa z pôvodného paketu použijú dáta a k ním sa pridajú údaje potrebné na smerovanie v IPv6 sieti. Výhodou je, že týmto spôsobom vieme sprostredkovať kompatibilitu naprieč viacerými sieťami

s rôznymi protokolmi. Obdobne vieme do procesu tunelovania začleniť aj bezpečnostné prvky v podobe šifrovania a autentizácie pôvodných dát. V súvislosti s tunelmi sa používateľ môže stretnúť s pojmami tunelovací protokol a tunelovacie rozhranie.

Tunelovací protokol predstavuje súbor činností, ktoré sá v procese tunelovania vykonávajú. V súčasnosti existuje veľa protokolov, ktoré sú štandardne špecifikované a bežne používané v sieťovej komunikácií. Najčastejšie sa používateľ stretne s tunelovaním pri VPN sieťach. Niektoré VPN v sebe nesú názov použitého tunelovacieho protokolu. Za spomenutie stojí protokol *Generic Routing Encapsulation* (ďalej GRE). GRE je tunelovací protokol vyvinutý spoločnosťou Cisco v roku 1994. Ponúka širokú paletu možností tunelovania viacerých sieťových protokolov vo virtuálnych spojeniach medzi zariadeniami, tzv. z ang. *point-to-(multi)point*. Niektoré variácie sa používajú aj pri vytváraní VPN. Viac informácií o GRE je dostupných na [3] a [4].

Tunelovacie rozhranie, resp. adaptér je virtuálne zariadenie, ktoré je možné vytvárať v jadre daného operačného systému. Jedná sa o kompletne softvérové riešenie. Dôležité je, že nie každý OS má natívnu podporu pre vytváranie virtuálnych tunelovacích rozhraní. Je preto potrebné používať ovládače tretích strán, ktoré danú funkcionalitu implementujú. Od roku 2000 podporujú tieto rozhrania Solaris, Linux a BSD operačné systémy. Poznáme dva typy virtuálnych softvérových tunelovacích rozhraní. Konkrétne TAP a TUN rozhranie. Nedajú sa použiť spolu, pretože pracujú na rôznych vrstvách. TUN emuluje správanie zariadenia na sieťovej vrstve (L3). Pracuje s paketmi a tie sa používajú pri smerovaní. Na druhej strane TAP rozhranie pracuje o úroveň nižšie s ethernetovými rámcami (L2). Používa sa na premostenie sieťovej komunikácie. TUN/TAP rozhrania je možné použiť na odosielanie a príjmanie dát. Dáta odoslané OS do TUN/TAP je možné modifikovať programom, ktorý rozhrania vytvoril. Na druhej strane používateľ môže v programe taktiež odoslať dáta do rozhraní. V tomto prípade TUN/TAP vloží dáta do sieťového zásobníka OS. Tým emuluje ich príjem z externého zdroja.

Technológia TUN/TAP je pomerne známa a zaužívaná. Svoje uplatnenie zohráva pri softvérovej implementácií VPN. Okrem toho sa bežne používa aj v sfére VM. Napríklad aj vo voľne dostupný nástroji na virtualizáciu – VirtualBox. Pri vytvorení a následnom používaní obrazu VM, dochádza k vytváraniu tunelovacích rozhraní. Prostredníctvom zvolenej konfigurácie stroja sa rozhrania nakonfigurujú. Týmto spôsobom sa pre používateľa sprístupní možnosť komunikácie virtuálneho stroja s inými zariadeniami. Viac informácií o problematike je možné nájsť v [5], [6] a [7], odkiaľ bol obsah tejto kapitoly čerpaný.

1.2.2 Charakteristika referenčných modelov

Pred podkapitolou 1.3.2 je potrebné pred samotnou klasifikáciou vysvetliť pojmy Referenčný model prepojenia otvorených systémov (z ang. *Open Systems Interconnection reference model*, ďalej OSI) a Model opisujúci balíky internetových protokolov (z ang. *Transmission Control Protocol/Internet Protocol reference model*, ďalej TCP/IP).

Úlohou uvedených referenčných modelov je vizualizácia postupu spracovania dát od používateľa až k ich odoslaniu zo zariadenia (z ang. *end-to-end data communication*). Pojem spracovanie dát znamená opísanie toho, ako dochádza v jednotlivých abstraktných vrstvách k pretransformovaniu používateľských dát na súbor jednotiek a núl, ktoré sú následne odoslané do iného zariadenia.

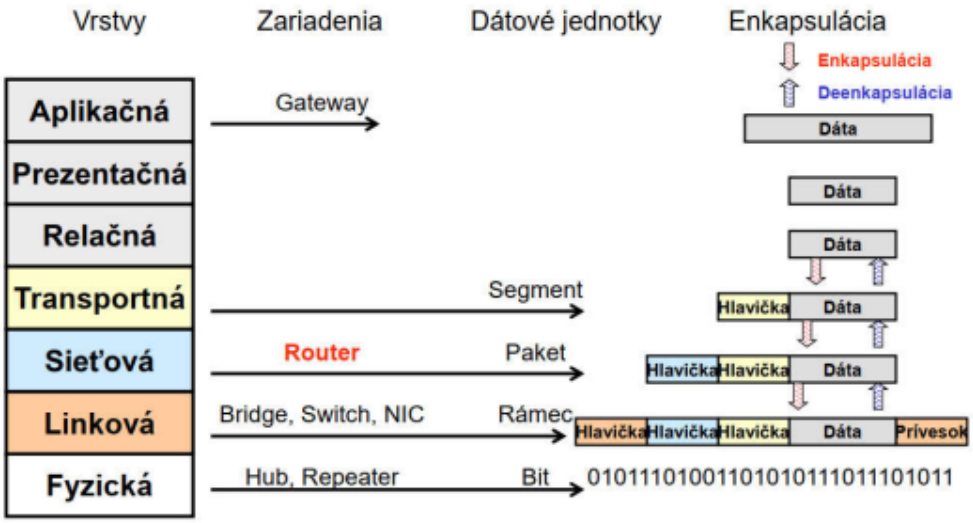
OSI Model vznikol v skorších fázach evolúcie počítačových sietí. Vychádza skôr z teoretického než praktického prístupu. Pozostáva zo 7 abstraktných vrstiev (z ang. *Layer*, ďalej L):

1. **fyzická vrstva** – z ang. *Physical Layer* (ďalej L1),
2. **spojová vrstva** – z ang. *Data Link Layer* (ďalej L2),
3. **sieťová vrstva** – z ang. *Network Layer* (ďalej L3),
4. **transportná vrstva** – z ang. *Transport Layer* (ďalej L4),
5. **relačná vrstva** – z ang. *Session Layer* (ďalej L5),
6. **prezenčná vrstva** – z ang. *Presentation Layer* (ďalej L6),
7. **aplikačná vrstva** – z ang. *Application Layer* (ďalej L7).

V schéme, na obrázku 1.2, sa nachádzajú jednotlivé vrstvy spoločne so zariadeniami, ktoré pracujú s jednotlivými dátami. Zároveň je v obrázku znázornený proces rozbalenia (z ang. *deencapsulation*). Schéma bola prevzatá z [8].

Čím je väčšie číslo vrstvy tým bližšie sa dáta nachádzajú pri používateľovi. Vďaka uvedeným vlastnostiam je tento model vhodnejší pri začiatku štúdia spracovania sieťových dát v počítači. Z rovnakého dôvodu sa taktiež viac stretávame s jeho použitím pri opise funkcionality riešenia ako s novším TCP/IP modelom. Viac informácií o problematike nájde čitateľ v [9].

Na druhej strane TCP/IP model vznikol z praktického prístupu. Hlavný rozdiel je v počte abstraktných vrstiev, ktorý je v prípade TCP/IP zmenšený na 4



Obr. 1.2: Schéma postupného spracovania dát jednotlivými vrstvami OSI modelu [8]

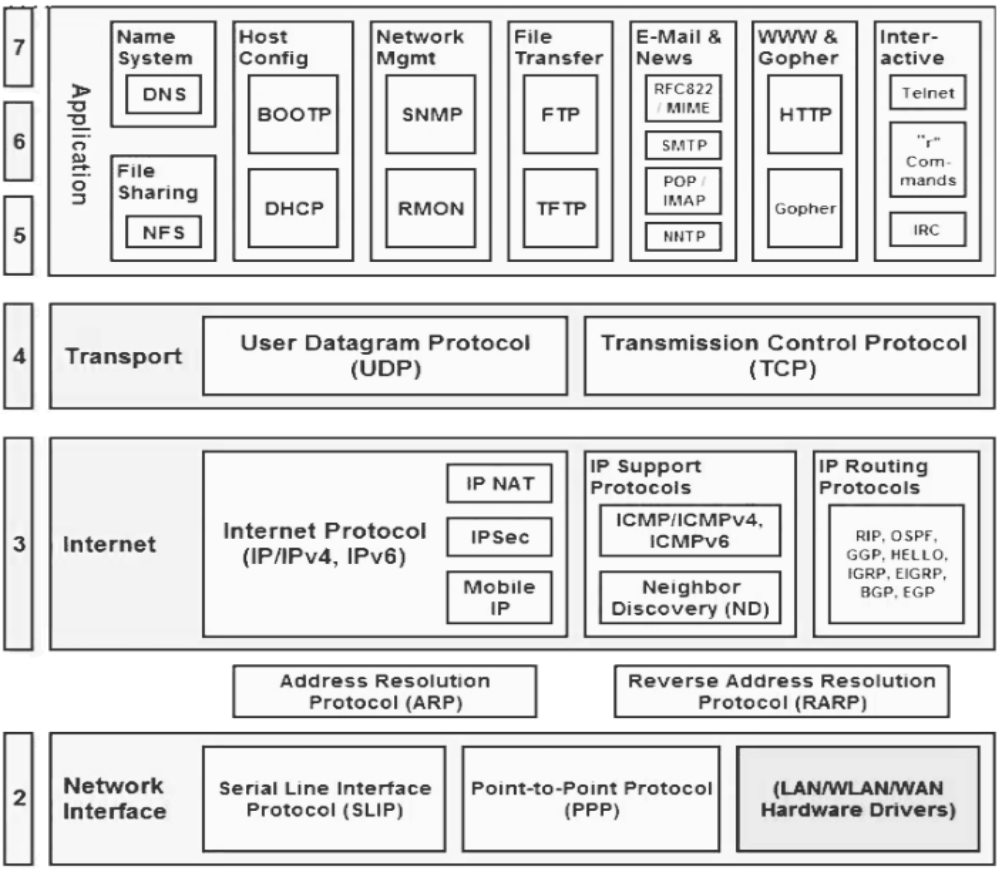
vrstvy [10]. TCP/IP model je zobrazený pomocou schémy na obrázku 1.3. V uvedenej schéme sú znázornené niektoré z protokolov, ktoré sa na jednotlivých vrstvách používajú.

Aplikačná vrstva (L5-L7) zahŕňa protokoly používané väčšinou aplikácií na poskytovanie užívateľských služieb alebo výmenu aplikačných dát cez sieťové pripojenia, ktoré je vytvorené protokolmi na nižšej úrovni. Spája vrstvy L5 až L7 OSI modelu. Príklady známych protokolov aplikačnej vrstvy sú HyperText Transfer Protocol (HTTP), File Transfer Protocol (FTP), Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) a iné. Údaje, resp. dáta sú pri spracovaní kódované podľa L4 protokolov. Sú zapuzdrené do protokolových jednotiek transportnej vrstvy, tzv. **segmentov**.

Transportná vrstva (L4) vytvára základné dátové kanály, ktoré aplikácie používajú na výmenu dát. Vrstva vytvára konektivitu medzi hostiteľmi, ktorá je nezávislá od siete, štruktúry užívateľských dát a smerovacích informácií. Konektivita na transportnej vrstve môže byť kategorizovaná ako orientovaná na spojenie, implementovaná v protokole TCP, alebo UDP bez orientácie na spojenie. Uvedené protokoly sú stručne charakterizované nižšie, v tejto podkapitole.

Protokoly v tejto vrstve zabezpečujú:

- riadenie chýb – z ang. *error control* [12],
- segmentáciu dát – z ang. *segmentation* [13],
- riadenie toku dát – z ang. *flow control* [14],



Obr. 1.3: Schéma TCP/IP modelu s niektorými protokolmi [11]

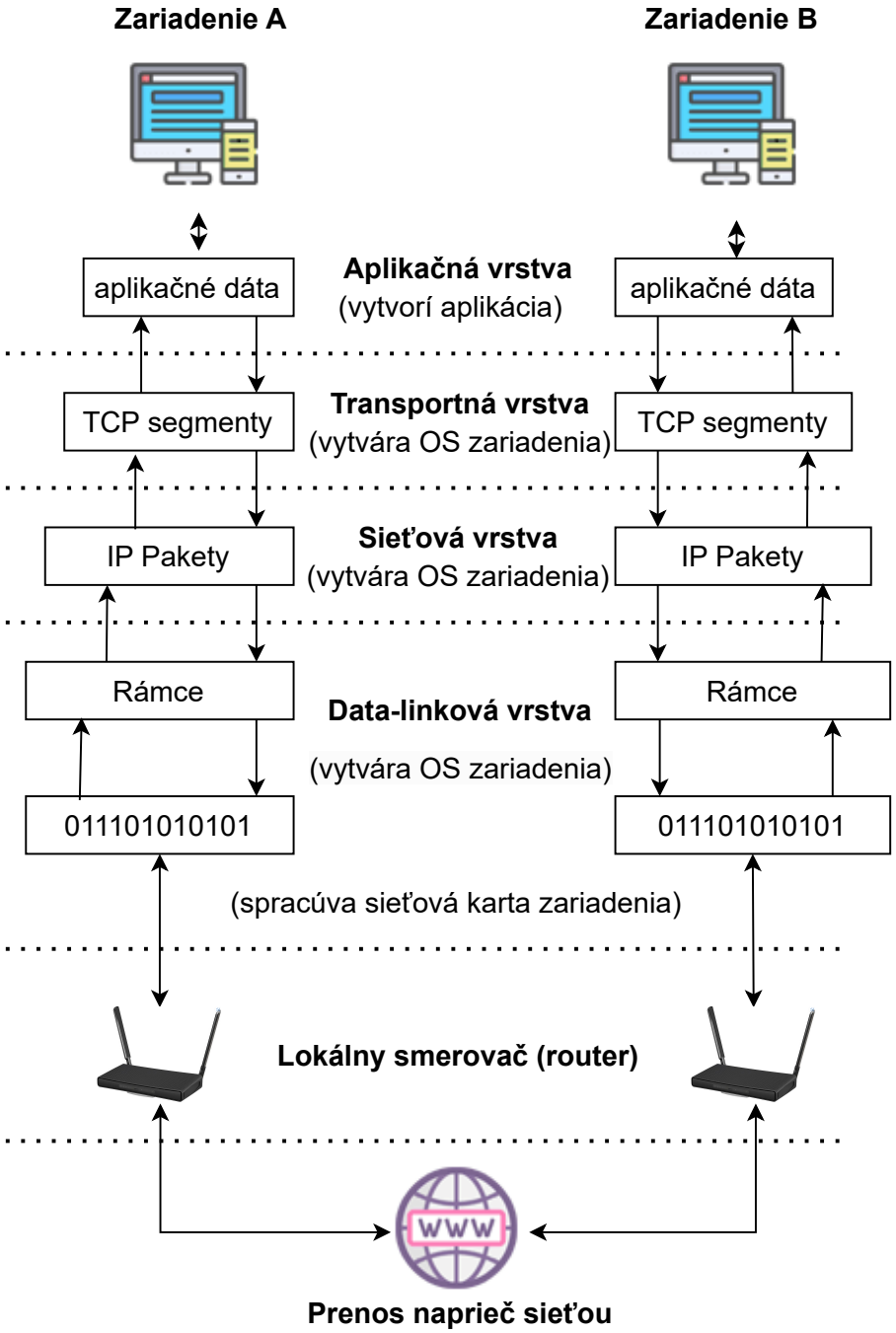
- riadenie preťaženia – z ang. *congestion control* [15],
- adresovanie aplikácií pomocou portov – z ang. *application addressing* [16].

Výstupom transportnej vrstvy sú segmenty, ktoré sú spracované v ďalšej vrstve referenčného modelu.

Internetová, resp. Sieťová vrstva (L3) je zodpovedná za odosielanie paketov cez jednu alebo viac sietí. S touto funkcionalitou internetová vrstva umožňuje sieťovanie, prepojenie rôznych IP sietí a v podstate vytvára internet. Z L4 segmentov tvorí pakety, tak že pridá informácie potrebné na ďalšie smerovanie.

Linková vrstva (L1-L2) sa používa na presun paketov medzi rozhraniami internetovej vrstvy dvoch rôznych hostiteľov na rovnakom linke. Procesy vysielania a prijímania paketov na linke je možné konfigurovať. Zariadenia nazývané prepínače (z ang. *switch*), vykonávajú rámcovania (z ang. *frame*). Pripravujú pakety z vrstvy L3 na prenos pridaním ďalších informácií. Týmto úkonom vzniknú rámce. Tie sa prenášajú do fyzickej vrstvy a cez prenosové médium až k hostiteľovi. Fyzická vrstva predstavuje prvok, cez ktoré sú dáta prenášane. Typickým príkladom je optický alebo ethernetový kábel.

Vyššie uvedené procesy prípravy a spracovania dát sú znázornené pomocou schémy na obrázku 1.4. V tejto schéme je znázornený proces vytváranie sieťových dát, ich následne smerovanie naprieč sieťou a spracovanie v cieľovom zariadení. V bežnej prevádzke sa jedná o obojsmernú komunikáciu. Z uvedeného dôvodu sú šipky obojstranné.



Obr. 1.4: Proces formovania a spracovania sieťových dát naprieč dvoma zariadeniami

Protokol riadenia prenosu (z ang. *Transmission Control Protocol*, ďalej TCP) je komunikačný protokol orientovaný na nadviazanie a udržanie sieťového spojenia medzi zariadeniami. Môže byť použitý pri úlohe príjímateľa aj odosielateľa (z ang. *full-duplex*). Úlohou je spoľahlivý prenos dát medzi komunikantmi. Odoslanie a príjem dát je v rovnakom poradí. Protokol zároveň obsahuje mechanizmy na kontrolu výskytu chýb. Svoj názov má podľa dvoch najdôležitejších protokolov:

- Protokol riadenia prenosu – z ang. *Transmission Control Protocol*,
- Internet protokol – z ang. *Internet Protocol*.

Na začiatku 21. storočia je 95% paketov používaných na internete typu TCP. Bežné aplikácie používajúce TCP sú webové (HTTP/HTTPS protokoly), slúžiace na e-mailovú komunikáciu (SMTP/POP3/IMAP) a prenos súborov (z ang. *File Transfer Protocol – FTP*). Minimálna dĺžka hlavičky TCP je 20 bajtov a maximálna dĺžka 60 bajtov. Po pridaní údajov TCP hlavičky k prenášaným dátam, vzniká tzv. *segment*.

V súčasnosti je možne TCP protokol implementovať softvérovo aj hardvérovo. Pri prvom z uvedených je problémom závislosť na OS a následne aj vysoká vyťaženosť procesora pri príprave a spracovaní dát. Pri hardvérovom riešení je výhodou optimalizácia a implementácia bez potreby dodatočnej úpravy OS. Hardvérové implementácie sa realizujú pomocou koprocesorov.

Podrobnejšie informácie o TCP protokole je možné nájsť v [17]. V uvedenej publikácií sa nachádza opis TCP hlavičky, metódy nadviazania a ukončenia spojenia. Obdobne je spomenuté ako dochádza k prenosu dát pomocou sekvenčných čísel. V uvedenej publikácií a v [11] môže čitateľ nájsť ďalšie informácie o protokole TCP.

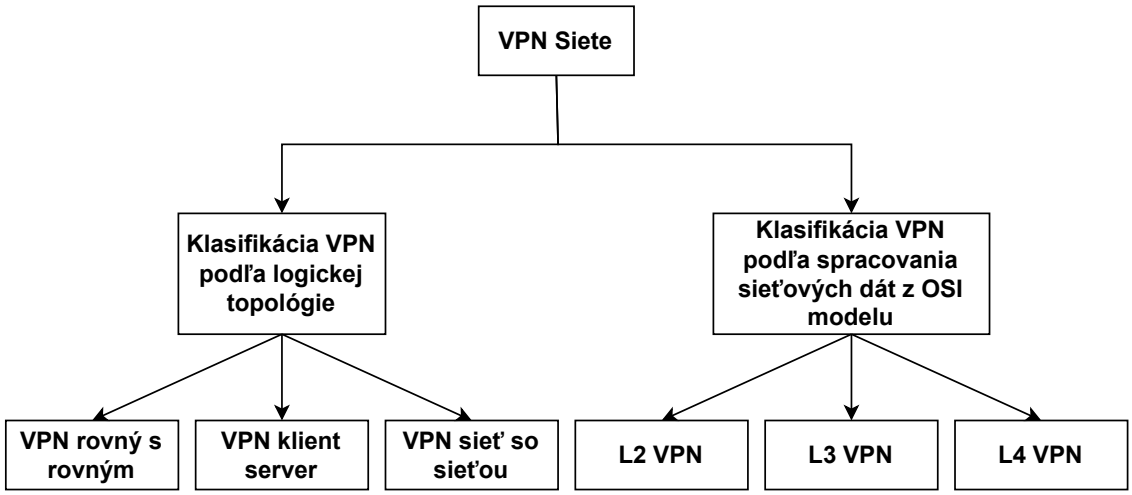
Používateľský datagramový protokol (z ang. *User Datagram Protocol*, ďalej UDP) je jedným zo základných komunikačných IP protokolov. Používa sa na odosielanie správ iným hostiteľom v sieti. Správy sú prenášané ako datagramy v paketoch. UDP nevyžaduje predchádzajúcu komunikáciu na nastavenie komunikačných kanálov alebo dátových ciest. Používa jednoduchý komunikačný model bez spojenia s minimom protokolových mechanizmov. Poskytuje kontrolné súčty pre integritu údajov a čísla portov na adresovanie rôznych funkcií v zdroji a cieli datagramu.

Narozdiel od TCP) neposkytuje žiadnu záruka doručenia správy alebo duplicitnej ochrany. UDP) je vhodný na účely, kde kontrola a oprava chýb buď nie sú potrebné, alebo sa vykonávajú v aplikácii. Aplikácie citlivé na čas často používajú

UDP, pretože zahadzovanie paketov je vhodnejšie ako čakanie na pakety oneskorené v dôsledku opätovného prenosu. Príklad použitia môžu byť streamovacie služby. Podrobnejšie informácie o UDP sú dostupné v [18].

1.3 Klasifikácia VPN sietí

V súčasnosti má čitateľ k dispozícii veľa rôznych internetových zdrojov o problematike VPN. Uvedené sú rôzne možnosti klasifikácie VPN siete. V rámci tejto práce klasifikujeme VPN siete podľa logickej topológie a vrstiev, na ktorých sú postupy aplikované. Obsahom tejto podkapitoly je rozdelenie a opis jednotlivých typov VPN sietí. Klasifikáciu zavedenú v tejto práci je možné vidieť na obrázku 1.5. V závere kapitoly sa nachádza sumárne zaradenie opísaných VPN protokolov do uvedenej klasifikácie.



Obr. 1.5: Klasifikácia VPN sietí

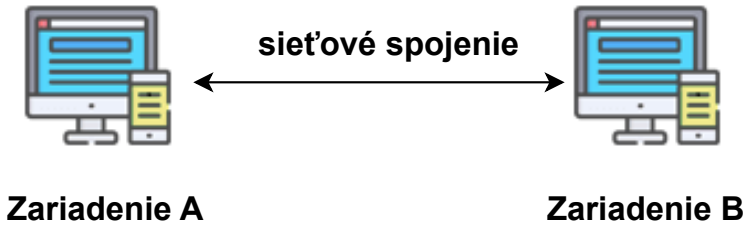
1.3.1 Rozdelenie VPN sietí podľa logickej topológie

Podľa topológie, v ktorej VPN spojenie prebieha rozdeľujeme VPN do 3 kategórií:

- **VPN rovný s rovným** – *z ang. Peer to Peer VPN*,
- **VPN klient a server** – *z ang. Client to Server VPN*,
- **VPN sieť so sieťou** – *z ang. Site to Site VPN*.

Topológia VPN siete typu rovný s rovným

Uvedený spôsob vytvára zabezpečený tunel medzi dvoma rovnocennými uzlami, resp. zariadeniami (z ang. *peers*), ktorí spoločne komunikujú cez verejnú sieť. Medzi zariadeniami je vytvorený tunel. Každý koniec má priradenú svoju IP adresu. Z uvedeného modelu vyplýva aj následné obmedzenie. VPN tunel vznikne iba medzi dvoma komunikujúcimi zariadeniami. Z toho dôvodu nie je toto použitie časté. Na obrázku 1.6 je znázornený uvedený typ VPN spojenia.



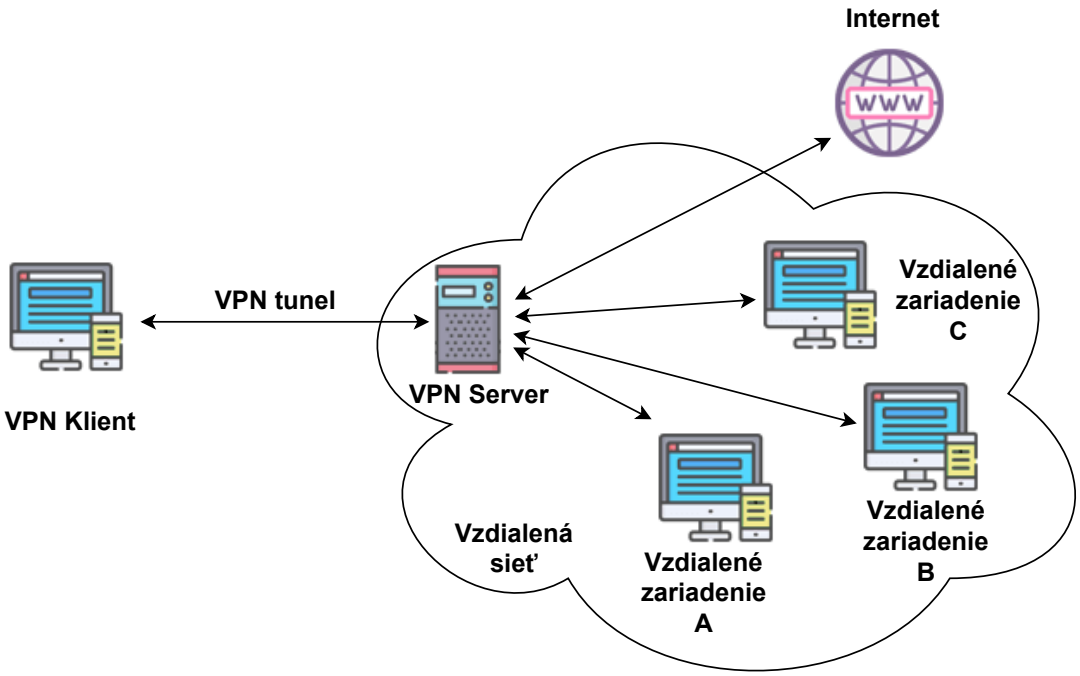
Obr. 1.6: Ukážka spojenia zariadení typu rovný s rovným

Topológia VPN siete typu klient a server

Tento typ spojenia pozostáva z pripojenia medzi dvoma alebo viacerými nerovnocennými zariadeniami. Najjednoduchší model musí pozostávať z jedného VPN servera a VPN klienta. Princíp spočíva vo vytvorení zabezpečeného tunela, ktorý je použitý na prenos dát medzi uvedenými zariadeniami. Zároveň je VPN server schopný vytvoriť N takýchto spojení. N reprezentuje počet VPN klientov, s ktorými dokáže server nadviazať spojenie. Tento parameter je závislý najmä od hardvérových prostriedkov daného servera.

Úloha klienta spočíva v presmerovaní všetkej svojej sieťovej komunikácie cez zabezpečený tunel, ktorý vznikol medzi ním a serverom. Tento úkon je najčastejšie realizovaný presmerovaním komunikácie cez sieťovú bránu (z ang. *GateWay*, ďalej GW). V danom OS, na ktorom VPN klient beží, je teda potrebné zmeniť IP adresu GW na adresu VPN servera. Vďaka tomu nastane presmerovanie komunikácie. Tento úkon je väčšinou realizovaný programovo pomocou aplikácií. Typicky sa nadviaže spojenie medzi klientom a serverom. Následne sa upravia sieťové nastavenia systému. Spomenuté úkony sú vysoko závislé od OS a daného programovacieho jazyka, prostredníctvom ktorého sú úpravy realizované. Úloha servera na druhej strane spočíva vo vytvorení možnosti pripojenia pre jedného alebo viacerých klientov. Následne server zastupuje klientovu prítomnosť v danej sieti, spracúva požiadavky klienta a komunikuje s ostatnými zariadeniami.

Komunikácia ďalej však už nie je zabezpečená pomocou šifrovania alebo tunelu. Na obrázku 1.7 sa nachádza schéma pripojenie VPN klienta a servera.



Obr. 1.7: Ukážka pripojenia VPN klienta na VPN server

V súčasnosti je tento spôsob považovaný za najviac používaný. VPN server slúži ako vstupná brána do internej siete. Vďaka tomu je možné sprístupniť zdroje pre používateľov z rôznych oblastí sveta. Používateľ sa taktiež môže stretnúť s pomenovaním Model **uzol k sieti**, resp. z ang *point-to-site*. Obdobne sa používa anglický výraz *Remote access VPN*. Pojmy sú ekvivalentné a predstavujú rovnakú myšlienku zapojenia VPN.

Topológia VPN siete typu sieť so sieťou

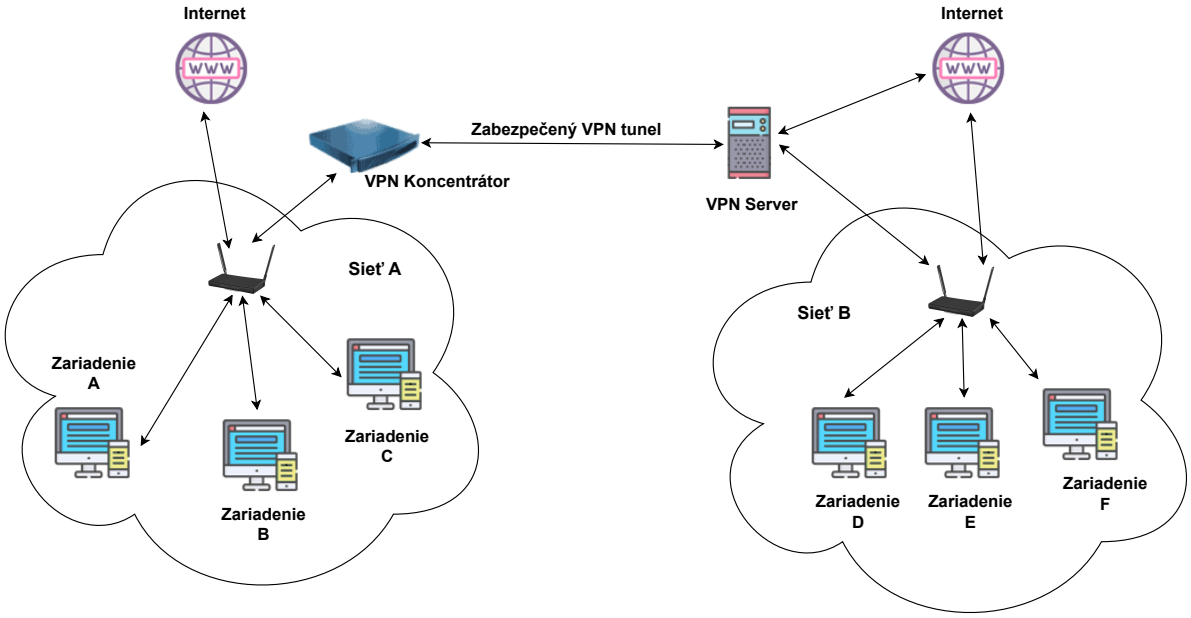
VPN model Sieť so Sieťou vytvára zabezpečený tunel medzi dvoma rôznymi sieťami naprieč verejnou sieťou. Model pozostáva z 2 zariadení – VPN servera a VPN koncentrátora (z ang. *VPN Concentrator*).

VPN koncentrátor je typ sieťového zariadenia, ktoré poskytuje zabezpečené VPN spojenie a doručenie dát. Zvyčajne je to špecializovaný smerovač (z ang. *router*). Dokáže vytvárať veľké množstvo VPN tunelov. Používa sa na nadviazanie spojenia VPN typu sieť so sieťou. Funkcionalita koncentrátora pozostáva z:

- nadviazania spojenia a konfiguráciu VPN tunela – z ang. *Establish and Configure tunnels*,

- autentizáciu používateľa – z ang. *Authenticate users*,
- priradenie IP adries používateľov k tunelom – z ang. *Assign tunnel/IP addresses to users*,
- šifrovanie a dešifrovanie dát – z ang. *Encrypt and Decrypt data*,
- zabezpečiť integritu doručenia – z ang. *Ensure end-to-end delivery of data*.

Model Sieť so sieťou je používaný najmä v korporátnom svete pri spojení vedľajšej pobočky s hlavnou, ktoré sa nachádzajú na rozdielnych geografických lokalitách. Pomocou schémy, na obrázku 1.8, je znázornený tento model.



Obr. 1.8: Ukážka spojenia VPN siete typu sieť so sieťou

Používateľ však málo kedy pozná o aký presne druh VPN sa jedná. Najčastejšie sa stretne s označením, z ang. *Remote Access VPN*. Jedná sa o vyššie uvedené VPN spojenie typu klient-server.

Informácia z tejto podkapitoly boli čerpané z [19].

1.3.2 Rozdelenie VPN sietí podľa vrstiev referenčného modelu

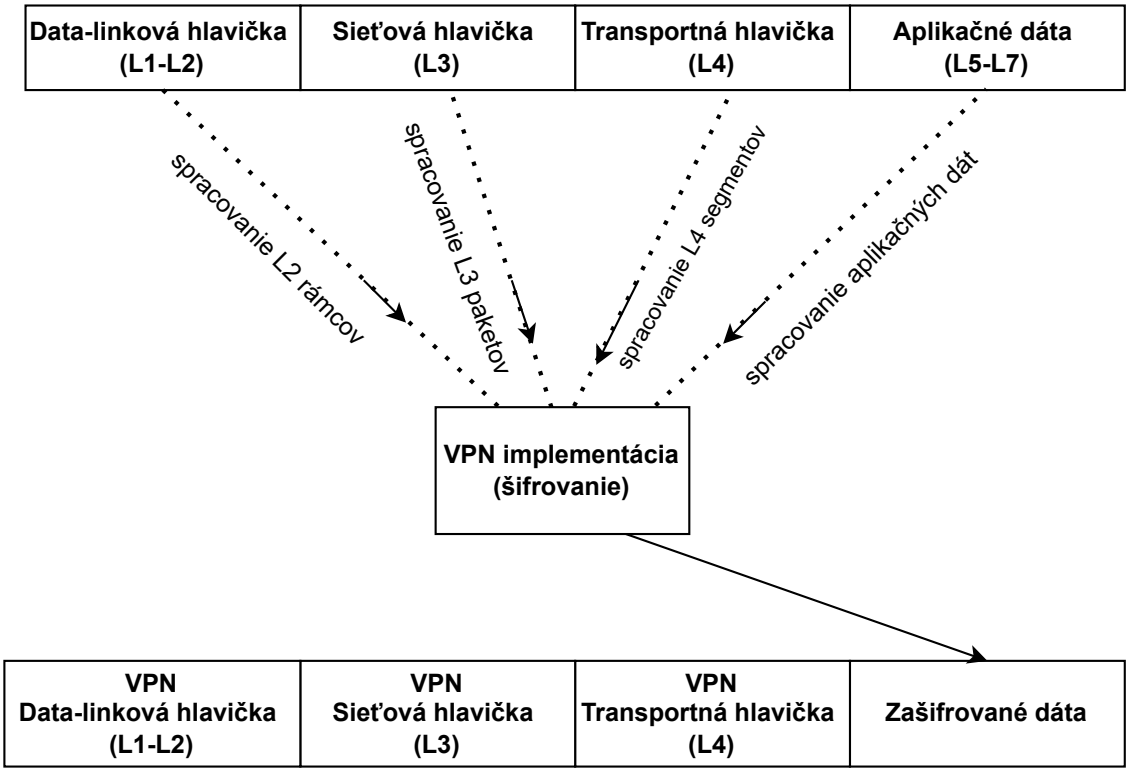
VPN siete môžeme klasifikovať aj podľa vrstvy (ďalej L) referenčného modelu. Rozdelenie vytvoríme na základe vrstvy pôvodných sieťových dát, ktoré VPN aplikácia spracúva. Stručná charakteristika referenčných modelov je obsahom podkapitoly 1.2.2. Každá dobrá VPN by v svojej implementácií mala realizovať šifrovanie. Preto použijeme túto činnosť ako príklad bloku, pri ktorom dochádza k už spomenutému spracovaniu pôvodných dát.

Klasifikácia VPN sietí podľa OSI modelu:

- **L2 VPN** – VPN na spojovej vrstve,
- **L3 VPN** – VPN na sieťovej vrstve,
- **L4 VPN** – VPN na transportnej vrstve.

Pri implementácií VPN komunikácie medzi zariadeniami je pre pochopenie dôležité určiť aké dáta vstupujú do VPN algoritmu. Pomocou tejto informácie a klasifikácie vyššie následne dokážeme zaradiť do určitej kategórie.

Princíp použitia spracovania dát za pomoci bloku na šifrovanie je znázornený pomocou schémy na obrázku 1.9. V schéme sa nachádzajú prerušované čiary. Tie reprezentujú scenár aký typ dát môže VPN spracúvať.



Obr. 1.9: Ukážka formovania sieťových dát po spracovaní pôvodných dát

Zo schémy je viditeľné, že spracovaním nižšej vrstvy dochádza k zväčšeniu bloku dát, ktoré je potrebné spracovať. To môže negatívne ovplyvniť výslednú rýchlosť celého systému. Okrem uvedenej vlastnosti je ďalším problémom prenos vrámci rôznych sietí. Z uvedených dôvodov je preto najrozšírenejší spôsob VPN spracovania dát medzi vrstvami L3 až L4.

Typicky sa s L2 a L3 VPN sieťami môže používateľ stretnúť v špecializovaných sieťových zariadeniach. Konkrétne na smerovačoch a prepínačoch. Prvé z uvede-

ných je využívané najmä pri smerovaní, respektíve určení cesty smerom z/do lokálnej siete až k cieľovej destinácií. Tento úkon je vykonaný za pomoci aplikácie smerovacích protokolov. Smerovač je možné použiť aj na smerovanie v rámci lokálnej siete. V porovnaní s prepínačom však nedosahuje porovnateľný výkon. Na druhej strane klasický prepínač je možné použiť len vrámci lokálnej siete. V súčasnosti sa používajú aj tzv. L3 prepínače. V porovnaní so smerovačmi je ich prednosťou vyššia rýchlosť spracovania prichádzajúcich paketov pri väčšom počte pripojených zariadení. Všetky uvedené typy sa však dajú realizovať aj na konečnom zariadení v podobe softvérovej implementácie.

1.4 Protokoly vo VPN sieťach

V predchádzajúcej podkapitole sme klasifikovali VPN siete na základe zapojenia kryptografického bloku do OSI referenčného modelu. V tejto podkapitole pomocou uvedeného rozdelenia, zaradíme a charakterizujeme niekoľko protokolov, ktoré sa typicky používajú vo VPN sieťach. Aktuálne neexistuje svetový štandard na vytváranie VPN spojení. Dôsledkom toho existuje veľké množstvo rôznych protokolov. V rámci tejto podkapaitoly si predstavíme niektoré z nich.

1.4.1 Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP)

PPTP umožnuje vytvoriť zabezpečené VPN spojenie k inej internetovej sieti. PPTP používa TCP/IP. TCP/IP sieťový protokol zabezpečuje bezpečný prenos dát z klienta do privátneho servera vo VPN sieti. Jedná sa o starší Microsoft L2 protokol, ktorý bol definovaný v roku 1996. Je rozšírením L2 PPP protokolu. PPTP zapuzdruje PPP rámce do IP paketov. Následne ich prenáša cez sieť.

Zabezpečenie prenosu pomocou PPTP pozostáva typicky z 3 po sebe nasledujúcich procesov:

1. PPP pripojenie a komunikácia – z ang. *PPP Connection and Communication*,
2. riadenie spojenia pomocou PPTP protokolu – z ang. *PPTP Control Connection*,
3. prenos dát PPTP tunelom – z ang. *PPTP Data Tunneling*.

Prechod medzi procesmi je možný len ak došlo k úspešnému dokončeniu predchádzajúceho kroku. V prvom procese sa PPTP klient pripája k serveru s prístupom na internet (z ang. *Network Access Server*, ďalej NAS). Používa sa pri tom PPP protokol, ktorý nadviaže spojenie a zašifruje pakety. V druhom kroku následne

vznikne TCP pripojenie medzi NAT a PPTP serverom. Použité je číslo portu 1723. Uvedeným postupom nám vznikne medzi zariadeniami PPTP Tunel. Po úspešnom vytvorení konektivity dochádza k zapuzdrovaniu prichádzajúcich zašifrovaných PPP dát do PPTP protokolu a ich prenosu cez tunel. PPTP zapuzdruje dáta do tzv. IP datagramov, ktoré už obsahujú zašifrovaný PPP paket. Datagramy su vytvorené pomocou GRE protokolu, ktorý bol spomenutý na začiatku. Na obrázku 1.10 je znázornený PPTP rámec.

Obr. 1.10: Schéma zložených sieťových dát po PPTP spracovaní

PPTP server po prijatí dáta rozbalí, dešifruje PPP paket a následne ho smeruje v rámci lokálnej siete.

Je dôležité poznamenať, že PPTP klient môže mať priamy prístup na internet. V uvedenom prípade sa nevytvára prvotné PPP spojenie až k internetovému poskytovateľovi. Viac informácií o protokole PPTP sa nachádza v [20] a [21], ktoré boli zdrojom pri tvorbe tejto podkapitoly.

Bezpečnosť a použitie protokolu

Protokol vznikol v júni 1996. Implementácia poskytuje používateľovi:

- **Autentizáciu** – z ang. *Authentication*, overenie totožnosti používateľa pomocou mena a hesla. Na výber boli autentizačné protokoly *Challenge Handshake Authentication Protocol* (CHAP) [22], *MicroSoft Challenge Handshake Authentication Protocol* (MS-CHAP) [23] a *Password Authentication Protocol* (PAP) [24].

- **Kontrolu prístupu** – z ang. *Access Control*, po úspešnej autentizácií je následne prístup používateľa riadený na základe pravidiel a politiky prístupu daného OS.

- **Šifrovanie dát** – z ang. *Data Encryption*, je vykonané pomocou vopred zdieľaného kľúča, ktorý sa získa odvodením z hašovanej hodnoty uloženého hesla používateľa. Haš je vstupom do prúdovej šifry RC4 [25] a výstupom je 40-bitový kľúč relácie.

- **Filtrovanie PPTP paketov** – z ang. *PPTP Packet Filtering*, možnosť zapnutia filtrovania paketov len autentizovaných PPTP klientov.

- **Preddefinované Firewall pravidla pre PPTP** – z ang. *PPTP with Firewalls and Routers*, PPTP má štandardne definované číslo TCP portu 1723 a ID 47 v IP protokole. Vďaka tomu je možné jednoducho presmerovať tok dát.

Protokol je aktuálne štandardne zahrnutý v každej distribúcií OS Windows aj Linux. Pri vytváraní VPN siete teda používateľ môže zvoliť uvedený protokol na zabezpečený prenos dát v lokálnej, ale aj naprieč verejnou sieťou. Výhodou protokolu je vysoká kompatibilita naprieč rôznymi platformami. Nevýhodou je veľké množstvo zraniteľných miest, možností zneužitia a použitie starších kryptografických algoritmov. Aktuálne existujú protokoly poskytujúce lepšiu bezpečnosť ako uvedená implementácia. Z uvedených dôvodov sa tento protokol neodporúča používať.

1.4.2 Layer 2 Tunneling Protocol (L2TP)

Ďalším z VPN tunelovacích protokolov je L2TP. Špecifikovaný bol v roku 2000 v dokumente RFC (z ang. *Request For Comments*) 2661 [26]. Inšpirovaný dvoma staršími protokolmi L2F (z ang. *Cisco Layer 2 Forwarding Protocol*) [27] a PPTP.

L2TP sieť pozostáva primárne z 3 zariadení:

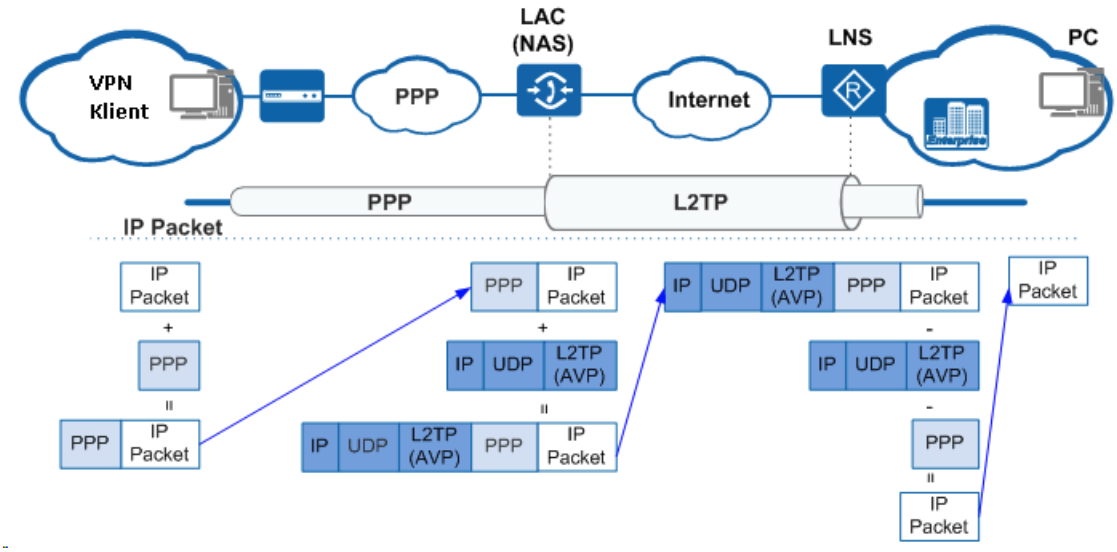
1. **PPP terminál** – ľubovoľné zariadenie na vykonanie PPP zapuzdrenia na dáta a pripojenie k LAC (z ang. *L2TP Access Concentrator*). Môže to byť aj samotné zariadenie, ktoré sa pripája.

2. **L2TP prístupového servera** – LNS (z ang. *L2TP Network Server*), jeden z koncov tunela, ktorý rozbalí dáta a poskytuje prístup do lokálnej sieti. Na zariadení prebieha autentizácia používateľa, vytvorenie PPP relácie (z ang. *session*) a L2TP tunela s LAC. Nasadzuje sa na hranici medzi privátnou a verejnou sieťou, zvyčajne ako sieťová brána na opustenie danej súkromnej siete (z ang. *gateway*). Obdobne poskytuje funkcionalitu prekladu adries z privátnych do verejných a opačne. Uvedená funkcionalitá sa nazýva Network Address Translation (NAT). Viac o tomto protokole je dostupné na [28].

3. **L2TP koncentrátora** – LAC, zariadenie umiestnené medzi LNS a clientom. Slúži na preposielanie paketov oboma smermi. V smere k LNS vytvára L2TP tunel. LAC server môže byť nasadený aj na PPP termináli a pracovať ako PPPoE (z ang. *PPP Over Ethernet*) server.

Na obrázku 1.11 je znázornené schéma, ako sú spomenuté zariadenia zapojené v logickej topológií. V obrázku je znázornený aj proces zapuzdrenia PPP pake-

tov, prenosu dát naprieč tunelom a následného rozbalenia. Schéma bola mierne poupravená a prevzatá z [29].



Obr. 1.11: Proces tunelovanie naprieč L2TP VPN protokolom [29]

L2TP používa namiesto TCP protokolu UDP, ktorého výhodou je rýchlejší prenos bez kontroly prijatia na druhej strane spojenia. Pri vzniku tunela používa UDP port 1701. Iniciátor tohto procesu následne vyberá náhodne z nečinných portov a smeruje nim pakety s portom 1701. Prijímač po prijatí paketu taktiež náhodne určí nečinný port a preposiela ním pakety prijaté iniciátorom. Takto zvolené číslo portu sa používa až kým nie je komunikácia cez tunel ukončená.

L2TP vytvára 2 druhy spojenia počas vytvárania konektivity medzi LAC a LNS.

- **tunelové spojenie** – z ang. *tunnel connection*, napomáha k nastoleniu viacero tunelov medzi zariadeniami. Pozostáva z jedného alebo viacerých relačných spojení. Žiadosť o vytvorenie vytvára LAC server po prijatí PPP žiadosť od vzdialeného používateľa. LAC a LNS si vymenia informácie potrebné na vznik spojenia ako sú napríklad autentizačné informácie tunela a ID. Po úspešnom vyjednávaní (z ang. *negotiation*) vznikne tunel, ktorý je identifikovateľný pomocou dohodnutého ID.

- **relačné spojenie** – z ang. *session connection*, reprezentuje PPP spojenie naprieč tunelom. Môže vzniknúť až keď je tunel úspešne vytvorený.

Po vytvorení oboch spojení následne odchádza k prenosu zapuzdrených PPP paketov naprieč týmto tunelom.

L2TP ponúka kompatibilitu pre mnohé platformy a jednoduchú konfiguráciu. OS Windows, Linux a Mac majú tento protokol zabudovaný v sebe. Výhodou je použitie UDP, vďaka tomu je možné protokol používať aj v nestabilnom sieťovom prostredí. Nevýhodou je zníženie prenosovej rýchlosti. L2TP používa taktiež vopred zdieľané kľúče a v prípade ak sa nezhodujú, tak dochádza k zastaveniu chodu. L2TP podporuje iba limitovaný počet portov. Samotná implementácia L2TP neposkytuje, respektíve nezabezpečuje žiadne šifrovanie alebo autentizáciu paketov. Na zabezpečenie sa používa v kombinácií s iným protokolom. Veľmi známa je implementácia L2TP/IPSec.

V roku 2005 vznikla 3. verzia protokolu, ktorá priniesla zväčšenie dĺžky ID v L2TP hlavičke, zo 16 na 32 bitov. Rozšírenie tunelového autentizačného mechanizmu a oddelenie L2TP dát súvisiacich s PPP protokolom. Viac o tomto upravenom protokole je možné nájsť na [30].

Viac informácií o L2TP problematike je možné nájsť v [31], [26], [29], odkiaľ boli informácie z tejto podkapitole čerpané.

1.4.3 Internet Protocol Security (IPSec)

IPSec je otvorený štandard. Vďaka tomu vďačí za veľkú popularitu a pravidelné aktualizácie kryptografických algoritmov. Protokol sa využíva na zabezpečenie bezpečnosti v sieti. IPSec môžeme klasifikovať ako L3 protokol, keďže pracuje s dátami zo sieťovej vrstvy. Má dva režimy:

- **transportný režim** – po prijatí paketu z vyššej vrstvy sú smerovacie dáta zachované a na základe nich sú dáta odosielané ďalej. K zvyšným dátam je pridaná hlavička použitého IPSec protokolu. Princíp pridania sieťových dát k pôvodným je znázornený na 1.12.
- **tunelovací režim** – zapuzdruje paket. Pridáva novú IP hlavičku a hlavičku IPSec protokolu (ESP/AH) k pôvodnému nezapuzdrenému paketu. Uvedená skutočnosť je zobrazená na obrázku 1.13.

Obr. 1.12: IPSec transportný režim

Za účelom poskytnutie zabezpečeného spojenia, protokol vykonáva autentizáciu, šifrovanie a vyjednávanie (z ang. *negotiation*), resp. výmenu potrebných kľúčov. Jednotlivé činnosti sú realizované pomocou týchto IPSec protokolov:

Obr. 1.13: IPSec tunelovací režim

- **Autentizačná hlavička** – z ang. *Authentication Header*, pridáva k prepravovanému paketu dáta na zabezpečenie dátovej integrity a pôvodu. Chráni proti z ang. *Replay attack* [32]. Dáta v tomto režime nie sú šifrované. AH hlavička je vygenerovaná v závislosti od toho v akom IPSec režime je protokol použítý.
- **Bezpečnostné zapuzdrenie nákladu** – z ang. *Encapsulating Security Payloads*, narozdiel od AH, ESP aj šifruje dáta z vyššej vrstvy. Vďaka tomu dochádza k zabezpečeniu dôvernosti, datovej integrity a autentizácie pôvodu. Výsledná hlavička závisí od dát zo sieťovej vrstvy a konfigurácie IPSec.
- **Internet Security Association and Key Management Protocol** – ďalej ISAKMP, protokol na autentizáciu a výmenu kľúčov. Slúži taktiež na vytvorenie parametra SA, ktorý sa používa v hlavičke AH/ESP.

IPSec je možné nakonfigurovať, tak aby používal AH a ESP selektívne alebo aj súčasne. V závislosti od konfigurácie následne dochádza k zapuzdrovaniu prichádzajúceho paketu. Používateľ má na výber viacero štandardných kryptografických algoritmov. Príkladmi sú AES [33], RSA [34], Diffie-Hellman [35] a eliptické krivky (ECDSA [36] aj ECDH [37]).

1.4.4 Secure Socket Tunneling Protocol (SSTP)

SSTP je bežný L2 VPN protokol, ktorý zapuzdruje PPP rámce cez HTTPS protokol [38]. Spolieha sa na SSL, resp. TLS, ktoré sú opísané neskôr v práci. Vďaka tomu umožňuje ľahší prechod cez väčšinu firewallov a proxy brán. Teda blokovanie takto vytvoreného VPN spojenia je pre poskytovateľov internetu a správcov siete zložitejšie.

SSTP bol vytvorený v roku 2007 spoločnosťou Microsoft. Primárne pre platformu Windows. Cieľom bolo poskytnúť bezpečnejšiu náhradu za PPTP a L2TP. V súčasnosti sa považuje za jeden zo štandartných protokolov. Je dostupný vo viacerých operačných systémoch vrátane Linuxu a BSD. Protokol je pravidelne udržiavaný o čom svedčí aj priebežná aktualizácia dokumentácie na Microsoft dokumentačných stránkach. Informácie k tejto podkapitole boli čerpané z [39]. V uvedenom zdroji je možné nájsť podrobnejšie informácie o protokole.

Proces zapuzdrenia dát s využitím protokolov je znázornený pomocou obrázka 1.14. Pri vytváraní SSTP segmentu dochádza k zapuzdreniu PPP rámcov

Obr. 1.14: Proces zapuzdrenia pôvodných PPP rámcov naprieč SSTP protokolom

pomocou HTTPS s využitím TCP protokolu s číslom portu 443. Po úspešnom nadviazaní TCP a overení SSL/TLS spojenia dochádza k spracovaniu SSTP hlavičky. Po úspešnom odstránení sa následne získa prístup k pôvodnému PPP rámcu.

Podobne ako tomu bolo v prípade L2TP protokolu, opísaného vyššie, tak z hľadiska prenosu sa prenášajú naprieč tunelom dva druhy paketov. Vytvára a odosiela ich klient aj server. Majú špecifický formát a musia byť prenášané po bajtoch a v sieťovom poradí bajtov (z ang. *network byte order*), z ľava do prava, teda od najvýznamnejšieho bitu po najmenej významný[1]. Prvé 4 parametre v oboch hlavičkách sú rovnaké:

1. **Verzia** – z ang. *Version*, má veľkosť 8-bitov, používa sa pri komunikácií a vyjednávaní SSTP verzie, ktorá sa má použiť. Prvé 4 bity signalizujú majoritnú verziu a zvyšné minoritnú verziu.

2. **Reservované** – z ang. *Reserved*, 7 bitov nastavených na 0, rezervované pre budúce použitie, pri spracovaní sa ignorujú.

3. **C** – 1 bit, indikátor pre dátový (0) a kontrolný SSTP paket (1).

4. **Dĺžka paketu** – z ang. *LengthPacket*, 16-bitový parameter, pozostáva z:

   - **R** – 4 bity, pripravené na budúce použitie, nastavené na 0 a ignorované,
   - **Dĺžka** – z ang. *Length*, 12 bitov, špecifikuje bajtovú veľkosť celého SSTP paketu.

Rozdielnosť medzi hlavičkami vzniká v:

- **Dátové SSTP pakety** – z ang. *SSTP Data Packets* [40], obsahujú 5. parameter
  - **5. Dáta** – pole variabilnej dĺžky. Obsahuje zapuzdrený náklad z vyššej vrstvy.
- **Kontrolné SSTP pakety** – z ang. *SSTP Control Packets* [41], obsahuje 3 dodatočné parametre:

[1] sieťové spracovanie dát známe aj ako z ang. *Big Endian*

- **5. Typ správy** – z ang. *Message Type*, 16-bitové pole s SSTP správou o stave spojenia. Celkovo 9 možných správ [41].
- **6. Číselné atribúty** – z ang. *Num Attributes*, 16-bitové pole, ktoré špecifikuje počet parametrov v správe.
- **7. Atribúty** – z ang. *Atributes*, zoznam parametrov s variabilnou veľkosťou.

Protokol vo všeobecnosti nepodporuje spojenie typu sieť k sieti. Primárne je orientovaný na pripojenie klienta k sieti, za účelom získania vzdialeného prístupu. To isté platí pri autentizácií. Je možné autentizovať iba používateľa, iné možnosti nie sú podporované (zariadenie, smart card, počítať,...). V prípade nestabilného spojenia, je možný vysoký výskyt straty paketov. Dôvodom je použitie TCP protokolu.

Bezpečnosť SSTP je sprostredkovaná za pomoci HTTPS protokolu, ktorý používa SSL/TLS. Aplikované kryptografické algoritmy závisia od verzie SSL/TLS, ktorá je použitá v implementácií. TLS bol predmetom opisu v úvode práce. SSTP sa považuje za veľmi bezpečný protokol. Na druhej strane použitie robustných šifrovacích a autentizačných algoritmov, dosť spomaľuje výsledné SSTP VPN pripojenie.

Viac informácií o protokole môže čitateľ nájsť v [39], odkiaľ boli aj informácie pre túto podkapitolu čerpané.

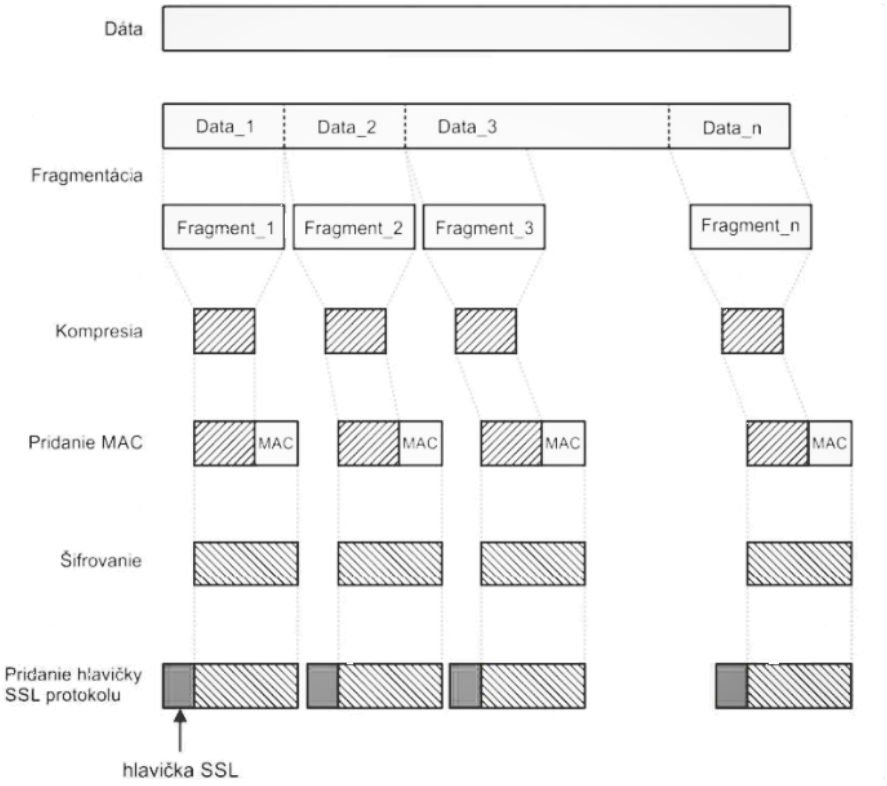
1.4.5 Transport Layer Security – TLS

TCP ani UDP protokol sam o sebe nezabezpečí dáta, ku ktorým sa pridáva hlavička. Dôsledkom toho vznikli viaceré protokoly slúžiace na autentizované šifrovanie aplikačných dát. Najznámejší je protokol zabezpečenia prenosu – TLS.

Zabezpečenie dát bolo prvotne vykonávané pomocou protokolu *Secure Sockets Layer* – SSL. Tento spôsob používa certifikáty na overenie pôvodcu dát. SSL malo od svojho vytvorenia dlhý vývoj, ktorý smeroval až k doteraz najpoužívanejšiemu TLS vo verzii 1.3. Ten vznikol v roku 2018. Inými slovami, TLS protokol je nástupca SSL pričom obsahuje rôzne úpravy a vylepšenia najmä z hľadiska rýchlosti. Zároveň sa v dnešnej dobe neodporúča používanie SSL protokolu. Dôsledkom optimalizácií je, že klienta komunikujúci so serverom cez HTTPS protokol s TLS 1.3 je rýchlejší ako v prípade použitia nešifrovaného HTTP variantu.

Aktuálne je ešte podporovaná aj verzia TLS 1.2, ktorá vznikla v roku 2008. V čase tvorby práce ešte nebol ohlásený oficiálny dátum s ukončením jej podpory. Pri vývoji softvéru sa preto programátorom odporúča použiť najnovšiu verziu.

TLS pracuje medzi aplikačnou a transportnou vrstvou. Spôsob spracovania dát je zobrazený pomocou obrázka 1.15 s SSL operáciami, prevzatého z [8]. Postup v SSL a TLS ostáva zachovaný.



Obr. 1.15: Prehľad operácií v SSL protokole [42]

Aplikačné dáta sa rozdelia na menšie fragmenty. Následne sa vykoná kompresia pomocou kompresného algoritmu. Z týchto dát sa vypočíta a pridá autentizačný kód správy (z ang. *Message Authentication Code*, ďalej MAC [43]), taktiež označovaný ako tag. Na uvedené dáta sa vykoná šifrovanie a nakoniec sa pridá TLS hlavička.

TLS sa v niektorej literatúre zvykne označovať aj ako VPN protokol. Z hladiska funkcionality VPN však s týmto tvrdením nemôžeme úplne súhlasiť. TLS spracúva dáta konkrétnej aplikácie. Jeho úlohou je zabezpečenie aplikačných dát pri bežnom prenose. Z hľadiska VPN by sme však mohli tunelovať naprieč sieťou len jednú konkrétnu aplikáciu. Ako vidíme jedná sa o veľmi špeciálny prípad. Situácia sa však mení v prípade implementácie TLS protokolu do aplikácie ako je napríklad webový prehliadač. V takomto prípade by sme za pomoci manipulácie dát vychádzajúcich z prehliadača dokázali sprostredkovať činnosť VPN. Ako príklad realizácie by mohli byť rôzne typy rozšírení, ktoré si môžeme do prehliadačov doinštalovať v podobe pluginov. Z tohto dôvodu zaradíme tento protokol vrámci rozdelenia VPN sietí do L4 kategórie aj napriek faktu, že sa nejedná o tu-

nelovací protokol.

Viac informácií o TLS protokole, jednotlivých verziách a optimalizáciách je možné nájsť na [42].

1.4.6 Ostatné populárne VPN protokoly

Vrámci tejto práce si predstavíme ešte dvojicu veľmi populárnych VPN riešení. Koncepčne sú riešenia pri vytváraní tunelu a prenose správ podobné vyššie opísaným protokolom. Z uvedeného dôvodu protokoly len stručne charakterizujeme.

OpenVPN

OpenVPN [44] je jeden z najznámnejších voľne dostupných VPN tunelovacích protokolov. Vznikol v roku 2001. Dostupné ako firmvérové riešenie pre výrobcov sieťových zariadení. Pre používateľa je dostupná vo forme softvéru, ktorý je potrebné nainštalovať na cieľovú platformu. Ponúka aj grafické rozhranie. Zabezpečené spojenie naprieč internetom je sprostredkovane prostredníctvom SSL/TLS protokolu. Dokáže pracovať s dátami na vrstve L2 aj L3, v závislosti od konfigurácie. Vďaka voľnému prístupu do zdrojového kódu poskytuje jednoduché možnosti na skúmanie výsledných riešení, validáciu a prípadnú úpravu podľa potrieb konkrétneho používateľa. Protokol je napísaný v jazyku C. Bezpečnostné prvky su implementované pomocou OpenSSL knižnice [45]. Knižnica v sebe zahŕňa funkcie potrebné na šifrovanie, autentizáciu, výmenu kľúčov a mnoho ďalšieho. Na obrázku 1.16 je znázornená výstupna štruktúra dát po zapuzdrení.

Obr. 1.16: Zloženie sieťových dát po spracovaní OpenVPN

Aktuálne používa na šifrovanie AES s 256-bitovou veľkosťou kľúča. V súčasnosti sa OpenVPN považuje za najbezpečnejšiu implementáciu VPN dostupnú pre viacero platforiem. Používateľ ma možnosti vo voľbe protokolu TCP alebo UDP. Podporuje aj prácu s IPv6. OpenVPN nie je kompatabilná s ostatnými protokolmi. Je preto potrebné mať implementáciu na serveri aj klientovi. Nevýhodou je pomerne veľké, energeticky a výpočtovo náročná implementácia.

Viac informácií o tomto komplexnom programe je možné nájsť v [19], [44]

a priamo na stránke OpenVPN[2]. Z uvedených zdrojov boli aj informácie čerpané. Zdrojový kód je dostupný napríklad na Githube[3].

WireGuard

WireGuard [46] je najnovší protokol z vyššie uvedených. Pracuje iba na vrstve L3. Jedná sa o implementáciu s voľne dostupným zdrojovým kódom. Vznikol v roku 2015. Cieľom projektu bolo vytvoriť jednoduchý protokol, ktorý sa ľahko používa, dosahuje vysoké prenosové rýchlosti a poskytuje kvalitnú bezpečnosť pre používateľa. Od roku 2020 sa stal súčasťou Linuxového jadra, konkrétne verzie Linux 5.6 kernel. Aktuálne podporuje veľké množstvo OS vrátane Androidu [47], Windowsu, MacOS [43], OS založené na BSD [48] a ďalšie. Za úspešnú implementáciu vďačí WireGuard implemetovaniu svojich funkcionalít do samotných jadier OS, čo značne zrýchľuje spracovanie dát. Samozrejmostou, ostáva aj využitie moderných, extrémne rýchlych kryptografických algoritmov a podpora pre IPv4 a IPv6.

Protokoly použité vo WireGuarde sú:

- **X25519** [49] – zabezpečuje výmenu kľúčov vďaka kryptografii s eliptickým krivkami [50] (ďalej ECC), ponúka 128-bitovú bezpečnosť s veľkosťou kľúča 256-bitov. Považuje sa za jednu z najrýchlejších kriviek v ECC.
- **ChaCha20** [51] – zabezpečuje symetrické šífrovanie.
- **Poly1305** [52] – vytvára autentifikačný kód správy (z ang. *Message Authentication codes*). Veľmi častá je kombinácia ChaCha20-Poly1305 za účelom autentizovaného šifrovania s pridruženými dátami (z ang. *Authenticated encryption with associated data*).
- **SipHash** [53] – Wireguard používa algoritmus na vytvorenie MAC a jeho následné mapovanie ku kľúčom v hashovacej tabuľke. Hashovacie tabuľky sú známy pojem v oblasti dátových štruktúr. Ich hlavnou výhodou je vysoká rýchlosť v porovnaní s ostatnými možnosťami.
- **BLAKE2s** [54] – hashovacia funkcia, rýchlejšia než aktuálne štandardy z rodiny SHA.
- **UDP** – protokol na prenos zapuzdrených dát.

[2]https://openvpn.net/faq/what-is-openvpn/
[3]https://github.com/OpenVPN/openvpn/

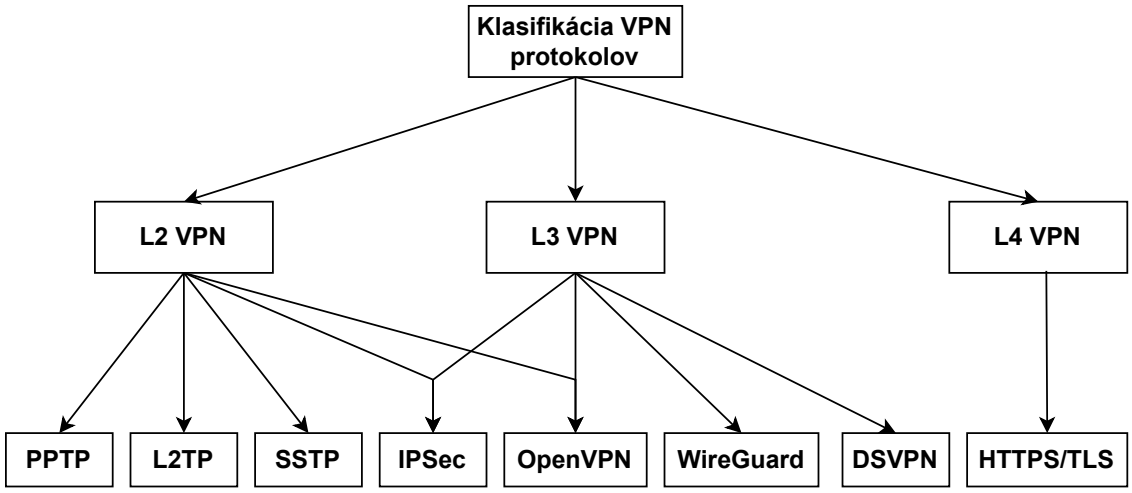
WireGuard podporuje aj použitie vopred zdieľaného kľúča za účelom symetrického šifrovania. Dôvodom je pokrok v oblasti kvantových počítačov, ktoré predstavujú riziko pre algoritmy založené na asymetrickom šifrovaní.

Viac informácií o tomto protokole je k dispozícií na [55] a [46], odkiaľ boli informácie aj čerpané. Zdrojový kód je rozdelený do viacerých repozitárov. Zoznam je dostupný na stránkach Wireguardu[4].

1.5 Zhrnutie VPN sietí

V súčasnosti sa využíva VPN aj na súkromné účely. Dôvodov môže byť viacero. Napríklad prístup k lokálne blokovaným doménam, anonymita v internetovom prostredí, zabezpečenie pripojenia a iné. V tomto prípade vstupujú do popredia tzv. VPN poskytovatelia (z ang. *VPN Providers*), ktorý za poplatok poskytujú výhody pripojenia cez VPN k verejnej sieti. Existujú však aj bezplatné implementácie VPN. Napríklad VPNHood s voľne dostupným zdrojovým kódom[5].

Na obrázku 1.17 je schéma zaradenie charakterizovaných protokolov do klasifikácie VPN. Do schémy sme zakomponovali aj DSVPN, ktorá bude predmetom analýzy v ďalších častiach práce.



Obr. 1.17: Klasifikácia spomenutých VPN protokolov

[4]https://www.wireguard.com/repositories/

[5]dostupné na `https://github.com/vpnhood/VpnHood`

2 Ľahká kryptografia

V počítačovej sfére sa čoraz častejšie stretávame so zariadenia, ktorých hardvérové prostriedky a ponúkaný výpočtový výkon sú podstatne nižšie ako v prípade bežne dostupných zariadení na domáce, resp. komerčné použitie. Príkladom môžu byť IOT (z ang. *Internet Of Things*) zariadenia , senzorové uzly, a podobné. Dôležitou vlastnosťou je aj komunikácia medzi sebou alebo inými zariadeniami. V dôsledku toho je nutné riešiť aj otázku zabezpečenia, resp. bezpečnosti takého prenosu dát.

Kryptografia je oblasť počítačovej vedy, ktorá sa zaoberá práve spomenutou problematikou. Hlavným cieľom je utajiť správu pri jej prenose z bodu A do B. Teda od odosielateľa (tvorcu) správy, až k jej prijímateľovi. Dôsledkom tohto úkonu dochádza k zabezpečeniu 3 hlavných úloh kryptografie:

- **ochrana osobných údajov** (dôvernosť) – z ang. *Data Privacy*,
- **autenticita údajov** (prišla z miesta, ktoré sa uvádza ako zdroj dát) – z ang. *Data Authenticity*,
- **integrita údajov** (nebolia upravená počas prenosu) – z ang. *Data Integrity*.

Pojem kryptografia vznikol už pomerne dávno a bol už viackrát charakterizovaný. Z toho dôvodu sa tejto problematike ďalej nebudeme venovať. Viac informácií je možné nájsť v [56].

V súčasnosti má používateľ možnosť vybrať si zo širokej ponuky kryptografických algoritmov. Výber je volený na základe potrebnej funkcionality, ktorú sa snažíme implementovať. Napríklad za účelom symetrického šifrovania by sme mohli použiť AES [33] (z ang. *Advanced Encryption Standard*), ktorý je aktuálne používaný ako štandardný kryptografický algoritmus. Detailný opis jednotlivých blokov a postupov použitých v AES-e, je obsahom rôznych publikácií. Viac informácií o problematike nájde čitateľ napríklad v [56].

V prípade zariadení spomenutých v úvode kapitoly, však môže nastať problém s výpočtovým výkonom pri realizácií algoritmov. Vo výsledku trvá vykonávanie funkcionality omnoho dlhšie a je aj energeticky náročnejšie ako v prípade

normálnych zariadení. V roku 2005 bol prvýkrát definovaný pojem, z ang. *Lightweight Cryptography*. Konkrétne v práci [57]. Vrámci tejto práce voľne preložíme tento pojem ako **Ľahká kryptografia** (ďalej LWC).

LWC algoritmy sú mnoho násobne efektívnejšie ako súčasne používané konvenčné kryptografické štandardy. Dôvodom je ich vysoká efektívnosť a nízky počet potrebných procesorových inštrukcií na vykonanie cielenej funkcionality. V súčasnosti je častým javom použitie označenia *lightweight* pre ľubovoľný kryptografický algoritmus. Jedná sa o implementácie, ktoré svojimi vlastnosťami spĺňajú základné požiadavky LWC. Tie boli definované samotnými autormi už v diele [57]. Sú nimi:

- **minimalizácia spotreby zdrojov zariadenia** – veľkosť kódu, používaných dát a spotreby energie,
- **poskytnutie dostatočné vysokého stupňa bezpečnosti**,
- **odolnosť voči útoku cez postranné kanály** – z ang. *side-channel attack*, napríklad útokom na analýzu výkonu a na časovanie,
- **jednoduchá implementácia a efektívnosť,**
- **nízke pamäťové nároky** – z ang. *low memory footprint*.

V práci budeme tieto algoritmy označovať ako *Lightweight Cryptographic Algorithm* (ďalej LWCA). LWCA tvoria kryptografické algoritmy, ktoré splňajú vyššie stanovené vlastnosti a teda je možné ich aj nasadiť do tzv. *low resource* zariadení. V závislosti od výslednej implementácie sa sledujú požiadavky na daný algoritmus. V prípade hardvérovej implementácie najväčšiu úlohu pri tvorbe optimálneho algoritmu zohráva energetická spotreba a potrebná veľkosť čipu. Na druhej strane, pri softvérovej implementácií je dôležitým aspektom veľkosť algoritmu a jeho využitie RAM pamäte. Čím sú uvedené parametre nižšie, tým výhodnejší je nasadenie daného algoritmu pre cieľové zariadenie. V prípade výpočtovo obmedzených zariadení sa pri výslednej implementácií LWCA môžeme stretnúť aj s kompromisom medzi ponúknutou bezpečnosťou a efektivitou.

V rámci tejto kapitoly si predstavíme jeden z novších LWCA algoritmov. Konkrétne balík Xoodyak s kryptografickou permutáciou XOODOO [2] a jeho použitie. Xoodyak sa stal jedným z 10 finalistov v LWC štandardizačnom procese Národného inštitútu pre štandardy a technológie (ďalej NIST) [58]. Vo februári roku 2023 bol za víťaza zvolený algoritmus Ascon [59].

Viac podrobností nájde čitateľ v [57], [60] a [58], odkiaľ boli aj informácie z tejto kapitoly čerpané.

2.1 Kryptografická permutácia XOODOO a jej variácie

Permutácia je operácia, ktorá mení pozíciu vstupných prvkov, tak aby vo výsledku vzniklo nová usporiadaná množina. Kryptografické permutácie sú špeciálne navrhnuté matematické algoritmy, tak aby bolo možné využiť ich za účelom šifrovania a dešifrovania. Operácie vykonané v takýchto permutáciách musia byť invertibilné. Kryptografické permutácie tvoria základný stavebný blok pri následnej tvorbe ďalších kryptografických blokov. Množina základných stavebných blokov sa v kryptografii spoločne označuje ako kryptografické primitíva (ďalej KP). Príkladom môžu byť hašovacie funkcie, generátory náhodných čísel a podobne. Viac informácií nájde čitateľ v [61].

XOODOO je sada 384-bitových kryptografických permutácií parametrizovaných počtom kôl. Funkcia kola/rundy (z ang. *round*) funguje na 12 slovách (z ang. *words*) po 32 bitoch. Vďaka tomu je efektívna aj na menej výkonných procesoroch nižšej triedy. Vytvoril ju tím Keccak [62], ktorý stojí za viacerými úspešnými kryptografickými algoritmami. Napríklad hashovacie funkcie z rodiny SHA-3 a iné – [63]. XOODOO algoritmus vznikol po vytvorení tzv. Kravatte autentizačno-šifrovacieho algoritmu [64], založené na Keccak-p permutácií [65]. Ten sa ukázal ako dostatočne rýchly na širokom spektre platforiem. Avšak nezapadá do kategórie LWCA.

Tím Keccak vypracoval nové riešenie založené na ich Keccak-p dizajne a permutačnom algoritme Gimli [66]. Vo výsledku autori zlúčili lepšie realizované prvky z oboch algoritmov do jedného celku. Primárny problém samotnej permutácie Gimli bol v slabom prejave zmeny výstupu po malých zmenách vo vstupnej správe. Táto vlastnosť sa v kryptografii označuje pomocou anglického pojmu, tzv. *propagation properties*[1]. Novo-vzniknuté riešenie autori pomenovali XOODOO.
Na základe rôznych variácií tohto kryptografického primitíva sa im následne podarilo vytvoriť sadu vysoko efektívnych kryptografických funkcií. Medzi sady, ktorých jadro tvorí XOODOO, patrí Xoodyak a Xoofff. Xoofff pozostáva zo zlúčenia Farfalle konštrukcie [67] so XOODOO permutáciou.

Xoodyak má, na rozdiel od Xoofff, duplexovú konštrukciu [68]. Vo výsledku máme ľahko prenosnú, všestrannú, kryptografickú knižnicu. Je vhodná do výkonovo obmedzených prostredí. Môže sa použiť pre väčšinu kryptografických funkcií, ktoré používajú symetrický kľúč. Napríklad hashovanie, šifrovanie, vý-

[1] Cieľom je aby aj zmena jedného bitu na vstupe, ovplyvnila čo najviac bitov vo výstupe – tzv. *Lavínový efekt*

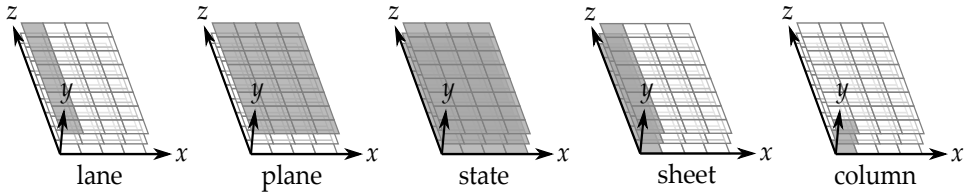
počet MAC alebo autentizované šifrovanie. O kvalite riešenia napovedá aj fakt, že sada Xoodyak je jedným z 10 finalistov v oblasti ľahkej kryptografie NIST štandardizačného procesu, ktorý pozostával z 3 predchádzajúcich kôl. Ich úlohou bolo vybrať najlepšie algoritmy zo všetkých prihlásených.

V rámci tejto kapitoly opíšeme kryptografické primitívum XOODOO a následne balík Xoodyak. Informácie o téme boli čerpané z týchto zdrojov: [2], [69], [1], [70], [71],[72].

2.1.1 XOODOO permutácia

XOODOO je permutácia, definovaná počtom rúnd. Má klasickú iteračnú štruktúru. Teda opakovane sa vola rundová funkcia s aktuálnym stavom. Pre pochopenie operácií je nutné pochopiť určité označenie použité v algoritme.

Stav – **state**, pozostáva z 3 rovnako veľkých horizontálnych rovín – **planes**[2]. Každá z týchto rovín obsahuje štyri paralelne 32-bitové pruhy – **lanes**)[3]. Okrem tejto charakteristiky je možné opísať stav ako množinu zloženú zo stĺpcov – **columns**[4], pričom jeden stĺpec obsahuje 4 bity v jednej rovine. Stav je teda tvorený zo stĺpcov usporiadaných v poli o rozmere $4 \times 3 \times 32 = 384$ bitov. Posledná položka na opis stavu sú tzv. listy – **sheets**[5]. List sa skladá z 3 na sebe uložených pruhov. Uvedené pojmy sú znázornené pomocou obrázka 2.1, ktorý bol prevzatý z [1].



Obr. 2.1: Grafické znázornenie terminológie využitej v kryptografickej permutácii XOODOO [1]

Roviny majú index y. Index $y = 0$ zodpovedá spodnej rovine a vrchná rovina má index $y = 2$. Bit je označený s indexom z vrámci množiny pruhov. List označujeme pomocou indexu x. Pozícia pruhu v stave je definovaná pomocou dvoch

[2]v jednej rovine je 128 bitov
[3]v jednom pruhu je 32 bitov
[4]v jednom stĺpci je 12 bitov
[5]v jednom liste je 96 bitov

súradníc (x, y). Konkrétny bit je možné reprezentovať v stave pomocou trojice súradníc (x, y, z). Pri určení stĺpca sú potrebné 2 súradnice (x, z). Pred spustením samotného algoritmu musí používateľ vykonať mapovanie 384-bitovej správy voči horizontálnym rovinám. Tento úkon sa realizuje pomocou vzorca 2.1.

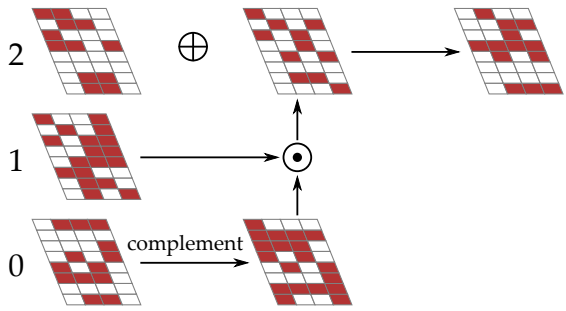
$$i = z + 32(x + 4y) \tag{2.1}$$

Výhodou XOODOO je, že celý stav, 384 bitov, dokáže byť uložený v 12 registroch po 32 bitov. Vďaka tomu ideálne vyhovuje nízko výkonným 32-bitovým zariadeniam.

Rundová funkcia pozostáva z 5 krokov:

1. miešanie vrstvy – z ang. *a mixing layer* θ,
2. posun rovín – z ang. *a plane shifting* ρ_{west},
3. pridanie rundových konštánt – z ang. *the addition of round constants* ι,
4. nelineárna vrstva – z ang. *a non-linear layer* χ,
5. posun rovín – z ang. *an another plane shifting* ρ_{east}.

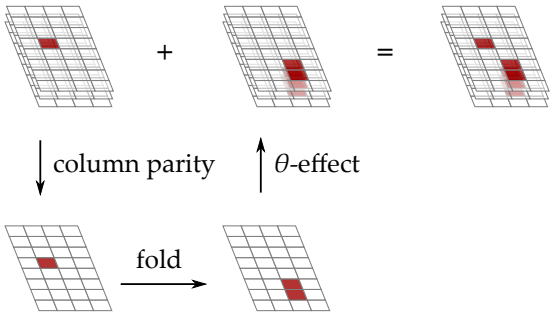
Opis jednotlivých krokov je znázornený pomocou obrázkov 2.2, 2.3, 2.4 ktoré sú prevzatý z [1].



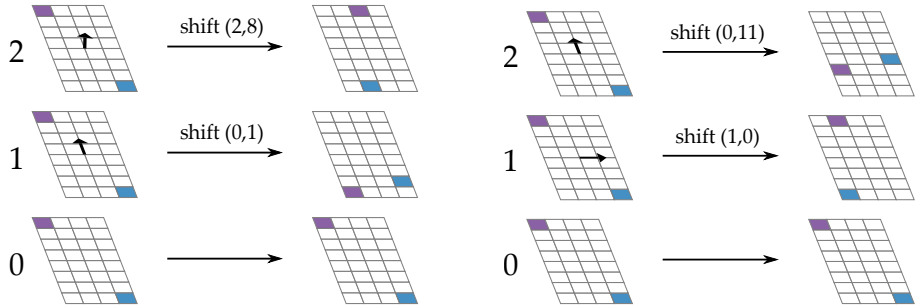
Obr. 2.2: Grafické znázornenie operácie χ [1]

V obrázku 2.4 je posun realizovaný na každom bite. V obrázku sú ilustrované len posuny 2 bitov.

Tabuľka 2.5 vysvetľuje jednotlivé operácie, ktoré sa v algoritme používajú. Algoritmus permutácie je následne znázornený pomocoou obrázku 2.6. Súčasťou implementácie sú aj tak zvané rundové konštanty. Tie je možné vidieť v tabuľke 2.1. Uvedené ilustrácie boli prevzaté z dokumentu [1].



Obr. 2.3: Grafické znázornenie operácie ρ [1]



Obr. 2.4: Ilustrácia miešania vrstiev ρ_{west} (vľavo) a ρ_{east} (vpravo)[1]

A_y	Plane y of state A
$A_y \lll (t, v)$	Cyclic shift of A_y moving bit in (x, z) to position $(x + t, z + v)$
$\overline{A_y}$	Bitwise complement of plane A_y
$A_y + A_{y'}$	Bitwise sum (XOR) of planes A_y and $A_{y'}$
$A_y \cdot A_{y'}$	Bitwise product (AND) of planes A_y and $A_{y'}$

Obr. 2.5: Charakteristika operácií v algoritmickom zápise kryptografickej permutácie XOODOO [1]

2.1.2 Kryptograficý balíček Xoodyak

Xoodyak možno považovať za všestranný kryptografický nástroj. Je vhodný pre väčšinu operácií využívajúcich symetrický kľúč. Napríklad generovanie pseudonáhodných bitov, autentizáciu, šifrovanie a iné. Tím Keccak použil pri návrhu duplexnú konštrukciu. Konkrétne variant s plným stavom a využitím kľúča. Tento dizajn označujeme ako Full-State Keyed Duplex (FSKD). Viac o tejto konštrukcii si čitateľ môže prečítať v [68]. Operačný režim, v ktorom Xoodyak pracuje sa nazýva Cyklista – z ang. *Cyclist*. Tento názov získal ako opozitum k pomenovaniu režimu Motorista (z ang. *Motorist*), ktorý je možné nájsť v Keyak schéme

Definícia XOODOO permutácie s počtom rúnd n_r

Parametre: Počet rúnd n_r

for rundový index i from $1 - n_r$ to 0 **do**

$A = \mathrm{R_i}(A)$

$\mathrm{R_i}$ **je špecifikovaná nasledujúcou sekvenciou krokov:**

θ :

$$P \leftarrow A_0 + A_1 + A_2$$
$$E \leftarrow P \lll (1,5) + P \lll (1,14)$$
$$A_y \leftarrow A_y + E \text{ for } y \in \{0,1,2\}$$

ρ_{west} :

$$A_1 \leftarrow A_1 \lll (1,0)$$
$$A_2 \leftarrow A_2 \lll (0,11)$$

ι :

$$A_0 \leftarrow A_0 + \mathrm{C}_i$$

χ :

$$B_0 \leftarrow \overline{A_1} \cdot A_2$$
$$B_1 \leftarrow \overline{A_2} \cdot A_0$$
$$B_2 \leftarrow \overline{A_0} \cdot A_1$$
$$A_y \leftarrow A_y + B_y \text{ for } y \in \{0,1,2\}$$

ρ_{east} :

$$A_1 \leftarrow A_1 \lll (0,1)$$
$$A_2 \leftarrow A_2 \lll (2,8)$$

Obr. 2.6: Algoritmický zápis kryptografickej permutácie XOODOO [1]

i	c_i
0	0x00000012
-1	0x000001A0
-2	0x000000F0
-3	0x00000380
-4	0x0000002C
-5	0x00000060
-6	0x00000014
-7	0x00000120
-8	0x000000D0
-9	0x000003C0
-10	0x00000038
-11	0x00000058

Tabuľka 2.1: Súbor rundových konštánt kryptografického algoritmu XOODOO [1]

[73]. Narozdiel od uvedeného balíka Keyak, nie je Xoodyak limitovaný len na au-

tentizované šifrovanie. Je jednoduchší hlavne kvôli tomu že neobsahuje paralelné varianty.

Režim Cyklista

Režim Cyklista funguje na princípe kryptografických permutácií f, teda zmeny usporiadania bitov za pomoci tajného kľúča a matematických operácií. Parametrami sú veľkosti blokov R_{hash}, R_{kin}, R_{kout} a veľkosť račety, resp. západky (z ang. *the ratchet size*) [74] $\ell_{ratchet}$. Uvedený pojem sa v kryptografii používa vo forme obrazného pomenovania. Cieľom je poukázať na jednoduchý pohyb vpred, ale s ťažkým, resp. zložitejším pohybom naspäť. Dôležité je, že uvedený scenár je vyvolaný zámerným dizajnom. Šírka permutácie b' je definovaná pomocou vzorca (2.2). Všetky uvedené parametre sú v bajtoch. Pre označenie prázdneho slova budeme používať E.

$$max(R_{hash}, R_{kin}, R_{kout}) + 2 \leq b' \tag{2.2}$$

Cyklista operuje v dvoch režimoch – **hašovací a kľúčový** (z ang. *hash and keyed mode*). Inicializácia prebieha pomocou príkazu `CYCLIST(K,id,counter)`. Ak sa parameter K rovná prázdnemu slovu E, tak potom nastane spustenie v hašovacom režime. Aktuálne nie je do implementácie zakomponovaná možnosť zmeny režimu po inicializácií. Vývojári však túto vlastnosť nevylúčili pre prípadné aktualizácie balíka.

Dostupné funkcie závisia od režimu, v ktorom sa Cyklista spúšťa. Medzi ne patria `ABSORB()` a `SQUEEZE()`. Možno ich volať v oboch režimoch, zatiaľ čo funkcie `ENCRYPT()`, `DECRYPT()`, `SQUEEZEKEY()` a `RATCHET()` sú dostupné len pre kľúčový režim. Účel každej funkcie je nasledujúci:

- `ABSORB(X)` absorbuje vstupný reťazec X,
- $C \leftarrow$ `ENCRYPT(P)` zašifruje P do C a absorbuje P,
- $P \leftarrow$ `DECRYPT(C)` dešifruje C do P a absorbuje P,
- $Y \leftarrow$ `SQUEEZE(L)` vytvára L-bajtový výstup, ktorý závisí od doteraz absorbovaných dát,
- $Y \leftarrow$ `SQUEEZEKEY(L)` funguje ako `SQUEEZE(L)`, ale používa sa za účelom generovania odvodeného kľúča,
- `RATCHET()` transformuje stav na nevratný tak, aby sa zabezpečila dopredná bezpečnosť (z ang. *Forward secrecy*) [75].

Stav bude závisieť od postupnosti volaní funkcií a od jeho vstupných reťazcov. Presnejšie povedané, zámerom je, že akýkoľvek výstup závisí od postupnosti všetkých vstupných reťazcov a volaní, tak že akékoľvek dva nasledujúce výstupné reťazce budú výstupom rôznych domén. Napríklad volanie `ABSORB(X)` znamená, že výstup bude závisieť od reťazca X. Na druhej strane `ABSORB()` vo funkcii `ENCRYPT(P)` vytvorí výstup závislý aj od P z funkcie šifrovania. Okrem uvedených závislostí ovplyvňujú výstup aj iné dizajnové riešenia. Príkladom je minimalizácia pamäťových požiadaviek. Vo výsledku teda výstup závisí od počtu predchádzajúcich volaní funkcie `SQUEEZE()` a predtým spracovaných textov pomocou funkcií `ENCRYPT()` a `DECRYPT()`. Viac informácií o režime je dostupných v kapitole 7.2, publikácie [1]. Algoritmický zápis jednotlivých funkcií a doplňujúce informácie o režime Cyklista je možné nájsť v [76], konkrétne v kapitole 2.2.

Definícia a bezpečnosť

Xoodyak je definovaný pomocou operatívneho režimu Cyklista nasledovne:

$$CYCLIST[f, R_{hash}, R_{kin}, R_{kout}, L_{ratchet}] \tag{2.3}$$

Kde jednotlivé parametre majú veľkosti:

1. f – permutácia XOODOO so šírkou 48 bajtov $(384$ bitov$)$,
2. R_{hash} – 16 bajtov,
3. R_{kin} – 44 bajtov,
4. R_{kout} – 24 bajtov,
5. $L_{ratchet}$ – 16 bajtov.

Takto definované parametre algoritmu dokážu poskytnúť 128-bitovú bezpečnosť v oboch režimoch Cyklistu. Samozrejmosťou je, že v prípade kľúčového režimu, musí byť veľkosť kľúča rovná alebo väčšia ako 128 bitov. Viac informácií o kryptografickej bezpečnosti algoritmov je možné nájsť v [77].

Viac informácií o bezpečnosti Xoodyak-a je možné nájsť v [1] (kapitola 7.3) a [76], odkiaľ boli informácie čerpané.

2.1.3 Možnosti použitia Xoodyak algoritmu

Obsahom tejto podkapitoly sú uvedené postupy ako a za akých okolností je daný balík možné použiť.

Použitie hašovacieho režimu

Xoodyak sa dá aplikovať ako hašovacia funkcia. Konkrétne je možné ju použiť ako funkciu na rozšírenie výstupu (z ang. *eXtendable-Output Function*) (ďalej XOF). Nominálne, resp. nie bežné použitie by v tomto prípade bolo nasledujúce:

```
CYCLIST(E,E,E) //spustenie v hašovacom režime,
ABSORB(X)      //absorpcia vstupného reťazca X,
SQUEEZE(L)     //vytvára L-bajtový výstup,
               //závislý od doteraz absorbovaných dát.
```

V tomto prípade by sa kryptografická bezpečnosť algoritmu pohybovala v závislosti od veľkosti výstupu L. Konkrétne v intervaloch:

- **odolnosť voči kolízií** – z ang. *collision resistance* [78], min(8L/2, 128) bitov,
- **odolnosť voči** – z ang. *preimage and second preimage resistance* [79], min(8L, 128) bitov,
- **odolnosť voči** – z ang. *m-target preimage resistance* [79], min(8L - log m, 128) bitov.

Bežná je však absorpcia sekvencie viacerých reťazcov.

Použitie kľúčového režimu

Inicializácia režimu začína použitím príkazu `CYCLIST(K,id,counter)`. Autori uviedli celkovo 6 spôsobov použitia. V nich sa opisuje význam parametrov id, $counter$ $nounce$ a podobne aj možnosti použitia funkcií, spomenutých na začiatku podkapitole.

- **Použitie na zabránenie viac-cieľového útoku** – z ang. *Two ways to counteract multi-target attacks*,
- **Tri spôsoby spracovania jednorázového kľúča** – z ang. *Three ways to handle the nonce*,
- **Autentizované šifrovanie** – z ang. *Authenticated encryption*,
- **Autentizované relačné šifrovanie** – z ang. *Session authenticated encryption*,
- **Použitie funkcie `RATCHET()`** – z ang. *Ratchet*,
- **Pohyblivé subkľúče** – z ang. *Rolling subkeys*.

Použitie na zabránenie viac-cieľového útoku – id parameter je voliteľný identifikátor kľúča K. Pre každý tajný kľúč by mal byť jedinečný. Ponúka možnosť zabránenia viac-cieľovým útokom. Jedná sa o útok na viacero používateľov daného kryptografického systému, resp. viacero kľúčov používateľa. Viac o tomto útoku je možné nájsť v [80]. V prípade použitia id parametra algoritmus rozšíri veľkosť kľúča. Následne pri vyhľadávaní kľúčov nedochádza k degradácií bezpečnosti a veľkosť tajného kľúča môže ostať 128 bitov. Týmto spôsobom bude zachovaná aj rovnaká bezpečnosť systému pred útokom. Príklad za účelom šifrovania správy P za pomoci tajného kľúča K s id, je na nasledujúci:

```
CYCLIST(K,id,E)
ABSORB(nounce)
C ← ENCRYPT(P)
```

Tri spôsoby spracovania jednorázového kľúča – 3. parameter pri inicializácií režimu cyklista je *counter*, resp. počítadlo. Jedná sa o dátový prvok vo forme bajtového reťazca, ktorý môže byť inkrementovaný. Spracúva sa po jednej číslici. Vďaka tomu sa obmedzuje počet informácií, ktoré vie útočník využiť pre rôzne vstupy. Pri inicializácií používateľ zvolí veľkosť počítadla v intervale $2 \leq B \leq 256$. Predpokladá sa, že počítadlo je reťazec z množiny $\mathbb{Z}_{\mathbb{B}}^{*}$. Potom ak je počítadlo inicializované ako prázdny reťazec, tak množina všetkých možných hodnôt po inkrementácií je $\mathbb{Z}_{\mathbb{B}}^{\ll}$. Pri každom ďalšom navýšení sa zvýši hodnota za $*$. Spracovanie prebieha od najvýznamnejšieho bitu. Čím menšia je hodnota B, tým menší je počet možných vstupov pri každej iterácií permutácie. Vďaka tomu je zabezpečená lepšia ochrana pred tzv. z ang *Power analysis* [81] útokmi a jeho variantami. Za účelom zamedzenia týchto útokov sa používa `ABSORB(nounce)` v prípade ak si počítadlo pri inicializácií zvolíme prázdny reťazec E.

Autentizované šifrovanie – za účelom autentizovaného šifrovanie je Xoodyak možné použiť nasledovne:

```
CYCLIST(K,nonce,E)
ABSORB(A)
C ← ENCRYPT(P)
T ← SQUEEZE(t)
return (C,T)
```

Pričom K je tajný kľúč s pridruženým jednorázovým heslo a dátami A k heslu. Z týchto údajov sa získa autentizačný tag t. Jeho veľkosť je rovná 16-bajtom. V prípade dešifrovania by postupnosť volaní vyzerala nasledovne:

```
CYCLIST(K,nonce,E)
ABSORB(A)
C ← ENCRYPT(P)
T ← SQUEEZE(t)
if T = T' then
  return P,
else
  return ⊥  //vyjadrenia hodnoty false
```

Kryptografická bezpečnosť takto implementovaného šifrovania je minimom z uvedených hodnôt $min(184, K, 8t)$.

Autentizované relačné šifrovanie – pracuje so sekvenciou správ a autentizačných tagov. V princípe sa opakuje viacero blokov z predchádzajúcej možnosti použitia. Prvé volanie je rovnaké ako v predchádzajúcom príklade. Implementácia však zahŕňa aj možnosť vytvoriť tag bez toho aby bolo nutné použiť funkcie `ABSORB()`, `ENCRYPT()` alebo obe súčasne pred volaním `SQUEEZE()`. Aj napriek tomu bude možné vytvoriť nový tag na základe predchádzajúcich dát, uložených v pamäti.

Použitie funkcie `RATCHET()` – používateľ môže v režime kľúča kedykoľvek volať funkciu `RATCHET()`. Volanie spôsobí prepísanie časti stavu s nulami. Vďaka tomu je nemožné vypočítať stav pred volaním funkcie `RATCHET()`. Týmto spôsobom je možné zťažiť snahu pri pokuse obnoviť vnútorný stav, napríklad pri útoku postrannými kanálmi. `RATCHET()` je možné použiť obdobne aj pri autentizovanom šifrovaní. Konkrétne pred alebo za funkciou vytvárania tagu `SQUEEZE()`.

```
CYCLIST(K,nonce,E)
ABSORB(A)
C ← ENCRYPT(P)
RATCHET()   //príklad volania pred
T ← SQUEEZE(t)
RATCHET()   //príklad volania za
```

Obidva spôsoby majú svoje výhody. Volanie pred vytváraním tagu je najfektívnejšie. Dôvodom je, že vďaka tomu je potrebné len jedno extra volanie permutácie. V prípad volania funkcie `RATCHET()` za `SQUEEZE()` sa šifrovaný text prenáša, funkcionalita `RATCHET()` je vykonaná asynchrónne a algoritmus môže spracovať ďalšiu správu, určenú na šifrovanie.

Pohyblivé subkľúče – je alternatíva k použitiu dlhodobého tajného kľúča K s inkrementovanými pridruženým jednorázovým kľúčom $nounce$ alebo identifi-

kátorom kľúča id. Subkľúč/e sa vytvára/jú pomocou funkcie `SQUEZEEKEY()`. Pri šifrovaní je teda možné nahradiť procesy inkrementácie a ukladania jednorázových hesiel pri každom použití K, pomocou použitia pohyblivých subkľučov.

```
K_1 ← K and i ← 1 //inicializacia tajneho kluca
while condition do
CYCLIST(K,E,E) //inicializácia novej Xoodyak inštancie
K_{i+1} ← SQUEEZEKEY(ℓ_sub)
RATCHET()       //volitelne
ABSORB(A_i)
C_i ← ENCRYPT(P_i) //sifrovanie
T_i ← SQUEEZE(t)  //vypocet tagu
⟹ output(C_i,T_i) //caka na dalsiu správu
i ← i + 1
```

Parameter ℓ_{sub} je vo veľkosti 32 bajtov $(256$ bitov$)$. Táto veľkosť by mala byť dostatočná aby sa zabránilo kolíziám za predpokladu, že v subkľúčoch nevznikla kolízia. Použitie týmto spôsobom ponúka odolnosť voči útokom cez postranné kanály. Tajný kľúč nie je po dodávke prvého subľúča používaný. Vďaka tomu nie je ani vystavený možnému útoku. Každým ďalším šifrovaním sa mení aj použitý kľúč na šifrovanie, čo veľmi sťažuje možnosti ďalšej analýzy.

Použitie za účelom autentizovaného šifrovania s bežným heslom

Protokoly na výmenu kľúčov, ako napríklad Diffie-Hellman, poskytujú vo výsledku bežný tajný kľuč. Pred symetrickým šifrovaním je však potrebná jeho úprava. Za týmto účelom je možné použiť Cyklistu v hašovacom režime. Následne po spracovaní bežného kľúča použijeme odvodený kľuč na spustenie režimu kľúča. Funkcionalita je jednotlivých volaní je znázornená nižšie.

```
CYCLIST(E, E, E)      //hasovaci rezim
ABSORB(ID)            //ID pouziteho protokolu
ABSORB(K_A)           //verejny kluc A
ABSORB(K_B)           //verejny kluc B
ABSORB(K_AB)          //tajny kluc
K_D ← SQUEEZE(ℓ)

CYCLIST(K_D, nonce, E) //rezim kluca
ABSORB(A)
C ← ENCRYPT(P)
T ← SQUEEZE(t)
return (C, T)
```

Ak platí $\ell \leq R_{hash}$, tak implementácia dokáže efektívne zreťaziť tajný kľúč K_D a reinicializovať cyklistu CYCLIST(K_D,E,E). Dôvodom je, že tajný kľúč je už súčasťou stavu permutácie. Je len potrebné nastaviť zvyšné parametre.

2.1.4 Overenie správnosti implementácie algoritmu pomocou testovacích vektorov

Povinnosťou tvorcov kryptografických algoritmov pri štandardizačnom procese NIST je dodať referenčnú implementáciu algoritmu, dostupnú na [82]. Pomocou nej si vieme overiť správnosť iných implementácií. Nás však zaujala pomerne jednoduchá implementácia, ktorá obsahuje aj overenia správnosti algoritmu. Jedná sa o program s názvom Xoocycle [83], ktorý má voľne dostupný kód napísaný v jazyku C. Implementácia obsahuje XOODOO permutáciu spoločne s funkciami z balíka Xoodyak. Používateľ si teda môže vyskladať použitie aj podľa vyššie opísaných možností použitia. Zároveň obsahuje testovací zdrojový kód `xootest.c` na overenie výstupu. Po úprave vstupu a následnej kompilácií je tak možné overiť správnosť výstupu implementácie. Archív s uvedenými zdrojovými kódmi je dostupný v [83]. Uvedený archív prikladáme spoločne s referenčnou implementáciou do Prílohy A.1.

3 Charakteristika zariadenia, nástrojov a konfigurácia prostredí

V praktickej časti tejto práce budeme realizovať naše experimenty s kryptografickou permutáciou XOODOO na jednom fyzickom zariadení. Jedná sa o osobný prenosný počítač značky Asus. V tabuľke 3.1, je uvedená špecifikácia tohto zariadenia. Nad týmto zariadením budeme následne spúšťať virtuálne obrazy OS pomocou virtualizačných nástrojov. Týmto spôsobom izolujeme činnosť programov od nášho natívneho OS. Počas celej doby experimentovania bude zariadenie pripojené k elektrickej sieti s cieľom dosiahnuť čo najvyšší výkon.

Komponenty	**Zariadenie** **Asus TUF A15**
Model	F506IU-AL006T
Verzia OS	Win 11 Home; 64-bit.; v.22H2
Zostava OS	22621.1555
CPU	AMD Ryzen 7 Mobile 4800H
RAM	16 GB DDR4 2x1600 MHz
Úložisko	SSD OM8PCP3512F-AB

Tabuľka 3.1: Technická špecifikácia použitého fyzického zariadenia

3.1 Použité vývojové nástroje

Pri práci vo virtuálnych obrazoch bolo potrebné pracovať s viacerými programami. V tejto podkapitole si ich stručne predstavíme.

Visual Studio Code [84]

Visual Studio Code, taktiež známe ako VSCode, je odľahčená verzia textového editora. Program je dostupný pre Windows, macOS a Linux. Obsahuje zabudovanú podporu pre JavaScript, TypeScript, Node.js a má bohatý ekosystém rozšírení pre ďalšie jazyky ako napríklad C++, C#, C, Java, Python, PHP, Go, .NET a ďalšie. Jedná sa o bezplatný program, dostupný na webe[1]. VSCode v práci používame ako primárny editor na úpravu, ladenie a preklad kódu.

GCC prekladač a balík Make [85]

Programy, ktoré v práci používané sú napísané v jazyku C. Kvôli potrebe prekladu kódu sme do virtuálnych OS nainštalovali aj prekladače a balík Make na jednoduchý bezstarostný preklad. Na OS Linux je inštalácia pomerne jednoduchá. Stačí zadať do terminálu tieto príkazy.

```
sudo apt install gcc
sudo apt install make
```

V prípade OS Windows používame balíček Winlibs.

Winlibs balík [86]

Ako naznačuje názov jedná sa o balík s knižnicami jazyka C a C++ určený pre OS Windows. Jedná sa o voľne dostupný balík[2]. V prípade použitia je postup inštalácie zložitejší ako na Linuxe. Používateľ musí manuálne balíček stiahnuť. Po stiahnutí musí importovať uvedený balíček, resp. cestu k nemu, do premenných prostredia OS Windows. Jeden zo spôsobov je uvedený aj na Winlibs stránke.

Počas práce sme používali GCC s verziou 12.2.0, MinGW-w64 10.0.0 (UCRT) - release 2. Uvedený balík obsahuje aj program make.

Tunelovacie rozhranie Wintun [87]

Wintun je veľmi jednoduchý a minimalistický ovládač pre vytvorenie tunelovacieho rozhrania v systéme Windows. Wintun komunikuje s jadrom OS a poskytuje používateľovi prístup k sieťovému rozhraniu na zapisovanie a čítanie paketov. Rozhranie sa správa rovnako ako v prípade natívneho Linuxového a BSD ovládača. Wintun bol pôvodné navrhnutý pre implementáciu VPN protokolu WireGuard. Autori sa však rozhodli zverejniť túto časť samostatne čím otvorili cestu

[1] `https://code.visualstudio.com/download`

[2] dostupne na https://winlibs.com/

experimentovaniu v sieťovej vrstve L3 na OS Windows. Jediné obmedzenie vzniká na strane OS Windowsu. Aby sme dokázali spustiť vo Windowse ľubovoľný ovládač, tak musí byť digitálne podpísaný. Kvôli tomu autori poskytujú na svojej stránke[3] už podpísaný ovládač. Používateľ potrebuje stiahnuť dynamickú knižnicu `wintun.dll` a hlavičkový súbor `wintun.h` . Pribaliť ju do projektu a následne použiť. Obdobne je na stránke vytvorené demo ako príklad použitia.

V rámci tejto práce sme sa rozhodli vyskladať ovládač aj vlastnými silami. Používateľ na to potrebuje vykonať 3 kroky:

- **inštalácia Windows Driver Kit** – konkrétne v našom prípade verziu pre Windows 10, version 2004, pretože sme inštaláciu skúšali na OS Windows 10 s verziou 21H2. Okrem toho táto verzia je posledná kompatibilná možnosť pre Visual Studio 2019. Dostupné na Microsoft webe[4],
- **inštalácia Visual Studio IDE 2019** – popri inštalácii by sa mal automatický nainštalovať aj Windows Software Development Kit. Ak by tak nenastalo odporúčame doinštalovať. Visual Studio postačuje vo verzii Community.
- **bcdedit /set testsigning on** – zadať tento príkaz do príkazového riadka spusteného ako administrátor a následne reštartovať.

Po uvedených krokoch sa nám OS spustí do testovacieho režimu. V ňom dokážeme následne modifikovať pôvodné riešenie a vyskladať si vlastný ovládač. Ako uviedli autori, pre jeho použitie bez spusteného testovacieho režimu OS je nutné ovládač podpísať.

Pre čitateľa sme pripravili aj vlastnú demo ukážku použitia ovládača v jazyku C. Zdrojový kód je obsahom príloh. Konkrétne v priečinku Prílohe A.2. Priečinok obsahuje zdrojový kód programu, podpísaný `wintun.dll`, balíček make a jednoduché `readme.txt` s pokynmi. Viac informácií nájde používateľ v dokumentácií Wintun, dostupnej na webe[5].

Zdrojový kód na meranie počtu cyklov

Pri experimentálnych meraniach kryptografickej permutácie XOODOO sme sa rozhodli použiť funkcie na meranie počtu vykonaných inštrukcií. Ukážku zdrojového kódu je možné si pozrieť v 3.1.

[3] `https://www.wintun.net/`

[4] `https://learn.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/other-wdk-downloads`

[5] `https://git.zx2c4.com/wintun/about/`

Zdrojový kód 3.1: Zdrojový kód funkcií na zmeranie počtu vykonaných cyklov

```
1  //start of measurement
2  static __inline__ uint64_t cpucyclesS(){
3    unsigned cycles_low, cycles_high;
4    __asm__ volatile ("CPUID\n\t"
5    "RDTSC\n\t"
6    "mov␣%%edx,␣%0\n\t"
7    "mov␣%%eax,␣%1\n\t": "=r" (cycles_high), "=r" (cycles_low)::
8    "%rax", "%rbx", "%rcx", "%rdx");
9    return  (((uint64_t)cycles_high << 32) | cycles_low );
10 }
11 // end of measurement
12 static __inline__ uint64_t  cpucyclesE(){
13   unsigned cycles_low, cycles_high;
14   __asm__ volatile ("RDTSCP\n\t"
15   "mov␣%%edx,␣%0\n\t"
16   "mov␣%%eax,␣%1\n\t"
17   "CPUID\n\t": "=r" (cycles_high), "=r" (cycles_low)::
18   "%rax", "%rbx", "%rcx", "%rdx");
19   return (((uint64_t)cycles_high << 32) | cycles_low );
20 }
```

Uvedený kód bol prevzatý z [88]. Viac informácií o funkcionalite nájde čitateľ v uvedenom diele.

Umelá inteligencia založená na OpenAI [89]

V čase vytvárania práce sa pre širokú verejnosť vypustila umelá inteligencia ChatGPT založená na OpenAI. Jedná sa o pomerne dobrý nástroj pri vyhľadávaní čiastkových riešení. V našom prípade nám bola nápomocná najviac pri problémoch súvisiacich s riešením kompatibility v kóde. Odpoveď na otázku sme týmto spôsobom dokázali nájsť podstatne skôr, než tradičným prehľadávaním internetu. Rád by som však upozornil čitateľa, že nástroj nie je vhodné používať za účelom vytvorenia komplexného riešenia. Nakoľko tento nástroj ešte nie je dostatočne vyspelý.

Aktuálne dostupná verzia pre verejnosť má isté limitácie. Konkrétne sa jedná o jej dátový model na základe, ktorého bola učená. Informácie obsiahnuté v modeli su z roku 2021. V niektorých momentoch to preto poskytovalo pre používateľa neaktuálne alebo neplatné informácie.

Čitateľ si môže ChatGPT vyskúšať na stránke[6]. Odhadujeme že, vývoj tohto nástroja bude v blízkej dobe veľmi napredovať vzhľadom k získanej popularite.

Program Wireshark na analýzu sieťovej premávky [90]

Wireshark je veľmi populárny a známy program s otvoreným zdrojovým kódom. Je vhodný na použitie za účelom analýzy sieťových protokolov, vyhľadávaní chýb pre smerovaní a vytváraní nových protokolov. Poskytuje používateľovi možnosti zachytávať sieťovú premávku a následne na základe analýzy týchto dát dokážeme vyhodnotiť správanie, výkon alebo prípadné bezpečnostné problémy riešenia.

Práca s programom je relatívne jednoduchá a intuitívna. Používateľ si dokáže zvoliť ľubovoľné sieťové rozhranie a následne monitorovať čo sa deje. Zo získaných dát je možne určiť všetky podstatné sieťové informácie o prenášaných dátach.

Viac o programe je možné nájsť na stránke[7] programu, odkiaľ boli aj informácie z tejto podkapitoly čerpané.

3.2 Prostredie virtuálnych strojov vo virtualizačnom nástroji VirtualBox

Pri testovaní funkcionality VPN sme použili virtualizačný nástroj (ďalej VM) VirtualBox (ďalej VB), spoločnosti Oracle, vo verzii 6.1.38. VB je voľne dostupný. Inštalácia je jednoduchá a rýchla. Viac informácii o nástroji je možné dohľadať v [91].

Pre použitie je potrebné aby mal používateľ k dispozícií obraz operačného systému (ďalej OS). Tie nie je problém získať ani pre OS Windows a podobne, avšak pri našej práci sme zvolili využitie voľno dostupného OS – **Linux Ubuntu** vo verziách 22.04.3(LTS (z ang. Long Term Support) – OSS. Následne sme vykonali inštaláciu spomenutých nástrojov a vytvorili klon – OSC. Pri opise práce použijeme označenia OSS pre VPN server a OSC pre klienta.

Pri jednoduchej inštalácií VM sme použili konfiguráciu s 2048 MB RAM a 2 jadrami. (Minimálna inštalácia). V prípade potreby dávame je k dispozícií návod na prípravu OS Windows v VM – [92]. Po inštalácii sme OS aktualizovali pomocou príkazov:

[6] `https://chat.openai.com/`
[7] `https://www.wireshark.org/`

```
sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
```

Následne sme doinštalovali potrebné súčasti k VM OS vo verzii ako je VB, teda 6.1.30. Dôvodom bolo zväčšenie rozlíšenia a využívanie možnosti zdieľaného priečinka s OS, na ktorom daný VB beží. Za účelom správneho fungovania priečinka bolo nutné v termináli použiť príkaz:

```
sudo usermod -aG vboxsf $(whoami)
```

a následne reštartovať OS.

Pri príprave prostredia S OS Windows sme postupovali obdobne. Zo stránok Microsoftu sme stiahli obraz s OS Windows 10 vo verzii 22H2. Následne sme konfigurovali obraz podľa prednastavených nastavení. Vo virtuálnom stroji sme priradili obrazu po 4 gigabajty pamäte RAM a 4 procesory. Po spustení sa systém začne automaticky aktualizovať. Nechali sme mu preto priestor 10 minút. Následne sme OS reštartovali a po štarte sme inštalovali potrebné nástroje. V prípade potreby ďalšieho zariadenia s OS Windows sme si len vytvárali klon tohto už predinštalovaného systému.

3.2.1 Zmena sieťových adaptérov

VB ponúka rôzne možnosti nastavenia sieťových adaptérov. Aktuálne su dostupné tieto:

- **Not attached** – zariadenie nemá žiaden sieťový adaptér a teda ani prístup do žiadnej siete,
- **Network Address Translation** (**ďalej NAT**) – VM host používa lokálnu adresu a s vonkajším svetom komunikuje vďaka číslam portov a prekladu adries na adresu natívneho zariadenia,
- **NAT Network** – typ internej NAT siete, vďaka ktorej je možná taktiež komunikácia smerom von
- **Bridge adapter** – vytvorenie virtuálneho rozhrania s vlastnou IP adresou,
- **Internal** – interná sieť medzi VM bez prístupu do natívneho zariadenia,
- **Host-Only** – slúži na vytvorenie podsiete medz natívnym zariadením a skupinou priradených VM bez prístupu na internet,
- **Generic driver** – všeobecné rozhranie s možnosťou výberu iného ovládača na vytvorenie sieťového rozhrania,

- **Cloud-Based** – používa sa na pripojenie lokálneho VM do vzdialenéj cloud služby.

Konektivita jednotlivých možností je znázornená pomocou tabuľky 3.2. Host reprezentuje natívne zariadenie. NET prístup na internet. Viac informácií o režimoch je dostupných na [93].

Režim	Konektivita				
	VM –> Host	**VM <– Host**	**VM1 <–> VM2**	**VM –> NET**	**VM <– NET**
Host-only	+	+	+	-	-
Internal	-	-	+	-	-
Bridged	+	+	+	+	+
NAT	+	konfigurácia portov	-	+	konfigurácia portov
NAT network	+	konfigurácia portov	+	+	konfigurácia portov

Tabuľka 3.2: Konektivita jednotlivých sieťových adaptérov

Vzhľadom k našim potrebám, teda obojsmerná komunikácia medzi 2 VM, sú pre nás relevantné režimy bridge a NAT network. Ako si môžeme všimnúť, NAT vyžaduje dodatočnú konfiguráciu portov v prípadoch kedy chceme aby nastala komunikácia medzi dvoma VM. Z tohto dôvodu je pre čo najjednoduchší prístup zvoliť práve režim bridge. Ten priradí VM vlastnú IP adresu, pomocou, ktorej stroj komunikuje.

Viac o jednotlivých režimov je taktiež možné nájsť v [94]. Publikácia obsahuje postup konfigurácie jednotlivých režimov spoločne s ich opisom.

4 Implementácia jednoduchej VPN siete s využitím XOODOO permutácie

Za účelom demonštrácie jednoduchej VPN siete sme zvolili voľne dostupnú implementáciu v jazyku C. V tejto kapitole postupne rozoberieme funkcionalitu a správanie vzniknutej VPN siete.

4.1 Dead Simple VPN

Dead Simple VPN je voľne dostupný[1] program, napísaný v jazyku C. Určený je pre operačný systém Linux. Autorom je Frank Denis. DSVPN rieši najbežnejší prípad použitia VPN, teda pripojenie klienta k VPN serveru cez nezabezpečenú sieť. Následne sa klient dostane na internet prostredníctvom servera. Tak ako bolo uvedené napríklad v obrázku 1.1.

DSVPN používa protokol riadenia prenosu – TCP [10]. Medzi ďalšie pozitíva patrí:

- Používa iba modernú kryptografiu s formálne overenými implementáciami.
- Malé a konštantné pamäťové nároky. Nevykonáva žiadne dynamické alokovanie pamäte (z ang. *heap memory*).
- Malý (25 KB) a čitateľný kód. Žiadne vonkajšie závislosti (z ang. *Dependencies*).
- Funguje po preklade GCC prekladačom. Bez dlhej dokumentácia, žiaden konfiguračný súbor, dodatočná konfigurácia. DSVPN je spustiteľná jednoriadkovým príkazom na serveri, obdobne na klientovi. Bez potreby konfigurácie brány firewall a pravidiel smerovania.

[1] https://github.com/jedisct1/dsvpn

- Funguje na Linuxe (kernel $\geq$ 3.17), macOS [43] a OpenBSD [95], DragonFly BSD [96], FreeBSD [97] a NetBSD [98] v klientskych a point-to-point režimoch.
- Nedochádza k úniku IP medzi pripojeniami, ak sa sieť nezmení. Blokuje IPv6 na klientovi, aby sa zabránilo úniku IPv6 adries.

V uvedenej VPN autor zakomponoval aj možnosť pokročilejších nastavení. Celkový súhrn vstupných parametrov pri štarte programu je takýto:

```
./dsvpn   server
<key file>
<vpn server ip or name>|"auto"
<vpn server port>|"auto"
<tun interface>|"auto"
<local tunnel ip>|"auto"
<remote tunnel ip>"auto"
<external ip>|"auto"

./dsvpn   client
<key file>
<vpn server ip or name>
<vpn server port>|"auto"
<tun interface>|"auto"
<local tunnel ip>|"auto"
<remote tunnel ip>|"auto"
<gateway ip>|"auto"
```

Väčšina parametrov je v zdrojovom kóde prednastavených na automatické hodnoty. Príkladom je číslo portu 443, vytvorenie rozhrania tun0, prevzatie externej IP adresy zo siete a ďalšie. Používateľ teda môže spúšťať DSVPN pomocou príkazu s najmenej 2 parametrami v prípade servera a tromi pre prípad klienta. Dôvodom je, že klient potrebuje mať určenú IP adresu servera, na ktorý sa má pripojiť (3.parameter). Druhý parameter v poradí je už spomenutá cesta k zdieľanému 256-bitovému kľúču.

4.2 Kryptografia použitá v DSVPN

DSVPN používa v svojej implementácií malú sebestačnú kryptografickú knižnicu – *Charm*[2]. Jej autorom je tvorca DSVPN. Implementácia umožňuje autentizované šifrovanie (z ang. *authenticated encryption*) a hašovanie kľúčov (z ang. *keyed hashing*). Správnosť implementácie algoritmu v knižnici programátor overil pomocou nástroja **Cryptol**[3]. Uvedený nástroj slúži na zápis algoritmu do matematickej špecifikácií. Tým poskytne možnosť jednoduchšej a hlavne korektnej implementácie zvoleného kryptografického algoritmu. Zároveň je možné program využiť aj na verifikáciu vytvoreného riešenia. Obdobne sú v repozitári knižnice ponechané overovacie skripty pre jednoduché spustenie.

Kryptografický algoritmus použitý v DSVPN je Xoodoo permutácia v duplex móde, pričom môže byť jednoducho nahradená napríklad permutáciou Gimli[4] [99] alebo Simpira384[5] [100]. Pri zmene musí používateľ zasiahnuť do zdrojového kódu v súbore **charm.c**, ktorého obsahom sú kryptografické primitíva.

4.3 Experimentálne overenie VPN

DSVPN sme prakticky overili pomocou dvojice virtuálnych strojov OSS a OSC, ktorých opis je obsahom 3.2. Na zariadení OSS sme pomocou nastroja make a GCC prekladača vykonali inštaláciu DSVPN. Obdobný postup je aplikovaný aj vo VM OSC. Na OSS spúšťame VPN server, ktorý nám poskytne IP adresu, prostredníctvom ktorej budeme komunikovať s vonkajším svetom. Na obrázku4.1 je znázornená architektúra siete, v ktorej bude vykonaný experiment.

Na spustenie a vytvorenie spojenia vykonáme nasledujúce úkony:

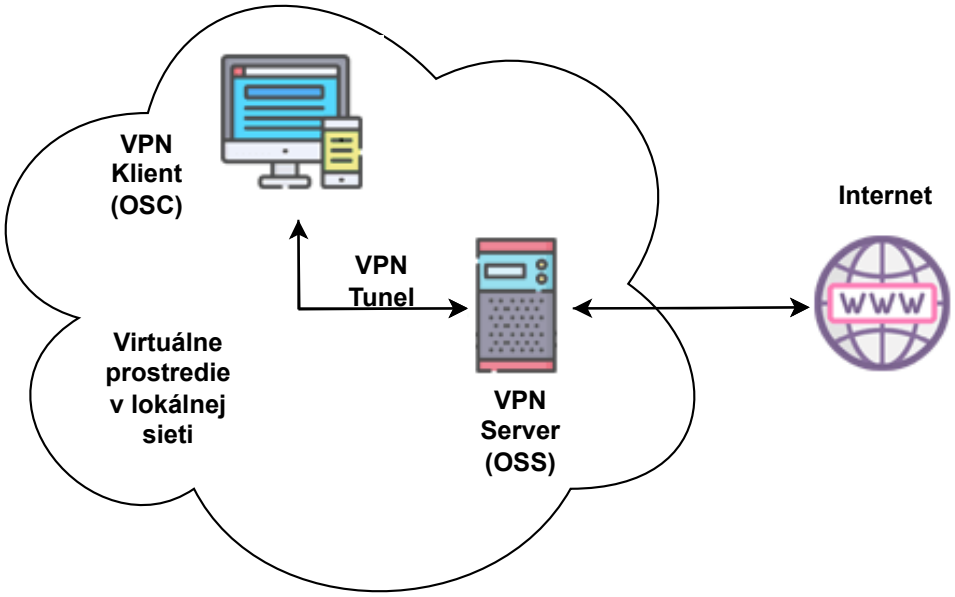
1. Vygenerovanie zdieľaného kľúča:

   ```
   dd if=/dev/urandom of=vpn.key count=1 bs=32
   ```

   – zdieľaný kľúč, ktorý sme vygenerovali, sa nám uložil do súboru *vpn.key*. Jeho veľkosť je 32 bajtov, teda 256 bitov. Kľúč je potrebné vložiť do priečinka s programom *dsvpn* v oboch zariadeniach – OSS aj OSC alebo zadať cestu ako parameter, kde sa kľúč nachádza.

2. OSS zariadenie:

[2] `https://github.com/jedisct1/charm`
[3] `https://cryptol.net/index.html`
[4] `https://github.com/jedisct1/gimli`
[5] `https://github.com/jedisct1/simpira384`



Obr. 4.1: Schéma architektúry jednoduchej VPN siete počas experimentu

```
sudo ./dsvpn server vpn.key auto
2340 auto 10.8.0.254 10.8.0.2
```

– tento príkaz zabezpečí spustenie VPN servera na prostredí OSS s IP adresou. Príkaz `sudo` nám spustí program s administrátorskými právami. Piaty parameter nastavuje IP adresu servera. V našom prípade **`auto`**, použije aktuálne používanú IP na komunikáciu s vonkajším prostredím. Príkazom ďalej definujeme číslo portu 2340, ktoré sa použije pri nadviazaní TCP spojenia medzi klientom a serverom. Poslednou konfiguráciou je priradenie mena a IP adresy tunelov, ktoré bude využívať naše zariadenie – 10.8.0.254 a druhý koniec tunela – 10.8.0.2. Používateľ má ešte možnosť nastaviť tzv. External IP. Tú by sme využili ak by sme spúšťali DSVPN na routri poskytovateľa internetu. Obdobne na klientovi vieme nastaviť gateway IP, ktorá slúži na presmerovanie komunikácie k serveru. Po spustení príkazu si vieme overiť našu konfiguráciu[6].

3. OSC zariadenie:

```
sudo ./dsvpn client vpn.key 192.168.88.62
2340 auto 10.8.0.2 10.8.0.254
```

[6]Pomocou `ip address show tun0` overíme IPv4 adresu VPN tunela.

– uvedený príkaz zabezpečí, že sa pripojíme na VPN server, ktorý ma IP adresu *192.168.88.62* s číslom portu 2340. Následne vzniká TCP spojenie. Dôležité je si všimnúť poradie adries tunelov. Je opačné ako v prípade servera.

4. V prípade úspešnej konektivity sa operácia podarila a pre okolitý svet sme viditelný pomocou IP adresy, ktorú sme zvolili.

Na overenie správnosti funkcionality nám postačí jednoduchý sieťový príkaz `traceroute`. Napríklad `traceroute google.sk`[7]. Prvá z uvedených adries je práve tá, ktorú dané zariadenie používa.

V našom prípade bolo nutné použiť lokálne adresy vzhľadom na to, že oba VM bežia na jednom hosťovskom počítači. Obidve zariadenia sú tým pádom pripojené k jednému internetovému poskytovateľovi, čo má za následok takmer rovnaké smerovanie k vzdialenej doméne.

Proces zistenia IP adresy VPN servera, po spustení, a overenie funkčnosti je následne znázornený pomocou obrázkov 4.2, 4.3, 4.4.

V 4.2 sme žltou farbou znázornili IP adresu, na ktorej je VPN server dostupný. Oranžová farba znázorňuje IP adresy tunelu medzi serverom a klientom v tomto poradí.

Následne v 4.3 môžeme vidieť to isté pre klienta.

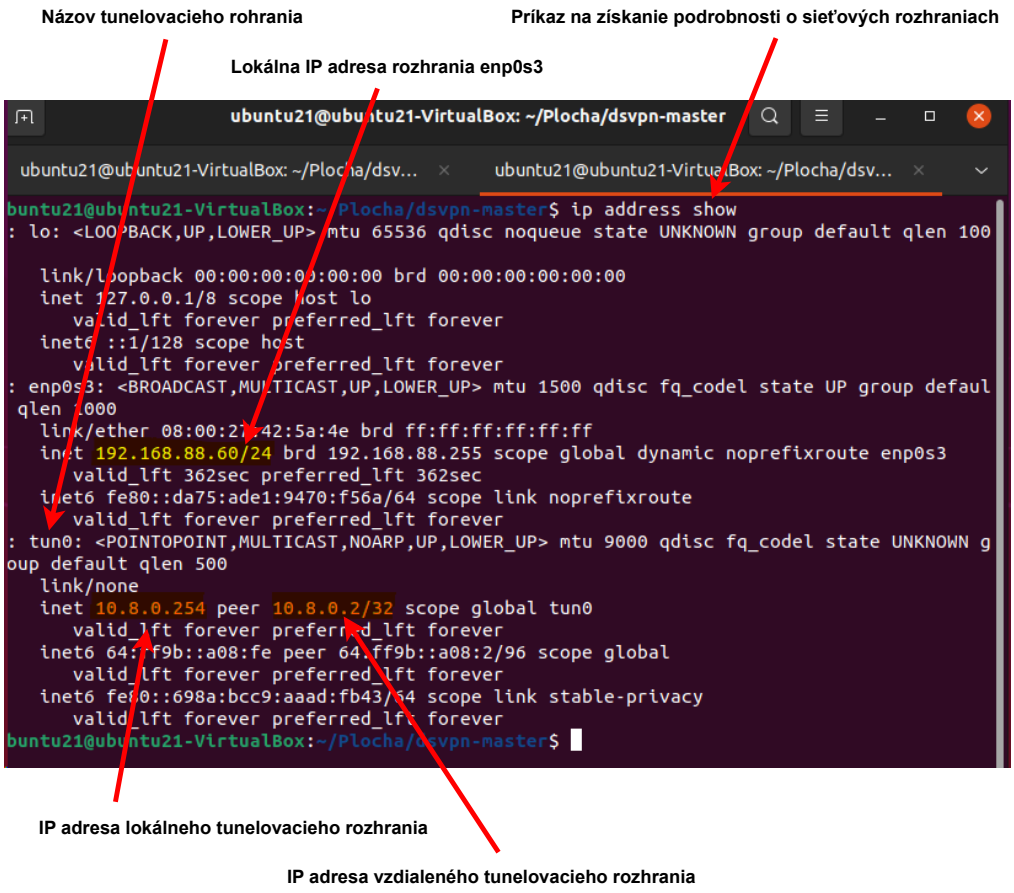
Nakoniec, v 4.4 môžeme vidieť ako klient pri internetovej komunikácií používa namiesto svojej vlastnej, adresu poskytnutú VPN serverom na zariadení OSS – žltou zvýraznená IP. Červenou je zaškrnutá farba poskytovateľa internetu.

4.4 Koncepčný opis a praktické overenie programu DSVPN

DSVPN vytvára VPN sieť medzi VPN klientom a VPN serverom. Na obidvoch zariadeniach je potrebné spustiť program pomocou korešpondujúcich príkazov.

Princíp vysvetlíme na praktickom príklade. Klienta umiestnime na lokálnu sieť bez prístupu na internet. Následne vymažeme všetky smerovacie pravidlá v zariadeni. Klient po tomto kroku nedokáže komunikovať so žiadným zariadením, keďže nemá žiadne prednastavené pravidlá, kam by smeroval internetovú komunikáciu. V uvedenej lokálnej sieti bude prítomný taktiež VPN server, ktorý ako jediný dokáže komunikovať s okolitým svetom. Po spustení DSVPN na obi-

[7] vo Windows CMD prostredí: `tracert google.sk`

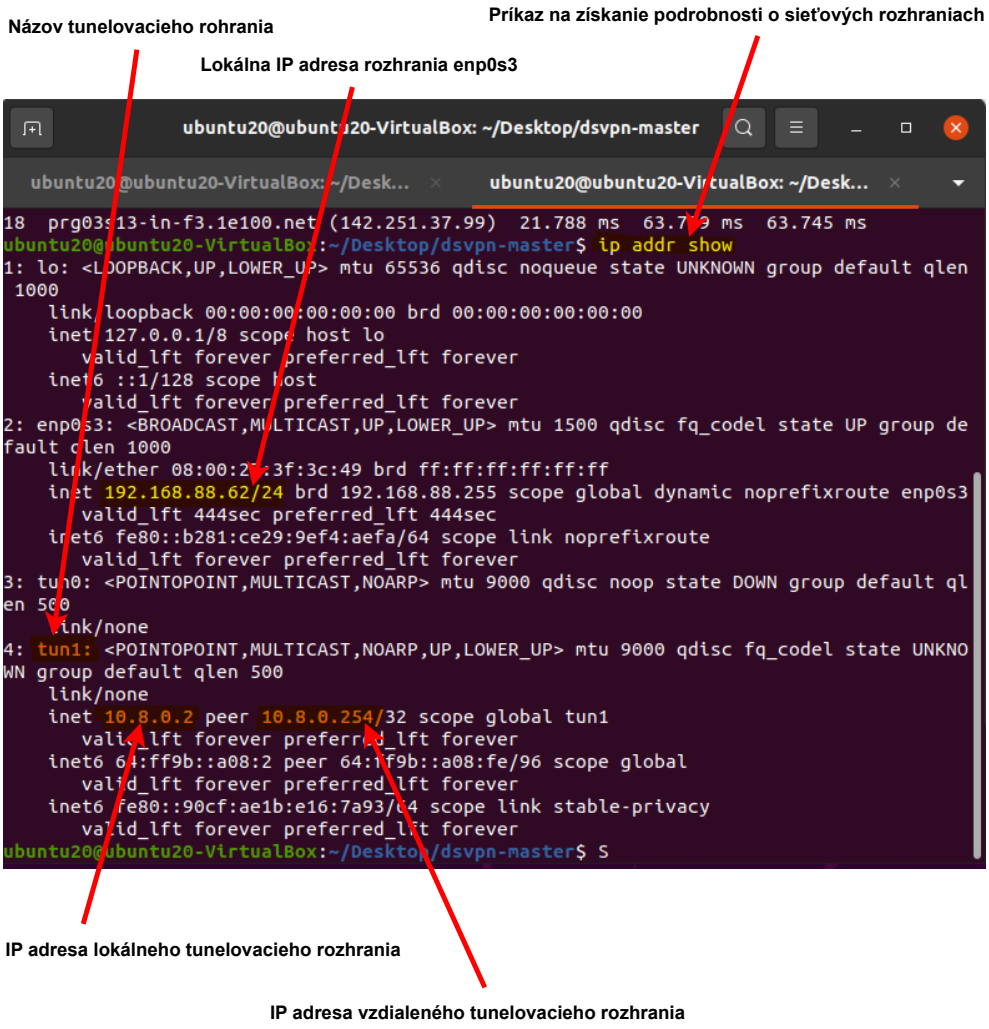


Obr. 4.2: Zistenie IP adries VPN servera na VM OSS

dvoch zariadeniach, dochádza k spojeniu. Jedná sa o TCP spojenie vytvorené soketmi, ktoré je na začiatku nešifrované. Jeho úlohou je až následné preposielanie už zašifrovaných dát v novom L3 pakete. Dáta sú šifrované pomocou kryptografickej permutácie XOODOO, ktorú sme opísali v druhej kapitole tejto práce. Následne DSVPN overuje stav soketov a tunelovacieho rozhrania. Ak je tun rozhranie pripravené na čítanie (obsahuje pakety), tak dochádza k ich spracovaniu (šifrovaniu) a preposlaní cez soket. Po prijatí sa dáta dešifrujú a smerujú na základe dát z L3 IP hlavičky.

Toto je celý princíp zabezpečenej komunikácie medzi klientom a serverom vo VPN sieti na vrstve L3. Aby sme docielili plnohodnotnú funkcionalitu VPN, tak potrebujeme do tohto riešenia zakomponovať smerovanie. Tým, že dáta smerujeme von z tejto siete, tak je ešte potrebné upraviť niektoré systémové smerovacie pravidla.

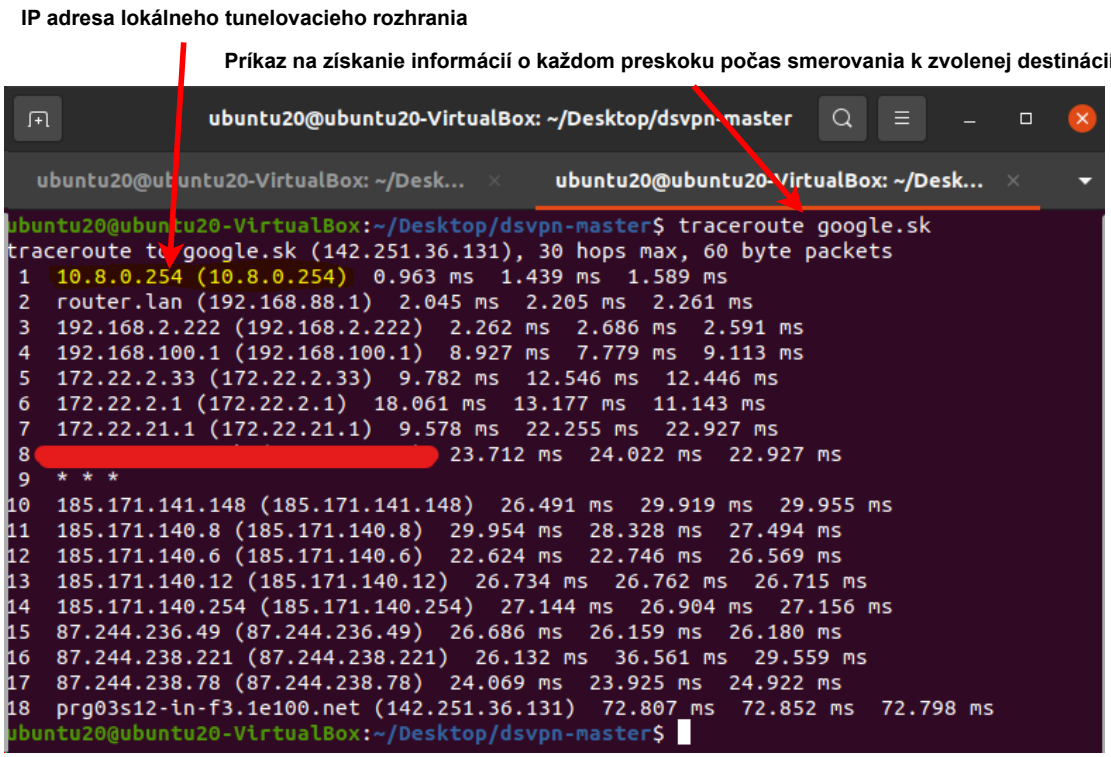
Okrem načrtnutého príkladu s prístupom na internet, dokáže klient takto získať konektivitu k jemu nedostupným segmentom siete. Samozrejme za predpokladu, že sú dostupné pre server. Ako príklad zdroja môže byť diskové úložisko.



Obr. 4.3: Zistenie IP adries VPN Klienta na VM OSC

Prípadne prístup na internetové domény. V angličtine sa takýto termín označuje ako *remote access*, teda vzdialený prístup. Je to tiež veľmi obľúbený a používaný typ VPN siete.

Funkcionalita DSVPN je znázornená pomocou schémy na obrázku 4.5. V nej môžeme na ľavej strane vidieť čo sa deje s paketom pri požiadavke smerom od VPN klienta k VPN serveru. OS na základe požiadavky formuje L3 pakety. Po presmerovaní paketu na tunel DSVPN zašifruje tieto dáta. Následne ich zapíše do soketu, ktorý tvorí so serverom TCP spojenie. Server tieto dáta spracuje a vykoná potrebné náležitosti. Po získaní odpovede zasa server odpovedá klientovi rovnakým mechanizmom. v obrázku sme pre DSVPN vytvorili 2 bloky. **DSVPN IN** a **DSVPN OUT**. Funkcionalita je znázornená iba v spodnej časti schémy. Jedná sa však o identické bloky. V obrázku je možné si ešte všimnúť zaradenie blokov podľa ich činnosti na šifrovaciu a dešifrovaciu časť.



Obr. 4.4: Overenie funkcionality DSVPN pomocou príkazu traceroute

4.5 Analýza zdrojového kódu DSVPN

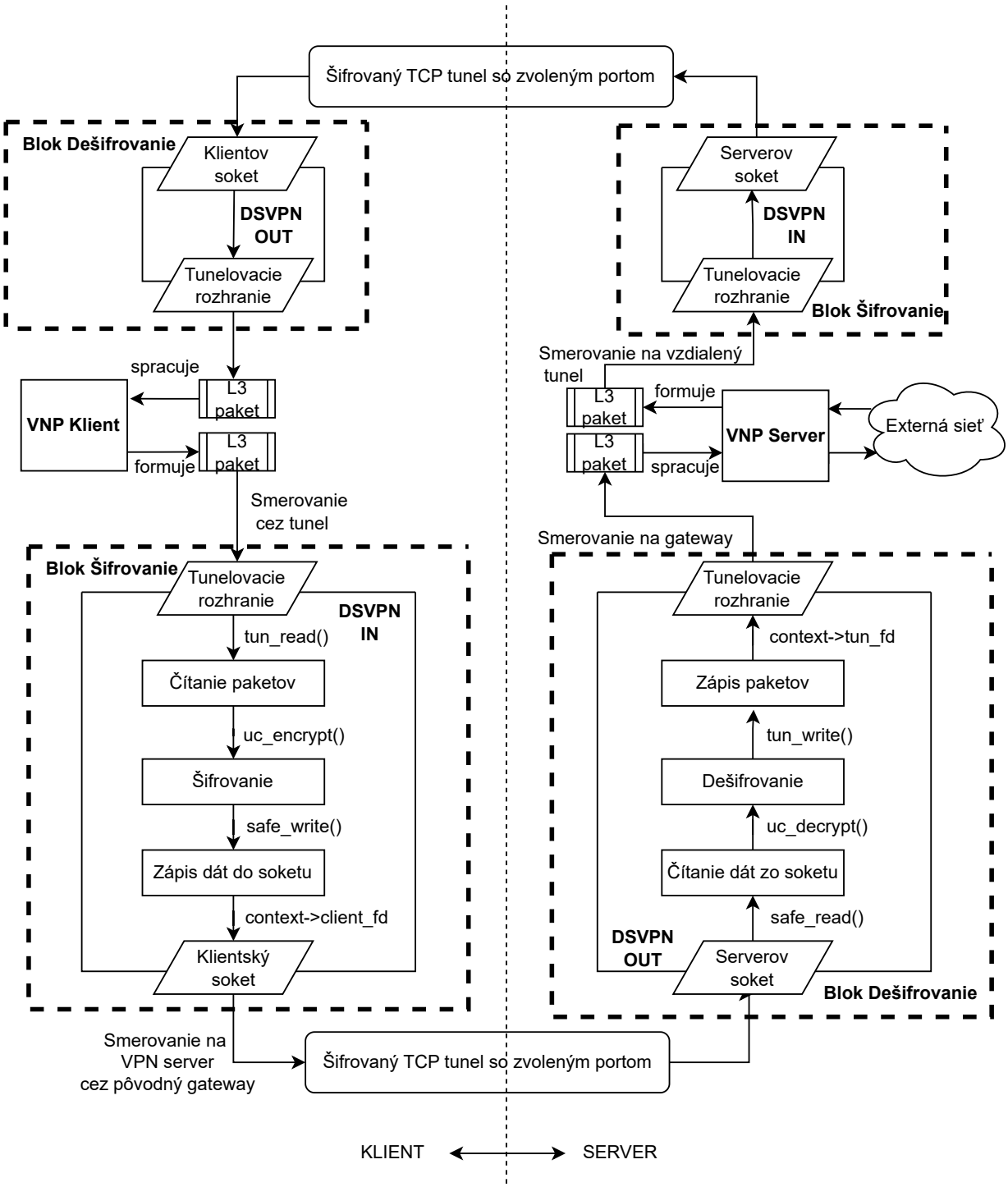
Pri analýze sa zameriame výhradne na dôležité časti kódu DSVPN pre programovací jazyk C. Repozitár pozostáva z jedného make-file súbora [101]. Troch hlavičkových (.h) a k ním korešpondujúcimi zdrojovými kódmi (.c), s pomenovaním:

1. **charm.h** – kryptografická knižnica so 6 funkciami,
2. **os.h** – funkcie čítania a zápisu paketov, vytvorenia, používania a zrušenia tunelovacieho rozhrania,
3. **vpn.h** – deklarácia konštánt, endianity[102] a niektorých závislostí OS.

V spomenutých hlavičkových súboroch sa nachádzajú deklarácie funkcií, ktoré VPN používa. Definície sú obsahom .c súborov, ako je v jazyku C zaužívaným zvykom. Obsahom tejto podkapitoly je analýza týchto kódov.

4.5.1 Súbor charm.h a charm.c

Obsahom sú prevažne funkcie, používané pri vykonávaní kryptografického algoritmu XOODOO. Charm.h pozostáva zo 6 funkcií. Ich implementácia nie je



Obr. 4.5: Ukážka prenosu paketu naprieč DSVPN

až tak rozsiahla. Zaberá celkovo 337 riadkov. Princípy použité v algoritme boli opísané v kapitole 2.

Zdrojový kód 4.1: Obsah hlavičkového súboru charm.h

```
1  void uc_state_init(uint32_t st[12], const unsigned char key[32],
2                     const unsigned char iv[16]);
3  void uc_encrypt(uint32_t st[12], unsigned char *msg,
4                  size_t msg_len, unsigned char tag[16]);
5  int uc_decrypt(uint32_t st[12], unsigned char *msg,
6                  size_t msg_len,
7                  const unsigned char *expected_tag,
8                  size_t expected_tag_len);
9  void uc_hash(uint32_t st[12], unsigned char h[32],
10              const unsigned char *msg, size_t len);
11 void uc_memzero(void *buf, size_t len);
12 void uc_randombytes_buf(void *buf, size_t len);
```

4.5.2 Súbor os.h a os.c

Obsahom su funkcie, ktorých úlohami sú čítanie alebo pridanie GW, vytvorenie a nastavenie tunelu v danom OS. Následne je aplikovaná úprava firewall pravidiel, tak aby všetka komunikácia bola presmerovaná na VPN server. Úprava firewall pravidiel je závislá od úlohy programu, pod ktorou je DSVPN spustená, teda či sa jedná o server alebo klienta. Celkovo je obsahom 12 funkcií, ktoré riešia uvedené úlohy. Detaily je možné vidiet v 4.2.

Zdrojový kód 4.2: Obsah hlavičkového súboru os.h

```
1  ssize_t safe_read(const int fd, void *const buf_, size_t count,
2                    const int timeout);
3  ssize_t safe_write(const int fd, const void *const buf_,
4                     size_t count,
5                     const int timeout);
6  ssize_t safe_read_partial(const int fd, void *const buf_,
7                            const size_t max_count);
8  ssize_t safe_write_partial(const int fd, void *const buf_,
9                             const size_t max_count);
10
11 typedef struct Cmds {
12  const char *const *set;
13  const char *const *unset;
14 } Cmds;
15
16 Cmds firewall_rules_cmds(int is_server);
17 int shell_cmd(const char *substs[][2], const char *args_str,
18               int silent);
19 const char *get_default_gw_ip(void);
20 const char *get_default_ext_if_name(void);
21 int tcp_opts(int fd);
22 int tun_create(char if_name[IFNAMSIZ], const char *wanted_name);
23 int tun_set_mtu(const char *if_name, int mtu);
24 ssize_t tun_read(int fd, void *data, size_t size);
25 ssize_t tun_write(int fd, const void *data, size_t size);
```

Zdrojový kód implementuje čítania a zápisu dát z TUN tunelu, soketu a príkazového riadku.

4.5.3 Súbor vpn.h a vpn.c

Hlavičkový súbor obsahuje prevažne definovanie niektorých parametrov potrebných na správnu funkcionalitu VPN, spoločne s korekciou pre niektoré OS. Viac detailov je možné vidieť v zdrojovom kóde 4.3. Ostatné parametre, ktoré bolí opísané pre spustenie, su definované práve v tomto súbore (porty, IP adresy, MTU (z ang. *Maximum Transmission Unit*) atď.).

Zdrojový kód 4.3: Obsah hlavičkového súboru vpn.h

```
1  /*UNIX-like OS Dependent Libraries*/
2  #include <sys/ioctl.h>
3  #include <sys/socket.h>
4  #include <sys/types.h>
5  #include <sys/uio.h>
6  #include <sys/wait.h>
7  #include <net/if.h>
8  #include <netinet/in.h>
9  #include <netinet/tcp.h>
10 /*End UNIX-like OS Dependent Libraries*/
11 /*OS setup dependencies*/
12 #ifdef __linux__
13 #include <linux/if_tun.h>
14 #endif
15
16 #ifdef __APPLE__
17 #include <net/if_utun.h>
18 #include <sys/kern_control.h>
19 #include <sys/sys_domain.h>
20 #endif
21
22 #ifdef __NetBSD__
23 #define DEFAULT_MTU 1500
24 #else
25 #define DEFAULT_MTU 9000
26 #endif
27 /*End of OS setup dependencies*/
```

Main() – Beh programu

Pred samotným opisom by som rád upozornil na jeden fakt. Autor DSVPN používa vo veľkej miere zápis pomocou tzv. ternárnych operátorov. Viac informácií o tejto problematike je možné nájsť v [103]. V skratke, používa sa podmienený zápis hodnoty do premennej.

Vpn.c je hlavným zdrojovým kódom DSVPN. V jeho vnútri nájdeme hlavnú funkciu `main()`. Zároveň obsahuje hlavičkové súbory uvedených knižníc. Ako prvé dochádza k inicializácií premennej štruktúry `Context` 4.4. Štruktúra v sebe

nesie všetky premenné, potrebné na správne fungovanie programu.

Zdrojový kód 4.4: Štruktúra Context obsahujúca dôležité premenné programu DSVPN

```
typedef struct Context_ {
  const char *  wanted_if_name;
  const char *  local_tun_ip;
  const char *  remote_tun_ip;
  const char *  local_tun_ip6;
  const char *  remote_tun_ip6;
  const char *  server_ip_or_name;
  const char *  server_port;
  const char *  ext_if_name;
  const char *  wanted_ext_gw_ip;
  char          client_ip[NI_MAXHOST];
  char          ext_gw_ip[64];
  char          server_ip[64];
  char          if_name[IFNAMSIZ];
  int           is_server;
  int           tun_fd;
  int           client_fd;
  int           listen_fd;
  int           congestion;
  int           firewall_rules_set;
  Buf           client_buf;
  struct pollfd fds[3];
  uint32_t      uc_kx_st[12];
  uint32_t      uc_st[2][12];
} Context;
```

Následne dochádza k načítaniu vopred zdieľaného kľúča pomocou pomocnej funkcie `load_key_file()` 4.5. Úlohou je prečítanie kľúča, pričom sa používa funkcia z os.c – `safe_read()`. Realizuje sa spočítanie prečítaných znakov. `Safe_read()` má v sebe zakomponovanú aj funkciu `poll()` [104]. Dôvodom je, že `safe_read()` sa používa aj pri čítaní zo soketu a tunelu. V linuxe je čítanie z týchto typov rovnaké. Tato časť kódu je však podmienená. Vyhodnocuje sa špecifická chyba, ktorú je možné dostať len pri čítaní soketu, respektíve tunelu.

V prípade, ak sa prečítalo 32 bajtov, `safe_read()` vracia 0. Následne sa inicializuje stav v XOODOO permutácií.

Zdrojový kód 4.5: Načítanie zdieľaného kľúča

```
1  static int load_key_file(Context *context, const char *file)
2  {
3   unsigned char key[32];
4   int           fd;
5
6   if ((fd = open(file, O_RDONLY)) == -1) {
7     return -1;
8   }
9   if (safe_read(fd, key, sizeof key, -1) != sizeof key) {
10    (void) close(fd);
11    return -1;
12  }
13  uc_state_init(context->uc_kx_st, key,
14                (const unsigned char *) "VPN Key Exchange");
15  uc_memzero(key, sizeof key);
16
17  return close(fd);
18 }
```

Ako môžeme vidieť v implementácii sú bežne použité smerníky. Vo výsledku, tak dokážeme preniesť zmenu hodnôt na viaceré premenné.

V prípade, ak používateľ pri štarte nezmenil parameter pre IP adresu sieťovej brány (z ang. *GateWay*) (ďalej GW), tak sa používa preddefinovaná. Tá sa získa pomocou funkcie
`get_default_gw_ip()`, ktorá je deklarovaná v 4.2. Prostredníctvom shell príkazu `ip route` a funkcie `read_from_shell_command()`, dochádza k extrakcii informácií priamo z príkazového riadka. Tento krok je teda závislý od OS, v ktorom používateľ pracuje. Nasleduje overenie návratových hodnôt z funkcií iba v prípade ak je DSVPN spustené ako klient.

Program v prípade servera pokračuje s `get_default_ext_if_name()`.
Obdobne ako v predchádzajúcom odstavci je realizácia funkcionality vykonaná pomocou terminálu. Podstata spočíva v zistení mena tunelovacieho rozhrania.

Po nastavení parametrov sa dostávame k vytvoreniu tunelovacieho rozhrania. V tomto kroku autor používa funckiu `tun_create`. Úloha je vysoko závislá od OS. Dôsledkom toho je možné vidieť vetvenie funkcionality vzhľadom k bežiacemu OS. DSVPN poskytuje kompatibilitu pre 6 OS, medzi, ktoré patrí Linux, FreeBSD [97], NetBSD [98], OpenBSD [95], MacOS [43], Dragon Fly BSD [96]. Následne

na základe systému dochádza k vytváraniu tunelu s prednastaveným, resp. zvoleným menom. Program ďalej nastaví maximálnu veľkosť preneseného paketu (z ang. *Maximum Transmission Unit*, (ďalej MTU) na 1500 alebo 9000 bajtov. Tento parameter závisí od používaného OS.

Po príprave tunelu dochádza k overeniu dostupnosti VPN servera. Tento krok vykonáva funkcia `resolve_ip`. Tá ma v sebe vnorené 2 funkcie, ktoré su menným ekvivalentom aj vo Windows knižniciach. Jedná sa o funkcie `getaddrinfo` a `getnameinfo`. Funkcie sa používajú na overenie dostupnosti služby, na ktorú sa soket má napojiť.

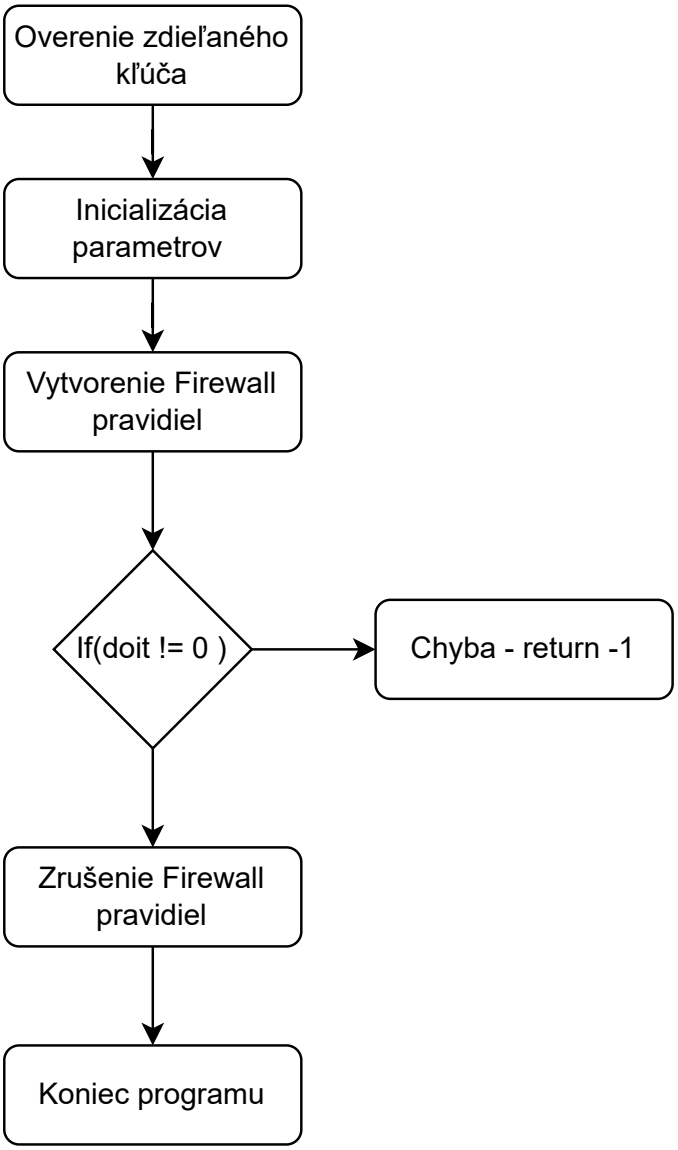
Posledným krokom súvisiacim s konfiguráciou prostredia je vytvorenie pravidla pre branu FireWall (ďalej FW). Tento úkon realizuje `firewall_rules()`. Tento proces je opäť systémovo závislý. Jeho realizácia je vykonaná pomocou funkcie `Cmds`, ktorá je globálne definovaná štruktúra. `Cmds firewall_rules_cmds()` obsahuje súbor prednastavených shell príkazov, ktoré sú postupne vkladané do príkazového riadka. Ich úlohou je presmerovanie prenosu cez vzniknutý tunel. Ukážka príkazov je znázornená v zdrojovom kóde 4.6.

Zdrojový kód 4.6: Ukážka zdrojového kódu funkcie `Cmds firewall_rules_cmds()`

```
1  Cmds firewall_rules_cmds(int is_server)
2  {
3    if (is_server) {
4      #ifdef __linux__
5      static const char
6      *set_cmds[] =
7      { "sysctl net.ipv4.ip_forward=1", //ipv4 forwarding zapina
8          "ip addr add $LOCAL_TUN_IP peer
9  $REMOTE_TUN_IP dev $IF_NAME",
10         //priradenie ip tunelovaciemu rozhraniu
11       "ip -6 addr add $LOCAL_TUN_IP6 peer
12 $REMOTE_TUN_IP6/96 dev $IF_NAME",
13       "ip link set dev $IF_NAME up",
14       //zapnutie tunelovacieho rozhrania
15       "iptables -t raw -I PREROUTING ! -i
16 $IF_NAME -d $LOCAL_TUN_IP -m addrtype !
17 --src-type LOCAL -j DROP", //priklad smerovacieho pravidla
18       NULL
19       },
20     *unset_cmds[] = { //priklad odnastavenia pravidla vyssie
21       "iptables -t raw -D PREROUTING ! -i
22 $IF_NAME -d $LOCAL_TUN_IP -m addrtype !
23 --src-type LOCAL -j DROP",
24        NULL
25     };
26     #endif
27   }
28 }
```

Posledným úkonom je samotný beh VPN. Ten spúšťa funkcia `doit()`. Doterajší beh programu je jednoducho znázornený pomocou flow diagramu 4.6.

Od tohto momentu sa presúvame do procesu spojenia a spracovania dát. Hlavnou úlohou funkcie `doit()` je nadviazanie soketového TCP spojenia medzi klientom a serverom. Vo vnútri `doit()` preto dochádza k vetveniu programu. V prípade, že je DSVPN spustená ako server spustí sa funkcia `tcp_listener()`. V opačnom prípade `client_reconnect()`. Listener vytvára socket a následne pomocou systemovej funkcie `bind()` sa napojí na zvolené číslo portu. Potom čaká na spoje-



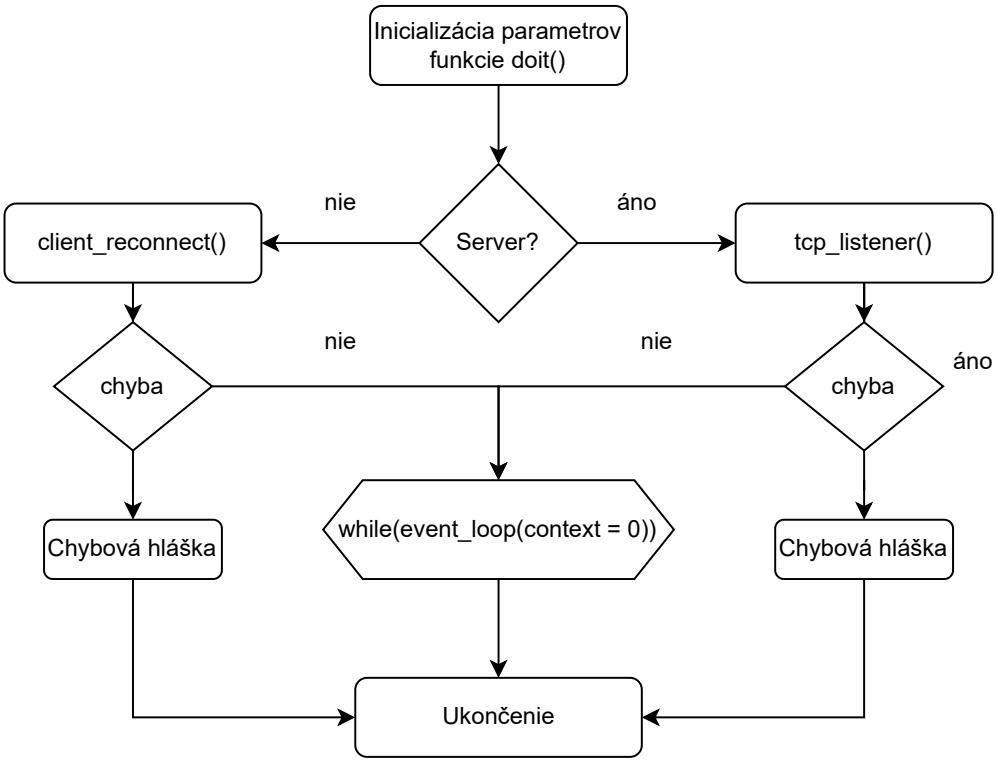
Obr. 4.6: Štruktúra funkcie`main()` v programe DSVPN

nie od klienta pomocou funkcie `listen()`. Smerník na socket je uložený do smerníka na štruktúru Context. Klient používa vetvu s `Client_reconnect()`. V nej sa snaží opakovane nadviazať spojenie so serverom. Za týmto účelom `client_connect()`. Pred týmto úkonom, samozrejme, dochádza k overeniu či už nedošlo k nadviazaniu spojenia. O to sa stará `client_disconnect()`, ktorý ruší aktívne spojenie.

`Client_connect()` slúži na pripojenie klienta k serveru. Vykonáva aj úpravu pravidiel v FW. Následne sa pokúša o nadviazania spojenia pomocou funkcie `tcp_client()`. Po tejto sérií činností sa program vracia do `doit()`. V cykle **`while`** sa vykonávaná funkcia `event_loop()`, v ktorej dochádza k použitiu kryptografickej knižnice charm. Jej obsahom je inicializácia pomocných premenných. viď. zdrojový kód 4.7. Obrázok 4.7 znázorňuje doteraz opísanú činnosť funkcie `doit()`.

Zdrojový kód 4.7: Premenné funkcie event loop

```
1  struct pollfd *const fds = context->fds;
2  Buf                  tun_buf;
3  Buf *                client_buf = &context->client_buf;
4  ssize_t              len;
5  int                  found_fds;
6  int                  new_client_fd;
```



Obr. 4.7: Princíp fungovania funkcie doit()

Funckia `event_loop()`

`Event_loop()` je 111 riadkov dlhá funkcia. Jej obsah môžeme rozdeliť na overovací a vykonávací. Úlohou niekoľkých **`if`**-ov vo funkcii je preverovanie signálov, spätných hodnôt a premenných, ktoré by signalizovali chybu, používateľov záujem o ukončenie programu alebo signál pre čítanie dát zo soketov, respektíve tunelov.

Zaujímavé je taktiež definované makro `BUFFERBLOAT_CONTROL`. Jeho úlohou je zamedzenie problému zvaného **Bufferbloat**. V skratke, je to nechcený jav, ktorý je zapríčinený nadmerným ukladaním paketov do vyrovnávacej pamäte, tzv. zahltenie. To ma za následok vysokú latenciu a tzv. z ang. *Packet Delay Variation*

(ďalej PDV/Jitter), v paketovo-orientovaných sieťach. Viac o tejto problematike je možne si prečítať v [105].

Na druhej strane vykonávacie funkcie niečo vykonávajú. Do tejto kategórie zaraďujeme funkcie:

- `tcp_accept()` – slúži na vytvorenie nového soketového TCP spojenia s klientom,
- `tun_read()` – v prípade linuxového OS, volá `safe_read_partial()` na zapísanie dát do nami vytvoreného tunelovacieho rozhrania,
- `uc_encrypt()` – kryptografické šifrovanie paketov z tunelovacieho rozhrania,
- `safe_write_partial()` – používa štandardizovanú funkciu `write()` vo while cykle, zapíše zašifrované dáta do vyrovnávacej pamäte, určenej pre odoslanie klientovi, vracia počet zapísaných dát,
- `safe_write()` – používa sa v prípade ak došlo k zahlteniu paketmi,
- `client_reconnect()` – slúži na obnovu spojenia v prípade chyby,
- `safe_read_partial()` – obdobne ako pri `write()`, používa `read()` funkciu,
- `uc_decrypt()` – kryptografické dešifrovanie správy a následne odoslanie na tunelovacie rozhranie,
- `tun_write()` – volá `safe_write` pri OS Linux, teda klasický zápis dešifrovaných dát.

Metóda použitá pri zápise zašifrovaných dát vo funkcii `event_loop()` je znázornená v 4.8.

Zdrojový kód 4.8: Spôsob zápisu šifrovaných dát

```
1
2  writenb = safe_write_partial(context->client_fd, tun_buf.len,
3                               2U + TAG_LEN + len);
4  if (writenb < (ssize_t) 0) {// kontrola zahltenia -- bufferbloat
5   context->congestion = 1;
6   writenb             = (ssize_t) 0;
7  }
8 // ak doslo k zahlteniu
9  if (writenb != (ssize_t)(2U + TAG_LEN + len)) {
10  writenb = safe_write(context->client_fd, tun_buf.len + writenb,
11  2U + TAG_LEN + len - writenb, TIMEOUT);
12 }
```

V princípe celá logika tejto VPN pozostáva z kontroly obsahu tunelovacieho rozhrania a aktívnych soketov. Následne, ak sa na vstupoch nachádzajú dáta, tak dochádza k ich čítaniu, dešifrovaniu a odoslaniu dát aplikácií, ktorej prislúchajú.

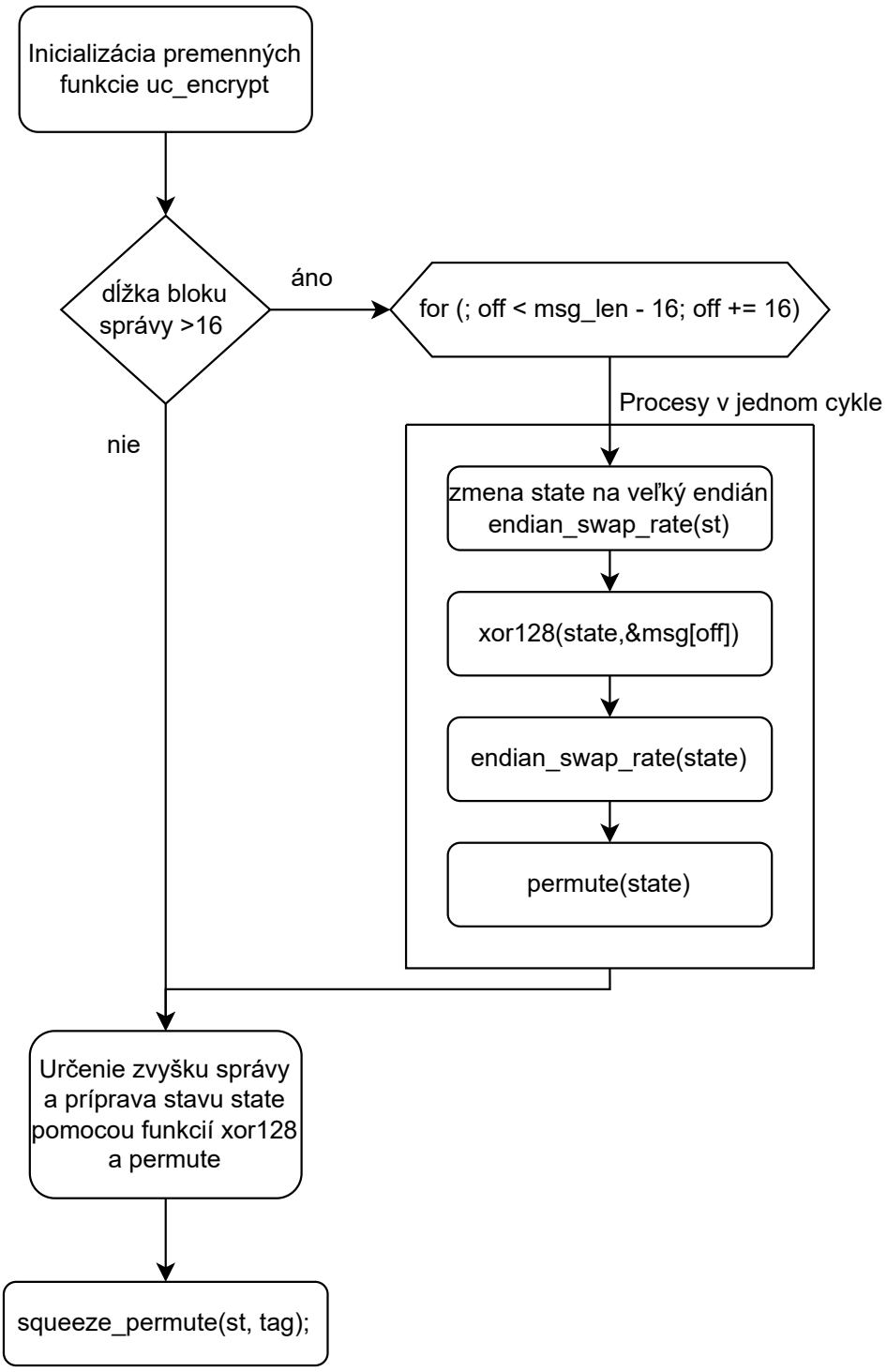
Na konci funkcie `event_loop()` sa nachádza ešte overenie pre prípad keď nie je vyrovnávacia pamäť s dátami plná. V tomto prípade funkcia vykonáva posun uložených bajtov na začiatok. Inými slovami pripravuje dáta na ďalšie čítanie. Vyššie uvedené činnosti sú znázornené v zdrojovom kóde 4.9.

Zdrojový kód 4.9: Príprava dát na ďalšie čítanie

```
1
2   if (2 + TAG_LEN + MAX_PACKET_LEN != len_with_header) {
3     unsigned char *rbuf      = client_buf->len;
4     size_t         remaining = client_buf->pos - len_with_header;
5     memmove(rbuf, rbuf + len_with_header, remaining);
6   }
7   client_buf->pos -= len_with_header;
```

Šifrovanie a dešifrovanie

Proces šifrovania, resp. dešifrovania správy nastáva na oboch stranách spojenia, teda pri klientovi aj serveri. Zdrojový kód 4.10 demonštruje šifrovanie implementované v funkcii `uc_encrypt()`. Tento proces sme opísali v obrázku 4.8.



Obr. 4.8: Proces šifrovania v funkcii uc_encrypt()

Zdrojový kód 4.10: Šifrovanie správy pomocou testovanej funkcie uc_encrypt

```
1
2  void uc_encrypt(uint32_t st[12], unsigned char *msg,
3                  size_t msg_len, unsigned char tag[16])
4  { //spracovanie po 16 znakov
5    unsigned char squeezed[16];
6    unsigned char padded[16 + 1];
7    size_t        off = 0;
8    size_t        leftover;
9
10   if (msg_len > 16) {
11     for (; off < msg_len - 16; off += 16) {
12       endian_swap_rate(st);
13       memcpy(squeezed, st, 16);
14       xor128(st, &msg[off]);
15       endian_swap_rate(st);
16       xor128(&msg[off], squeezed);
17       permute(st);
18     }
19   }
20   leftover = msg_len - off;
21   memset(padded, 0, 16);
22   mem_cpy(padded, &msg[off], leftover);
23   padded[leftover] = 0x80;
24   endian_swap_rate(st);
25   memcpy(squeezed, st, 16);
26   xor128(st, padded);
27   endian_swap_rate(st);
28   st[11] ^= (1UL << 24 | (uint32_t) leftover >> 4 << 25
29              | 1UL << 26);
30   xor128(padded, squeezed);
31   mem_cpy(&msg[off], padded, leftover);
32   permute(st);
33   squeeze_permute(st, tag);   //vytvorenie tagu
34 }
```

V kóde dochádza k častému použitiu 2 funkcií. Konkrétne `xor128()` a `permute()`. Jedná sa o pomerne dôležité bloky pre správne fungovanie šifrovacieho algoritmu. Obsah prvej z uvedených je preto znázornený v zdrojovom kóde 4.11.

Zdrojový kód 4.11: Funkcia xor128 použitá v implementácií šifrovania

```
1  static inline void xor128(void *out, const void *in)
2  {
3    #ifdef __SSSE3__
4    _mm_storeu_si128((__m128i *) out,
5    _mm_xor_si128(_mm_loadu_si128((const __m128i *) out),
6    _mm_loadu_si128((const __m128i *) in)));
7    #else
8    unsigned char *      out_ = (unsigned char *) out;
9    const unsigned char *in_  = (const unsigned char *) in;
10   size_t               i;
11
12   for (i = 0; i < 16; i++) {  //xororvanie jednotlivych znakov
13     out_[i] ^= in_[i];    //v 16 bitovom bloku spravy
14   }
15   #endif
16 }
```

Funkcia `permute()` je pomerne rozsiahla. Jej obsah tvorí 100 riadkov zdrojového kódu. Jedná sa o implementáciu XOODOO permutácie, ktorá bola opísaná v Kapitole 2 tejto práce. Použitá implementácia závisí od podmieneného kompilovania zdrojového kódu. Naše zariadenie nemá k dispozícií potrebné procesorové inštrukcie. Po skompilovaní sa používa blok, ktorý sa nachádza v ukážke zdrojového kódu 4.12.

Zdrojový kód 4.12: Funkcia permute() a makrá realizujúce permutáciu XOODOO

```
#define ROTR32(x, b) (uint32_t)(((x) >> (b)) |
                     ((x) << (32 - (b))))
#define SWAP32(s, u, v)        \
do {                           \
  t      = (s)[u];             \
  (s)[u] = (s)[v], (s)[v] = t; \
} while (0)

static void permute(uint32_t st[12])
{
  uint32_t e[4], a, b, c, t, r, i;
  for (r = 0; r < XOODOO_ROUNDS; r++) {
    for (i = 0; i < 4; i++) {
      e[i] = ROTR32(st[i] ^ st[i + 4] ^ st[i + 8], 18);
      e[i] ^= ROTR32(e[i], 9);
    }
    for (i = 0; i < 12; i++) {
      st[i] ^= e[(i - 1) & 3];
    }
    SWAP32(st, 7, 4);
    SWAP32(st, 7, 5);
    SWAP32(st, 7, 6);
    st[0] ^= RK[r];
    for (i = 0; i < 4; i++) {
      a         = st[i];
      b         = st[i + 4];
      c         = ROTR32(st[i + 8], 21);
      st[i + 8] = ROTR32((b & ~a) ^ c, 24);
      st[i + 4] = ROTR32((a & ~c) ^ b, 31);
      st[i] ^= c & ~b;
    }
    SWAP32(st, 8, 10);
    SWAP32(st, 9, 11);
  }
}
```

K **dešifrovaniu** dochádza ak sa v klientskom sokete nachádzajú dáta. Program

overuje či sú v premennej `fds[POLLFD_CLIENT]` dáta určené na spracovanie. Premenná `fds[POLLFD_CLIENT]` predstavuje smerník na pamäťový blok, kde je uložený soket na druhú stranu spojenia, teda akceptovaného klienta. V momente keď sa tam nachádzajú dáta dôjde k ich čítaniu pomocou funkcie `safe_read_partial()`. Následne program realizuje dešifrovanie funkciou `uc_decrypt()`, ktorá je inverznou k `uc_encrypt()`. V ukážke zdrojového kódu 4.13 a 4.14, si používateľ môže prezrieť obsah funkcie `uc_decrypt()`. Po odšifrovaní dát ich program zapisuje do tunelovacieho rozhrania prostredníctvom funkcie `tun_write()`. Následne TUN rozhranie dotvára paket a vloží ho do sieťového zásobníka (z ang. *network stack*). OS následne vykonáva ďalšie spracovanie paketu do nižších vrstiev sieťového modelu.

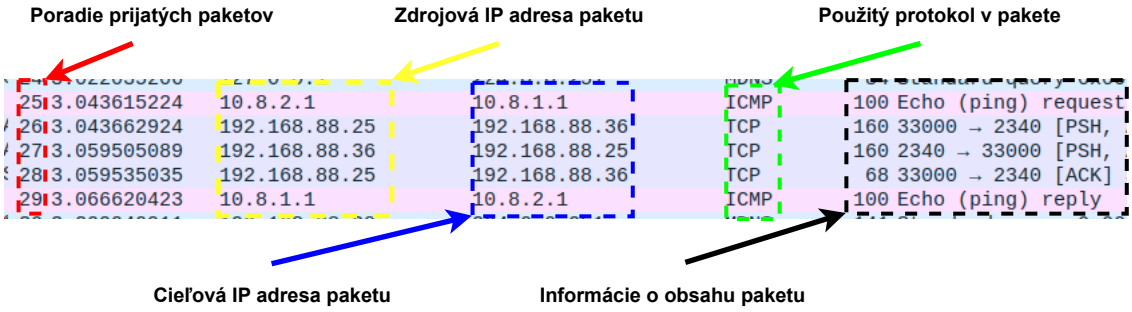
Zdrojový kód 4.13: Zdrojový kód testovanej funkcie na dešifrovanie správy (1.časť)

```
1  int uc_decrypt(uint32_t st[12], unsigned char *msg,
2                 size_t msg_len,
3                 const unsigned char *expected_tag,
4                 size_t expected_tag_len)
5  {
6    unsigned char tag[16];
7    unsigned char squeezed[16];
8    unsigned char padded[16 + 1];
9    size_t        off = 0;
10   size_t        leftover;
11
12   if (msg_len > 16) {
13     for (; off < msg_len - 16; off += 16) {
14       endian_swap_rate(st);
15       memcpy(squeezed, st, 16);
16       xor128(&msg[off], squeezed);
17       xor128(st, &msg[off]);
18       endian_swap_rate(st);
19       permute(st);
20     }
21   }
22   leftover = msg_len - off;
23   memset(padded, 0, 16);
24   mem_cpy(padded, &msg[off], leftover);
25   endian_swap_rate(st);
26   memset(squeezed, 0, 16);
27   mem_cpy(squeezed,
28           (const unsigned char *) (const void *) st,
29           leftover
30           );
31     xor128(&padded, squeezed);
32   padded[leftover] = 0x80;
33   xor128(st, padded);
34   endian_swap_rate(st);
35   st[11] ^= (1UL << 24 | (uint32_t) leftover >> 4
36   << 25 | 1UL << 26);
37   mem_cpy(&msg[off], padded, leftover);
```

Zdrojový kód 4.14: Zdrojový kód testovanej funkcie na dešifrovanie správy (2.časť)

```
38      permute(st);
39      squeeze_permute(st, tag);
40
41      if (equals(expected_tag, tag, expected_tag_len) == 0) {
42        memset(msg, 0, msg_len);
43        return -1;
44      }
45      return 0;
46    }
```

Na obrázku 4.11 sme pripravili názornú ukážku šifrovaných dát pri prenose cez soket. Za účelom sme použili už spomínaný nástroj Wireshark na zachytávanie premávky v sieťových rozhraniach. Prechod dát z pohľadu klienta medzi zariadeniami je znázornený na obrázku 4.9.



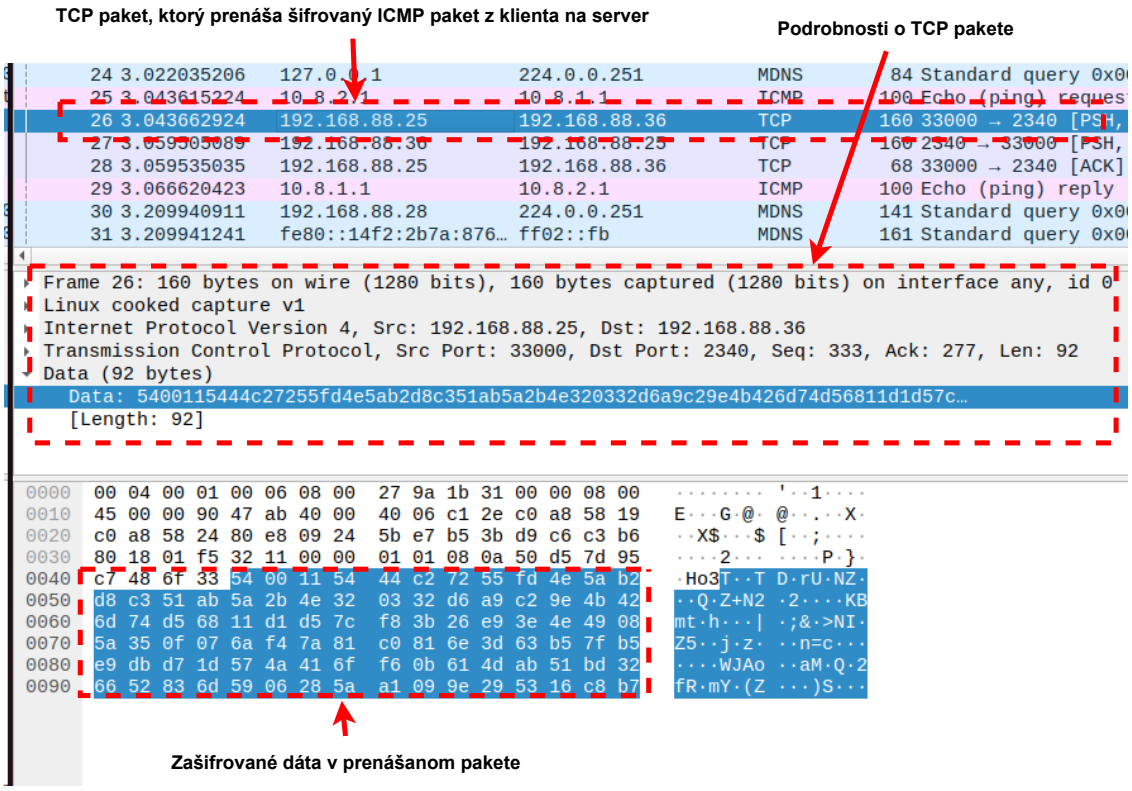
Obr. 4.9: Prenos zašifrovaných dát z VPN klienta na VPN server

Na VPN klientovi sme spustili v príkazovom riadku príkaz `ping 10.8.1.1`. Ten nám vytvára ICMP paket so žiadosťou o odpoveď[8]. Obsah tohto paketu je možné si pozrieť v obrázku 4.10. Tento paket je vo VPN klinetovi po spracovaní vo DSVPN zašifrovaný pomocou XOODOO permutácie a odoslaný cez soketové TCP spojenie[9]. Obsah zašifrovaného paketu je znázornený v 4.11. Označená časť paketu v obrázku je už spomenutý zašifrovaný ICMP paket z obrázku 4.10. VPN server ho po prijatí dešifruje a posiela na vlastné tunelovacie rozhranie. Odiaľ prevezme paket OS a vygeneruje odpoveď na pôvodnú požiadavku vo forme nového paketu. Ten je prenesený na klienta opäť cez soketové TCP spojenie[10]. Paket číslo

[8] paket číslo 25
[9] paket číslo 26
[10] paket číslo 27

```
00 04 ff fe 00 00 00 00  00 00 00 00 00 00 08 00   ........ ........
45 00 00 54 4f 13 40 00  40 01 d4 84 0a 08 02 01   E··TO·@· @·......
0a 08 01 01 08 00 0c 19  00 01 00 06 c0 92 35 64   ........ ......5d
00 00 00 00 30 16 07 00  00 00 00 00 10 11 12 13   ····0··· ........
14 15 16 17 18 19 1a 1b  1c 1d 1e 1f 20 21 22 23   ........ ···· !"#
24 25 26 27 28 29 2a 2b  2c 2d 2e 2f 30 31 32 33   $%&'()*+ ,-./0123
34 35 36 37                                        4567
```

Obr. 4.10: Obsah pôvodného paketu s ICMP žiadosťou



Obr. 4.11: Zašifrovaný pôvodný ICMP paket v novom TCP pakete

28 je odpoveď na úspešne prijatie. DSVPN spracuje tento paket a zapíše pôvodný na tunelovacie rozhranie. Z hľadiska klienta už vidíme dešifrovanú odpoveď v pakete číslo 29, ktorú spracuje OS.

Ukončenie činnosti programu

Používateľ má možnosť ukončiť vzniknuté VPN spojenie medzi klientom a serverom pomocou jednoduchého príkazu `crtl + c`. Program zaznamená tento vstup a ukončí cyklus. Po návrate až do hlavnej funckie `main()` sa z OS vymažú aplikované FW pravidlá a používateľ môže používať počítač ako pred spustením DSVPN.

4.6 Analýza výpočtových nárokov DSVPN

Za účelom analýzy výpočtových nárokov sme sa v práci zamerali na meranie potrebného počtu cyklov a zároveň aj času, potrebného na vykonanie šifrovanie a dešifrovanie permutacie XOODOO. Pre linuxovú platformu sme použili niektoré zabudované funkcie ako je `clock()`. Pomocou nej sme zmerali čas vykonávania meranej funkcie. Ukážka ako bol kód na meranie implementovaný do DSVPN je možné vidieť v ukážke zdrojového kódu 4.15.

Zdrojový kód 4.15: Ukážka spôsobu merania pri (de)šifrovaní XOODOO

```
1     uint64_t time,tick; //inicializacia premennych
2     clock_t t = clock();
3
4     tick = cpucyclesS();
5     codeTomeassure();   //funkcia urcena na meranie
6     time = cpucyclesE()-tick;
7
8     t = clock() - t;    //vyhodnotenie
9     double time_taken = ((double)t)/CLOCKS_PER_SEC;
10    printf(Size(%ld B): "%llu␣cycles␣in␣%f␣s\n", msg_length,
11           time, time_taken);
```

V prípade, ak by používateľ potreboval vykonať podobné meranie času v prostredí OS Windows, tak môže použiť zdrojový kód 4.16. Viac o použití a obmedzeniach je možné nájsť v práci [88].

Zdrojový kód 4.16: Meranie času vykonávania na OS Windows

```
#include <windows.h>

#define TIMER_INIT \  //inicializacia makra
LARGE_INTEGER frequency; \
LARGE_INTEGER t1,t2; \
double elapsedTime; \
QueryPerformanceFrequency(&frequency);

#define TIMER_START QueryPerformanceCounter(&t1);
#define TIMER_STOP \
QueryPerformanceCounter(&t2); \
elapsedTime=(double)(t2.QuadPart-t1.QuadPart)
            /frequency.QuadPart;

TIMER_INIT    \\pouzitie
{
  TIMER_START
  codeToMeasure()
  TIMER_STOP
}
```

Spojenie medzi klientom a serverom je spustené na VM. Šifrovanie bolo merané na strane klienta. Dešifrovanie sme merali v OS servera. Počas spojenia sme sa snažili naviesť stav väčšieho sieťového zaťaženia. Tento úkon sme zrealizovali otvorením viacerých rôznych okien vo webovom prehliadači. Týmto spôsobom sme simulovali potrebu prenosu väčšieho množstva dát naprieč sieťou. Najčastejšie však do šifrovania vstupovali TCP pakety, ktoré majú za úlohu udržať soketové TCP spojenie. Ich veľkosť je 52 bajtov. Z výpisu sme ešte na základe pozorovania sledovali aké veľkosti sa najčastejšie vyskytujú. Na základe takto získaných dát sme vypracovali tabuľku 4.1. Hodnoty pre jednotlivé stĺpce boli získane ako aritmetický priemer z meraní. Pakety, ktoré vstupovali do šifrovania, resp. dešifrovania menej ako 20-krát sme z meraní vypustili. Dôvodom je snaha o získanie lepších štatistických údajov. Obdobne sme pri výpočte aritmetického priemeru nebrali do úvahy príliš veľké výchylky pri meraní počtu cyklov. Uvedené chyby merania spôsobil samotný OS, kvôli prerušovania činnosti programu DSVPN.

Súčasťou Prílohy A.4 sú súbory s logmi, z ktorých bola tabuľka vytvorená. Zároveň do Prílohe A.4 prikladáme priečinok `MeasurementsInVMEnvironment`

Veľkosť dát [B]	**Názov meranej funkcie**			
X	**uc_encrypt()**		**uc_decrypt()**	
Počet meraní	Počet cyklov	Čas vykonávania [s]	Počet cyklov	Čas vykonávania [s]
52 X 1376	1 648	0,000 076	2 377	0,000 062
60 X 79	2 527	0,000 049	2 769	0,000 044
64 X 47	1 799	0,000 048	2 341	0,000 043
80 X 145	2 853	0,000 053	3 343	0,000 057
91 X 128	2 944	0,000 046	2 965	0,000 042
116 X 35	4 083	0,000 049	2 878	0,000 049
222 X 23	4 220	0,000 345	3 976	0,000 040
569 X 51	10 245	0,000 950	8 574	0,000 143
1 385 X 147	21 232	0,000 165	19 046	0,000 045
1 452 X 14	22 599	0,000 077	20 083	0,000 532
Celkom [B]	-	-	-	-
364 656	74 150	0,001 858	68 352	0,000 957

Tabuľka 4.1: Výsledky z experimentálnych meraní funkcií na šifrovanie a dešifrovanie v prostredí virtuálnych strojov

so zdrojovým kódom programu, ktorý bol použitý na spracovanie výsledkov.

4.7 Windows kompatibilita

V tejto práci sme sa zamerali aj na rozšírenie pôvodnej funkcionality DSVPN o kompatibilitu na OS Windows. Rozšírenie by slúžilo vo veľkej miere ako edukatívny vzor pri jednoduchom vysvetlení problematiky VPN na rôznych platformách. Samozrejmosťou ostáva zachovanie pôvodnej kompatibility. V rámci tejto činnosti sme museli pridať, resp. zmeniť niektoré funkcionality. V priebehu tejto podkapitoly stručne opíšeme aplikované zmeny. Rád by som ešte upozornil čitateľa na použitie prepocesorov **`#ifdef`** a **`#ifndef`**. Kompletne upravený kód je obsahom prílohy A.3.

4.7.1 Hlavičkové súbory

Prvotnou činnosťou pre vytvorenie kompatibility programu DSVPN s OS Windows bolo získanie vedomostí o knižniciach, ktoré v prípade soketového programovania potrebujeme. Priebežnou analýzou pôvodného riešenia sme zároveň vyhľadávali dané realizácie aj pre OS Windows. Obdobne pri snahe o priebežné ladenie programu, nám prekladač vypísal niektoré problémy týkajúce sa nedostupných knižníc pre Windows. Vo výsledku sme pre Windows platformu po-

trebovali vložiť 13 hlavičkových súborov a zadefinovať niektoré makrá, ktoré sa vo Windowse volajú inak. Aplikované zmeny je možné si pozrieť v ukážke zdrojového kódu 4.18.

4.7.2 Funkcia generovania náhodných čísel

Implementácia XOODOO používa pri svojej činnosti aj náhodné dáta. V pôvodnej implementácií DSVPN sa tieto dáta získavajú pomocou systémových generátorov náhodných čísel. V prípade OS Linux sa tento úkon realizuje tradične systémovým volaním funkcie `SYS_getrandom()`. V prípade ostatných podporovaných OS sa volá funkcia `arc4random_buf()`. Na základe odporúčaní z [88] sme do DSVPN zakomponovali pre prípad OS Windowsu volanie funkcie `BCryptGenRandom()`. Toto rozhranie je aktuálne na Windowse odporúčaný spôsob generovania náhodných dát pre kryptografické účely. Výstupom volania sú dáta z kryptograficky bezpečného pseudonáhodného generátora náhodných čísel. V ukážke zdrojového kódu 4.17 je znázornená modifikovaná funkcia na získavanie náhodných dát.

Zdrojový kód 4.17: Ukážka zdrojového kódu na získanie náhodných dát

```
1  void uc_randombytes_buf(void *buf, size_t len)
2    {
3      #ifdef _WIN32
4      if (STATUS_SUCCESS!=BCryptGenRandom(NULL,buf,len,
5                           BCRYPT_USE_SYSTEM_PREFERRED_RNG))
6      {
7        puts("BCRYPTGENRANDOM␣ERROR");
8        abort();
9      }
10     #elif defined(__linux__)
11     if ((size_t) syscall(SYS_getrandom, buf, (int) len, 0)
12                            != len)
13     {
14         abort();
15     }
16     #else
17     arc4random_buf(buf, len);
18     #endif
19   }
```

Viac o problematike generovania náhodných čísel je možné si prečítať v [88].

4.7.3 Soketová kompatibilita

Windows v porovnaní s Linuxom pracuje s iným typom soketov. Ako sme videli v útržkoch kódu vyššie, linux pri vytváraní soketu vracia hodnotu typu **`int`**, ktorá odkazuje na vytvorený soket. Windows na druhej strane vracia štruktúru typu `SOCKET`. Pretypovanie z jedného typu na druhý bohužiaľ nie je možné jednoduchým riešením. Elegantné riešenie tohto problému bolo vytvorenie makra, ktoré prekladaču povedalo aký typ premennej má použiť. Za týmto účelom sme zadefinovali nové makro `SCK`. Viď. ukážku zdrojového kódu 4.18.

Následne postačilo len zmeniť deklarácie a definície všetkých soketových premenných vstupujúcich do funkcie. Rovnaký scenár platil aj pri vytváraní soketových premennych. Jednoducho sme nahradili každý soket typu **`int`** za `SCK`.

Zdrojový kód 4.18: Makrá a hlavičkové súbory pridané do vpn.h

```
#ifdef _WIN32
#ifndef _WIN32_WINNT
#define _WIN32_WINNT 0x0600
#endif
#include <stdbool.h>
#include <winsock2.h>
#include <ws2tcpip.h>
#include <winioctl.h>
#include <windows.h>
#include <io.h>
#include <tchar.h>
#include <ws2ipdef.h>
#include <iphlpapi.h>
#include <mstcpip.h>
#include <winternl.h>
#include <stdarg.h>
#include "wintun.h"
#define SCK   SOCKET
#define SCKERR INVALID_SOCKET
#define INVSCK INVALID_SOCKET
#define nfds_t ULONG
#define TCP_DEFER_ACCEPT SO_ACCEPTCONN
#define SOL_TCP IPPROTO_TCP
#define IFNAMSIZ 256
#define SIOCSIFMTU 0x8922
#else
#include <sys/wait.h>
#include <sys/ioctl.h>
#include <sys/socket.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/uio.h>
#include <net/if.h>
#include <netinet/in.h>
#include <netinet/tcp.h>
#include <netdb.h>
#include <poll.h>
#define SCK   int
#define INVSCK -1
#define SCKERR 0
#endif
```

Nasledovala práca so soketmi. Princíp fungovania soketov na strane klienta a servera ostáva v svojej podstate rovnaký. Odlišný je spôsob inicializácie, zápisu, čítania, konfigurácie a manipulácie s nimi. V tomto smere nám vo veľkej miere pomohol návod v [106]. V publikácií je názorným spôsobom vysvetlený princíp fungovania, práce a manipulácie so soketmi.

Pred samotným používaním soketov je potrebné inicializovať tzv. Winsock. Tento úkon sme realizovali v `main()` funkcii, zobrazenú v ukážke zdrojového kódu 4.19.

Zdrojový kód 4.19: Inicializácie knižnice na prácu so soketmi

```
1  #ifdef _WIN32
2  WSADATA wsa;
3  // Initialize Winsock
4  if (WSAStartup(MAKEWORD(2,2), &wsa) != 0) {
5    printf("WSAStartup␣failed.␣Error␣Code␣:␣%d",
6            WSAGetLastError());
7    return 1;
8  }
9  #endif
```

V kóde sme potrebovali zmeniť spôsob čítania a zápisu dát do soketov. Za týmto účelom sme vytvorili viacero funkcií, ktoré danú činnosť realizujú. Ich volanie sa vykonáva v pôvodnej funkcionalite pomocou preprocesora **`#ifdef _WIN32`**. Ak je teda potrebné aby pôvodná implementácia bola vykonaná odlišne, tak sme pomocou tohto makra volali nami vytvorenú funkciu. Celkovo sme takýmto spôsobom vytvorili 9 funkcií, ktoré sú obsahom os.c. Do os.h sme pridali deklarácie:

- `int SCK_close(SCK fd);`,
- `int w_open(const char *filename, int flag);`,
- `int w_read(int file, unsigned char *buf, size_t count);`,
- `int w_close(int file);`,
- `ssize_t w_read_file(const int fd, void *const buf_,`
  `size_t count);`,
- `ssize_t w_safe_read(const SOCKET fd, void *const buf_,`
  `size_t count, const int timeout);`,

- `ssize_t w_safe_write(const SOCKET fd, const void *const buf_, size_t count, const int timeout);`,
- `ssize_t w_safe_read_partial(const SOCKET fd, void *const buf_, const size_t max_count);`,
- `ssize_t w_safe_write_partial(const SOCKET fd, void *const buf_, const size_t max_count);`.

Pri Windows OS na konci každého programu ešte potrebujeme zavolať `WSACleanup()`. Za spomenutie ešte stojí získavanie chýbových hlášok zo soketov. V Linuxe sa v prípade chyby ukladá chybová hláška do globálnej premennej `errno`. Z nej následne programátor dokáže určiť kde mohol nastať problém. V prípade Windowsu potrebuje používateľ zavolať `WSAGetLastError()`. Následne má k dispozícií kód chybovej hlášky. Zoznam a popis chybových hlášok je dostupný na internete[11].

4.7.4 Tunelovacie rozhranie

Windows nemá natívnu podporu na vytváranie virtuálnych sieťových adaptérov. Na vyriešenie problému sme mali niekoľko možností. Prvá bola implementácia vlastného ovládača, ktorý by pracoval s jadrom OS. Reálnejšia možnosť bola použitie už vytvorenej implementácie. Tu sa nám naskytovali dve možné riešenie. OpenVPN TUN/TAP a Wintun adaptér [87]. Rozhodli sme sa použiť Wintun adaptér. Dôvodom je jeho použitie bez potreby inštalácie dodatočného softvéru. Do kódu DSVPN sme implementovali funkcie na inicializáciu, čitanie, zápis a ukončenie ovládača. Jedná sa o funkcie:

- `int wtunInit(Context *context);` – realizuje načítanie wintun.dll knižnice, vytvorenie adaptéru, spustenie prevádzky a jeho uloženie do štruktúry.
- `int tun_reader(Context *context, unsigned char *outgoingData)` – číta pakety, ktoré sú prijaté na rozhranie a ukladá ich do premennej outgoingData,
- `int tun_writer(Context *context, BYTE *PacketData, ssize_t PacketDataSize)` – zapisuje dáta v premennej PacketData s veľkosťou PacketDataSize do tunelovacieho rozhrania,

[11] `https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/winsock/windows-sockets-error-codes-2`

- **void** `w_cleanUp(Context *context)` – obsahuje funkcie z wintun.dll na bezpečné ukončenie prevádzky a vymazanie adaptéra.

Tieto funkcie sme vložili v DSVPN do súbora vpn.c. Dôvodom bolo posielanie celej štuktúry do týchto funkcií. Na správne fungovanie potrebuje premennú typu `WINTUN_SESSION_HANDLE`. Pri vytváraní adaptéra sa do nej uložia informácie o tunelovacom rozhraní. Na základe nich dokážeme následne čítať a zapisovať dáta do rozhrania. V budúcnosti by sa kvôli optimalizácií využitia pamäte odporúčalo zmeniť túto funkciu aby pracovala len s premennou `WINTUN_SESSION_HANDLE` a nie celou štruktúrou.

Na rozdiel od pôvodnej implementácie nastal pri tomto adaptéri problém. V DSVPN na Linuxe dokážeme monitorovať stav rozhrania. Dokáže teda určiť, či sa v ňom nachádzajú dáta na čítanie, nastala chyba alebo môžeme zapisovať dáta. V prípade wintunu sme však k takejto možnosti monitorovania nenašli informácie. Z uvedeného dôvodu sme museli pozmeniť logiku v kóde. Pôvodne sa z tunelovacieho rozhrania číta len ak rozhranie obsahuje nejaké dáta určené na čítanie. V aktualizovanej verzii čítame dáta z rozhrania pri každom cykle vo funkcii `event_loop()`. OS Windows podporuje možnosť počkať na ukončenie procesu. Zároveň wintun implementuje funkcionalitu čakania na prichádzajúce dáta ak momentálne na rozhraní žiadne nie sú. Do `tun_reader()` sme teda implementovali túto logiku. Vo výsledku funkcia skončí až keď nastane prečítanie nejakých dát. Tento úkon bude v prípade bežnej prevádzky potrebné zmeniť. Dôvodom je, že môže nastať blokovanie DSVPN v stave čítania z rozhrania. Pri experimentovaní sme nenastavovali filtrovacie pravidlá a ani raz spomenutý scenár nestal.

4.7.5 Smerovanie a Firewall pravidlá

Posledný z krokov, ktorý je dôležitý, je aplikovanie firewall pravidiel a smerovacích ciest. V pôvodnej implementácií sa nachádzajú niektoré pravidlá, ktoré sa na bežnom Windowse nemožno uskutočniť. Pri experimentoch sme sa rozhodli preto Firewall pravidlá na vypustiť. Pri implementácií sme ho vypli pomocou príkazu. Ten je možné si pozrieť v ukážke zdrojového kódu 4.21. Okrem tejto zmeny je rozdiel aj v nastavovaní prednastavených pravidiel smerovania. Pri experimentoch sme aplikovali rôzne pravidla. Obsah príkazov pre príkazový riadok je možné vidieť v ukážke kódov 4.20 a 4.21.

Zdrojový kód 4.20: CMD pravidla použité na VPN serveri

```
1  //SERVER
2  *set_cmds[] ={
3  //nastavuje ipv4 adresu
4  "netsh␣interface␣ipv4␣add␣address␣$IF_NAME
5  $LOCAL_TUN_IP␣255.255.255.255",
6
7  //nastavuje ipv6 adresu na wtun adapter
8  "netsh␣interface␣ipv6␣add␣address␣$IF_NAME␣$LOCAL_TUN_IP6/96",
9
10 //vypina firewall
11 "netsh␣advfirewall␣set␣allprofiles␣state␣off",
12
13 //default MTU je 9000
14 "netsh␣interface␣ipv4␣set␣subinterface
15 $IF_NAME␣mtu=9000␣store=persistent",
16
17 //aby mohlo z jedneho interfacu na druhy preposielat pakety
18 "netsh␣interface␣ipv4␣set␣interface␣$IF_NAME
19 forwarding=enabled",
20
21 //(powershell) globalny pre vsetky vyssie
22 //"Set-NetIPInterface -Forwarding disabled",
23
24 //zapina interface ak by bol vypnuty
25 "netsh␣interface␣set␣interface␣$IF_NAME␣admin=enable",
26
27 //ak je destinacia ip remote tunela,
28 //tak posli na local tunel rozhranie
29 "route␣add␣$REMOTE_TUN_IP␣mask␣255.255.255.255␣$LOCAL_TUN_IP",
30
31 NULL },
```

Zdrojový kód 4.21: CMD pravidla použité na VPN klientovi

```
1  //KLIENT
2  *set_cmds[] = {
3  "netsh␣advfirewall␣set␣allprofiles␣state␣off",
4  "netsh␣interface␣ipv4␣set␣subinterface␣$IF_NAME␣mtu=9000
5  store=persistent",
6  "netsh␣interface␣ipv4␣set␣interface␣$IF_NAME␣forwarding=enabled",
7  "netsh␣interface␣ipv4␣add␣address␣$IF_NAME
8  $LOCAL_TUN_IP␣255.255.255.255",
9
10 //pri testovani vypnute
11 //"netsh interface ipv6 add address $IF_NAME $LOCAL_TUN_IP6/96",
12
13 "netsh␣interface␣set␣interface␣$IF_NAME␣admin=enable",
14
15 //paket so s cielom server ip ma ist cez povodny gw
16 "route␣add␣$EXT_IP␣mask␣255.255.255.255␣$EXT_GW_IP",
17
18 "route␣delete␣0.0.0.0", //maze defaultnu rutu
19
20 //presmeruje kazdu IP, ktoru nepozna na lokalny tunel
21 "route␣add␣0.0.0.0␣mask␣0.0.0.0␣$LOCAL_TUN_IP",
22
23 NULL },
24
25 //$IF_NAME = wtun0
26 //$LOCAL_TUN_IP = ip lokalneho tunela
27 //$REMOTE_TUN_IP = ip tunela na druhej stane
28 //$EXT_IP = ip VPN servera
29 //$EXT_GW_IP = povodna Gateway na zariadeni
```

4.7.6 Preklad a ladenie zdrojových kódov

Zmeny vykonané s cieľom vytvorenia kompatibility si vyžadovali použitie iného balíka Make, ktorý by fungoval správne vo Windowse. Prepisovaný kód sme natvrdo premiestnili do jedného priečinka. Teda všetky pôvodné hlavičkové súbory a zdrojové kódy z DSVPN sme vložili do jedného priečinka. K nim sme priložili `wintun.h` a `wintun.dll`. Následne sme vytvorili jednoduchý Makefile

na kompiláciu programu do funkčného celku. Ukážku jednoduchého zdrojového kódu je možné vidieť v 4.22.

Zdrojový kód 4.22: Ukážka zdrojového kódu v balíku Make

```
1  CC=gcc
2  CFLAGS= -Wall -Wextra -g
3  WINFLAGS = -lbcrypt -liphlpapi -lws2_32
4  SRCS= dsvpn
5  CHARM=charm.c
6  OS=os.c
7  VPN=vpn.c
8  all: $(SRCS)
9
10 $(SRCS): %:
11 $(CC) -o $< $(SRCS) $(CHARM) $(OS) $(VPN) $(CFLAGS) $(WINFLAGS)
12
13 clean:
14 $(RM) *.exe
```

Pri vývoji softvéru sme používali aj nástroj na ladenie programov. Z uvedeného dôvodu prikladám aj konfiguráciu pre ladenie v prostredí programu Visual Studio C. Konfiguráciu bolo potrebné pripraviť. V nej ma čitateľ možnosť prečítať si ako daný program spúšťať za účelom ladenia. Dôležité je taktiež, že program Visual Studio Code **musí** byť pri bežnom chode DSVPN a aj jeho ladení **byť spustený ako administrátor**. Ak tento scénar nenastane, tak nebude možné vytvoriť tunelovacie rozhranie a DSVPN ukončí činnosť. V ukážke zdrojového kódu 4.23, je možné vidieť potrebnú konfiguráciu `launch.json` na spustenie DSVPN ako klient v režime ladenia.

Zdrojový kód 4.23: Konfigurácia launch.json pre ladenie DSVPN

```
{
  "version": "0.2.0",
  "configurations": [
  {
    "name": "C/C++:␣g++.exe␣build␣and␣debug␣active␣file",
    "type": "cppdbg",
    "request": "launch",
    "program": "${workspaceFolder}/dsvpn.exe",
    "args": ["client", "C:/Users/marro/Desktop/xy/m.key",
    "192.168.88.10", "2340", "auto", "10.8.2.1", "10.8.1.1"],
    "stopAtEntry": false,
    "cwd": "${fileDirname}",
    "environment": [],
    "externalConsole": false,
    "MIMode": "gdb",
    "miDebuggerPath": "C:\\mingw64\\bin\\gdb.exe",
    "setupCommands": [
    {
      "description": "Enable␣pretty-printing␣for␣gdb",
      "text": "-enable-pretty-printing",
      "ignoreFailures": true
    }
    ]
  }
  ]
}
```

5 Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov

V rámci tejto kapitoly zhrnieme dosiahnuté výsledky z analýzy, experimentálnych meraní a rozšírenia kompatibility pre OS Windows.

5.1 Analýza jednoduchej VPN siete

V úvode praktickej časti sme postupnou analýzou prešli jednotlivé časti zdrojového kódu DSVPN. Názorne sme opisovali dôležité bloky a funkcionalitu implementovanú v tejto jednoduchej VPN. Na základe nadobudnutých znalostí sme vypracovali stavové diagramy, ktoré čitateľovi jednoznačne vysvetľujú čo sa v programe realizuje. Na základe týchto informácií, dokáže pochopiť ako sa v praxi realizuje VPN sieťové spojenie.

5.2 Experimentálne meranie autentizovaného šifrovania pomocou permutácie XOODOO

Popri analýze zdrojového kódu sme experimentálne overili funkcionalitu autentizovaného šifrovania pomocou permutácie XOODOO v jednoduchej VPN sieti. Simuláciu bežného prostredia sme uskutočnili za pomoci 2 virtuálnych OS a jedného natívneho OS, na ktorom virtuálizácia prebiehala. Virtualizované zariadenia mali obdobne aj obmedzený výpočtový výkon a pridelené prostriedky. To sa prejavovalo v pomalších odozvách systémov na požiadavky používateľa.

Zo získaných výsledkov v tabuľke 4.1 sme usúdili, že virtuálne prostredie nie je vhodné pre meranie. Z toho dôvodu sme vytvorili program, ktorý používa kryptografické funkcie z implementácie DSVPN. XOODOO permutáciu sme inicializovali podľa vzoru v DSVPN. Následne sme vygenerovali náhodné dáta a tie sme zašifrovali a dešifrovali. Získané dáta sú znázornené v tabuľke 5.1.

Veľkosť dát [B]	uc_encrypt()		uc_decrypt()	
	Počet cyklov	Čas vykonávania [ms]	Počet cyklov	Čas vykonávania [ms]
52	15 428	0,005 600	16 124	0,005 700
250	50 634	0,017 600	50 866	0,017 700
500	97 817	0,034 000	97 469	0,033 800
1 000	189 312	0,065 600	189 167	0,065 500
1 500	280 691	0,097 100	280 749	0,097 100
3 000	557 322	0,192 700	557 960	0,192 900
4 500	834 997	0,288 600	835 374	0,288 700
6 000	1 110 120	0,383 600	1 109 279	0,383 300
7 500	1 397 974	0,483 100	1 386 258	0,479 000
9 000	1 769 841	0,611 600	1 661 352	0,574 100

Tabuľka 5.1: Výsledky z experimentálnych meraní funkcií na šifrovanie a dešifrovanie v prostredí lokálneho zariadenia

Z týchto výsledkov už je jednoznačne, že čas vykonávania šifrovania a dešifrovania, je priamo úmerný veľkosti dát vstupujúcich do XOODOO permutácie. To isté platí aj pre počet vykonaných cyklov. Rádovo sa čas vykonávania počas merania pohyboval pod úrovňou 1 milisekundy a to aj pri šifrovaní dát o veľkosti 9000 bajtov, ktorá predstavuje maximálnu možnú prenosovú veľkosť paketu (MTU). To znamená, že v implementácií DSVPN do (de)šifrovania nevstupujú väčšie dáta. Použitie permutácie XOODOO na zariadení je teda extrémne rýchle a jej použitie pri sieťovom prenose je z používateľského hľadiska zanedbateľné.

Vytvorený zdrojový kód na meranie šifrovania a dešifrovania je obsahom Prílohy A.4. Konkrétne v priečinku `MeasurementsInLocalEnvironment`.

5.3 Výsledky dosiahnuté pri tvorbe kompatibility DSVPN pre OS Windows

Jedným z cieľov našej práce bolo aj rozšírenie pôvodného riešenia DSVPN o kompatibilitu pre OS Windows. Samozrejmosťou bolo zachovanie pôvodnej kompatibility v rámci ostatných OS. V princípe sa nám podarilo vytvoriť tunelové spojenie medzi VPN klientom a VPN serverom so zabezpečeným prenosom dát. Taktiež je možné nadviazať spojenie nie len medzi zariadeniami s OS Windows, ale vieme spojiť ľubovoľné OS z množiny podporovaných DSVPN.

Problém riešenia nastáva pri smerovaní paketov naspäť k pôvodnému vlastníkovi. Pomocou sieťových príkazov a monitoringu premávky sa nám nepodarilo doteraz zistiť, prečo sa odpoveď na pôvodnú požiadavku nedokáže vrátiť na za-

riadenie. Tento úkon sa deje aj napriek tomu, že pri monitoringu vidíme ako paket s odpoveďou opúšťa zariadenie a prichádza na to, ktoré má dostať odpoveď. Súčasná hypotéza je, že nám uniká niečo pri smerovaní paketu z pozície OS Windows. Tento problém sa budeme snažiť ešte v blízkej budúcnosti vyriešiť, nakoľko by sa nemalo jednať o veľký problém. Čitateľ bude mať prístup ku aktuálnemu kódu pomocou stránky github.

6 Záver

Cieľom našej práce bolo uvedenie čitateľa do problematiky VPN sietí, so zameraním na použitie kryptografického algoritmu XOODOO permutácie za účelom zabezpečenia komunikácie. V prvej časti práci sme zadefinovali potrebné pojmy spojené s problematikou VPN sietí. Následne sme postupným opisom charakterizovali čo sa deje v sieťach typu VPN. Na základe naštudovanej literatúry sme vytvorili klasifikácie VPN sietí. Rozdelenie bolo realizované podľa logickej topológie a dát vstupujúcich do šifrovania. Pomocou nadobudnutých informácií sme charakterizovali a špecifikovali činnosti implementované v známych VPN protokoloch. V závere prvej kapitoly sme zhrnuli rozdelenie VPN sietí pomocou grafu.

Druhá kapitola sa venuje problematike ľahkej kryptografie. V nej sme charakterizovali tento pomerné nový odbor v oblasti kryptografie. Následne sme pokračovali s opisom XOODOO permutácie, ktorú zaraďujeme do tejto kategórie. XOODOO permutácia je súčasťou kryptografického balíka Xoodyak, ktorý je jedným z finalistov štandardizačného procesu NIST v ľahkej kryptografie. Opísali sme činnosti v algoritme a vysvetlili možnosti použitia.

Tretia kapitola obsahuje postupy prípravy prostredí na experimentovanie. Konfiguráciu virtualizovaných OS a opis jednotlivých nástrojov, ktoré boli pri práci použité. Opísali sme Wintun adaptér na tvorbu virtuálnych tunelovacích rozhraní v OS Windows. Za účelom použitia pri výučbe v špecializovaných predmetoch orientovaných na bezpečnost v počítačových sieťach, sme vytvorili jednoduché demo, ktoré demonštruje odosielanie a prijímanie ICMP paketov pomocou tohto adaptéru.

Štvrtá kapitola sa zameriava na praktickú demonštráciu jednoduchej VPN siete s využitím XOODOO permutácie. V úvode sme charakterizovali program DSVPN. Následne sme praktickým experimentom overili jeho funkčnosť. Z tejto činnosti sme vypracovali článok do Zborníka vedeckých prác TUKE FEI [107]. Podrobne sme analyzovali zdrojový kód DSVPN. Popri analýze sme názorným spôsobom ukázali čo sa deje s paketmi. Experimentálne sme zmerali rýchlosť a počet cyklov implementácie XOODOO permutácie v DSVPN. Súčasťou našej

práce bolo aj vytvorenie kompatibility DSVPN o OS Windows a opis vykonaných zmien.

V piatej kapitole sme zhrnuli dosiahnuté výsledky z praktickej časti práce. Celý obsah prílohy A vrátane samotnej práce sme uverejnili na git stránku Github pod profilom mr171hg[1]. Dôvodom je dostupnosť týchto informácií pre každého, kto sa potrebuje v problematike VPN zorientovať.

Výsledná podoba práce spoločne s demonštratívnymi príkladmi zdrojových kódov a ostatnými prílohami boli spracované tak, aby bolo možné ich použitie v špecializovaných predmetoch zameraných na bezpečnosť v počítačových sieťach.

Pre účely rozšírenia práce by sme navrhovali pokračovať v práci na kompatibilite DSVPN. Rozšíriť implementáciu o viacero kryptografických algoritmov a následne experimentálne merať. Aplikovať program DSVPN na sieťové zariadenie a vyskúšať reálnu prevádzku. Refaktorovať a optimalizovať zdrojový kód. Rozšíriť program o možnosti pripojenia viacerých klientov na jeden server s využitím paralelného programovania s viac vláknami.

[1] `https://github.com/mr171hg/DiplomaProject`

Literatúra

1. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *Xoodoo cookbook*. Team Keccak, 2020. Dostupné tiež z: `https://eprint.iacr.org/2018/767.pdf`. [Online; Citované:6.2.2022].
2. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *Xoodyak*. Team Keccak, 2020. Dostupné tiež z: `https://keccak.team/xoodyak.html`. [Online; Citované:6.2.2022].
3. Generic Routing Encapsulation. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://en.wikipedia.org/wiki/Generic_Routing_Encapsulation`. [Online; Citované: 31.3.2023].
4. Generic Routing Encapsulation (GRE). [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://www.rfc-editor.org/info/rfc1701`. [Online; Citované: 31.3.2023].
5. Tunneling protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://en.wikipedia.org/wiki/Tunneling_protocol`. [Online; Citované: 31.3.2023].
6. TUN/TAP. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://en.wikipedia.org/wiki/TUN/TAP`. [Online; Citované: 31.3.2023].
7. Universal TUN/TAP device driver. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://www.kernel.org/doc/Documentation/networking/tuntap.txt`. [Online; Citované: 31.3.2023].
8. DRUTAROVSKÝ, Miloš. Bezpečnosť v architektúre TCP/IP II (BIKS pr6). [B.r.]. [Online; Citované:6.2.2022].
9. OSI model. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://en.wikipedia.org/wiki/OSI_model`. [Online; Citované: 20.3.2023].
10. WIKIPEDIA. Transmission Control Protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol`. [Online; Citované:26.1.2022].

11. TCP/IP protocols. [B.r.]. Dostupné tiež z: http://www.tcpipguide.com/free/t_TCPIPProtocols.htm. [Online; Citované: 21.5.2021].

12. Error detection and correction. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Error_detection_and_correction. [Online; Citované: 20.3.2023].

13. Segment. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Segment. [Online; Citované: 20.3.2023].

14. Flow Control (date). [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_control_(data). [Online; Citované: 20.3.2023].

15. Network congestion. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Network_congestion. [Online; Citované: 20.3.2023].

16. Port (computer networking). [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Port_(computer_networking). [Online; Citované: 20.3.2023].

17. COMPUTER SCIENCE UPJS, Institute of. 5. Prednáška - Transportná vrstva: Protokol TCP. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://siete.ics.upjs.sk/prednaska-5/. [Online; Citované:6.2.2022].

18. User Datagram Protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/User_Datagram_Protocol. [Online; Citované: 20.3.2023].

19. S., Sridevi; D.H, Dr.Manjaiah. Technical Overview of Virtual Private Networks (VPNs). *International Journal of Scientific Research*. 2013, roč. 2, č. 7, s. 93–96. Dostupné tiež z: https://www.worldwidejournals.com/international-journal-of-scientific-research-(IJSR)/file.php?val=July_2013_1372777193_d5c86_32.pdf. [Online; Citované: 2.2.2023].

20. ZORN, Glen; PALL, Gurdeep-Singh; HAMZEH, Kory. *Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP)* [RFC 2637]. RFC Editor, 1999. Request for Comments, č. 2637. Dostupné z DOI: 10.17487/RFC2637. [Online; Citované: 2.2.2023].

21. Understanding Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP). 1997. Dostupné tiež z: https://wwwdisc.chimica.unipd.it/luigino.feltre/pubblica/unix/winnt_doc/pppt/understanding_pptp.html. [Online; Citované: 2.2.2023].

22. Challenge-handshake authentication protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Challenge-handshake_authentication_protocol. [Online; Citované: 2.2.2023].

23. MS-CHAP. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/MS-CHAP. [Online; Citované: 2.2.2023].

24. Password Authentication Protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Password_Authentication_Protocol. [Online; Citované: 2.2.2023].

25. RC4. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/RC4. [Online; Citované: 2.2.2023].

26. TOWNSLEY W. Valencia A., Rubens A.; G., Pall; G., Zorn; PALTER, B. *Layer Two Tunneling Protocol "L2TP"* [RFC 2661]. RFC Editor, [b.r.]. Request for Comments, č. 2661. Dostupné z DOI: 10.17487/RFC2661. [Online; Citované: 2.2.2023].

27. VALENCIA A., Littlewood M.; KOLAR, T. *Cisco Layer Two Forwarding (Protocol) "L2F"* [RFC 2341]. RFC Editor, [b.r.]. Request for Comments, č. 2341. Dostupné z DOI: 10.17487/RFC2341. [Online; Citované: 2.2.2023].

28. Network address translation. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Network_address_translation. [Online; Citované: 4.2.2023].

29. AR500, AR510, AR531, AR550, and AR2500 V200R008 CLI-based Configuration Guide - VPN. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1000154777/83e5177f/overview. [Online; Citované: 4.2.2023].

30. TOWNSLEY, Mark; GOYRET, Ignacio; LAU, Jed. *Layer Two Tunneling Protocol - Version 3 (L2TPv3)* [RFC 3931]. RFC Editor, 2005. Request for Comments, č. 3931. Dostupné z DOI: 10.17487/RFC3931.

31. Layer 2 Tunneling Protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Layer_2_Tunneling_Protocol. [Online; Citované: 4.2.2023].

32. Replay attack. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Replay_attack. [Online; Citované: 20.2.2023].

33. Advanced Encryption Standard. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Encryption_Standard. [Online; Citované: 8.5.2021].

34. RSA (cryptosystem). [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/RSA_(cryptosystem). [Online; Citované: 20.2.2023].

35. Diffie–Hellman key exchange. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Diffie%E2%80%93Hellman_key_exchange. [Online; Citované: 20.2.2023].

36. Elliptic Curve Digital Signature Algorithm. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic_Curve_Digital_Signature_Algorithm. [Online; Citované: 20.2.2023].

37. Elliptic-curve Diffie–Hellman. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic-curve_Diffie%E2%80%93Hellman. [Online; Citované: 20.2.2023].

38. HTTPS. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/HTTPS. [Online; Citované: 20.2.2023].

39. [MS-SSTP]: Secure Socket Tunneling Protocol (SSTP). [B.r.]. Dostupné tiež z: https://learn.microsoft.com/en-us/openspecs/windows_protocols/ms-sstp/c50ed240-56f3-4309-8e0c-1644898f0ea8. [Online; Citované: 20.2.2023].

40. 2.2.3 SSTP Data Packet. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://learn.microsoft.com/en-us/openspecs/windows_protocols/ms-sstp/1e71add9-7243-490a-b816-2174d5b3c179. [Online; Citované: 20.2.2023].

41. 2.2.2 SSTP Control Packet. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://learn.microsoft.com/en-us/openspecs/windows_protocols/ms-sstp/a961ef2b-daeb-4d1e-bf28-45f10c8ba565. [Online; Citované: 20.2.2023].

42. Transport Layer Security. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Transport_Layer_Security#TLS_1.3. [Online; Citované: 21.5.2021].

43. macOS. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://sk.wikipedia.org/wiki/MacOS. [Online; Citované: 20.2.2023].

44. OpenVPN. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/OpenVPN. [Online; Citované: 20.2.2023].

45. OpenSSL Cryptography and SSL/TSL Toolkit. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.openssl.org/. [Online; Citované: 20.2.2023].

46. WireGuard. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.wireguard.com/papers/wireguard.pdf. [Online; Citované: 20.2.2023].

47. Android (operačný systém). [B.r.]. Dostupné tiež z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Android_(opera%C4%8Dn%C3%BD_syst%C3%A9m). [Online; Citované: 20.2.2023].

48. List of BSD operating systems. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_BSD_operating_systems. [Online; Citované: 20.2.2023].

49. Curve25519. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Curve25519. [Online; Citované: 7.3.2023].

50. Elliptic curve cryptography. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic-curve_cryptography. [Online; Citované: 7.3.2023].

51. ChaCha Variant. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Salsa20#ChaCha_variant. [Online; Citované: 7.3.2023].

52. Poly1305. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Poly1305. [Online; Citované: 7.3.2023].

53. SipHash. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/SipHash. [Online; Citované: 7.3.2023].

54. BLAKE2. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/BLAKE_(hash_function)#BLAKE2. [Online; Citované: 7.3.2023].

55. WireGuard. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/WireGuard. [Online; Citované: 20.2.2023].

56. LEVICKÝ, Dušan. *Kryptografia v informačnej bezpečnosti*. Elfa, 2005.

57. PAAR, Christof; POSCHMANN, Axel; SCHMIDT, Markus D. Efficient hardware implementation of the advanced encryption standard (AES). 2005, s. 319–333.

58. BASSHAM, Lawrence; ÇALIK, Çağdaş; MCKAY, Kerry; TURAN, Meltem Sönmez. Submission requirements and evaluation criteria for the lightweight cryptography standardization process. *US National Institute of Standards and Technology*. 2018. Dostupné tiež z: https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/Lightweight-Cryptography/documents/final-lwc-submission-requirements-august2018.pdf. [Online; Citované: 20.2.2023].

59. Ascon Lightweight Authenticated Encryption and Hashing. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://ascon.iaik.tugraz.at/index.html. [Online; Citované: 17.4.2023].

60. KATAGI, Masanobu; MORIAI, Shiho et al. Lightweight cryptography for the internet of things. *sony corporation*. 2008, roč. 2008, s. 7–10. Dostupné tiež z: `https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9595b5b8db9777d5795625886418d38864f78bb3`. [Online; Citované: 20.2.2023].

61. Cryptographic primitive. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://en.wikipedia.org/wiki/Cryptographic_primitive`. [Online; Citované: 20.3.2023].

62. Team Keccak Home page. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://keccak.team/`. [Online; Citované:6.2.2022].

63. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *The Keccak-p Permutations*. Team Keccak, 2020. Dostupné tiež z: `https://keccak.team/specifications.html`. [Online; Citované:6.2.2022].

64. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *Kravatte*. Team Keccak, 2020. Dostupné tiež z: `https://keccak.team/kravatte.html`. [Online; Citované:6.2.2022].

65. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *The Keccak-p Permutations*. Team Keccak, 2020. Dostupné tiež z: `https://keccak.team/keccakp.html`. [Online; Citované:6.2.2022].

66. BERNSTEIN, Daniel J; KÖLBL, Stefan; LUCKS, Stefan; MASSOLINO, Pedro Maat Costa; MENDEL, Florian; NAWAZ, Kashif; SCHNEIDER, Tobias; SCHWABE, Peter; STANDAERT, François-Xavier; TODO, Yosuke et al. Gimli: a cross-platform permutation. In: *International Conference on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*. Springer, 2017, s. 299–320.

67. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *Farfalle: parallel permutation-based cryptography*. Team Keccak, 2020. Dostupné tiež z: `https://keccak.team/farfalle.html`. [Online; Citované:6.2.2022].

68. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *The sponge and duplex constructions*. Team Keccak, 2020. Dostupné tiež z: `https://keccak.team/sponge_duplex.html`. [Online; Citované:6.2.2022].

69. JOAN DAEMEN Seth Hoffert, Gilles Van Assche; KEER, Ronny Van. The design of Xoodoo and Xoofff. 2018, roč. 2018. Dostupné z DOI: 10.13154/tosc.v2018.i4.1-38. [Online; Citované:6.2.2022].

70. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; PEETERS, Michaël; ASSCHE, Gilles Van; KEER, Ronny Van. *Xoodoo cookbook (2.revision)* [Cryptology ePrint Archive, Report 2018/767]. 2019. Dostupné tiež z: https://eprint.iacr.org/2018/767.pdf. [Online; Citované:6.2.2022].

71. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *Xoodyak, an update*. Publication to NIST Lightweight Cryptography Standardization Process (round ..., 2020. Dostupné tiež z: https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/lightweight-cryptography/documents/round-2/status-update-sep2020/Xoodyak-update.pdf. [Online; Citované:6.2.2022].

72. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *Xoodyak*. Publication to NIST Lightweight Cryptography Standardization Process, 2020. Dostupné tiež z: https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/Lightweight-Cryptography/documents/round-1/spec-doc/Xoodyak-spec.pdf. [Online; Citované:6.2.2022].

73. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *The Keyak authenticated encryption scheme*. Team Keccak, 2020. Dostupné tiež z: https://keccak.team/keyak.html. [Online; Citované:6.2.2022].

74. What is a ratchet? [B.r.]. Dostupné tiež z: https://crypto.stackexchange.com/questions/39762/what-is-a-ratchet. [Online; Citované: 1.1.2023].

75. Forward secrecy. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Forward_secrecy. [Online; Citované: 1.1.2023].

76. DAEMEN, Joan; HOFFERT, Seth; MELLA, Silvia; PEETERS, Michaël; VAN ASSCHE, Gilles; VAN KEER, Ronny. *Xoodyak, a lightweight cryptographic scheme*. Publication to NIST Lightweight Cryptography Standardization Process, 2022. Dostupné tiež z: https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/lightweight-cryptography/documents/finalist-round/updated-spec-doc/xoodyak-spec-final.pdf. [Online; Citované:19.3.2023].

77. Security level. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Security_level. [Online; Citované: 1.1.2023].

78. Collision resistance. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Collision_resistance. [Online; Citované: 20.3.2023].

79. Preimage attack. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Preimage_attack. [Online; Citované: 20.3.2023].

80. What is a multi-target attack? [B.r.]. Dostupné tiež z: https://crypto.stackexchange.com/questions/75880/what-is-a-multi-target-attack. [Online; Citované: 20.3.2023].

81. Power analysis. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_analysis. [Online; Citované: 20.3.2023].

82. Xoodyak LWC referenčná implementácia s testovacími dátami. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/lightweight-cryptography/documents/finalist-round/updated-submissions/xoodyak.zip. [Online; Citované:6.2.2022].

83. Xoocycle. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://github.com/sbp/xoocycle. [Online; Citované:6.2.2022].

84. Visual Studio Code home page. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://code.visualstudio.com/. [Online; Citované:6.2.2022].

85. GCC, the GNU Compiler Collection. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://gcc.gnu.org/. [Online; Citované:6.2.2022].

86. WinLibs standalone build of GCC and MinGW-w64 for Windows. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://winlibs.com/. [Online; Citované:6.2.2022].

87. Wintun Layer 3 TUN Driver. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.wintun.net/. [Online; Citované:6.2.2022].

88. ROHAČ MAREK, Drutarovsky Miloš. *Generovanie náhodných čisel na platforme Windows*. TUKE, 2021. Dostupné tiež z: https://git.kpi.fei.tuke.sk/marek.rohac/bc/-/blob/master/thesis.pdf. [Online; Citované: 31.3.2023].

89. Introducing ChatGPT. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://openai.com/blog/chatgpt. [Online; Citované:6.2.2022].

90. Wireshark Home page. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.wireshark.org/. [Online; Citované:6.2.2022].

91. Oracle VM Virtual Box. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/VirtualBox. [Online; Citované: 20.1.2022].
92. MIKETHETECH. Installing Windows 10 on Virtualbox 6.1.12 – FULL PROCESS, 2020 – video tutorial. 2020. Dostupné tiež z: https://www.youtube.com/watch?v=gKQvaPejxpc&ab_channel=MikeTheTech. [Online; Citované: 17.5.2021].
93. ORACLE. 6.2. Introduction to Networking Modes. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.virtualbox.org/manual/ch06.html. [Online; Citované:26.1.2022].
94. BOSE, Michael. VirtualBox Network Settings: Complete Guide. 2019. Dostupné tiež z: https://www.nakivo.com/blog/virtualbox-network-setting-guide/. [Online; Citované:26.1.2022].
95. OpenBSD. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.openbsd.org/. [Online; Citované: 20.2.2023].
96. DragonFly BSD. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.dragonflybsd.org/. [Online; Citované: 20.2.2023].
97. FreeBSD. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.freebsd.org/. [Online; Citované: 20.2.2023].
98. NetBSD Project. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.netbsd.org/. [Online; Citované: 20.2.2023].
99. NIST LIGHTWEIGHT CRYPTOGRAPHY STANDARDIZATION PROCESS, Publication to. Gimli 2019-03-29. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/Lightweight-Cryptography/documents/round-1/spec-doc/gimli-spec.pdf. [Online; Citované:6.2.2022].
100. SHAY GUERON, Nicky Mouha. Simpira v2: A Family of Efficient Permutations Using the AES Round Function. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://hal.inria.fr/hal-01403414/document. [Online; Citované:6.2.2022].
101. ORG., GNU. GNU Make Manual. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.gnu.org/software/make/manual/html_node/index.html. [Online; Citované:20.2.2022].
102. WIKIPEDIA. Endianita. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Endianita. [Online; Citované:20.2.2022].
103. FREECODECAMP.ORG. Ternary Operator in C Explained. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.freecodecamp.org/news/c-ternary-operator/. [Online; Citované:20.2.2022].

104. MAN7ORG. Poll. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://man7.org/linux/man-pages/man2/poll.2.html`. [Online; Citované:20.2.2022].

105. Bufferbloat. [B.r.]. Dostupné tiež z: `https://en.wikipedia.org/wiki/Bufferbloat`. [Online; Citované: 1.3.2021].

106. FATOUROU, Panagiota. *Introduction to Sockets Programming in C using TCP/IP*. Eleftherios Kosmas, 2012. Dostupné tiež z: `https://www.csd.uoc.gr/~hy556/material/tutorials/cs556-3rd-tutorial.pdf`. [Online; Citované: 13.4.2023].

107. ROHAČ MAREK, Drutarovsky Miloš. *KryptograĄcký balík Xoodyak a jeho použitie v jednoduchej VPN sieti*. TUKE FEI, 2022. Dostupné tiež z: `http://eei.fei.tuke.sk/data/EEI-13.pdf`. [Online; Citované: 13.4.2023].

Zoznam príloh

Príloha A CD Médium – viď. obsah CD média

A Obsah CD Média

Prílohy v CD médiu sme rozdelili na tieto 4 časti:

- **Príloha A.1** – Zdrojové kódy referenčnej implementácie XOODOO spoločne s kódom na otestovanie správnosti algoritmu Xoocycle
- **Príloha A.2** – Zdrojový kód s demo použítím Wintun adaptéra
- **Príloha A.3** – Zdrojový kód pôvodnej a rozšírenej DSVPN implementácie
- **Príloha A.4** – Výsledky experimentálnych meraní spoločne so zdrojovými kódmi použitých programov

Obsah celej tejto práce je dostupný na gite:

- `https://github.com/mr171hg/DiplomaProject`

Obsah CD média je možné nájsť na stránke:

- `https://github.com/mr171hg/DiplomaProject/tree/main/DiplomaWork/appendixes/Attachments`